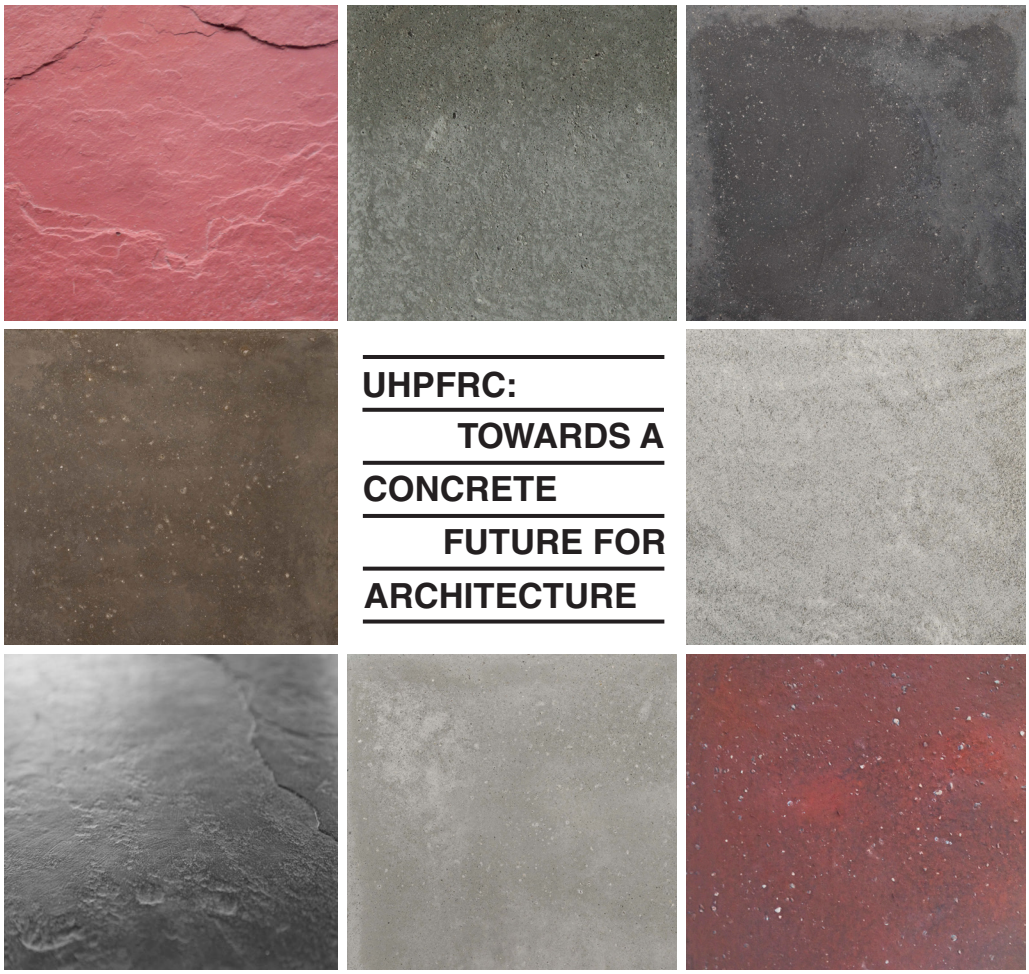


UHPFRC: TOWARDS A CONCRETE FUTURE FOR ARCHITECTURE

Jenine Principe

Università degli Studi di Napoli Federico II
DiARC – Dipartimento di Architettura

Dottorato di Ricerca in Architettura
XXXII ciclo

Coordinatore del Dottorato di Ricerca
Prof. arch. Fabio Mangone

Area Tematica
Tecnologie Sostenibili, Recupero e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente

Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete: towards a concrete future for architecture

Ph.D. Candidate
Jenine Principe

Tutor
Prof. arch. Mario Losasso
Co-tutor
Prof. arch. Raphaël Fabbri
Dott.ssa Cinzia Palazzetti

2017-2020

In copertina
il Cantiere
Finiture in UHPFRC
Crediti fotografici
© il Cantiere

«Il costruttivismo progettante individua un architetto che è ricercatore nel senso classico del termine, cioè un indagatore che non si contenta mai del risultato raggiunto».

Eduardo Vittoria, “Il costruttivismo progettante”, in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), *L’architetto tra tecnologia e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994, pag. 171.

INDICE

11 Introduzione

16 01. L'innovazione tecnologica: esplorazione di un tema

21 1.1 Le teorie dell'innovazione tecnologica in campo economico: dai processi lineari all'evoluzione combinatoria

33 1.2 Le nuove frontiere dell'innovazione architettonica: innovazione *marketing driven*, *open innovation*, *green innovation*

47 1.3 Tipologie di innovazioni, loro ibridazioni e fattori di successo

55 1.4 Innovazione tecnologica e progetto architettonico

64 02. Industrializzazione e architettura: pensiero, tecniche e processi

69 2.1 Industrializzazione, prefabbricazione, standardizzazione: impatti sul pensiero progettuale

83 2.2 Innovazione nell'industria edilizia tra questione ambientale, dematerializzazione e nuovi mezzi per la "produzione della materia"

103 2.3 *Destandardization* e *mass customization*

123 2.4 Rivoluzione Digitale tra democratizzazione della produzione e pensiero computazionale

158 03. Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete per l'architettura

163 3.1 UHPFRC tra innovazione, tecnica e progetto

177 3.2 L'evoluzione della tecnologia: stato dell'arte e prime applicazioni

193 3.3 Modelli attuali di produzione e prefabbricazione e prospettive 4.0

213 3.4 Prospettive *green* e scenari del mercato nel campo degli UHPFRC: applicazioni nel settore delle costruzioni

232 04. UHPFRC: il progetto della conoscenza

237 4.1 La costruzione della conoscenza: prove sperimentali per la verifica prestazionale di UHPFRC per l'architettura

247 4.2 Protocollo di prove di ritiro

273 4.3 Protocollo di prove di durabilità

281 4.4 Protocollo di verifica della qualità estetica dei prodotti

297 4.5 La misura della conoscenza

306 05. *Digital Concrete*

311 5.1 Il progetto tecnologico con calcestruzzi ultra-performanti nell'era digitale

317 5.2 La progettazione di un sistema prefabbricato in UHPFRC per interoperabilità tra progettisti e produttori

339 5.3 Riqualificare le strutture portanti con UHPFRC

351 Conclusioni

361 Bibliografia

385 Sitografia

389 Ringraziamenti

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di ricerca nasce nell'ambito di un progetto finanziato dall'Unione Europea – PON Ricerca e Innovazione 2014-2020 – con l'obiettivo di favorire la collaborazione tra Università e mondo della produzione e si innesta, quasi in maniera automatica, all'interno di due grandi temi disciplinari della Tecnologia dell'Architettura, ovvero l'innovazione tecnologica e la produzione industriale che, declinati nella loro relazione con il progetto architettonico, hanno costituito il fondante apparato di conoscenza dell'intera trattazione.

Con il settore della produzione industriale, è nato immediatamente un rapporto preferenziale, grazie alla collaborazione con l'azienda friulana di riferimento, il Cantiere, che si occupa di prefabbricazione di componenti in calcestruzzi ultra-performanti.

Gli Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) si affacciano sul mercato delle costruzioni già negli anni '90, distinguendosi per le alte prestazioni di resistenza meccanica e durabilità, che fanno sì che vengano impiegati, almeno inizialmente, in ambito puramente ingegneristico. Sono pochi gli architetti che si accorgono che la matrice cementizia estremamente compatta, combinata con le elevate resistenze, apre un nuovo campo di sperimentazioni formali che, in un processo che più avanti definiremo di *design-driven innovation*, finiscono per spingere il materiale anche nel campo del design.

L'esperienza in azienda ha consentito di avviare una riflessione molto ampia, da un lato su cosa significhi costruire una realtà produttiva improntata su un'innovazione, e, dall'altro, sulla relazione tra produzione industriale e progettazione tecnologica, soprattutto in un settore, come quello del calcestruzzo, ancora a metà strada tra Terza e Quarta Rivoluzione Industriale, nonostante quest'ultima gli presenti fortissime occasioni di crescita.

Sebbene la tesi abbia al centro, tanto nei titoli quanto nei contenuti, un argomento molto specifico, è stata molta chiara sin dall'inizio, anche a causa dei sopracitati fattori contestuali, la necessità di ampliare il punto di vista e di guardare, prima di tutto, al materiale come a un'innovazione tecnologica. L'impostazione metodologica si fonda, quindi, sull'analisi del concetto di innovazione iniziando dalla sua genesi in ambito economico, e sulla relazione tra progetto e produzione, esaminata attraverso le varie Rivoluzioni Industriali ricostruite, seppur cercando di tenere una sequenza temporale lineare, per macro-temi. Standardizzazione, dematerializzazione, produzione della materia, de-standardizzazione, mass customizzazione, democratizzazione della produzione e pensiero computazionale, hanno ricomposto i tasselli del

paradigm shift che deriva – o ha causato – la Rivoluzione Digitale in atto.

Dapprima affrontati in chiave ancora generale, i macro-temi sono stati riportati, nel terzo capitolo, all'interno del settore dei calcestruzzi, approcciandosi all'UHPFRC come a un materiale innovativo, verificando sempre, grazie sia all'esperienza in azienda che alla collaborazione con il partner estero Atelier Masse, una società di ingegneria che si occupa principalmente di ottimizzazione di elementi e componenti in UHPFRC, la coerenza dell'approccio metodologico adoperato con la realtà produttiva.

Fondamentale è stata anche la ricostruzione del rapporto ambivalente degli ultra-performanti con il calcestruzzo tradizionale, di cui conserva i caratteri di ambiguità dettati dalla condivisa natura plastica e a cui aggiunge una nuova e più marcata complessità derivante dalle differenti modalità di progettazione, che sorprendono per l'approccio dematerializzato che si traduce, come vedremo, in sezioni più sottili, in superfici mutevoli. La complessità insita nei calcestruzzi ultra-performanti, riprogettabili fino alla scala molecolare, si traduce anche in un vasto *range* di applicazioni, realizzabili con una altrettanto ampia casistica di tecniche produttive, in continuo aumento a causa dei repentini progressi dettati dal *digital turn*.

La ricostruzione della storia passata e presente del materiale nonché del vasto panorama di prodotti e tecniche di produzione e prefabbricazione, ha messo in evidenza come manchi tanto una conoscenza del materiale in senso stretto – cos'è e come si comporta – quanto delle sue modalità di progettazione. A tale mancanza si è cercato di sopperire da un lato, mediante lo sviluppo di un metodo per la costruzione della conoscenza del materiale, andando al di là delle informazioni fornite dai produttori, e, dall'altro, fornendo metodologie di progettazione che, sulla base delle sue possibili applicazioni, consentano di comprendere tanto le caratteristiche prestazionali che quelle produttive.

A partire da questa analisi, è stato possibile formulare tre domande di Ricerca:

1) con questi presupposti, quali sono – se ci sono – le prospettive di applicazione dell'UHPFRC all'interno del settore italiano delle costruzioni, tradizionalmente restio ad accogliere l'innovazione tecnologica e attualmente attraversato da una profonda crisi?

2) in un contesto di materiali progettati e modificati alla scala molecolare, con caratteristiche e prestazioni customizzabili, quali sono i confini, in quanto architetti, della nostra conoscenza? È possibile "costruire" la conoscenza di materiali in continua evoluzione dinamica?

3) all'interno del settore dei calcestruzzi, a metà strada tra un mondo della produzione ancora vincolato alle tecniche del passato e una ricerca che punta alla completa robotizzazione dei processi, può la progettazione tecnologica fornire gli strumenti operativi e culturali all'attuale realtà produttiva?

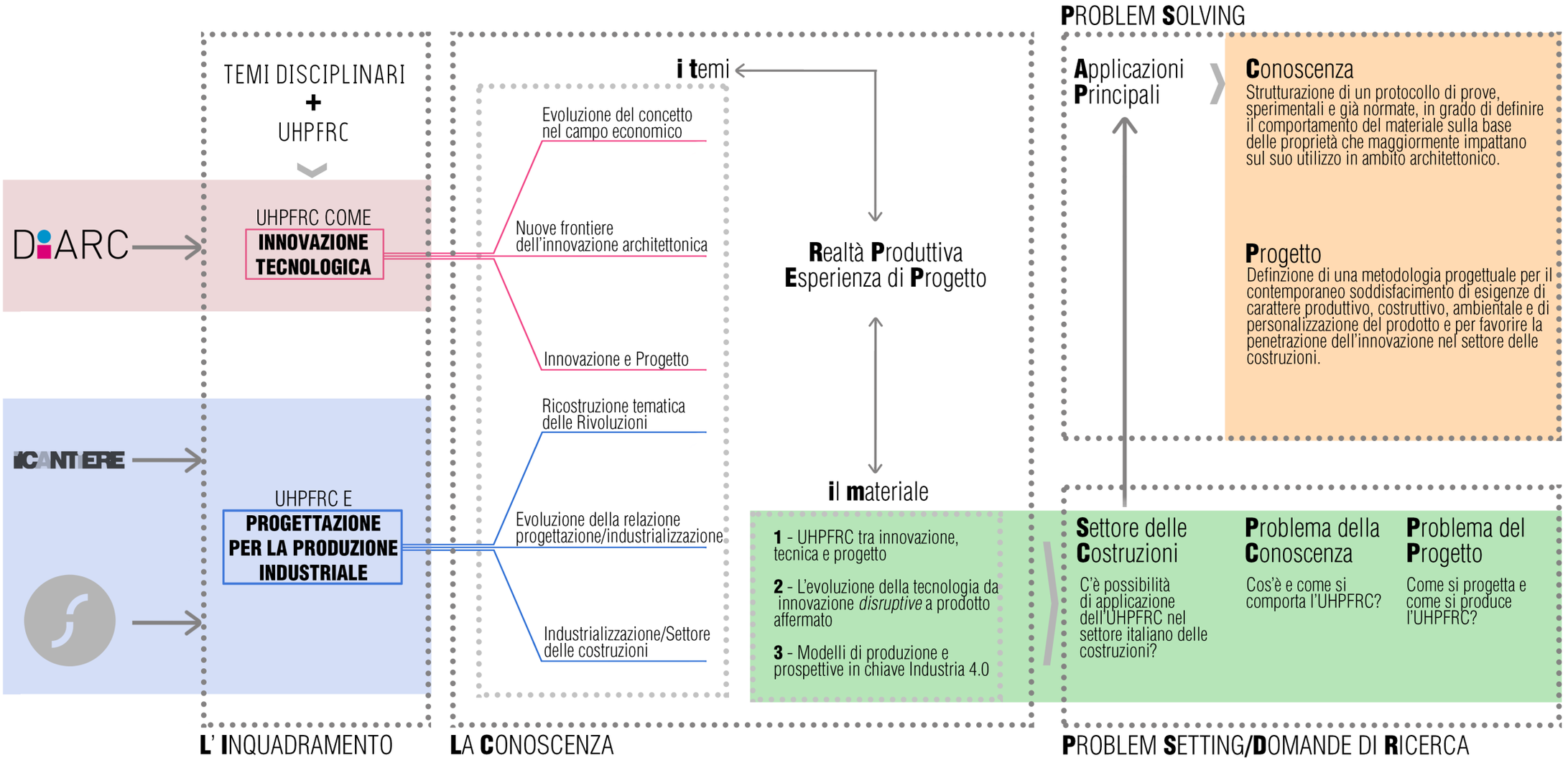
Per rispondere a tali quesiti, si è tentato di sviluppare un metodo di "costruzione" della conoscenza che riportasse alla scala dell'architettura le implicazioni "nano" dei materiali. Ne deriva un protocollo di prove sperimentali, affiancato a uno minore di prove già regolamentate,

calibrato sulla base delle applicazioni architettoniche più significative e messo a disposizione tanto dei progettisti che dei produttori, fornendo strumenti e metodi di chiara comprensione, facilmente implementabili e in grado di restituire la plasticità del calcestruzzo ultra-performante.

Al problema della strutturazione della conoscenza, segue quello relativo alla progettazione, ancora una volta declinato all'interno della realtà industriale che, soprattutto nel caso delle componenti architettoniche, si confronta spesso con richieste estranee ai vincoli imposti dalla produzione. Nella scelta degli approfondimenti progettuali, oltre che alla produzione, si è guardato anche al settore italiano delle costruzioni che, a dispetto della profonda crisi che lo attraversa ormai da più di 10 anni, offre agli ultra-performanti interessanti prospettive applicative, soprattutto nel settore della riqualificazione sia di edifici (interventi strutturali c*ast-in-side* e sostituzione di facciate) che di infrastrutture.

Dunque, con l'obiettivo di mediare la relazione tra produzione industriale e progettazione tecnologica, dall'esperienza mutuata dall'approccio sistemico ed esigenziale-prestazionale, saranno sfruttate le potenzialità della progettazione computazionale per garantire il contemporaneo soddisfacimento di esigenze di carattere produttivo, costruttivo, ambientale e di personalizzazione del prodotto. Molto spesso, infatti, nel tentativo di rispondere alla comparsa di nuovi materiali, nuove tecniche e addirittura nuovi sistemi economici, anziché riportare l'innovazione tecnologica tra gli strumenti culturali del progetto architettonico, si è caduti nelle apparenti soluzioni offerte dai falsi tecnicismi, destinati poi a perdersi e a scomparire nella frettolosa evoluzione del progresso. All'architetto oggi è chiesto di confrontarsi con i materiali avanzati, le cui prestazioni dipendono a tal punto da caratteristiche appartenenti a una scala lontana da quella macroscopica dell'abitare, che è fin troppo facile convincersi che la loro conoscenza vada al di là dei confini della nostra disciplina. E se è vero che la chimica dei materiali sembra appartenere a un'altra dimensione, è altrettanto vero che determina la potenzialità costruttiva, morfologica, espressiva ed estetica del calcestruzzo e quindi, nonostante tutto, non può essere ignorata. Si tratta, in conclusione, di costruire una cultura della tecnica che sia antropologicamente adeguata.

WORKFLOW


PROBLEM SOLVING
TEMI DISCIPLINARI
+
UHPFRC
DiARC
UHPFRC COME
INNOVAZIONE TECNOLOGICA
iCANTIERE
UHPFRC E
PROGETTAZIONE PER LA PRODUZIONE INDUSTRIALE
i temi
Evoluzione del concetto nel campo economico
Nuove frontiere dell'innovazione architettonica
Innovazione e Progetto
Ricostruzione tematica delle Rivoluzioni
Evoluzione della relazione progettazione/industrializzazione
Industrializzazione/Settore delle costruzioni
Realtà Produttiva
Esperienza di Progetto
il materiale
1 - UHPFRC tra innovazione, tecnica e progetto
2 - L'evoluzione della tecnologia da innovazione disruptive a prodotto affermato
3 - Modelli di produzione e prospettive in chiave Industria 4.0
Applicazioni Principali
Conoscenza
Strutturazione di un protocollo di prove, sperimentali e già normate, in grado di definire il comportamento del materiale sulla base delle proprietà che maggiormente impattano sul suo utilizzo in ambito architettonico.
Progetto
Definzione di una metodologia progettuale per il contemporaneo soddisfacimento di esigenze di carattere produttivo, costruttivo, ambientale e di personalizzazione del prodotto e per favorire la penetrazione dell'innovazione nel settore delle costruzioni.
Settore delle Costruzioni
C'è possibilità di applicazione dell'UHPFRC nel settore italiano delle costruzioni?
Problema della Conoscenza
Cos'è e come si comporta l'UHPFRC?
Problema del Progetto
Come si progetta e come si produce l'UHPFRC?
L' INQUADRAMENTO
LA CONOSCENZA
PROBLEM SETTING/DOMANDE DI RICERCA

01

Innovazione tecnologica: esplorazione di un tema

«*Architects' refusal to embrace technological innovations invites their extinction*».

David Celanto, "Innovate or perish. New Technologies and Architecture's Futures", in *Harvard Design Magazine*, vol. 27, 2007, pag. 1.

Riflettere oggi sul concetto di innovazione tecnologica significa addentrarsi in un processo a dir poco complesso, che affonda le sue radici nelle teorie economiche figlie delle varie rivoluzioni industriali per poi abbracciare, di conseguenza, aspetti di carattere sociale e culturale. Un'analisi che non tenga conto di tale complessità finirebbe per fornire una visione marginale dell'innovazione, oggi inammissibile soprattutto considerati gli scenari contemporanei, dove la velocità dell'informazione genera un altrettanto rapido aumento di conoscenza che si scontra, soprattutto in ambiti di antica provenienza come il nostro, con i tempi lunghi della sedimentazione culturale.

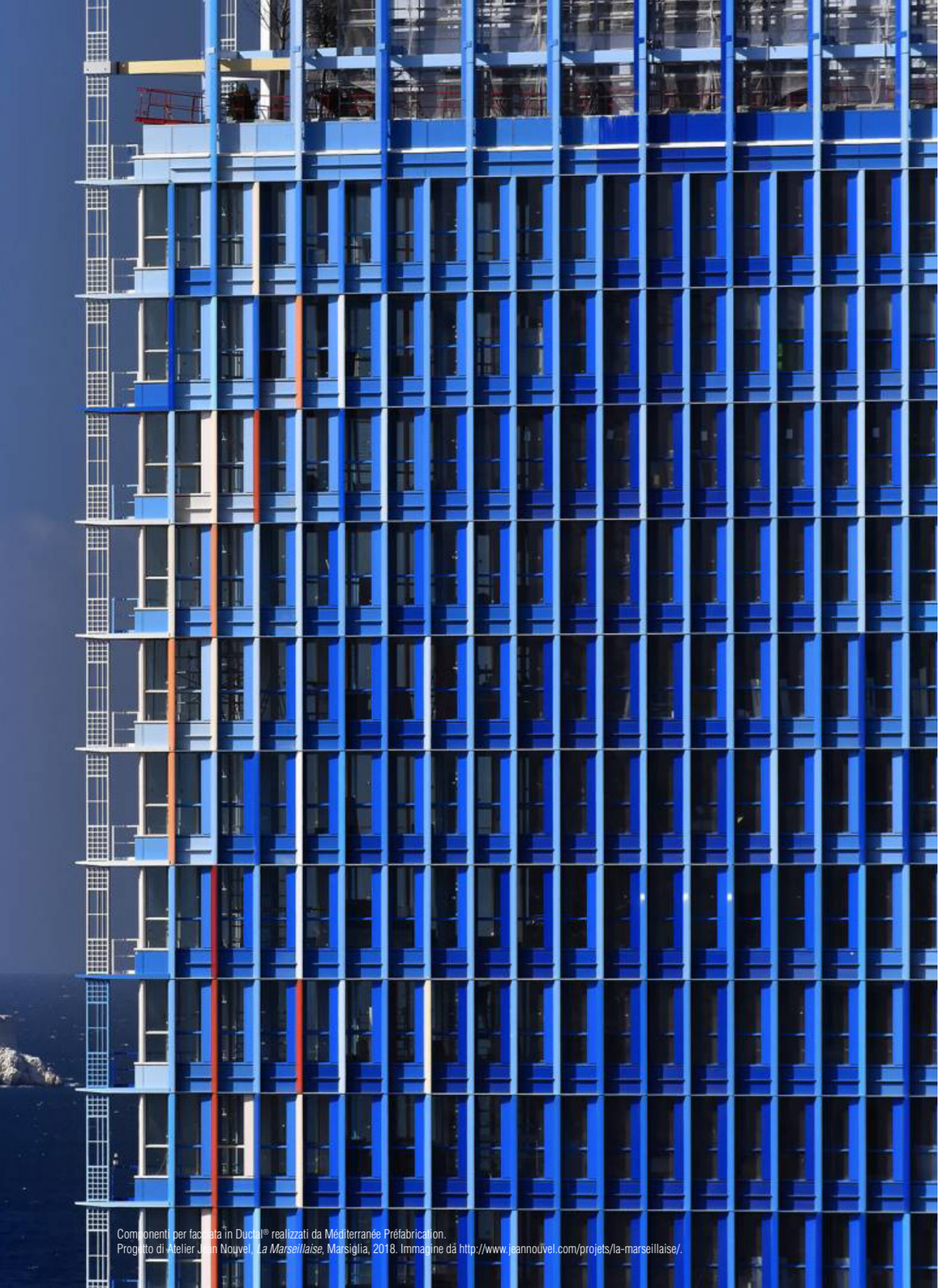
L'innovazione tecnologica è, a tutti gli effetti, una risorsa intellettuale per il progetto architettonico che richiede, però, una conoscenza dei suoi meccanismi di genesi, nonché dei luoghi in cui nasce – che sono solo in qualche caso i laboratori di Ricerca & Sviluppo – e si afferma. Infatti, molto spesso, l'innovazione è frutto di meticolose e costanti migliorie che avvengono all'interno delle realtà industriali, accumulandosi fino a generare cambiamento.

Ne deriva che la conoscenza della realtà industriale e dei motivi che spingono un'azienda a investire in innovazione, nonché dei fattori che ne determinano il successo sul mercato, è alla base dell'interazione tra Architettura e Industria che, nonostante la ormai lunga relazione, fatica ancora a trovare una sua dimensione. Eppure, soprattutto nel caso delle Piccole Medie Imprese, dove è ancora possibile avviare collaborazioni basate su uno scambio diretto di competenze e conoscenze, un progetto in grado di assimilare gli stimoli provenienti dalle tecniche di produzione utilizzate e, soprattutto, dalle politiche manageriali e di marketing, potrebbe arricchire significativamente il prodotto in termini di qualità morfologica e prestazionale, uso efficace delle risorse e semplificazione dei processi produttivi.

Questo primo capitolo dunque, ancora di inquadramento disciplinare ma fondamentale per comprendere a fondo le dinamiche viste durante l'esperienza in azienda, si pone l'obiettivo di ricostruire l'evoluzione del concetto di innovazione a partire dal suo originario ambito di provenienza, ovvero quello economico, analizzandone in particolare la relazione con il mercato, le sue mutevoli influenze all'interno della realtà industriale e l'interdipendenza con la gestione dell'informazione e della conoscenza attraverso il pensiero di alcuni studiosi del secolo scorso.

Saranno analizzate anche le più recenti frontiere dell'innovazione, che accolgono stimoli provenienti dal *management*, dalle nuove metodologie di inclusione, dalla sostenibilità, con particolare attenzione alle recenti politiche europee sulle tematiche ambientali, che guideranno in maniera decisa Ricerca e Innovazione nel prossimo futuro.

Dopo averne dato una definizione e categorizzazione, si analizza la relazione dell'innovazione con il progetto architettonico e con l'edilizia, guardando soprattutto agli aspetti legati alla Cultura Tecnologica della Progettazione che, nell'ambito delle nuove sfide poste dai futuri scenari di sviluppo sociale ed economico, vede nell'innovazione un motore capace di incidere soprattutto in termini di gestione delle complesse processualità che interessano tanto il progetto che le nuove tecniche di produzione industriale, comprese quelle dei calcestruzzi.



Componenti per facciata in Ductal® realizzati da Méditerranée Préfabrication.
Progetto di Atelier Jean Nouvel, *La Marseillaise*, Marsiglia, 2018. Immagine dà http://www.jeannouvel.com/projets/la-marseillaise/.

1.1 Le teorie dell'innovazione tecnologica in campo economico: dai processi lineari all'evoluzione combinatoria

Il concetto di innovazione nasce in seno alla disciplina economica, di cui diventa in breve tempo elemento fondante, nonché strumento imprescindibile per garantire la competitività delle aziende sul mercato globale.

Dunque, per comprenderne l'evoluzione, non si può che partire da quanto è stato affermato in ambito economico, considerando che l'innovazione tecnologica impatta sullo sviluppo aziendale determinandone le politiche organizzativa non solo in senso strettamente produttivo.

Inizialmente analizzato, seppur in fase embrionale, da Adam Smith[1] – che per primo ragionò sul valore aggiunto fornito a un bene dal progresso tecnologico e tecnico – e Karl Marx[2] – secondo il quale la massiccia introduzione delle macchine nei processi produttivi ne comportava necessariamente una riscrittura innovativa – il concetto di innovazione ha trovato una sua dignità scientifica solo con Joseph Schumpeter[3].

Schumpeter, in pieno contrasto con quanto affermato dall'allora dominante dottrina dell'equilibrio economico, iniziò a domandarsi se l'economia potesse modificarsi senza l'intervento di fattori esogeni, ritenuti, fino a quel momento, responsabili del suo andamento altrimenti statico. Egli riteneva che la combinazione di sistemi, strutture, processi e mezzi preesistenti, potesse generare innovazione che, più che un atto compiuto in se

[1] In piena rivoluzione industriale, Smith introduce il concetto di "mano invisibile", ovvero una forza in grado di assicurare, attraverso la concorrenza, l'equilibrio tra domanda e offerta. La crescita della domanda richiede un efficientamento dei sistemi di produzione e, dunque, conduce alla divisione del lavoro, alla creazione di nuove tecnologie e nuovi beni. La divisione del lavoro, a sua volta, implica un'evoluzione globale delle modalità produttive, un aumento di specializzazione e maggiore progresso tecnico, avviando processi di crescita. Il progresso tecnologico e tecnico, e dunque l'innovazione, sono incorporati nel processo produttivo e assumono, per tale motivo, un valore implicito concorrendo globalmente a generare il valore dei beni capitali. Si veda Smith, A., *Teoria dei sentimenti morali*, trad.it. Di Pietro, S., Rizzoli BUR, Milano, 2013 (ed. orig. *The Theory of Moral Sentiments*, London, 1759); Smith, A., *Lezioni di Glasgow*, trad. it. Zompanti Oriani, V., Giuffrè Editore, Milano, 1989; Perano, M. e Maturo, A., "L'evoluzione del concetto di innovazione", in Ventriglia, F. (a cura di), *La Strategia di Innovazione. Opzioni e problematiche valutative*, Giappichelli Editore, Torino, 2005, pp. 3-45.

[2] Marx constata che le nuove fasi di produzione, scorporate in una serie di operazioni semplici e standardizzate, sono frutto dell'introduzione delle macchine. Se prima gli attrezzi produttivi servivano diversi scopi, adesso un macchinario svolge una sola funzione particolare, richiedendo un'innovazione delle attrezzature rispetto ai processi produttivi. A ciò si aggiunge la pressione competitiva che, unita all'ampiezza del mercato di riferimento, stimola le aziende a spingere verso l'innovazione (Perano, M. e Maturo, A., "L'evoluzione del concetto…", *op. cit.*, 2005).

[3] Schumpeter, J.A., *Teoria dello sviluppo economico*, trad.it. Berti, L., Rizzoli Etas, Milano, 2013 (ed. orig. *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*, Duncker & Humblot, Berlino, 1911).

stesso, si configurava come un vero e proprio processo, costituito da fasi ben definite e identificabili. Preceduta dall'invenzione[4], chiusa nell'ambito della ricerca scientifica e tecnologica, l'innovazione ne è un'applicazione all'interno del sistema produttivo, in cui deve necessariamente avere caratteri di ripetizione.

In particolare, l'autore elabora due diversi modelli concettuali, il Mark I e il Mark II[5], ispirati, rispettivamente, alla struttura industriale europea del XIX secolo e all'industria americana di inizio secolo successivo.

Nel primo modello, l'innovazione è "distruzione creatrice": l'imprenditore[6], sfruttando le opportunità offerte in seguito a un incremento di conoscenze, acquista un vantaggio competitivo, che rientrerà solo quanto le imprese concorrenti riusciranno a sviluppare la stessa innovazione. Quindi, nel processo evolutivo dell'economia capitalistica, le innovazioni tecnologiche e gestionali trasformano il ciclo produttivo, scompaginando l'equilibrio dei mercati ed eliminando le imprese incapaci d'innovare. Il processo innovativo è, in questo caso, tipico delle piccole e medie imprese.

È diverso ciò che accade nel modello Mark II, dove sono le grandi imprese monopolistiche le uniche in grado di avviare processi innovativi grazie alla "accumulazione creativa"[7]. Secondo il Mark II, quindi, le piccole e medie imprese, che si trovano naturalmente nel mercato competitivo, sono meno inclini all'innovazione in quanto, a differenza dei grandi monopolisti, hanno più difficoltà a finanziare processi di Ricerca & Sviluppo.

Tale posizione è, in realtà, in netto contrasto con l'idea, oramai affermata, che sia proprio la competizione a stimolare l'innovazione. Il promotore di questa visione è l'economista Kenneth Arrow che, nel 1962[8], spiegò come un monopolista sia meno incline a innovare in quanto, sebbene senza dubbio farà degli investimenti per abbassare i costi, migliorare la qualità o creare un nuovo prodotto, probabilmente, non otterrà riscontri significativi in termini di guadagno,

[4] Nelle formulazioni più recenti, non sempre un'invenzione si trasforma in innovazione, in quanto tale passaggio è strettamente correlato a una sua applicazione commerciale. Non di rado, l'innovazione ha un ritardo temporale rispetto all'invenzione, in parte dovuto al fatto che esse nascono in due contesti – e con due obiettivi – differenti: mentre l'invenzione ha sede nei laboratori di ricerca o nelle università, tipicamente l'innovazione si sviluppa all'interno delle imprese (si veda Dizionario Treccani di Economia e Finanza, *Innovazione,* http://www.treccani.it/enciclopedia/innovazione_%28Dizionario-di-Economia-e-Finanza%29/).

[5] Il Mark I, descritto da Schumpeter nella *Teoria dello sviluppo economico*, viene così denominato da Nelson e Winter e da Kamien e Schwartz nel 1982 (Nelson, R.R. e Winter. S.G., *An Evolutionary Theory of Economic Change*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, USA, 1982; Kamien, M. e Schwartz, N., *Market Structure and Innovation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982) mentre il Mark II è presentato in *Capitalismo, Socialismo e Democrazia* (Schumpeter, J.A., Capitalism, Socialism and Democracy, Harper and Row, New York, 1975).

[6] L'imprenditore schumpeteriano agisce mosso da motivazioni che, spesso, esulano dalla razionalità. Egli risponde alla volontà di realizzazione nel lavoro, al desiderio di novità, all'ambizione di conquistare successo (Perano, M. e Maturo, A., "L'evoluzione…", *op.cit.*, 2005).

[7] Successivamente alcuni autori (si veda Utterback, J.M. e Abernathy, W.J., "A Dynamic Model of Process and Product Innovation", in *OMEGA The International Journal of Management Science*, vol. 3, 1975) hanno collegato i modelli schumpeteriani al ciclo di vita di un'industria. Inizialmente, quando la tecnologia è in continuo cambiamento e l'incertezza è molto elevata, le nuove imprese sono le principali innovatrici (Mark I). In un secondo momento, l'industria si sviluppa e i cambiamenti tecnologici si stabilizzano, facendo si che le economie di scala, le curve di apprendimento e le risorse finanziarie diventino importanti discriminanti nel processo produttivo e competitivo, lasciando spazio solo alle grandi imprese con potere monopolistico.

[8] Arrow, K.J., "Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention", in Nelson, R. (a cura di), *The Rate and Direction of Economic Activities: Economic and Social Factors*, Princeton University Press, Princeton, USA, 1962, pp. 609-626.

non avendo per definizione ulteriore mercato da conquistare[9]. Se un *competitor* introduce un'innovazione invece, il guadagno sarà maggiore in quanto potrà appropriarsi di fette di mercato finora lasciate scoperte o appartenenti ad altri[10].

In tale contesto, la conoscenza risulta indispensabile[11] per l'introduzione di processi innovativi finalizzati alla creazione di profitto. Arrow introduce così il modello del "*learning-by-doing*"[12], secondo il quale il cambiamento tecnico può essere attribuito all'esperienza che si accumula in seguito alla gestione dei sistemi produttivi nel tempo e che determina, a lungo andare, un incremento della produttività e, quindi, dei profitti[13]. Assumono così, grande rilevanza sia la qualità del capitale umano disponibile che, accumulando conoscenze sempre più complesse, è in grado di elevare la produttività del sistema, sia la tipologia e la quantità di informazioni a disposizione dell'imprenditore. In particolar modo, l'informazione acquisisce le caratteristiche di un bene vero e proprio e, in quanto tale, può essere scambiato[14].

Tuttavia, il costo della trasmissione di un certo numero di informazioni è di solito molto basso, in quanto l'informazione è, per sua natura, indivisibile. Ciò significa che chiunque possiede un'informazione, la possiede nella sua interezza. Inoltre, la conoscenza, una volta prodotta, genera *spillover*[15], la cui presenza determina una riduzione del vantaggio marginale del soggetto economico privato che la detiene.

Ne deriva la necessità di un intervento pubblico finalizzato o a sostenere la ricerca scientifica o a garantire un certo margine di profittabilità agli attori economici coinvolti, producendo una

[9] L'impatto del pensiero di Arrow è tale che la tendenza dei monopolisti a limitare l'investimento in innovazione è detta "*Arrow effect*". Cfr. Baker, J.B., "Beyond Schumpeter vs. Arrow: How Antitrust Fosters Innovation", in *Antitrust Law Journal*, vol. 74, 2007, pp. 575-602.

[10] Tale guadagno sarà maggiore se il nuovo prodotto o processo è un'innovazione radicale, ovvero capace di sostituire completamente un prodotto o processo preesistente.

[11] Addirittura in apertura del suo "Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention" (Arrow, K.J., "Economic Welfare…", *op. cit.*, 1962), Arrow scrive: «*invention is here interpreted broadly as the production of knowledge*».

[12] «*Learning is the product of experience. Learning can only take place through the attempt to solve a problem and therefore only takes place during activity*», Arrow, K. J., *The Economic Implications Of Learning By Doing*, Technical Report n. 101, Institute For Mathematical Studies In The Social Sciences, Stanford, 1961.

[13] Arrow (Arrow, K. J., *The Economic Implications…*, *op.cit.*, 1961) si pone il problema di definire le variabili economiche che possano rappresentare l'esperienza. La possibilità di utilizzare come variabile gli *output* cumulativi – ovvero gli *output* totali calcolati dal tempo zero – non è considerata soddisfacente in quanto, nel caso in cui tale *output* risulti costante, lo sarebbe anche lo stimolo all'apprendimento, portando infine a una situazione di equilibrio. Per tale motivo la variabile considerata dall'autore è l'investimento lordo cumulativo che considera, ad esempio, anche l'inserimento di nuove attrezzature capace di cambiare l'ambiente produttivo, introducendo così nuovi stimoli all'apprendimento. Un'altra questione fondamentale riguarda il posizionamento dell'apprendimento all'interno delle condizioni produttive che, in ultima istanza, viene incorporato nei beni capitali. In qualsiasi momento del nuovo tempo produttivo, i beni capitali incorporano tutta la conoscenza allora disponibile, sebbene una volta realizzati la loro efficienza produttiva non può essere migliorata da una conoscenza sopravvenuta in un secondo momento. Ciò significa che un'unità di beni capitali prodotta ad un tempo t_1 rispetto a una prodotta ad un tempo t_2, richiede almeno la stessa quantità di lavoro richiesta dalla seconda, ma non rende più profitto e prodotti.

[14] Significativa è l'analisi di Arrow sul rapporto monopolio/informazione: un monopolista che possiede un'informazione necessaria a produrre innovazione, non può né semplicemente venderla sul mercato aperto, in quanto qualsiasi acquirente potrebbe sottrargli la posizione dominante, né sfruttarla completamente, dal momento in cui nessuna protezione legale può garantire una completa appropriabilità di un bene tanto intangibile quanto l'informazione. Infatti, l'uso stesso dell'informazione è di fatto un modo di rivelarla, a partire dalla questione relativa alla mobilità del personale. Cfr. Arrow, K.J., "Economic Welfare…", *op. cit.*, 1962.

[15] «In economia, fenomeno per cui un'attività economica volta a beneficiare un determinato settore o una determinata area territoriale produce effetti positivi anche oltre tali ambiti. Il termine è usato inoltre per indicare la diffusione di situazioni di squilibrio da un mercato all'altro», da Enciclopedia Treccani online, *Spillover*, http://www.treccani.it/enciclopedia/spillover/.

sorta di forma artificiale di monopolio temporaneo per la commercializzazione dell'innovazione tramite, ad esempio, i *property rights*[16].

La centralità dell'informazione nel pensiero di Arrow risulta oggi particolarmente significativa, considerato il radicale spostamento del fulcro dell'economia mondiale verso i beni intangibili e il ruolo ricoperto dai *data* nella definizione non solo degli equilibri economici, ma anche di quelli sociali e politici a scala globale.

Mentre Arrow esaminava i *driver* dell'innovazione, le sue relazioni con il mercato e il ruolo della conoscenza, qualche anno prima Abbot P. Usher poneva l'attenzione sulle sue modalità di sviluppo, intendendo il progresso tecnico come un fenomeno evolutivo. Nel suo celeberrimo *A History of Mechanical Inventions*[17], Usher supera sia una visione trascendentalista dell'innovazione, vista come il frutto di una tanto eccezionale quanto inspiegabile intuizione di un individuo geniale[18], sia una di tipo puramente meccanicistico, in cui l'innovazione assume caratteri di inevitabilità rispetto a una serie di eventi passati.

L'autore, dunque, propone un suo modello basato sull'idea che l'innovazione sia frutto sì di un atto intuitivo, e quindi al di là di un comune esercizio di conoscenza, ma derivi anche da un processo di "sintesi cumulativa" ove ogni passo in avanti pone le basi per quello successivo[19]. Sebbene l'atto di intuizione sia senza dubbio un momento fondamentale, è solo il primo dei 4 step necessari a realizzare tale sintesi, cui si deve, infine, la genesi dell'innovazione. Dopo una prima fase di percezione e analisi del problema, in molti casi dovuto all'emergere di un bisogno inappagato, vi è una fase di valutazione delle variabili ambientali da considerare, nonché delle attività e degli eventi che andranno poi a stimolare l'atto intuitivo – ovvero il terzo step del processo – che, infine, sarà sottoposto a un'ampia revisione critica finalizzata a un suo adattamento al contesto sociale ed economico. Usher enfatizza, dunque, l'importanza che hanno i fattori esterni nel fornire gli ingredienti essenziali all'intuizione, in contrasto con l'idea romantica di un individuo eroico – il genio – che, come folgorato, produce invenzioni. Il processo inventivo quindi, essendo determinato anche da fattori imprevedibili, assume un carattere di contingenza che ne rende impossibile una previsione dei tempi e dei percorsi di sviluppo. Inoltre, la stessa revisione critica è incline a stimolare nuovi atti di intuizione, in un processo che di fatto si configura come non lineare[20].

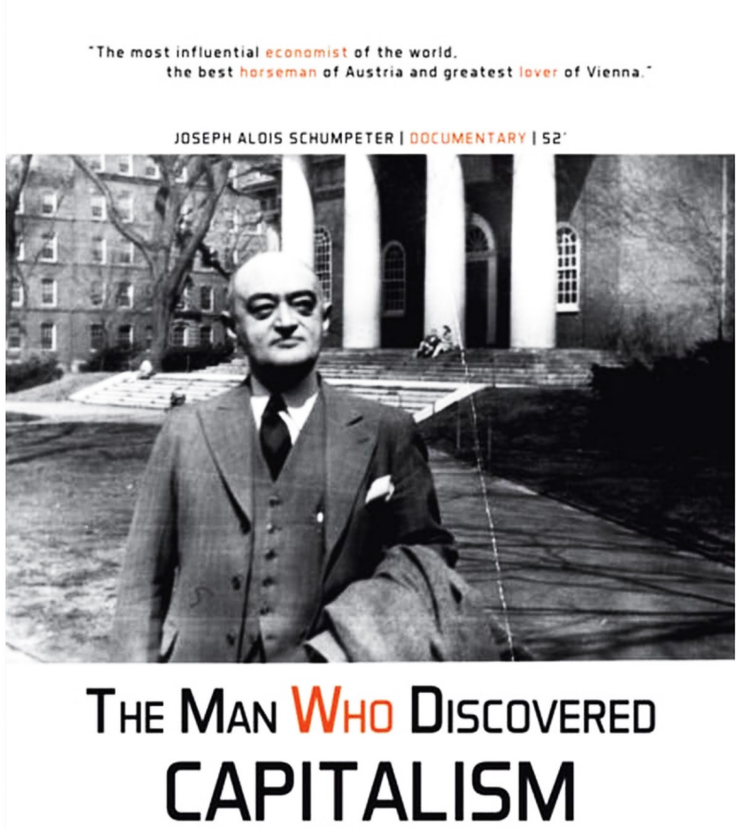
[16] Cfr. Perano, M. e Maturo, A., "L'evoluzione…", *op.cit.*, 2005. Nel paragrafo 2.4 sarà analizzata la contrazione del regime di proprietà privata in seguito alla scoperta dei Commons.

[17] Cfr. Usher, A. P., *A History of Mechanical Inventions*, Harvard University Press, Cambridge, 1954 (ed. orig. 1929).

[18] Significativo che, molti anni dopo, Brian Arthur scriva «non credo che esista alcun genio, semmai persone con una grande scorta di funzionalità e principi». Sebbene non limiti il ruolo dell'intuizione, Arthur ritiene che essa non possa prescindere da una profonda conoscenza dei sistemi e dei modelli in cui avrà sede la soluzione oppure dei principi atti a individuarla (Arthur, B., *La natura della tecnologia. Cos'è e come evolve*, trad. it Fassio, D., Codice edizioni, Torino, 2011 (ed. orig. *The Nature of Technology: What it is and How it Evolves*, The Free Press and Penguin Books, London, 2009).

[19] Cfr. Garud, R. *et alii*, "From the Process of Innovation to Innovation as Process", in Langley, A. e Tsoukas, H. (a cura di), *The SAGE Handbook of Process Organization Studies*, SAGE Publications Ltd, Thousand Oaks, USA, 2016, pp. 451-465.

[20] Garud *et alii* (*ibidem*) hanno rilevato l'importanza delle connessioni temporali tra le diverse fasi del modello di Usher. Caratterizzate da scale temporali multiple e non da una singola concettualizzazione lineare del tempo, la fasi di Usher generano asincronie tra, ad esempio, l'emergenza di diversi componenti di un'innovazione e le infrastrutture richieste per un loro sviluppo e implementazione.



Locandina del documentario *Joseph Alois Schumpeter - The Man Who discovered Capitalism*, regia di Detlef Siebert, prodotto da Philipp filmproduction GmbH & Co. KG. Immagine da https://www.schumpeter-film.de/en/.

Negli anni Sessanta, invece, la ricerca[21] pone l'attenzione sulla relazione tra l'andamento della domanda e la spinta innovativa, arrivando all'elaborazione della teoria *demand pull* secondo la quale è la domanda di particolari beni capitali, considerati catalizzatori dell'innovazione tecnologica, a stimolare l'attività innovativa. Il decennio successivo, invece, è dominato dal cosiddetto approccio *technology push* basato su una certa autonomia di sviluppo della tecnologia. In questo caso le grandi imprese non producono direttamente innovazione, ma si differenziano sulla base della capacità di accesso e di appropriabilità delle opportunità offerte dall'avanzamento tecnologico.

I modelli *demand pull* e *technology push* troveranno successivamente un punto di incontro frutto, da un lato, della convinzione che le imprese innovative debbano essere in grado di monitorare l'ambiente scientifico e attivare relazioni con le istituzioni di questo sistema[22], dall'altro della consapevolezza che l'innovazione è oramai vestita di una complessità tale da rendere impossibile una sua interpretazione in chiave o "economica" o "tecnologica".

A tal proposito, nel rilevante "An Overview of Innovation", Nathan Rosenberg e Stephen Kline, definendo l'innovazione come «*complex, uncertain, somewhat disorderly, and subject to changes of many sorts*»[23], dichiarano che qualsiasi analisi del processo innovativo deve partire dalla relazione tra le dinamiche di mercato e le nuove frontiere scientifiche e tecnologiche. Proprio su questa relazione si basa il successo di un'innovazione che, tuttavia, essendo influenzata da fenomeni in larga parte imprevedibili, è soggetta a un elevato grado di incertezza[24] che abbraccia tanto le *performance* tecniche attese che la risposta del mercato, in termini soprattutto di accettazione e assorbimento del cambiamento introdotto[25].

Vi è difatti una sostanziale differenza, nonché un tempo tecnico variabile, tra l'innovazione come entità legale – ovvero così come depositata all'Ufficio Brevetti – e l'innovazione come entità economica, cioè commercializzabile.

L'approdo alla commercializzazione è stato per anni considerato come il punto di arrivo di un modello lineare di sviluppo che, partendo dalla ricerca scientifica e passando per una fase di *product development*, giungeva infine alla produzione. Tuttavia, oltre a caratterizzarsi per l'assenza di percorsi di verifica e controllo delle soluzioni adottate[26], tale modello partiva da un presupposto errato, ponendo al centro dell'intero processo la scienza anziché il design.

[21] Fondamentale è l'opera di Joseph Schmookler. Si veda Schmookler, J., *Invention and economic growth*, Harvard University Press, Cambridge, 1966.

[22] Si veda Perano, M. e Maturo, A., "L'evoluzione…", *op.cit.*, 2005.

[23] Kline, S. J. e Rosenberg, N., "An overview of innovation", in Landau, R. e Rosenberg, N. (a cura di), *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth*, National Academies Press, Washington DC, USA, 1986, pag. 275.

[24] L'incertezza caratterizza l'intero processo di sviluppo di un'innovazione: nelle fasi iniziali del ciclo produttivo è molto elevata e le aziende sono costrette ad assumere maggiori rischi nel tentativo di migliorare le performance tecniche e soddisfare i bisogni del consumatore. Durante la fase di *product development* emerge un design prevalente che, se di successo, riducendo l'incertezza, consente all'azienda di spostare l'attenzione dal prodotto al processo produttivo, lavorando sull'abbassamento dei costi e sull'ottimizzazione della produzione. *Ivi*, pp. 275-304.

[25] «*Successful innovation requires a design that balances the requirements of the new product and its manufacturing processes, the marked needs, and the need to maintain an organization that can continue to support all these activities effectively*» e ancora «*success demands not only selecting the right cost and performance combination but also judging just when the timing is right for the product's introduction*», *ivi*, pag. 277.

[26] «*In an ideal world of omniscient technical people, one would get the design of the innovation workable and optimized the first time. In the real world of inadequate information, high uncertainty, and fallible people, nothing like this happens*», *ivi*, pag. 286.

Solo un processo progettuale realizzato attraverso diverse fasi di *fitting* iterative può infatti condurre all'innovazione che, in alcuni casi, porta addirittura alla nascita di nuove branche della scienza, frutto in questo caso solo di una necessità tecnica[27]. In sostanza, Kline e Rosenberg affermano che la relazione tra scienza e innovazione è tutt'altro che unilaterale, in quanto spesso e volentieri è la domanda di innovazione a condurre alla "creazione"[28] di nuova scienza. Inoltre, nella maggior parte dei casi, l'innovazione si realizza con la conoscenza già in possesso di coloro che la sviluppano che, solo in caso di incapacità di risoluzione di un particolare problema, si amplia mediante ulteriori approfondimenti. Sono ben poche le situazioni in cui è direttamente la ricerca a generare innovazione che è solitamente di tipo radicale come è avvenuto, ad esempio, nel caso dei semiconduttori, dei laser, dell'ingegneria genetica etc. etc.

Se Usher con il concetto di "sintesi cumulativa" introduce una certa circolarità all'intero processo di genesi dell'innovazione e Arrow pone la conoscenza e l'informazione al centro della questione, Kline e Rosenberg contribuiscono a risollevare l'innovazione dalla sua posizione subalterna rispetto alla scienza, dimostrando come non solo la spinta innovativa possa essere in qualche modo immanente all'innovazione stessa, ma addirittura possa essere di stimolo alla ricerca scientifica. A ciò si aggiunge il valore attribuito al ruolo dell'incertezza, che fornisce all'intero processo innovativo il giusto livello di complessità che lo caratterizza.

Negli anni '80 il tema ritorna ancora una volta sulle modalità di sviluppo dell'innovazione all'interno delle imprese. Con l'obiettivo di superare l'inadeguatezza delle teorie economiche "ortodosse"[29], non più in grado né di descrivere la realtà contemporanea né di rispondere alle sue esigenze, Richard R. Nelson e Sidney G. Winter[30] elaborano una nuova teoria evolutiva di impronta darwiniana il cui cuore è, sostanzialmente, il concetto di *routine* descritto, non a caso, come la base genetica di un'impresa. Le *routine*[31] comprendono tutti i *pattern* comportamentali di una firma, dalle tecniche produttive a quelle gestionali, fino ad arrivare alle più complesse decisioni manageriali, pubblicitarie e di ricerca e sviluppo. Definite come "persistenti" ed "ereditarie", le *routine* già consolidate determinano, assieme alle condizioni ambientali, fonte di incertezza, i possibili comportamenti dell'organismo produttivo che, tuttavia, nel caso di

[27] Lavorando sui suoi sistemi di illuminazione elettrica, Edison fu obbligato a consultare un matematico per lavorare sui circuiti paralleli senza, i quali, oggi, sarebbe impossibile pensare all'ingegneria elettrica così come la conosciamo. *Ivi*, pag. 287.

[28] "*Creation*" nel brano in inglese, *ibidem*.

[29] Per essere più specifici, le teorie ortodosse si basano fondamentalmente su tre concetti: perfetta informazione, equilibrio statico e massimizzazione del comportamento. In particolare, un modello basato sulla massimizzazione del comportamento contiene almeno tre componenti separabili: l'individuazione di cosa si vuole massimizzare (quasi sempre il profitto), la definizione delle capacità della firma e l'interpretazione delle azioni dell'azienda come finalizzate alla sola massimizzazione dei propri obiettivi. Si veda Nelson, R.R e Winter, S.G., *An Evolutionary Theory …*, *op. cit.*, 1982.

[30] *Ibidem*.

[31] La definizione di *routine* fornita dagli autori è la seguente: «*our general term for all regular and predictable behavioral patterns of firms is 'routine'. We use this term to include characteristics of firms that range from well-specified technical routines for producing things, through procedures of hiring and firing, ordering new inventory, or stepping up production of items in high demand, to policies regarding investment, research and development, or advertising, and business strategies about product diversification and overseas investment. In our evolutionary theory, these routines play the role that genes play in biological evolutionary theory. They are a persistent feature of the organism and determine its possible behavior (through actual behavior is determined also by the environment); they are heritable in the sense that tomorrow's organisms generated from today's have many of the same characteristics, and they are selectable in the sense that organisms with certain routines may do better than others, and, if so, their relative importance in the population (industry) is augmented over time*». *Ivi*, p. 14.

mancato raggiungimento di un obiettivo prefissato come, ad esempio, una diminuzione di profittabilità, è costretto a modificare il suo *pattern* comportamentale[32]. Tuttavia, a causa di un processo circolare di interdipendenza tra mercato e impresa, anche la *routine* influenza l'ambiente che la seleziona. Di chiara influenza schumpeteriana, qualsiasi cambiamento o combinazione di *routine* è considerato una forma di innovazione.

L'innovazione non è però l'unica strada da seguire: il decisore infatti, nel caso in cui il processo innovativo sia troppo dispendioso o lontano dalle competenze e dai mezzi dell'impresa, può optare per l'imitazione, ovvero provare a stimolare il cambiamento guardando alle buone pratiche già in atto, che si possono rivelare in alcuni casi economicamente più vantaggiose.

A ciò si aggiunge il concetto di regime tecnologico[33], ovvero una combinazione di opportunità, appropriabilità e cumulatività oppure, per essere più chiari, un *pattern* tecnologico da esplorare in seguito all'introduzione di una particolare tecnologia che potremo definire apri-pista e che conduce, infine, alla nascita di traiettorie tecnologiche, intese come probabili linee ulteriori di esplorazione innovativa.

Tuttavia, è bene precisare che l'incertezza veste un ruolo ancora una volta fondamentale all'interno della teoria evoluzionaria di Nelson e Winter, mostrando discrete somiglianze con quanto afferma Brian Arthur nel suo *La natura della tecnologia*[34]. Tuttavia, quest'ultimo più che riferirsi ai modelli economici, focalizza la sua analisi strettamente sull'evoluzione della tecnologia sebbene, come abbiamo visto, questa intrecci a tal punto la sua storia con l'economia da far sì che esse possano raramente essere analizzate separatamente. Nel descrivere l'evoluzione della tecnologia l'autore afferma, infatti, che non vi è nulla di predeterminato nell'ordine in cui si dispiega la sequenza evolutiva, per quanto ciò non implichi né che l'evoluzione sia completamente casuale né che sia prevedibile la futura composizione della tecnologia nella sua totalità.

A differenza dei suoi predecessori Arthur, piuttosto che applicare *tout court* Darwin alla tecnologia, ritiene che si debba lavorare sul concetto di ereditarietà, dal momento che le nuove tecnologie ereditano componenti da quelle precedenti ricombinando però le varie parti. Ancora una volta, viene utilizzata la combinazione schumpeteriana – creatrice di innovazione a partire da elementi preesistenti – che ritroviamo anche nell'usheriana "sintesi cumulativa". Dunque le tecnologie, distinte in semplici e complesse, formano un sistema che si auto-incrementa che, comunque, non può essere spiegato con la sola combinazione. Fondamentale è, infatti, la cattura di nuovi fenomeni naturali che, trasformati in principi di utilizzo, portano alla nascita di nuove tecnologie. Il meccanismo così delineato prende il nome di evoluzione combinatoria ed è in esso che risiede la differenza sostanziale con la teoria di Darwin.

[32] Questo processo è descritto da Nelson e Winter (*ibidem*) come una catena di Markov, ovvero un processo aleatorio in cui la probabilità di transizione a uno stato nuovo di sistema dipende solo dallo stato immediatamente precedente e non dal percorso effettuato (Wikipedia, *Processo markoviano*, https://it.wikipedia.org/wiki/Processo_markoviano).
[33] Nelson e Winter (*ibidem*) descrivono due tipi di regimi tecnologici: *science-based* e cumulativo. Mentre il primo implica un'ampia e universale conoscenza dei fenomeni implicati condotto quasi sempre al di fuori dell'impresa, il secondo è caratterizzato da una conoscenza limitata, accumulata all'interno del processo di apprendimento della firma, che si potrebbe assimilare al "*learning-by-doing*" di arrowiniana memoria.
[34] Arthur, B., *La natura della tecnologia…*, *op. cit*., 2011.



Illustrazione di Daniel Horowitz/Corbis, tratta dalla copertina di Arthur, B., *La natura della tecnologia. Cos'è e come evolve*, trad. it Fassio, D., Codice edizioni, Torino, 2011 (ed. orig. *The Nature of Technology: What it is and How it Evolves*, The Free Press and Penguin Books, London, 2009).

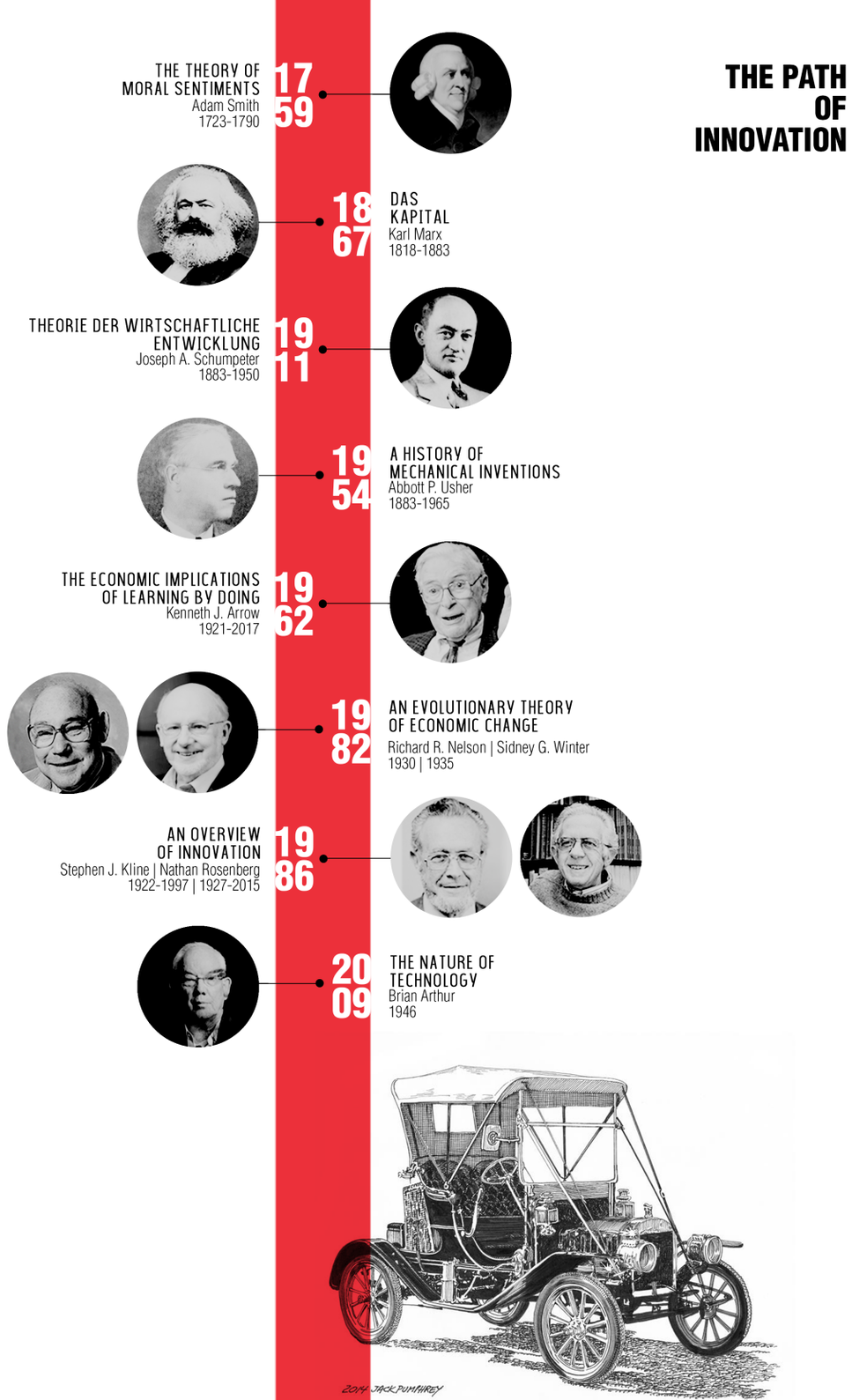
Infatti, in biologia, a differenza che in tecnologia, l'evoluzione non può selezionare liberamente le parti necessarie da sistemi diversi per poi ricombinarle a causa delle restrizioni genetiche e, per di più, ogni nuova combinazione prodotta è sottoposta alle leggi della sopravvivenza. Al contrario, in tecnologia l'evoluzione è di norma combinatoria, mentre la variazione e la selezione darwiniana intervengono in un secondo momento, lavorando su strutture già formate.

Nonostante ciò, le nuove tecnologie nasceranno solo se c'è un effettivo bisogno da soddisfare oppure una nicchia di opportunità. Tuttavia, anche le nuove tecnologie generano nuovi bisogni in quanto, la loro stessa esistenza richiede di soddisfarne lo scopo in maniera più economica ed efficiente, finendo per crescere ed espandersi autopoieticamente. Naturalmente tutto il processo è mediato dall'economia, ritenuta dall'autore come un insieme di tecnologie che, proprio in quanto tale, si forma e si riforma continuamente con esse, cambiando ogni volta la sua identità. In un processo di causalità circolare, la totalità delle tecnologie crea la struttura ove avvengono flussi di beni e servizi, mentre l'economia, a sua volta, crea la tecnologia a partire da se stessa. L'economia dunque è una autopoiesi perpetua, generativa, sempre insoddisfatta.

Con Arthur, tecnologia ed economia perdono definitivamente i propri confini, intrecciandosi in un processo senza inizio né fine.

Per concludere, l'innovazione tecnologica, a partire dalle sue interpretazioni in ambito strettamente economico, si configura come un importante elemento di supporto alla ricerca sul progetto e appare più che mai fondamentale comprenderne i meccanismi che ne governano il successo sia nella realtà industriale che nel mercato. Può essere il mercato infatti, a influenzare il decisore che, per conquistare o mantenere una posizione competitiva, può valutare l'avvio di un processo innovativo all'interno dell'impresa, almeno fino a quando sarà l'economia stessa a imporre il cambiamento. Tuttavia, come si è detto, anche la tecnologia genera occasioni di innovazione, costruendo nuove nicchi di opportunità che, a loro volta, possono condurre al miglioramento, all'ottimizzazione o magari alla sostituzione di pratiche e processi già in atto, anche esterni alla realtà industriale di partenza.

In una contesto in cui la produzione si avvicina sempre più rapidamente alla progettazione, le dinamiche produttive e commerciali che governano un'impresa entrano come fattori determinanti del progetto in maniera sempre più decisa. A ciò si aggiungono le implicazioni sulle qualità del prodotto, edilizio o meno, prevenienti dalla relazione con processi di R&S, condotti interagendo continuamente con il marketing e con le modalità di commercializzazione del prodotto.



A fianco. The path of innovation, elaborazione grafica a cura dell'autrice. Picture credits: A. Smith, artista sconosciuto, foto di Antonia Reeve; K. Marx, Wikipedia Commons; J. Schumpeter, Wikipedia Commons; A. Usher, *Harvard Class Album 1947-48*; K. Arrow, electionscience.org; R. Nelson, columbia.edu; S. Winter, mackinstitute.wharton.upenn.edu; S. Kline, nae.edu; N. Rosenberg, foto di Chuck Painter; B. Arthur, foto di Ian Tuttle, Porcupine Photography.



Elementi di facciata in Ductal® realizzata da Bonna Sabla e da Il Cantiere.
Progetto di ECDM architectes, *Crèche et logement de fonction rue Pierre Budin*, Parigi, 2012. Immagine da https://www.ductal.com/en/architecture/custom-facades.

1.2 Le nuove frontiere dell'innovazione architettonica: innovazione marketing driven, open innovation, green innovation

L'innovazione tecnologica, che sia frutto di strategie *demand-pull* o *technology-push* o che derivi addirittura da processi evolutivi interni, è stata per tutto il secolo scorso al centro del dibattito sulla competitività delle aziende sul mercato.

Recentemente lo stesso concetto di innovazione ha subito una revisione di alcuni dei sui elementi fondamentali, a partire dai meccanismi di avvio del processo innovativo fino ad arrivare ad una ricalibrazione delle possibili traiettorie di sviluppo e dei fattori alla base di un suo inserimento di successo sul mercato.

Mentre in passato le aziende che avevano conquistato una posizione competitiva, si preoccupavano principalmente di garantire il contenimento dei costi attraverso economie di scala e produzione di massa che, per definizione, si basa sull'uniformazione dei bisogni, successivamente, soprattutto per i settori produttivi largamente influenzati dalla variabilità della domanda, le politiche aziendali hanno deviato sull'applicazione di modelli flessibili, in grado di adattarsi alle mutevoli richieste degli acquirenti.

La nuova filosofia di gestione sinteticamente descritta determina l'attribuzione di un ruolo chiave al marketing[35], cui si chiede di svolgere una funzione di raccordo tra impresa e mercato[36], ampliando così il nocciolo centrale dell'innovazione, che arriva a contenere anche tutto ciò che riguarda il posizionamento dei prodotti sul mercato. Sebbene già Schumpeter parlasse di innovazione di mercato come riorganizzazione della struttura dell'offerta di un settore industriale, originariamente l'attenzione era posta sulle fasi tecnico-ingegneristiche di progettazione e di fabbricazione dei beni piuttosto che sull'attività commerciale, limitata essenzialmente alla cura dei rapporti con la clientela. Inoltre, in settori maturi come quello edilizio, dove la maggior parte dei prodotti presenti sul mercato erano pressoché analoghi in termini di *performance*, la competizione tra le aziende si esercitava praticamente solo sul fattore prezzo. Per marketing oggi si intende un sistema di attività teso a pianificare, attribuire

[35] L'enciclopedia Treccani definisce il marketing come «il complesso dei metodi atti a collocare con il massimo profitto i prodotti in un dato mercato attraverso la scelta e la pianificazione delle politiche più opportune di prodotto, di prezzo, di distribuzione, di comunicazione, dopo aver individuato, attraverso analisi di mercato, i bisogni dei consumatori attuali e potenziali», cfr. Enciclopedia Treccani online, *Marketing*, http://www.treccani.it/enciclopedia/marketing/.

[36] Vinci, A., "Oltre il prodotto: altre forme di innovazione", in Losasso, M., *Percorsi dell'innovazione. Industria edilizia, tecnologie, progetto*, CLEAN, Napoli, 2010, pp. 83-94.

prezzo, promuovere e distribuire prodotti o servizi in grado di soddisfare i clienti e di garantire all'impresa ampi margini di profitto. Contiene due aspetti essenziali: la definizione del *target* di mercato e la scelta degli strumenti con cui raggiungerlo[37].

Oggi, in campo edilizio come in molti altri settori, le caratteristiche tecniche del prodotto legate alla soddisfazione dei bisogni centrali – ovvero i bisogni di base che avvicinano il cliente al prodotto servizio – vengono addirittura date per scontate, facendo sì il valore si sposti sul servizio, sulla personalizzazione e sugli elementi periferici del sistema dell'offerta. Per i prodotti edili di alta gamma, al costo elevato deve necessariamente corrispondere un'offerta di servizi distribuito su tutta la vita utile del prodotto: ad esempio, assieme a un *kitchen top* realizzato in UHPFRC, si acquistano anche dettagliate indicazioni per la sua manutenzione, costruite e ricalibrate a seconda dell'utilizzo che l'acquirente ne farà nel tempo.

Ne deriva che metodi come il *branding*, finalizzati a creare e a sviluppare le relazioni con il cliente condizionandone le scelte, acquistano un'importanza di primo piano, cambiando non solo il ruolo del cliente all'interno dell'impresa, ma anche la sua percezione da parte di quest'ultima. È l'avvento del *customer based management* che, per quanto detto, si distingue nettamente dal tradizionale paradigma del marketing basato sulla rispondenza a requisiti relativi a costi, tempi e qualità. Le industrie cosiddette creative impostano l'attività di R&S sui gusti e sulle preferenze degli individui per dar vita a nuovi prodotti e servizi, in un processo di *hidden innovation* che raramente si rivela al pubblico[38] e che conduce le aziende a trasformare la propria offerta produttiva dal singolo prodotto a un sistema integrato. Progettisti e aziende sono così costrette ad ampliare il proprio bagaglio di conoscenza, che, dal tipo *I-shaped* di stampo tecnico-ingegneristico e mono-disciplinare utilizzato nel caso del prodotto, diventa di tipo sistemico – *T-shaped* – fondamentale per la gestione del prodotto-servizio.

Nel settore edile ciò si traduce nell'elaborazione di sistemi a diversi gradi di complessità, ma sempre finalizzati a offrire un pacchetto comprensivo anche di aspetti, detti intangibili, che escono dal confine fisico del prodotto, come la messa a punto di modalità di velocizzazione e sicurezza dell'assemblaggio, garanzie di affidabilità e di integrazione con differenti tecniche e in diverse condizioni ambientali e d'uso. L'innovazione nasce quindi con la possibilità di prevedere margini di variabilità per dimensioni, finiture e gamme e con prerogative di soddisfacimento prestazionale in termini avanzati.

[37] Nonostante la comprovata centralità del marketing nelle strategie aziendali, nelle imprese occidentali si registra ancora una difficoltà di coordinamento non solo tra marketing, produzione e R&S ma anche tra marketing e vendite. Infatti, mentre nello sviluppo di nuovi prodotti il marketing, guardando alla domanda finale, lavora su prospettive di medio termine, il settore vendite lavora su tempi brevi, creando così facile terreno di scontro nella definizione delle politiche imprenditoriali. Enciclopedia Treccani online, *Marketing*, http://www.treccani.it/enciclopedia/marketing/.

[38] Si veda Casoni, G. e Fanzini, D., *I luoghi dell'innovazione. Complessità management progetto*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011. A tal proposito Kline e Rosenberg (Kline, S. J. e Rosenberg, N., "An overview of innovation", *op. cit.*, 1986) descrivono un fenomeno abbastanza simile, sebbene non utilizzino la locuzione *hidden innovation*: la tendenza generale è quella di identificare le innovazioni solo con invenzioni ad alto impatto, escludendo, paradossalmente, la maggior parte del progresso tecnologico che non è visibile agli occhi e che si attua un piccolo cambiamento alla volta. Ciò è dovuto sia all'impossibilità di attribuire una certa dimensionalità alle innovazioni, che richiedono un tempo storico per essere misurate, sia alla tendenza a identificarle come qualcosa di chiaramente definito, che entra a far parte nel mondo economico allo scadere di una data ben precisa.

HOW TO INNOVATE?

THROUGH CUSTOMER BASED STRATEGIES

01

NETFLIX'S STRATEGY

1 - CONSUMER VIEWING BEHAVIOUR ANALYSIS

2 - PRODUZIONE DIVERSIFICATA

4 - FRUIZIONE PERSONALIZZATA

Netflix ha saputo sfruttare il fenomeno dello *streaming*, intercettando un nuovo comportamento già in atto e creando una piattaforma con prodotti di alta qualità e pensati per diverse nicchie di mercato.

02

LAGO'S STRATEGY

«LA PERSONA RIMESSA AL CENTRO DI TUTTO. QUESTO E' IL MODO IN CUI INTENDIAMO IL DESIGN» *

«IL DESIGN SEI TU, NOI FORMIAMO L'ALFABETO» *

Nel 2006 Daniele LAGO apre un blog in cui raccoglie suggerimenti e opinioni dei consumatori.
Nasce una strategia produttiva, basata su una linea di prodotti, modulari, versatili e integrabili, per consegnare «alle persone una nuova libertà compositiva»*.

*lago.it

03

3D SYSTEMS' STRATEGY

1 - PRODUZIONE SU RICHIESTA

2 - SOLUZIONI END-TO-END

3 - FORMAZIONE

Nel 1983 Chuck Hull, padre della stereolitografia e cofondatore di 3D Systems, si accorge dell'esistenza di una ben definita nicchia di mercato, che richiedeva una velocizzazione della prototipazione. Nel 1986 deposita il brevetto che segna la nascita della stampa 3D*.

*it.3dsystems.com

Il filone di ricerca così delineato, definito marketing relazionale, può essere ulteriormente stressato, passando dal porre il cliente al centro delle politiche di marketing a coinvolgerlo direttamente nei processi decisionali, sfruttando in particolar modo il potere della rete per il lancio di prodotti innovativi[39].

Tuttavia, far sì che i clienti si sentano realmente coinvolti non è semplice: sia nei modelli *business-to-customer*, come nel caso delle società fortemente incentrate sul rapporto con l'utenza, che in quelli *business-to-business*, ove ci si affida ai dipartimenti di vendita e assistenza per identificare le nuove necessità di mercato, i vecchi modelli di R&S non riescono a orientarsi in un mercato agile e in rapida evoluzione.

Radjou e Prabhu suggeriscono, in *Frugal Innovation*[40], una serie di principi – che coinvolgono sia il reparto R&S che quello manageriale – cui fare riferimento per una maggiore integrazione del cliente nelle dinamiche aziendali. Occorrerebbe prediligere prodotti «abbastanza buoni»[41] che taglino al massimo sul contenuto tecnologico a favore della semplicità d'uso, tracciandone l'utilizzazione anche dopo l'acquisto. Fondamentali risultano le tecniche di inclusione dell'utenza che trovano nel web un ottimo alleato: in particolare, il *crowdsourcing* – per la raccolta di idee e la verifica prestazionale di prodotti tramite piattaforme online – e i *social media*, ormai diffusissimi e di utilizzo comune, consentono di raccogliere dati e consigli di mercato con costi praticamente inesistenti.

Alle ricerche online, si aggiungono metodi più pragmatici, come ad esempio l'utilizzo dei laboratori di immersione, dove un gruppo di acquirenti può utilizzare il prototipo del prodotto da lanciare fornendo un *feedback* immediato al team di R&S. A ciò si aggiungono metodologie di *collaborative design*, che per le PMI che hanno come clienti gli studi di architettura, si traduce nella dotazione di veri e propri uffici di progettazione all'interno dell'azienda che si occupano di colmare la distanza che separa il mondo della produzione da quello della progettazione, con modificazioni del design del prodotto che forniscono ad ambo le parti un valore aggiunto in termini di conoscenza, tanto che si potrebbe parlare di una sorta di *learning-by-doing* arrowiniano, ma bidirezionale. Ancora una volta ciò assume un particolare rilievo nel caso dei materiali avanzati come l'UHPFRC, in cui la collaborazione con la casa madre per la formulazione del corretto *premix* di calcestruzzo e con quella di prefabbricazione per la realizzazione dell'elemento, fornisce tanto agli architetti quanto agli imprenditori continue occasioni di sperimentazioni innovative e "accumulazioni creative".

[39] Per maggiori approfondimenti si veda Sabbadin, E., "Disegnare l'innovazione. Le traiettorie del marketing", in Epifani, S. *et alii* (a cura di), *Decidere l'innovazione. Come misurare, valutare e scegliere il cambiamento*, Sperling & Kupfer Editori, Piacenza, 2006, pp. 129-186. Lo stesso autore mette in evidenza come il marketing relazionale non sia, però, l'unica via. Altre correnti di pensiero ritengono che i clienti non sarebbero in grado di fornire indicazioni sulle traiettorie possibili di innovazione, che invece si potrebbero dedurre da una dettagliata analisi delle tendenze dei prodotti di successo, i cui attributi rappresenterebbero la traccia evolutiva dei desideri e dei bisogni dei consumatori. In sostanza, «i beni che riescono a resistere più a lungo sul mercato codificano la storia dei beni di successo e permettono di estrapolare i *trend* futuri. […] L'analisi sistematica dei *trend* relativi ai prodotti di successo permette di esplicitare fattori di regolarità stabili che possono consentire di generare innovazioni». Tali fattori di regolarità prendono il nome di creative template, una sorta di codice dell'innovazione. Si veda Goldenberg, J. E Mazursky, D.C., *Creatività e innovazione di prodotto*, Etas, Milano, 2003.

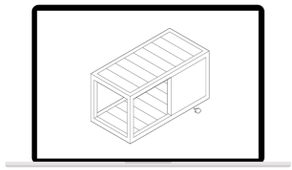
[40] Radjou, N. e Prabhu, J., *Frugal Innovation. Come fare di più con meno*, trad. it Cherubini, B. e Buffoni, M., Rubettino Editore, Soveria Mannelli, 2016 (ed. orig. *Frugal Innovation. How to do more with Less*, Profile Books, London, 2015).

[41] *Ivi*, pag. 57.

A fianco. Dot Architects, *Huaxia Star Libary,* Cina, 2018.
Tutte le immagini sono tratte da https://www.wikihouse.cc/.

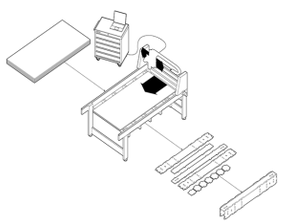
WikiHouse

«WikiHouse is a digitally-manufactured building system. It aims to make it simple for anyone to design, manufacture and assemble beautiful, high-performance homes that are customised to their needs»*.



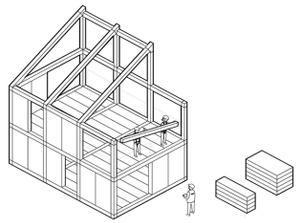
01_DIGITAL DESIGN

«WikiHouse is an adaptable system of standardised parts. This means each house can be unique without costing more. One size doesn't need to fit all»*.



02_LOCAL FABRICATION

«WikiHouse doesn't need a large, expensive factory. Components are manufactured by a network of local microfactories using digital fabrication tools»*.



03_RAPID ASSEMBLY

«Homes can be rapidly assembled to millimetre precision, like a flat-pack. Almost anyone can do it; including small businesses and self-builders»*.

*https://www.wikihouse.cc/About



OPEN INNOVATION

Se la *collaborative innovation* pone al centro il cliente, l'*open innovation*, simile per molti aspetti, riscrive proprio il rapporto con l'approvvigionamento di conoscenza, promuovendo la collaborazione tra azienda e mondo esterno.

Durante lo sviluppo del prodotto la canonica fase *front-end*, in cui sono molto forti le interazioni con i vari attori coinvolti, seppur mediate e controllate dall'impresa, guadagna l'aggettivo "*fuzzy*" – sfocato – aprendosi notevolmente all'ambiente esterno ed esponendo così la firma a maggiori situazioni di rischio a favore però di una più ampia, seppur spesso anche più caotica, esplorazione delle soluzioni possibili.

Alla fase esplorativa del *front-end*, si aggiunge quella del *back-end*, finalizzato a sfruttare in modo efficiente la base di conoscenza precedentemente sviluppata, concentrandosi sulle attività di design e *testing* di nuovi prodotti. In entrambe queste fasi, utenza e attori rivestono ancora una volta un ruolo significativo attraverso le figure dei *lead-user* che, per professione o per passione, mettono in campo competenze che vanno oltre la comune esperienza d'uso del prodotto.

Nella fase di *front-end* è possibile instaurare con l'utenza diversi livelli di collaborazione basati sulla competizione o sulla selezione di idee, sulle comunità di creazione in cui, dopo la scomposizione in parti di un problema specifico, se ne affida la risoluzione a gruppi di consumatori specializzati, e infine sugli ormai consolidati forum di discussione, adoperati quando la complessità del *task* è piuttosto bassa.

Anche nella fase di *back-end* il coinvolgimento dell'utenza ha diverse gradazioni: dall'uso di *toolkit user-friendly* atti supportare l'innovazione vera e propria o di altri più semplici per il co-design e per la personalizzazione, si arriva alla produzione di elementi modulari e configurabili in base ai requisiti espressi dall'utente. Possono rientrare nella fase di *back-end* anche le forme di innovazione di tipo *collaborative* precedentemente descritte[42].

Politiche aziendali di questo tipo rientrano, in realtà, in un movimento più ampio, denominato *Corporate Social Responsability* (CSR) che sta acquisendo, in particolare nel settore edilizio ove le interazioni con l'ambiente e il contesto sociale sono estremamente rilevanti, un peso sempre maggiore, soprattutto considerando la recente tendenza del settore produttivo verso la *mass-customization*[43].

In questi casi, per le aziende «la responsabilità e la partecipazione non sono considerate come funzioni puramente strumentali all'impresa ma come fondamenti della vita e dello sviluppo dell'impresa stessa»[44]. Inoltre, la garanzia di una crescita di lungo periodo si traduce nella capacità di coniugare la ricerca del profitto e della redditività con altri *driver* importanti quali la tutela dell'ambiente, il rispetto dell'etica negli affari, lo sviluppo del capitale intellettuale, il contemperamento delle aspettative legittime dei portatori di interessi. È oramai opinione diffusa che l'adozione di logiche CSR comporti anche un significativo riscontro economico, in quanto si riesce rafforzare *brand image* e *brand value*, conquistando una fascia di consumatori in continua crescita, dato il rilievo acquisito negli ultimi anni dai temi ambientali e di etica

[42] Per ulteriori approfondimenti sull'*open innovation* si veda Casoni, G. e Fanzini, D., *I luoghi dell'innovazione…*, *op.cit.*, 2011, pp. 22-27; Chesbrough, H. *et alii*, *New Frontiers in Open Innovation*, OUP Oxford, Oxford, 2017; Chesbrough, H., *Open Innovation: The New Imperative for Creating And Profiting from Technology*, Harvard Business School Press, Boston, 2006.

[43] L'argomento è ampiamente trattato nel paragrafo 2.3.

[44] Vinci, A., "Oltre il prodotto: altre forme di innovazione", *op.cit.*, 2010, pp. 91-92.

del lavoro. Sulla questione ambientale oltre alla spinta innovativa proveniente dal mercato, che intercetta quindi un tipo di domanda sensibile a tali temi, va anche detto che gli obblighi normativi, come ad esempio le procedure per l'efficientamento energetico e la valutazione della sostenibilità[45], hanno rappresentato sicuramente uno stimolo essenziale per un'evoluzione *green* dei processi progettuali[46].

Tra questi, l'approccio *life cycle* nasce con l'obiettivo di porre rimedio alla parzialità con cui si affrontava il tema della sostenibilità, inserendolo in una prospettiva sistemica e valutando le maggiori opportunità per ridurre gli impatti ambientali, economici e sociali, dalla scala dell'edificio a quella territoriale. Declinato alla scala del prodotto, le strategie LC, mediante un'opportuna valutazione dei limiti della durabilità, mirano più che altro a garantirne un utilizzo affidabile almeno fino al punto, detto *break-even*, in cui si presenta un'alternativa tecnologica più valida.

Tuttavia, la necessità di considerare e, soprattutto di valutare, l'intero processo progettuale e costruttivo in tutte le sue fasi, dalla promozione alla dismissione degli artefatti, ha prodotto, almeno inizialmente, un effetto "disarmante" sia per i progettisti che per i produttori in quanto ogni parte risultava «in relazione col tutto, in un modello radicalmente olistico, ma rispetto al quale ogni intervento produce un'eco o un effetto a cascata, che appare arduo da modellare e ancor più governare»[47].

Ciononostante, sebbene con le lecite difficoltà iniziali, si può decisamente parlare di un cambio di paradigma verso una *green innovation* che consente oggi di parlare di ecologia industriale, con modelli di *business*[48] improntati al rispetto di principi quali l'ottimizzazione

[45] I metodi per la valutazione della sostenibilità si distinguono in bilanci ambientali e meccanismi a punteggio. I primi valutano in maniera analitica tutti gli effetti ambientali connessi al processo progettuale e costruttivo e ne esprimono l'impatto tramite un indice. L'impatto totale si misura sommando i singoli effetti prodotti da ogni processo relativo alla realizzazione e all'uso dell'opera. Rientrano in questa categoria la valutazione del tipo Lyfe Cycle Assestement, introdotta nel 1999 dalla Society of Environmental Toxicology and Chemistry. LCA è un metodo di analisi sistemica per la valutazione del danno ambientale associato alle varie scale del progetto, mediante la quantificazione dei flussi di materia ed energia in ingresso e in uscita, dagli impatti determinati dai materiali utilizzati e dei rifiuti prodotti in tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio. I metodi a punteggio, definiti Green Building Rating Systems e comprensivi dell'americano LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) e dell'italiano Protocollo ITACA, si basano sull'attribuzione di un giudizio che corrisponde al livello conseguito dall'edificio o dai suoi elementi rispetto a ciascuno dei requisiti di sostenibilità previsti senza, però, mai arrivare a una valutazione di sintesi. Per quanto riguarda la scala del prodotto, significativi sono l'approccio IPP (Integrated Product Policy) che spinge verso l'acquisto di prodotti eco-compatibili e la dichiarazione ambientale di prodotto (Environmental Product Declaration, EPD), di natura volontaria e rientrante nella norma ISO 14020, assimilata dalla corrispondente UNI "Etichette e dichiarazioni ambientali – Principi generali". Le etichettature fornite da terzi invece, come il marchio di qualità ambientale Ecolabel, sono rilasciate solo ai prodotti che superano alcuni requisiti minimi. A ciò si aggiunge la certificazione energetica, introdotto in Italia dal decreto legislativo 192 del 2005, a recezione della direttiva 2002/91/CE. *Ivi*, pag. 139; Girardi, C., "Metodi e strumenti per la valutazione della sostenibilità dei prodotti edilizi", in Losasso, M., *Percorsi dell'innovazione. Industria edilizia, tecnologie, progetto*, CLEAN, Napoli, 2010, pp. 78-79.

[46] Cfr. Campioli, A. e Lavagna, M., "Innovazione ambientale dei processi di trasformazione del costruito e ciclo di vita", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 5, 2013, pp. 66-73.

[47] Si veda Antonini, E., "La sostenibilità", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2001, pag. 137. All'autore si deve anche l'aggettivo "disarmante".

[48] Radjou e Prabhu dimostrano, attraverso la vicenda dell'impresa Tarkett, che i modelli di business improntati alla sostenibilità non solo esistono, ma sono anche di successo. Nel 2007 la multinazionale Tarkett, leader nel settore delle pavimentazioni in laminato, moquette e piastrelle, assume un nuovo CEO, Micheal Giannuzzi che, nonostante un solido tasso di crescita del 10% annuo, decide di rivoluzionare prodotti e processi produttivi sposando la causa ambientale. Nel 2013, il consumo di acqua potabile di Tarkett si è ridotto del 12%, mentre sono diminuiti del 37% i rifiuti destinati alla discarica grazie al reinserimento

di materiali ed energia, la salvaguardia delle risorse e la dematerializzazione delle attività economiche nonchè degli oggetti in senso stretto.

Tali approcci rientrano nel più ampio contesto dell'oramai affermato modello economico della *circular economy*[49], che impone una progettazione di materiali, prodotti e sistemi in grado di attivare flussi circolari nell'impiego delle risorse all'interno della tecnosfera, limitando i carichi trasferiti alla biosfera[50]. Come vedremo meglio nel Capitolo 3, anche il settore dei calcestruzzi, responsabile del consumo di una larga fetta delle risorse energetiche (circa il 10%)[51] e materiche dell'intero settore industriale internazionale, punta oramai sull'introduzione di processi circolari all'interno della sua filiera: si pensi che solo in Italia, nel triennio 2016-2018, le aziende hanno investito oltre 90 milioni di euro in tecnologie per il reimpiego di materiali di recupero nel ciclo produttivo[52].

Ancora, fondendo tanto i contenuti quanto i nomi, negli ultimi anni, la *circular economy* è stata inglobata nella più ampia *green economy* che, però, pone al centro della questione, oltre che un uso efficiente delle risorse e una corretta gestione dei rifiuti, anche il benessere delle persone e la salvaguardia dell'ecosistema.

Se per *green economy* si intende «un'economia capace di usare con efficienza l'energia e le materie prime, di intervenire sugli ecosistemi senza danneggiarli, di guardare ai rifiuti come a una fase del continuo divenire delle merci»[53] ben si comprende la forte relazione strategica con il concetto di resilienza come, tra l'altro, dimostra la proliferazione di documenti programmatici internazionali sul tema, tra cui si segnalano *Towards a Green Economy* (2011) e *Green Economy Coalition*[54] (2012).

nella catena produttiva di quello che prima veniva considerato materiale di scarto. Tarkett, come molte altre aziende, vede nella sostenibilità non un limite di sviluppo, ma un'occasione per fidelizzare i clienti, aumentare i profitti e ottenere un vantaggio competitivo che, difatti, oggi conserva a discapito delle sue politiche di investimento controtendenza. Cfr. Radjou, N. e Prabhu, J., *Frugal Innovation. Come fare di più con meno*, *op.cit.*, 2016, pp. 117-148.

[49] Si vedano Lacy, P. *et alii*, *Circular Economy. Dallo spreco al valore*, trad. it. Vegetti, M., Egea, Segrate, 2016 (ed. orig. *Waste to Wealth. The Circular Economy Advantage*, Palgrave Macmillan, London, 2015); Raworth, K., *L'economia della ciambella. Sette mosse per pensare come un economista del XXI secolo*, trad. it. Cella, E., Edizioni Ambiente, Milano, 2017 (ed. orig. *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*, Random House, London, 2017).

[50] Campioli, A. *et alii*, "Approccio Life Cycle per la sostenibilità nel settore delle costruzioni e nelle trasformazioni del territorio", in Antonini, E. e Tucci, F. (a cura di), *Architettura, città e territorio verso la Green Economy*, Edizioni Ambiente, Milano, 2017, pp. 135-151.

[51] Si veda IEA, *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*, OECD/IEA, 2017.

[52] Federbeton, *Infrastrutture sostenibili: al Saie di Bari la proposta di Federbeton per il rilancio del paese e del comparto*, casaclima.com, 2019.

[53] Cianciullo, A. e Silvestrini, G., *La corsa della Green Economy. Come la rivoluzione verde sta cambiando il mondo, Edizioni Ambiente*, Milano, 2010, pag. 14. Dopo la definizione gli autori significativamente aggiungono: «questa definizione è utile per la carica fortemente evocativa che l'espressione *green economy* incarna, ma a rigor di logica l'aggettivo dovrebbe essere definito pleonastico. Dovrebbe essere sufficiente parlare di economia secondo la definizione che ne dà il vocabolario Garzanti: "Razionale gestione delle risorse disponibili per un determinato uso". […] L'economia dovrebbe essere per sua natura *green*».

[54] Fabrizio Tucci ha recentemente fornito una sintesi del lavoro svolto su tali temi dall'Unione Europea, dalle Nazioni Unite e dall'autorità ministeriali fino al 2018 (Tucci, F., "Resilienza ed economie green per il futuro dell'architettura e dell'ambiente costruito", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 15, 2018, pp. 153-164), segnalando i seguenti documenti: United Nations Environment Program, *Global Green New Deal*, UNEP Publishing, Brussels, BE, 2008; European Environmental Agency, "Impacts of Europe's Changing Climate – 2008 Indicators based-Assessement", in *EEA Report No. 4/2008*, 2008; European Commission, *White Paper. Adapting to Climate Change: Towards a European framework for action*, EU Publishing, Brussels, BE, 2009; United Nations Environment Programme, *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable*



Alcuni dei testi più recenti sul tema della *green innovation* e sulla *green* e *circular economy*.

Questi mettono in evidenza il rapporto che si esplica tra *green economy*, processi circolari e resilienza nell'ambito dell'ambiente costruito, attraverso la capacità di adattamento di quest'ultimo ai cambiamenti climatici e ai problemi legati alla limitatezza e alla non rinnovabilità delle risorse naturali[55].

Tra le politiche europee a stampo *green*, va citato, il recentissimo documento *The Green New Deal for Europe. A Blue Print for Europe's Just Transition* del 2019[56], di cui vale la pena riportare l'incipit, che si configura come una dichiarazione d'intenti: «E*urope today confronts two crisis. The first in an economic crisis, with rising levels of poverty, insecurity, and homelessness across the continent. The second is a climate and environmental crisis, with severe consequences for Europe's front-line communities and even more perilous one on the horizon. […] A radically new approach is necessary to reverse this destructive trend and to deliver environmental justice in Europe and around the world. We call this approach the Green New Deal for Europe*»[57].

Il GND opera attraverso tre diverse istituzioni, il Green Public Works (GPW), l'Environmental Union (EnU) e l'Environmental Justice Commision (EJC). Mentre l'EJC è, di fatto, il primo corpo internazionale il cui obiettivo è assicurare, mediante un apposito set di standard internazionali normativi, conoscitivi e di valutazione delle conseguenze del cambiamento climatico, la transizione verde[58], l'EnU ha un compito più strutturale, ovvero offrire un robusto e onnicomprensivo pacchetto regolamentare per riallineare la politica europea agli avanzamenti scientifici fatti sul *breakdown* ambientale[59].

Development and Poverty Eradication, UNEP Publishing, Brussels, BE, 2011; European Environmental Agency, *European Adaptation to Climate Change in Europe*, Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg-Copenaghen, 2012; United Nations Environment Programme, *Green Economy Coalition*, UNEP Publishing, Brussels, BE, 2012; European Commission, *An EU Strategy on adaptation to climate change*, EU Publishing, Brussels, BE, 2013; European Environment Agency, *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report*, 2016; Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici e Ministero dell'Ambiente, *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici PNACC*, Supporto tecnico-scientifico per il MATTM, prima stesura per la consultazione pubblica, Roma, 2017; Consiglio Nazionale per la Green Economy, *Programma di transizione alla Green Economy in Italia*, Stati Generali della Green Economy, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero per lo Sviluppo Economico, Ecomondo Pubblicazioni, Rimini, 2017; European Commission, *Implementation of the Circular Economy Action Plan*, EU Publishing, Brussels , BE, 2017; Ministero dell'Ambiente e Ministero dello Sviluppo Economico, *Strategia Energetica Nazionale SEN 2017*, 2017.

[55] In particolare, lo scambio tra *green economy* e resilienza si articola sulla base di tre approcci metodologici: il *self-reliant approach*, secondo il quale ambiente costruito e architettura diventeranno progressivamente sistemi autopoietici al fine di ridurne la dipendenza da meccanismi di accumulazione delle risorse e di accentramento dei punti di erogazione di beni e servizi; l'*error-friendliness approach*, che implica una buona disposizione verso gli errori portando a una sorta di robustezza adattiva del sistema; il *dynamic-responsive approach*, secondo «il quale la cultura tecnologica del progetto deve essere in grado di mettere in condizioni i sistemi ambientale e architettonico di rispondere alle costanti interazioni con le trasformazioni in atto in modo insieme sinergico, dinamico e appropriatamente reattivo». Cfr. Tucci, F., "Resilienza ed economie green per il futuro dell'architettura…", *op.cit.*, 2018, pag. 155-156.

[56] *The Green New Deal. A Blue Print for Europe's Just Transition*, Draft for Public Consultation, 2019. Disponibile all'indirizzo: https://report.gndforeurope.com/.

[57] *Ivi*, pag. 4.

[58] L'EJC si occupa anche dello sviluppo di nuovi indicatori per la valutazione del livello di implementazione dell'agenda climatica europea, avvisando l'Unione e le altre istituzioni internazionali sull'indirizzo delle future politiche di sviluppo. Particolarmente significativi sono i compiti di procedere al riconoscimento formale dei rifugiati climatici offrendo loro diritto d'asilo e di redigere il primo *database* europeo sulle migrazioni ambientali. *Ivi*, pp. 52-62.

[59] L'EnU comprende tre aree legislative differenti, l'emergenza, la sostenibilità e la solidarietà. *Ivi*, pp. 33-50.



In contrasto con la politica nazionale, nel 2019 il sindaco di Los Angeles Eric Garcetti ha lanciato il Green New Deal Plan. Previsto, tra le altre cose, uno stanziamento di 8 miliardi di dollari entro il 2022 per ammodernare la rete elettrica. Immagine da https://www.fabiooreccchini.it/los-angeles-lavora-al-suo-green-new-deal/.

L'ultima istituzione, il GPW, è un programma di investimenti finalizzato a garantire giustizia ambientale e sociale, a promuovere una decarbonizzazione dell'economia, a tutelare la biodiversità e a coinvolgere le popolazioni nei processi decisionali conferendo più potere alle autorità locali. Gli investimenti previsti si pongono l'ambizioso obiettivo di riorientare l'economia europea minimizzando, di fatto, il modello capitalistico a favore di uno sviluppo sostenibile, anche attraverso un rilancio della democrazia mediante la restituzione ai lavoratori e alle comunità di un ruolo di rilievo nelle politiche strategiche di crescita.

Naturalmente, anche per il settore industriale si parla di modificazione delle strutture produttive in chiave sostenibile, con particolare attenzione alle regioni meno sviluppate e con una forte dipendenza dai carburanti fossili. Il design dei prodotti e dei processi industriali si dovrà basare su una prospettiva *life-cycle*, sulla riciclabilità e sulla limitazione degli sprechi nel *packaging* e nell'*advertising*.

Per aiutare la transizione ecologica, il GND include, in continuità con Horizon 2020[60] che, com'è noto, puntava agli investimenti su ricerca e innovazione[61] per una crescita intelligente, sostenibile e inclusiva dell'Europa, Green Horizon 2050[62], dedicato esclusivamente allo sviluppo di soluzioni per la crisi ambientale e climatica.

A questo si aggiunge, un ulteriore programma quadro più vasto, Horizon Europe[63] che punta a rafforzare la base tecnologica e scientifica dell'Unione per rispondere alle sfide globali e contribuire al raggiungimento dei cosiddetti Sustainable Development Goals, supportando, contemporaneamente, la competitività del settore industriale anche attraverso l'innovazione tecnologica. Horizon Europe è impostato su una struttura a tre pilastri, denominati Open Science, Global Challenges and Industrial Competitiveness e Open Innovation.

Mentre il primo è quello più in continuità con Horizon 2020 in quanto mira a supportare la ricerca scientifica d'eccellenza, il secondo pilastro si dirama in cinque cluster – "salute", "società sicura e inclusiva", "industria e digitalizzazione", "clima, energia e mobilità" e "cibo e risorse naturali" – in modo da incentivare la multidisciplinarietà e multisettorialità a livello internazionale, con particolare enfasi sul ruolo chiave delle industrie per il raggiungimento degli obiettivi di programma. Il terzo pilastro, infine, sarà focalizzato sull'innovazione, con l'aiuto dell'European Innovation Council che, assieme all'affermato European Institute of Innovation and Technology, farà da *framework* di supporto agli investitori e sviluppatori, con un occhio di riguardo sempre ai temi della sostenibilità, del miglioramento della qualità della vita e della prosperità socio-economica[64].

Appare dunque chiaro il ruolo strategico dell'innovazione tecnologica nei programmi di sviluppo europeo, sia in chiave ambientale che di collaborazione sinergica con il settore industriale che, per l'edilizia, significa introdurre innovazioni processuali – individuando, tra le altre cose, soluzione capaci di ridurre i consumi energetici e ripensando gli edifici sul lungo periodo – e di prodotto, ovvero abbattendo l'impronta ecologica degli artefatti, riducendo il consumo di materiale e prevedendone la riparabilità prima e la riciclabilità poi, incorporando nel prodotto informazioni e conoscenza necessarie a ottenerle.

Lo spostamento di interesse verso questi temi ha chiaramente – e intenzionalmente – prodotto una radicale trasformazione nel campo della Ricerca e della Sperimentazione tecnologico progettuale che, abbracciando definitivamente i temi del *green*, che sia *economy* o *innovation*, non può più prescindere dalla disamina della questione ambientale, che veste anche e soprattutto il nostro settore di una responsabilità che trascende il solo sviluppo economico, seppur sostenibile, arrivando a toccare temi come la giustizia sociale, l'eguaglianza, la dignità del lavoro e la salvaguardia degli ecosistemi.

«Il nostro compito di architetti è di modificare l'ambiente in cui l'uomo vive e lavora […]. Ma sia l'uomo che l'ambiente, sia gli strumenti che le risorse sono immersi nella stessa realtà, complessa e dinamica, e qualsiasi trasformazione […] si ripercuote all'intorno, creando a volte reazioni contrarie, a volte risultati imprevedibili o comunque incontrollabili […]. La tecnologia […] copre, istituzionalmente, un ambito abbastanza vasto di questo campo di relazioni di causa ed effetto […]. Ma gli aspetti tecnici oggi non sono più isolabili; essi fanno parte della globalità del contesto; ogni scelta che li riguarda è anche scelta politica, economica, sociale perché è in queste direzioni che si sentiranno gli effetti»[65].

È necessaria, dunque, una riflessione sulla relazione tra innovazione tecnologica e progetto d'architettura, che richiede, però, per iniziare, la definizione di quali siano le sfumature, declinazioni e ibridazioni dell'innovazione tecnologica nel settore edile.

[60] Si veda Commissione Europea, *Horizon 2020 in breve. Il programma quadro dell'UE per la ricerca e l'innovazione*, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, 2014.

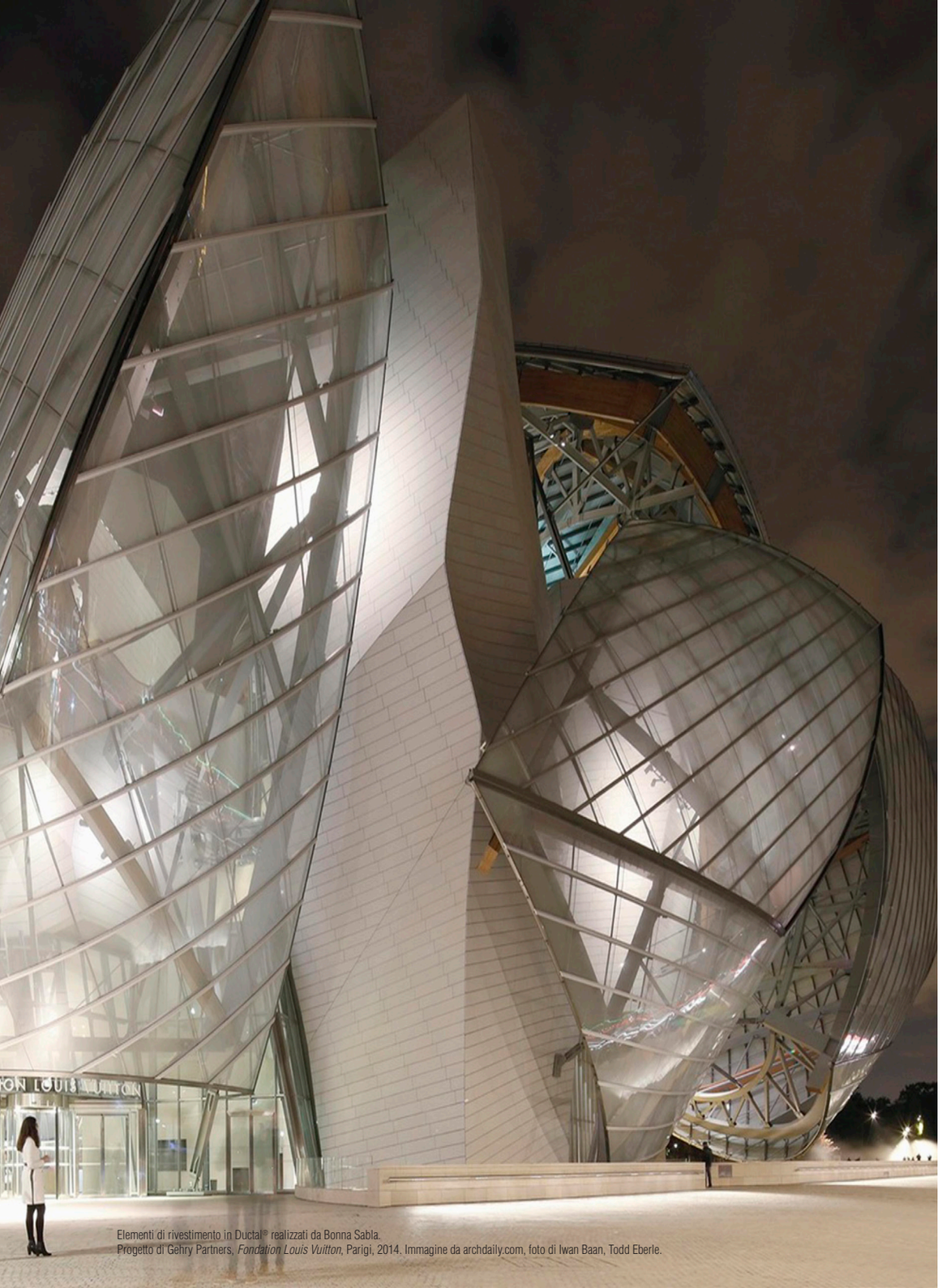
[61] Questa stessa ricerca è figlia di finanziamenti derivanti dal PON Ricerca e Innovazione 2014-2020.

[62] *The Green New Deal. A Blue Print for Europe's Just Transition*, Draft for Public Consultation, 2019, pp. 26-27. Disponibile all'indirizzo: https://report.gndforeurope.com/.

[63] Si veda European Commission, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council. Establishing Horizon Europe – The Framework Programme For Research And Innovation*, 2018.

[64] Saranno stanziati per i tre pilastri, 26, 53 e 13 miliardi di euro. Cfr. European Commission, *Proposal for a Regulation...,op.cit.*, 2018.

[65] Spadolini, P., "Design e tecnologia: struttura e contenuti di un campo di indagine", in Spadolini P. (a cura di), *Design e tecnologia, un approccio progettuale all'edilizia industrializzata*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1974.



Elementi di rivestimento in Ductal® realizzati da Bonna Sabla.
Progetto di Gehry Partners, *Fondation Louis Vuitton*, Parigi, 2014. Immagine da archdaily.com, foto di Iwan Baan, Todd Eberle.

1.3 Tipologie di innovazioni, loro ibridazioni e fattori di successo

I diversi contribuiti all'evoluzione del tema precedentemente delineati hanno esteso sempre più il campo di influenza del concetto di innovazione, che non si limita alla solo innovazione di prodotto, come molto spesso si tende a pensare, ma abbraccia la componente estetica, di design, di immagine e di comunicazione, nonché gli aspetti legati ai servizi: la dimensione organizzativa dell'impresa, il sistema dell'offerta, il marketing e le relazioni con i clienti rientrano a pieno titolo nel *pattern* dei processi innovativi[66]. Per tale motivo, il tentativo di fornire una definizione del termine[67] è quantomai complesso e richiede un'analisi che si dipani almeno su tre livelli, nominale, reale e contestuale.

La definizione nominale individua nel nucleo semantico del termine un aggettivo, *novus*, un verbo, *innovare*, e un sostantivo, *innovatio*[68], indicando, già di primo acchito, come l'innovazione possa far riferimento a caratteristiche, attività e oggetti. Sebbene la definizione reale rimandi all'innovazione in quanto oggetto, inserita cioè in un contesto concreto, l'innovazione può indicare anche un evento, uno stato o un sistema, a seconda che il campo tematico analizzato riguardi una novità di prodotto, di processo, di riorganizzazione strutturale oppure la descrizione delle organizzazioni o società intese come luogo della scoperta, della produzione, della ripartizione e dell'affermazione delle innovazioni. Emerge così il livello contestuale, che richiede proprio la definizione della funzione tematica dell'innovazione, ovvero una sua contestualizzazione rispetto a un determinato ambiente, un argomento, un soggetto. Il passaggio alla formulazione dell'innovazione in quanto tema[69] significa, quindi, declinarne le differenti dimensioni. La prima dimensione del tema innovazione è quella oggettuale, cioè reale, che consente di definire l'innovazione come prodotto, come evento e come processo – ragionare sulla creazione di un prodotto innovativo richiede la necessità di una

[66] Sabbadin, E., "Disegnare l'innovazione. Le traiettorie del marketing", *op.cit.*, 2006, pp. 129-186.
[67] Hilgenberg, K., "Conoscere l'innovazione. L'anatomia di un tema", in Epifani, S. *et alii* (a cura di), *Decidere l'innovazione. Come misurare, valutare e scegliere il cambiamento*, Sperling & Kupfer Editori, Piacenza, 2006, pp. 7-38.
[68] La definizione tratta dal vocabolario Treccani rimanda al termine latino *innovatio*, ovvero l'atto, l'opera di innovare, cioè di introdurre nuovi sistemi, nuovi ordinamenti, nuovi metodi di produzione. Si veda Enciclopedia Treccani online, *Innovazione*, http://www.treccani.it/vocabolario/innovazione/.
[69] Hilgenberg ("Conoscere l'innovazione…", *op. cit.*, 2006) distingue le caratteristiche di un tema ponendole su un livello linguistico – tema come argomento oggetto d'esame – cognitivo – ovvero una differenziazione del concetto mediante l'introduzione di categorie – e sociale.

temporalizzazione che, di per sé, è una questione processuale – come stato e come struttura e, infine, come sistema e come organizzazione[70].

Dopo la definizione oggettuale o fisica del tema innovazione, viene l'esplorazione della dimensione cognitiva – più contestuale – che è un tentativo di risposta a una domanda riguardante l'origine di un prodotto, un processo, una struttura o un sistema innovativo. A queste si aggiungono la dimensione comportamentale dell'innovazione, ancora contestuale, che fornisce le categorie – azione, decisione, motivazione e *performance* – per descrivere e determinare quali siano le modalità e i fattori di successo che costituiscono la generazione di un prodotto o un processo innovativo, e la dimensione comunicativa, che nasce dai recenti progressi nell'ambito del *knowledge management*.

La dimensione cognitiva è la sede delle differenziazioni finalizzate a strutturare il tema dell'innovazione e che si articolano in differenze qualitative, quantitative, modali e relazionali:

- la differenza qualitativa si esprime attraverso la distinzione tra innovazioni di tipo *disruptive* e di tipo *sustaining*, che riguardano l'impatto che l'innovazione genera sul mercato e sul business;
- la differenza quantitativa distingue le innovazioni radicali, ossia che mutano completamente i principi di concezione dell'oggetto, da quelle incrementali, che rappresentano un'evoluzione dell'oggetto rispetto al passato ma che conserva ancora i suoi caratteri di riconoscibilità;
- la differenza modale suddivide le innovazione a seconda che siano di prodotto[71], di processo, di marketing[72] o di organizzazione, differenziazione che si trova anche nell'Oslo Manual[73];
- la differenza relazionale, che definisce l'innovazione in base ai suoi rapporti con l'impresa o con il mercato.

Già Schumpeter aveva operato una distinzione simile, individuando cinque tipologie d'innovazione: produzione di un nuovo bene (innovazione di prodotto), introduzione di un nuovo metodo di produzione (innovazione di processo), apertura di un nuovo mercato (innovazione commerciale), sfruttamento di una nuova fonte di materie prime (innovazione di approvvigionamento) e riorganizzazione della struttura dell'offerta di un settore industriale (innovazione di mercato)[74].

[70] *Ibidem*.

[71] In letteratura è possibile trovare diverse definizioni di innovazione di prodotto. Vi sono le *breakthrough innovation*, capaci di creare un mercato completamente nuovo arrivando a influenzare il comportamento degli utenti, le *line extension*, ovvero prodotti nuovi per l'impresa ma non per il mercato e infine, le innovazioni dette di *product enhancement*, ovvero i miglioramenti sostanziali di un prodotto. Tali definizioni non si escludono a vicenda, tant'è che la prima e l'ultima coincidono rispettivamente con le innovazioni radicali e incrementali. Si veda Epifani, S., "Misurare l'innovazione. La necessità di un confronto", in Epifani, S. *et alii* (a cura di), *Decidere l'innovazione. Come misurare, valutare e scegliere il cambiamento*, Sperling & Kupfer Editori, Piacenza, 2006, pp. 39-84.

[72] Sabbadin (Sabbadin, E., "Disegnare l'innovazione. Le traiettorie del marketing", *op. cit.*, 2006, pp. 129-186.) inserisce tra le innovazioni di marketing anche quelle di design, cioè riguardanti una modificazione nell'aspetto estetico e nella forma di un prodotto che, senza intervenire sugli elementi funzionali e sulle caratteristiche d'uso, consente ugualmente di rivedere le strategie di vendita. Seppur faccia un uso discutibile del termine design, tale definizione è utile per comprendere cosa si intenda per innovazione di marketing, che può includere, inoltre, anche eventuali cambiamenti del *packaging* o del *product placement*.

[73] OECD-Eurostat, *Oslo Manual. Guidelines for collecting and interpreting Innovation data*, 2005. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/OSLO?inheritRedirect=true.

[74] Schumpeter, J.A., "Teoria dello sviluppo…", *op. cit.*, 2013.

DESIGN DRIVEN INNOVATION

ARTEMIDE
Yang

CARLOTTA DE BEVILACQUA

La serie Metamorfosi è stata lanciata da Artemide nel 1998, in seguito al progetto "Human Light", basato sull'idea che il fruitore debba avere la possibilità di modificare i propri scenari. Metamorfosi trasforma la lampada da un oggetto illuminate a un sistema in grado di migliorare la qualità dell'ambiente.

artemide.com



KARTELL
Bookwork

RON ARAD

Lanciata nel 1994, Bookworm trasforma un comune elemento d'arredo come una libreria in un oggetto d'arte da personalizzare con le proprie letture .

kartell.com



ALESSI
Family Follows Fiction

STEFANO GIOVANNONI

Lanciata nel 1991, è famiglia di oggetti in plastica giocosi e colorati, antropomorfi e metaforici.

alessi.com



MARTINELLI LUCE
Cobra

ELIO MARTINELLI

«Disegnata nel 1968 da Elio Martinelli, il Cobra rappresenta uno dei primi apparecchi illuminanti in resina prodotti con un particolare sistema di stampaggio. La lampada è caratterizzata da una linea semplice e da una forma geometrica inscritta in una sfera, ma con la rotazione del braccio il riflettore assume una posizione che richiama la testa di un cobra pronto allo scatto».

martinelliluce.it



In campo edilizio, le innovazioni di processo si sviluppano in vari ambiti e attengono generalmente all'ottimizzazione di tempi e costi, a nuove modalità di organizzazione della produzione, della progettazione e del cantiere. Invece, le innovazioni di prodotto riguardano nuovi materiali o nuove applicazioni per i materiali tradizionali[75], nuove attrezzature di cantiere finalizzate alla realizzazione di prodotti *in situ* e nuovi componenti e sistemi. Essa è frutto di ricerche svolte in vari campi, dall'analisi dei prodotti *competitor* e delle esigenze degli utilizzatori attraverso ricerche di mercato, fino all'utilizzo efficace delle risorse disponibili o alla ridefinizione di varie funzioni. Sia le innovazioni di processo che di prodotto sono tuttavia interagenti con le innovazioni di mercato, che si attuano attraverso azioni di acquisizione, fidelizzazione e coinvolgimento degli utilizzatori di prodotti e tecnologie, come meglio spiegato nel paragrafo precedente.

Nicola Sinopoli fornisce un'ulteriore categorizzazione dell'innovazione, distinguendone tre tipi: le fondamentali, ovvero quelle in grado di soddisfare esigenze fino a quel momento insoddisfatte e che, per tale motivo, hanno quasi sempre le caratteristiche di originalità tipiche delle invenzioni; le adattive, frutto di un trasferimento di elementi innovativi da un settore a un altro, con le opportune modificazioni e trasformazioni del caso; le funzionali, dettate dalla naturale evoluzione degli oggetti materiali o immateriali.

Infine, ancora Sinopoli[76] definisce le innovazioni "invisibili", ovvero tutti i prodotti o i processi che forniscono una prestazione importante ma non strettamente necessaria, come quelle riguardanti la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili che, fino a qualche anno fa, quando non vi era particolare sensibilità verso la questione ambientale, venivano difficilmente applicate senza un'imposizione o incentivazione di tipo normativo[77].

Infine, un'ulteriore distinzione, che si sovrappone a quelle precedenti, deriva dalla relazione con il design, articolata sulla base dei tre possibili punti di partenza del processo creativo, ovvero l'individuazione di una nuova forma o nuovo linguaggio, l'individuazione di un nuovo bisogno da soddisfare e l'applicazione di una nuova tecnologia. Ne derivano diverse tipologie d'innovazione: estetica, cioè relativa alla riconoscibilità del prodotto; tipologica, con riferimento a caratteri di distinguibilità rispetto all'architettura dominante; funzionale e d'uso; di senso, cioè legata ad aspetti emozionali e percettivi di prodotto[78]. Ciò significa che le imprese, lavorando, attraverso la collaborazione con un designer, sia sulla dimensione tecnologica del prodotto che sulla sua connotazione immateriale, introducono innovazioni processuali sia sul versante *soft* (gestione e organizzazione) che su quello *hard* (produzione), intervenendo, inoltre, anche

[75] In merito al valore delle tecniche di messa in opera innovative dei materiali tradizionali, Tonino Paris descrive la possibilità di sfruttare «lo spessore evocativo» e la «dignità architettonica» in essi sedimentati, lasciando filtrare, proprio attraverso interventi innovatori, «la risonanza della [loro] identità all'interno del processo compositivo e tecnico-costruttivo a vantaggio di altri materiali», anche nuovi. Si veda Paris, T., "Cultura del progetto e cultura della tecnica", in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), *L'architetto tra tecnologia e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994, pag. 89.

[76] Si veda Sinopoli, N., "L'innovazione tecnologica in edilizia: una premessa", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2001, pp. 7-20.

[77] Ciò risulta particolarmente vero nel caso delle tecnologie finalizzate contenimento dei consumi energetici, al miglioramento del comfort interno e, in generale, all'ottimizzazione delle prestazioni ambientali. Le innovazioni con questi obiettivi sono prevalentemente di prodotto, specificate sui materiali e sui componenti. Cfr. Campioli, A., "Qualità dell'architettura: innovazione, ricerca tecnologica e progetto", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 1, 2011, pp. 62-69.

[78] Casoni, G. e Fanzini, D., *I luoghi dell'innovazione…*, *op. cit.*, 2011, pp. 20-21.

sugli aspetti legati al marketing. Quest'ultimo, infatti, avrà gli strumenti per far leva sulle «forme inconsuete e originali di significato e senso del prodotto»[79] che si creano proprio dalla «ricombinazione in modi sempre nuovi e inediti di tecnologie esistenti»[80].

È bene chiarire che la tassonomia fin qui descritta suggerisce una sorta di polarizzazione dei fenomeni innovativi che, tuttavia, presentano ampi margini di sovrapposizione. Ciò è particolarmente vero per il settore edilizio dove tanto la compresenza di diversi settori industriali, da quello manifatturiero a quello dei servizi, quanto l'articolazione delle diverse fasi del processo di progettazione e produzione, fanno sì che l'innovazione si presenti con un carattere molteplice[81].

Tuttavia, a dispetto dell'abbondanza di categorizzazioni, il settore delle costruzioni si caratterizza per una secolare ritrosia nei confronti del trasferimento o dell'ingresso tecnologico da altri comparti produttivi, spesso lontani dai saperi delle maestranze edili, rendendo particolarmente ristretti i margini per lo sviluppo di innovazioni, soprattutto se *disruptive*. Vi è anche una questione di carattere culturale, particolarmente evidente nel caso in cui l'innovazione si confronta con il tema della casa che, in quanto «"oggetto della memoria", carico di elementi simbolici e culturali […], tende a difendersi dall'innovazione, assorbendola, nascondendola nel profondo dei suoi muri, trasformando terminali delle nuove attrezzature in oggetti di arredo»[82].

La ricerca specialistica, assieme ad alcune realtà produttive, ha cercato, tra gli anni Settanta e Ottanta, di promuovere una trasformazione del settore verso logiche industriali, attribuendo alla sperimentazione di nuove tecnologie un ruolo di traino verso un'evoluzione qualitativa ed economica. L'esperienza, che non ha dato i frutti attesi, si è scontrata con una rapida trasformazione del mercato, che proprio in quegli anni favoriva quelle imprese in grado di offrire produzioni più agili di semi-componenti e semilavorati, realizzati in serie più grandi e con un ridotto grado di predeterminazione formale, funzionale e di assemblaggio. Si è arrivati a quella che è stata definita micro-industrializzazione edilizia, con elementi a catalogo, generalmente di piccole dimensioni, facilmente integrabili e versatili. Poi, verso la fine degli anni Ottanta, si è affermata un'idea di tecnologia diffusa, contrapposta a una più enfatizzata che aveva portato, addirittura, a parlare di «morfologia della tecnica»[83].

Da quel momento, il quadro della produzione industriale per l'edilizia ha visto un aumento di prodotti a bassa complessità, la cui diversificazione ha determinato una ricchezza di opzioni tecnologiche, con una progressiva specializzazione e un innalzamento del contenuto prestazionale[84] con una predilezione per l'innovazione alla piccola scala, che risulta sempre vantaggiosa, in quanto consente alle aziende di acquisire una maggiore flessibilità con cicli produttivi brevi e un'elevata adattabilità alle caratteristiche del mercato.

In questo quadro complesso, si può dire che un processo o un prodotto innovativo vedono le ragioni del proprio successo in una serie di caratteristiche che, ancora con Sinopoli[85], vanno

[79] *Ivi*, pag. 20.

[80] *Ibidem*.

[81] Si veda Campioli, A., "Qualità dell'architettura…", *op. cit.*, 2011.

[82] Sinopoli, N., "L'innovazione tecnologica…", *op. cit.*, 2001.

[83] Losasso, M., Percorsi dell'innovazione..., *op. cit.*, 2010, p. 39.

[84] *Ivi*, p. 40.

[85] Sinopoli, N., "L'innovazione tecnologica…", *op. cit.*, 2001.

dalla capacità di innovare senza modificare troppo le prassi correnti, alla evidente dimostrazione di un vantaggio rispetto ai prodotti già esistenti, fino ad arrivare alla facilità di impiego, a un abbassamento dei costi o dei rischi di adozione, a una semplificazione delle lavorazioni in opera e del montaggio, nonché a una limitata dotazione di funzioni chiaramente identificabili. Tuttavia, la qualità intrinseca del prodotto o del processo non è sufficiente, in quanto ulteriori fattori che influenzano la riuscita di un'innovazione vanno ricercati anche nella sfera economica e politica. Mentre appaiono evidenti le implicazioni della sfera economica, essendo l'innovazione sempre finalizzata a una utilizzazione commerciale delle invenzioni o delle sperimentazioni, quelle politiche richiamano la necessità di definire condizioni favorevoli e incentivi per l'innesco dei processi innovativi[86], anche per rendere sempre conveniente nel tempo un investimento di questo tipo. Infatti, spesso avviene che, in seguito allo sviluppo di nuovi prodotti e di nuove tecnologie, all'innovazione radicale subentrino, per effetto dell'esperienza produttiva e degli investimenti in ricerca e sviluppo, delle innovazioni incrementali che, però, a un certo punto, esautorano il potenziale di prestazioni possibili. L'innovazione è dunque giunta alla sua fase di declino[87] che condurrà, inesorabilmente, a un arresto nella corsa dell'impresa di riferimento che, potrebbe essere riluttante nell'avviare una nuova fase di ricerca e sviluppo salvo, appunto, la presenza di opportune forme di incentivazione. È anche vero che limitarsi solo alla produzione di beni *commodity*, seppur meno rischioso, non è sempre conveniente in quanto le tecnologie utilizzate per i prodotti di base sono comuni e, di conseguenza ben imitabili. La capacità innovativa di un'azienda risiede proprio nella propensione a presentare un'offerta differenziata, innovativa e di base, ricercando percepibilità in un mercato in cui esistono numerosi prodotti similari, caratterizzati ciascuno da modesti incrementi o differenziazioni di prestazione.

Oggi le parole d'ordine sono dematerializzazione e flessibilità, fulcro del passaggio da una produzione di massa a una basata su prodotti più indeterminati e progettabili su misura, anche per quanto riguarda le variazioni relative a elementi costitutivi, aspetto e prestazioni. In particolare, la progressiva dematerializzazione dei processi e dei prodotti conferisce, oltre che un innalzamento del livello prestazionale, anche un contributo a una maggiore sostenibilità, prevedendo una riduzione della materia impiegata e uno slittamento verso un'economia dei servizi. Le nuove strategia ambientali si concentrano infatti sugli *input*, abbandonando le vecchie politiche basate su un approccio *end-of-the-pipe* per concentrarsi sulle fasi iniziali del processo produttivo, a partire dall'approvvigionamento delle risorse.

L'innovazione tecnologica opera quindi, su due crinali: sulla riduzione del grado di predeterminazione, sull'innalzamento del livello di dematerializzazione e di combinazione fra materiali, arrivando fino alla scala molecolare e ampliando in maniera esponenziale sia le potenzialità che i rischi connessi con l'uso di materiali più avanzati e *smart* – cioè in grado di adattare le proprie caratteristiche in rispondenza agli stimoli esterni – e sull'informatizzazione e sulla flessibilità delle attività produttive in fabbrica o in cantiere, nonché, negli ultimissimi sviluppi, su sistemi provenienti dal modello Industria 4.0[88].

[86] Losasso, M., Percorsi dell'innovazione..., *op. cit.*, 2010.
[87] È possibile individuare diverse fasi del ciclo di vita di un'innovazione, evidenziate dal sua posizionamento nel marcato: fase embrionale o di introduzione, crescita o fase di sviluppo, fase di *shake out*, in cui un'alta percentuale di imprese concorrenti abbandona il settore in un periodo di tempo relativamente breve, e, infine, fase di maturità e invecchiamento. *Ivi*, pag. 48.
[88] Per ulteriori approfondimenti si veda il Capitolo 2.

I processi digitali di concezione e produzione iniziano a permeare il settore edilizio, in stretta correlazione con i nuovi materiali introdotti sul mercato. L'infinità variabilità e l'articolazione formale concesse ai progettisti richiedono ai produttori lo stesso sforzo impiegato per la produzione di elementi modulari, ripetitivi e simmetrici. Ovviamente, si parla di sistemi *knowledge based*, per cui non basta più la cultura manualistica convenzionale, ma occorre mettere in gioco capacità critiche di riflessione per sostenere le motivazioni delle scelte tecnologiche in architettura, partendo dal presupposto che le capacità progettuali possano pienamente svilupparsi solo in termini di dialogo con il mondo della produzione. Il modello lineare di processo edilizio viene quindi sostituito da uno di tipo sinergico, caratterizzato dalla sovrapposizione dei diversi fattori e fasi della produzione, in perfetta coerenza con gli aspetti paradigmatici della realtà contemporanea quali, il dispiegamento di competenze e apporti diversificati negli attuali modi e strategie di approccio ai mercati, la rapidità con cui insorgono obsolescenze e modificazioni in molteplici tipologie di offerta e in sistemi esigenziali già estremamente frammentati e personalizzati, le mutevoli aspettative indotte dallo sviluppo tecnico, dalle nuove politiche di impresa, dalle nuove forme concorrenzialità inter-imprenditoriale[89].

«Ne conseguono nuove determinazioni nelle stesse problematiche del progetto-costruzione: problematiche che ne interiorizzano le potenti dinamiche – proprie di fenomenologie recenti e ormai strutturali (instabilità, turbolenza e diversificazione nei mercati, apparati tecnico-procedurali in continua evoluzione) – fino a rendere tendenzialmente obsoleto lo stesso dualismo processo-prodotto, o il tradizionale dualismo innovazione di processo, innovazione di prodotto»[90].

In conclusione, dunque, l'intero processo dell'innovazione deve essere sì concepito come una attività di ricerca per prodotti o processi con nuove o superiori combinazioni o caratteristiche, ma con la consapevolezza del ruolo fondamentale ricoperto dalle forze economiche, che riflettono tanto le peculiarità di costo e di forniture delle risorse, che lo stato presente della conoscenza tecnologica e dell'apparato esigenziale che determina la domanda. Coerentemente, il rapporto tecnologia-progetto architettonico amplia i propri orizzonti e si arricchisce di nuovi spunti, offrendo al progetto stesso le potenzialità tecnologiche dell'innovazione come elementi direttamente rapportabili alla creatività, all'organizzazione, alla forma, al linguaggio e alle prestazioni, come vedremo nel prossimo paragrafo.

[89] Si veda Giallocosta, G., *Riflessioni sull'innovazione…*, *op. cit.*, 2006, pag. 48.
[90] *Ibidem*.



Scala flottante in Ductal® realizzata da il Cantiere.
Zaha Hadid, *Floating Staircase*, Londra, 2012. Immagine da zaha-hadid.com.

1.4 Innovazione tecnologica e progetto architettonico

La relazione tra innovazione tecnologica e progetto si esplica, oggi, all'interno dei tre temi – toccati nei paragrafi precedenti – con cui è chiamata a confrontarsi l'intera disciplina della Tecnologia dell'Architettura[91]. Il primo tema, «progetto, sostenibilità e circolarità dei processi»[92], che come anticipato richiede una riscrittura tanto delle conoscenze che del progetto in tutte le sue fasi, delinea uno scenario che può dirsi innovativo per due ragioni: da un lato le scelte progettuali devono guardare all'intero ciclo di vita di un manufatto, dall'altro la circolarità dei processi impone un contesto industriale di riferimento più ampio, in cui è prevista la collaborazione tra diversi settori. Ciò finisce per ampliare le competenze della cultura tecnologica che «non riguarda più soltanto la consapevolezza delle caratteristiche dei materiali, delle tecniche costruttive e organizzative che consentono di realizzare un'idea, ma deve comprendere quegli strumenti di simulazione e di valutazione che permettano di prevedere e misurare le prestazioni di una soluzione progettuale durante l'intero ciclo di vita»[93]. In questo senso, si può dire che il progetto è investito da un'innovazione processuale che ne amplia notevolmente gli orizzonti, occupandosi di aspetti immateriali che vanno ben oltre la realizzazione del manufatto.

Il secondo tema, «progetto, digitalizzazione e industria 4.0»[94], introduce, con l'impatto della rete, l'automazione e la digitalizzazione dei processi progettuali e produttivi, i sistemi *design-to-fabrication*, la possibilità di analizzare e gestire grandi quantità di *data*, solo per citarne alcuni, la necessità di un adeguamento rapido – alle volte troppo – del settore edilizio affinché possa essere efficiente e competitivo sul mercato globale. In questo caso, il progetto dialoga con innovazioni sia di prodotto che di processo, che trasformano radicalmente gli approcci, confrontandosi non solo con la pluralità delle offerte provenienti dallo sviluppo tecnologico, ma anche con le loro sempre più complesse interazioni[95]. Infatti, «la digitalizzazione del settore, già interpretata come l'espressione più tangibile della quarta rivoluzione industriale è destinata

[91] Campioli, A., "Il carattere della cultura tecnologica e la responsabilità del progetto", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, 2017, pp. 27-32.
[92] *Ivi*, pag. 29.
[93] *Ivi*, pp. 29-30.
[94] *Ivi*, pag. 30.
[95] Si veda Russo Ermolli, S. (a cura di), *The Changing Architect. Innovazione tecnologica e modellazione informativa per l'efficienza dei processi*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2018.

a condizionare radicalmente i processi progettuali, tanto nei contenuti quanto nei metodi di elaborazione»[96]. Seppur accogliendo gli stimoli creativi che provengono dall'innovazione, occorre ricordare che è, tuttavia, «la coscienza dei problemi che trasforma queste competenze in progettualità perché l'interesse scientifico non si riduca alla formalizzazione delle procedure»[97]. Infatti, nonostante le nuove e apparentemente infinite possibilità offerte dalla tecnologia, appartiene, in ogni caso, al progettista il potere di definire i parametri che consentono di operare tra di esse una scelta che sia culturalmente e socialmente legittima[98].

Il terzo tema, «progetto, incertezza e resilienza»[99], richiede non «tanto di affrontare l'incertezza di tipo aleatorio, […] quanto piuttosto di gestire l'incertezza di tipo epistemico, dovuta all'impossibilità di creare modelli della realtà sufficientemente e adeguatamente definiti a causa dell'incompletezza della nostra conoscenza»[100]. Progettare in epoca di "crisi" e in uno stato di "scarsità di risorse" e di "emergenza", richiede infatti la sperimentazione di modi innovativi per rispondere ai nuovi contesti e alle nuove condizioni dell'abitare[101].

L'incertezza, tuttavia, risiede da sempre in alcuni modi di concepire il progetto stesso, vissuto con «la consapevolezza che il punto di arrivo sarà sempre un punto faticosamente strappato alle circostanze e non rappresenterà mai un'acquisizione definitiva […], che il risultato di volta in volta raggiunto rappresenti comunque un qualcosa di transitorio, di non definitivo, di ulteriormente modificabile»[102], quasi resiliente, si potrebbe dire.

L'incertezza, inoltre, domina anche i processi innovativi, come ben notato da Rosenberg e Kline[103] che, già nel 1986, ne individuavano i caratteri di imprevedibile variabilità. Seppur operanti all'interno dei temi così definiti, progetto e innovazione non sempre trovano un percorso comune di crescita. Infatti, mentre, da un lato, alcuni aspetti ontologici presenti in entrambi ne determinano una facile sincronia – il carattere di trasformazione, l'importanza del pensiero inventivo e un processo di sviluppo che si basa sulla ricerca – dall'altro, vivono uno scontro che si articola sia su un mancato allineamento temporale che all'interno dell'annoso dibattito tra pensiero teorico e pensiero tecnico.

Rispetto alla prima questione, se si riconosce al progetto un carattere di trasformazione e prefigurazione dell'ambiente costruito[104], la relazione con il concetto di innovazione è immediata, a patto che, con Guido Nardi[105], se ne dia una definizione doppia, ma sempre legata

[96] Del Nord, R., "Potenzialità dell'area tecnologica in tema di ricerca progettuale", in Perriccioli, M. (a cura di), *Pensiero tecnico e cultura del progetto. Riflessioni sulla ricerca tecnologica in architettura,* FrancoAngeli, Milano, 2016.
[97] Truppi, C., "La dimensione tecnologica del progetto", in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), *L'architetto tra tecnologia e progetto,* FrancoAngeli, Milano, 1994, pag. 29.
[98] *Ivi*, pag. 30.
[99] Campioli, A., "Il carattere della cultura tecnologica e la responsabilità del progetto", *op. cit.*, 2017, pag. 30.
[100] *Ibidem.*
[101] Cfr. Tucci, F., "Requisiti, approcci, visioni, nelle prospettive di sviluppo della Progettazione Tecnologica", in Lauria, M., Mussinelli, E. e Tucci, F. (a cura di), *La Produzione del Progetto*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2019, pag. 35.
[102] Guazzo, G., "La 'ricerca paziente' dell'architettura", in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), L*'architetto tra tecnologia e progetto, FrancoAngeli*, Milano, 1994, pag. 55.
[103] Kline, S. J. e Rosenberg, N., "An overview of innovation", *op. cit.*, 1986.
[104] «Nel suo senso più ampio e comprensivo progetto significa anticipazione. Un'anticipazione che ha in sé la previsione di ciò che viene anticipato. Il progetto […] implica ovviamente il riferimento a un futuro. Si basa cioè su una prefigurazione o previsione di possibilità». Si veda Calvo, F., "Progetto", in *Enciclopedia,* vol. 11, Einaudi, Torino, 1980, pag. 26.
[105] Nardi, G., "Innovazione. Sue caratteristiche nell'architettura", in Zanelli, A. (a cura di), *Ricerche di tecnologia dell'architettura*,

al manifestarsi di un «mutamento». L'innovazione è o «creazione *ex nihilo*, il venire alla luce di un fenomeno prima sconosciuto» oppure è un mutamento dovuto allo sviluppo di procedimenti già esistenti[106].

Dunque, la presenza di un carattere trasformativo consente di affermare che il progetto, in quanto tale, produce sempre innovazione. Ciò avviene o direttamente, come nel caso, ancora con Nardi, di espressioni paradigmatiche – qui «l'innovazione è allo stesso tempo mezzo e finalità del progetto; l'occasione particolare provoca e promuove la ricerca e l'applicazione di interventi innovativi che trovano nell'eccezionalità dell'evento la propria giustificazione»[107] – oppure, indirettamente e più frequentemente, per accumulo di conoscenza, grazie ad un costante «lavorio innovativo»[108].

Molto più complesso e articolato è, invece, il ruolo del pensiero inventivo sia per progetto e innovazione in quanto tali che per le loro interrelazioni.

Mentre l'innovazione ha un chiaro carattere di dipendenza dall'invenzione, di cui è, tra le varie definizioni, un'applicazione con caratteri di ripetibilità, il progetto, seppure considerabile come una serie di atti inventivi, si inserisce all'interno di un *corpus* di norme, aprendo così la questione non semplice dell'invenzione secondo regole[109].

Per dipanare la faccenda, bisogna mettere in crisi alcune nozioni diffuse sull'invenzione, tra cui quella relativa alla sua connessione con le scoperte a carattere accidentale[110].

La scoperta per *serendipity*, ovvero per caso e per sagacia, è stata ampiamente sdoganata[111] dall'idea che, in realtà, anche l'accidente si presenta solo alle menti in grado di coglierlo. La sagacia, più che il caso, risulta fondamentale, in quanto implica una mente pronta e libera, in grado di essere penetrata dall'esperienza: «di fronte alla scoperta accidentale, solo la mente libera può essere sagace, e accettare il dato inatteso, l'emozione della sorpresa, lo *shock* della novità, e poi riportare il dato dall'inatteso allo sforzo cosciente e metterlo a profitto»[112].

Libreria Clup, Milano, 2000, pp. 20-24
[106] Nardi, G., "Innovazione. Sue caratteristiche nell'architettura", *op. cit.*, 2000, pp. 20-24. La prima definizione riporta alla mente quanto afferma Brian Arthur riguardo alla tecnologia come invenzione. Partendo dal presupposto che una tecnologia radicalmente nuova si basa sullo sfruttamento di un nuovo principio, ovvero la modalità di "utilizzo" di un fenomeno naturale, un'innovazione radicale non può che derivare dalla scoperta di un nuovo fenomeno o dalla diversa applicazione di uno già conosciuto. Le innovazioni incrementali, invece, secondo Arthur, rientrano nel lavorio della cosiddetta "ingegneria standard", che realizza progetti, apparecchi e attua metodi a partire da principi conosciuti e accettati. Tale processo è la combinazione di componenti appropriate per attuare una funzionalità atta a esprimere un'intenzione progettuale. La ricerca della soluzione determina un accumulo di conoscenza che, a sua volta, pone le basi per generare innovazione (Arthur, B., *La natura della tecnologia…*, *op. cit.*, 2011).
[107] Nardi, G., "Innovazione…", *op. cit.*, pp. 20-24.
[108] «Bisogna ammettere che, nell'ambito della realizzabilità progettuale, è forse più corretto parlare di evoluzione delle tecniche, piuttosto che di vera innovazione. Come chiaramente deducibile dalla teoria e dalla storia delle tecnologie edilizie, ci si confronta in genere con un lavorio innovativo operato su materiali e su tecniche noti, dal segno impercettibile, seppur sicuro e costante». Sebbene Nardi dichiari che non si tratti di "vera innovazione", quella che descrive successivamente assume le sembianze di una vera a propria innovazione incrementale, sia di processo che di prodotto. *Ibidem.*
[109] Nardi, G., "Dialogo sul pensiero inventivo in architettura", in Boeri, R. *et alii* (a cura di), *Il pensiero inventivo*, Edizioni Unicopli, 1988, pag. 259.
[110] Usher è stato uno dei primi a liberare l'innovazione dal peso dell'invenzione geniale. A tal proposito si veda il paragrafo 1.1.
[111] Si veda il significativo saggio di Boeri, R. e Vignolo, L.A., "L'emozione dell'inventiva", in Boeri, R. *et alii* (a cura di), *Il pensiero inventivo*, Edizioni Unicopli, Milano, 1988, pp. 152-171.
[112] *Ivi*, pag. 161. A testimonianza di ciò, Vignolo riporta la scoperta del *transfert* e del *controtransfert* di Freud che, in realtà era stato anticipato da Breuer. Questi infatti, dopo aver interrotto con successo la cura di una paziente isterica, era rimasto sconvolto

Esiste, inoltre, una sorta di «preconscio»[113] che raccoglie e accumula tutte le conoscenze che, mantenute fino a quel momento non coscienti, si rivelano all'occorrenza, stimolando così la scoperta[114].

Vi è dunque nell'intero processo inventivo, sia un dato irrazionale, che viene dalla volontà di conoscenza, che uno razionale di riconduzione dell'inatteso a una logica sistematica di elaborazione del dato recepito.

Questa condizione duplice è perfettamente riscontrabile anche nel progetto, nel momento in cui l'architetto «solo con il suo foglio bianco, […] il suo magazzino di memorie, le proprie conoscenze della storia, dei materiali e delle loro caratteristiche» ha solo «la certezza di tre verità: il tema del progetto, il luogo dell'intervento, la dimensione del suo pensiero pratico e il suo mestiere. […] A partire dal tema e dal luogo si sviluppa l'affaticante conflitto a tre livelli, che proseguirà poi durante tutto il processo creativo […]. Un conflitto che trova la sua risoluzione nel graduale processo di conoscenza, per costruzione logica sempre uguale a se stesso: un nucleo emozionale che sfugge all'analisi ma che si lega al tema e al luogo e che crescerà con il crescere della conoscenza del tema e del luogo»[115]. Ancora più chiaro è quanto scrive Nardi a proposito del tentativo di risalire all'euristica del progetto, descrivendo le dinamiche di un percorso dominato da «elementi spesso inconsci, difficilmente oggettivabili in una serie di passaggi logici e determinati, […] costellati di ripensamenti, revisioni e riorganizzazioni radicali»[116]. Vi è, però, un assunto di base e cioè che all'origine del cammino progettuale vi è la conoscenza e la capacità interpretativa del progettista[117].

Subentra così l'altro preconcetto errato sull'invenzione, relativo al suo presunto carattere di eccezionalità – il famoso "colpo di genio" – per sua natura contrapposto all'intelligenza logico-deduttiva e al normale pensiero induttivo. In tal modo, tutto il lavoro preparatorio all'invenzione risulta trascurato, così come, troppo spesso, nell'invenzione architettonica tutti i gesti tecnici o di apprendimento culturale che precedono l'impulso creativo vengono dimenticati o sviliti[118] quando poi, come anticipato, si depositano in realtà nel "preconscio" in attesa di venir sollecitati.

Sfatati così i due miti sull'invenzione – la scoperta per *serendipity* e il "colpo di genio" – e appurato il legame indissolubile con la conoscenza e con un certo tipo di predisposizione a essa, si può affermare che in architettura così come in altre discipline, l'inventiva avviene, in realtà, sempre secondo regole, in quanto essa è necessariamente legata a materiali e tecniche, funzioni e spazialità, riferimenti culturali e innovazioni, tutti rientranti in una prospettiva

dal riproporsi di un'ulteriore e gravissima crisi di quest'ultima, rivelatasi poi dovuta al fatto che la donna si fosse innamorata del medico. Nonostante Breuer avesse capito tutto, non ebbe il coraggio, anzi la sagacia, di ammettere la sua scoperta, in quanto ne era coinvolto in prima persona: «in sostanza il caso gli si era presentato, ma Breuer probabilmente non aveva la sagacia, che comporta anche coraggio», *ivi*, pag. 160.

[113] *Ivi*, pag. 165.

[114] Risulta particolarmente significativo che, l'inventare, nel mondo greco, non rimanda alla creazione del nuovo, quanto al portare alla luce le potenzialità già contenute nelle cose.

[115] Paris, T., "Cultura del progetto e cultura della tecnica", *op. cit.*, 1994, pp. 79-80.

[116] Nardi, G., "Euristica e Architettura", in Bonfantini, M. *et alii* (a cura di), *La vita inventiva. Il Club Psòmega per Renato Boeri*, Edizioni scientifiche italiana, Milano, 1998, pp. 114-126.

[117] *Ibidem.*

[118] Nardi, G., "Dialogo sul pensiero inventivo in architettura", *op. cit.*, 1988, pag. 260.

euristica che consente di sfruttare e potenziare al massimo «i rapporti sinergici tra i vari micro-procedimenti progettuali, consentendo nello stesso tempo di scartare già nella fase ideativa le soluzioni meno corrette, coerenti e produttive»[119].

In architettura, infatti, l'inventiva viene attivata, e quindi vincolata, da una serie di domande, che a sua volta avviano una serie di meccanismi di combinazione e scelta tra tutti gli elementi coinvolti. «Non si tratta né di un'operazione arbitraria, né di un'operazione esclusivamente individuale, in quanto il mondo socio-culturale si rappresenta sotto molteplici aspetti come oggetto, stimolo e bagaglio dell'invenzione personale. Non si tratta peraltro di un procedimento meccanico perché la sensibilità, la cultura e le competenze tecniche del progettista sono i canali attraverso i quali si attua la comunicazione tra i vari elementi in gioco e sta proprio al progettista mediare tra i vari stimoli e le varie esigenze»[120].

Il riferimento all'attivazione dell'inventiva per mezzo di domande, si direbbe oggi la fase di *problem setting* che anticipa e guida il progetto e che può costituire di per sé un'innovazione di tipo metodologico, coincide con il primo degli aspetti che contraddistinguono la cosiddetta «inventiva scientifica»[121], altresì manifesta «nelle risposte che vengono congetturate e che solo in seguito saranno controllate empiricamente»[122] nonché «negli esperimenti, ideati e progettati al fine di controllare le teorie»[123] e nelle interpretazioni dei risultati così ottenuti. A ben vedere, l'inventiva cosiddetta scientifica, permea l'approccio metodologico di ricerca che, come anticipato, è l'ultimo elemento di sincronia tra progetto e innovazione. In effetti, ogni realizzazione progettuale, anche quella che conduce a una innovazione, appare come un'ipotesi, ovvero come una serie di presupposizioni fondate su un nucleo centrale, che va verificato e interrogato, in perfetta analogia con la ricerca scientifica *tout court*. Tuttavia, è bene chiarire non vi è corrispondenza diretta tra progetto e suo valore di ricerca[124]. Infatti, «tale valenza è riscontrabile quando per esso si evidenziano specifiche qualificazioni in base a determinate peculiarità genetiche, a particolari sviluppi operativi, ad esemplari modalità di produzione, a evidenti ricadute culturali, sociali, economiche e ambientali»[125]. Inoltre, mentre il progetto può nascere in quanto tale e qualificarsi in un secondo momento come prodotto di ricerca scientifica, l'innovazione non è mai un prodotto di ricerca scientifica in se stessa, ma è dalla ricerca anticipata o seguita. È infatti opportuno non confondere l'invenzione con l'innovazione, che è della prima un'applicazione. Delineati così, gli elementi che accomunano progetto e innovazione, bisogna a questo punto provare a chiarire le cause che ne determinano una scarsa

[119] *Ivi*, pag. 261.

[120] *Ivi*, pag. 262.

[121] «L'inventiva scientifica consiste, in primo luogo, nel porre domande nuove e penetranti alla natura, o nel riformulare acutamente processi tradizionali». Si veda Piazza, G., "Come si inventa la scienza", in Boeri, R. *et alii* (a cura di), *Il pensiero inventivo*, Edizioni Unicopli, Milano, 1988, pag. 171.

[122] *Ivi*, pag. 174.

[123] *Ivi*, pag. 176.

[124] In generale, un progetto ha valore di ricerca quando presenta coerenza di metodo, di adeguatezza delle rappresentazione e della restituzione tecnico-descrittiva, dell'innovazione nelle sue varie declinazioni. In particolare, nell'ambito della Progettazione Tecnologica, acquista risalto la componente delle "ricerche per il progetto", cioè prodotti di ricerca diversi dal progetto tradizionalmente inteso e sviluppati in termini innovativi e originali, come ad esempio, metaprogetti, linee guida, disciplinari tecnici etc. etc. Losasso, M., "Il progetto come prodotto di ricerca scientifica", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 2, 2011, pag. 84.

[125] *Ivi*, p. 80.

accettazione da parte dei progettisti e, in più in generale, del settore delle costruzioni. In prima istanza, ciò è dovuto ad un mancato allineamento temporale che si sviluppa lungo due direttrici.

La prima, ben nota, riguarda un attaccamento a dir poco tenace alle tecniche della tradizione, oltre che a una serie di difficoltà legate all'applicabilità dell'innovazione stessa, che vanno dalla «conoscenza ed esperienza scientifica delle caratteristiche dei materiali, alla capacità della cultura costruttiva e abitativa di riferimento ad accogliere l'innovazione proposta per farne patrimonio comune; dalla disponibilità del mondo produttivo a trasferire le innovazioni scientifiche nei prodotti correnti, all'adeguamento del mercato che ne promuova la diffusione; dalla rispondenza delle innovazioni proposte alle esigenze e ai bisogni espressi, alla congruenza delle scelte tecnologiche adottate rispetto alla unitarietà complessa del progetto»[126].

Naturalmente tale situazione si è accentuata con l'affermarsi della cultura industriale. Mentre in passato la limitatezza delle risorse, la necessità di utilizzare tecniche e materiali locali così come la scarsa circolazione delle informazioni garantiva una continuità culturale nella pratica costruttiva, e quindi nell'architettura, lo scenario industriale ha stravolto l'equilibrio di questa relazione, conducendo a un declino della cultura materiale che ha minato l'esistenza, e la crescita, in particolare dell'architettura diffusa, disinnescando «la capacità di espressione culturale come manifestazione autonoma e collettiva del gruppo sociale»[127].

La nostra cultura materiale, però, non è più quella industriale tradizionale, bensì quella digitale, che non potrà che essere definita coniugando le condizioni dettate dai nuovi modi dell'abitare e del produrre, che avvengono però in un complesso spazio multidimensionale ancor più denso di fenomeni, relazioni, componenti e dispositivi[128] in continua evoluzione. Spazio e oggetti assumono, di consequenza, una componente dinamica che, purtroppo, finisce per assottigliare quella «legittimazione inconsapevole», derivante da un riferimento immediato alla cultura materiale[129]. Subentra così la seconda direttrice, che si esplica nello scontro tra i tempi lunghi della sedimentazione culturale e quelli brevi, anzi brevissimi, dell'innovazione tecnologica. Infatti, se la cultura materiale "industriale" non è né diventata reale patrimonio collettivo né, tantomeno, è riuscita a integrarsi nella nostra cultura sociale, quella "digitale", essendo immersa in una dimensione temporale caratterizzata dall'immediatezza, fa sì che la comprensione diffusa sia delle tecniche di produzione che dei modi di progettazione sia resa ancora più difficila dalla complessità dei processi e dalle specializzazioni richieste, con la conseguente determinazione di una cesura tra cultura materiale e cultura sociale. In assenza di «quel senso di reciproca appartenenza»[130] tra luogo e individuo, le innovazioni sono subìte dal progetto, piuttosto che in esso integrate. Ciò determina anche uno sconvolgimento della figura del progettista, che non riesce ad assimilare ed elaborare le novità tecnologiche, finendo dunque

[126] Nardi, G., "Innovazione…", *op. cit.*, 2000, pp. 20-24.

[127] Nardi, G., "Progettare: il declino della cultura materiale. L'architetto dimezzato", in *Costruire per abitare*, n. 44, 1986, pp. 236-243.

[128] Losasso, M., "Produrre il progetto nell'era digitale", in in Lauria, M., Mussinelli, E. e Tucci, F. (a cura di), *La Produzione del Progetto*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2019, pag. 217.

[129] Nardi, G., "La cultura dell'innovazione", *op. cit.*, 1992; Si veda anche Block, M., "Principi insediativi, cultura materiale, resilienza urbana", in Losasso, M. (a cura di), *Principi insediativi e progetto ambientale. Conoscenza e indirizzi per la valorizzazione del sistema dei vuoti del Centro Antico di Napoli*, CLEAN, Napoli, 2018, pp. 51-67.

[130] La Creta, R., "L'architetto tra tecnologia e progetto", in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), *L'architetto tra tecnologia e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994, pag. 10.

per squalificarle o ignorarle completamente oppure, al contrario, le pone al centro del progetto ma, non comprendendole, scade in meri tecnicismi[131]. Mentre nel primo caso, la mancata conoscenza delle tecniche da parte dei progettisti implica un predominio dell'ingegnerizzazione come fase intermedia tra ideazione e realizzazione, causandone uno scollamento, nel secondo, l'invenzione di forme astratte, *high-tech*, frutto dalla capacità di alcune tecnologie mistificatrici di svincolare la forma dalla sua materialità, rispondendo solo a una cieca volontà di innovazione puramente estetizzante, priva la tecnica della sua valenza culturale.

Dinanzi all'inoppugnabilità del dato e alla potenza delle tecnologie, è purtroppo semplice dimenticare che il sentire comune dell'umanità resta «inemendabile nella verifica dei risultati prodotti da qualsiasi sperimentazione»[132], riportando il costruito sempre all'interno di un «discorso tra uomini»[133].

Il problema dell'innovazione tecnologica, finisce per inserirsi, quindi, in un conflitto più ampio e serrato tra cultura e tecnica, tra teoria e prassi[134].

Nella contemporaneità l'antico rapporto tra teoria e prassi – ove il peso della dimensione poietica impediva un corretto esplicarsi dell'azione tecnica in assenza di un forte fondamento teorico – si ribalta e la prassi, diventa "fare esecutivo", non finalizzato e privo di senso, perdendo così lo «scopo del fare architettura»[135].

Nella prospettiva di una riconciliazione tra cultura e prassi, dunque, occorre riportare da un lato la tecnica alla teoria, recuperando «la dimensione immaginativa»[136] all'interno del processo costruttivo e facendo in modo che la «tecnica si ponga come sperimentazione del possibile»[137] e, dall'altro, la teoria alla tecnica attraverso il progetto in quanto, se è vero che il progetto è «fondamento dell'Architettura, in quanto deve essere capace di definire la materia teorica dell'edificio, i principi ordinatori del suo assetto figurativo, la sua forma»[138], è anche

[131] Tali posizioni contrapposte, come descritto da Andrea Campioli, sono particolarmente evidenti all'interno del rapporto tra l'architettura nel suo insieme e i suoi dettagli costruttivi, sebbene, nel caso di seguito riportato, gli esempi siano di nobile stirpe. Infatti, le posizioni riportate, assolutamente contrastanti, sono di Aldo Rossi e Richard Rogers. Il primo ritiene che alla base dell'architettura ci sia l'idea e, di conseguenza, una sua visione unitaria affermando, lapidariamente, che «solo i minori e i dilettanti partono dai particolari per giungere al generale» (Rossi, A., "Intervista", in *Modulo*, n. 145, 1988, pp. 1264-1269). Rogers, invece, è per la centralità del dettaglio, soprattutto in virtù della sempre maggiore complessità del panorama tecnico. Anch'egli non sceglie la via diplomatica: l'architetto «se non capisce le modalità esecutive attuali finisce come un *graphic designer*, che fa solo piccoli disegni dell'aspetto esterno e superficiale dell'edificio» (Rogers, R. "Intervista", in D'Alessandro, M. (a cura di), *Eteronomia versus autonomia. Dodici interviste su progetto di architettura e progresso scientifico*, Dedalo, Roma, 1997, pp. 168-179). Si veda Campioli, A., "Idea, progetto, dettaglio", in Losasso, M. (a cura di), *Progetto e innovazione. Nuovi scenari per la costruzione e la sostenibilità del progetto architettonico*, CLEAN, Napoli, 2005, pp. 78-91.

[132] Ridolfi, G., "La condizione contemporanea del progetto. Rapporto sul matema digitale", in in Lauria, M., Mussinelli, E. e Tucci, F. (a cura di), *La Produzione del Progetto*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2019, pag. 395.

[133] *Ibidem*.

[134] «Una teoria è per definizione un insieme interconnesso di ipotesi ed enunciati il cui scopo è quello di spiegare fenomeni che, a partire dalle impostazioni concettuali, richiedono conferme sperimentali attraverso verifiche e la loro riproducibilità, esprimendo inoltre una capacità predittiva. Se la teoria esprime "cosa accadrà", la prassi è invece legata all'azione, all'attività, al modo di agire». Definizione tratta da Losasso, M., "Tra teorie e prassi: cultura, tecnologia, progetto", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, 2017, pag. 9.

[135] *Ibidem*.

[136] Truppi, C., "La dimensione tecnologica del progetto", *op. cit.*, 1994, pag. 27.

[137] *Ibidem*.

[138] Paris, T., "Cultura del progetto e cultura della tecnica", *op. cit.*, 1994, pag. 79.

vero che «senza l'azione del "pensiero pratico" o per così dire, dell'arte del costruire, il progetto diviene labile»[139]. Occorre, dunque, una doppia legittimazione per restituire unità ed efficacia alla progettazione e alla figura dell'architetto: la prima relativa al campo della tecnologia e della tecnica, per far sì siano interne al progetto, e la seconda relativa al campo della cultura, affinché il progetto comprenda, condivida e integri, i bisogni e le aspirazioni della collettività[140].

In questa riconnessione, si inserisce, naturalmente, anche l'innovazione tecnologica, dal momento in cui essa non può costituire di per sé un elemento positivo, «se non si inserisce all'interno di un processo di interpretazione culturale; se si sviluppa cioè in assenza di un progettista in grado di porsi come mediatore tra le implicazioni culturali del progetto e le tecniche esecutive»[141].

L'approccio tecnologico al progetto, in particolare, ha sempre sostenuto l'inscindibilità tra pensiero teorico e pratico, guardando alle implicazioni che gli aspetti realizzativi e gestionali, nonché processuali, determinano sia nell'azione progettuale che nei suoi fondamenti teorici[142]. Il progetto quindi, in tale ottica, finisce per costituire un "ponte" tra i diversi ambiti culturali e le tecniche, un luogo di sintesi degli apporti di tutti gli operatori.

In conclusione, non vi altro luogo che il progetto per ritrovare quel nesso, alle volte perduto, tra cultura teorica e cultura tecnica, tra innovazione tecnologica e tradizione progettuale. Un progetto che sia però euristico, «luogo della ricerca e della sperimentazione, ove agiscono insieme dispositivi creativi e vincoli tecnici»[143], ritrovando ed esprimendo nella *téchne* «il divenire dell'abitare tra astrazione dell'arte e concretezza del costruire»[144].

In questo senso la tecnica, che si esprime anche nell'innovazione tecnologica, «non è né ancella della scienza, né arte vile, né mero strumento: è invece componente viva della nostra stessa genesi, è la continuazione della nostra natura nella storia, è il segno della nostra presenza, l'espressione del nostro agire. Dunque alla tecnica non possiamo sottrarci, né negare attenzione. La nostra cultura non può che essere anche cultura tecnica ma, a questo punto della nostra storia, dobbiamo ricordarci che essa è anche e allo stesso tempo cultura sociale, etica, sensibile. In altre parole: una cultura antropologicamente adeguata»[145].

[139] *Ibidem*. Si trova d'accordo anche Emilio Faroldi: «in architettura la costruzione, intesa come strumento di concretizzazione materiale di un'idea, supera nel suo valore nominale il termine progetto, in quanto quest'ultimo trova la sua più elevata valenza culturale solo nel momento in cui tende a essere costruito. In assenza [...] di tale mansione, il progetto si trova limitato a un'affermazione implosiva e autoreferenziale, non trovando la sua emancipazione all'interno della sfera delle arti figurative materiali» (cfr. Faroldi, E., "Ideazione, progettazione, costruzione, gestione: l'architettura del progetto. Sette note costruite", in Claudi de Saint Mihiel, A. (a cura di), *Tecnologia e progetto per la ricerca in Architettura*, CLEAN, Napoli, 2014, pag. 87).

[140] Nardi, G., "Progettazione ipotesi e definizioni. Quel labile confine tra tecnica e cultura", in *Costruire per abitare*, n. 65, 1988, pp. 240-244.

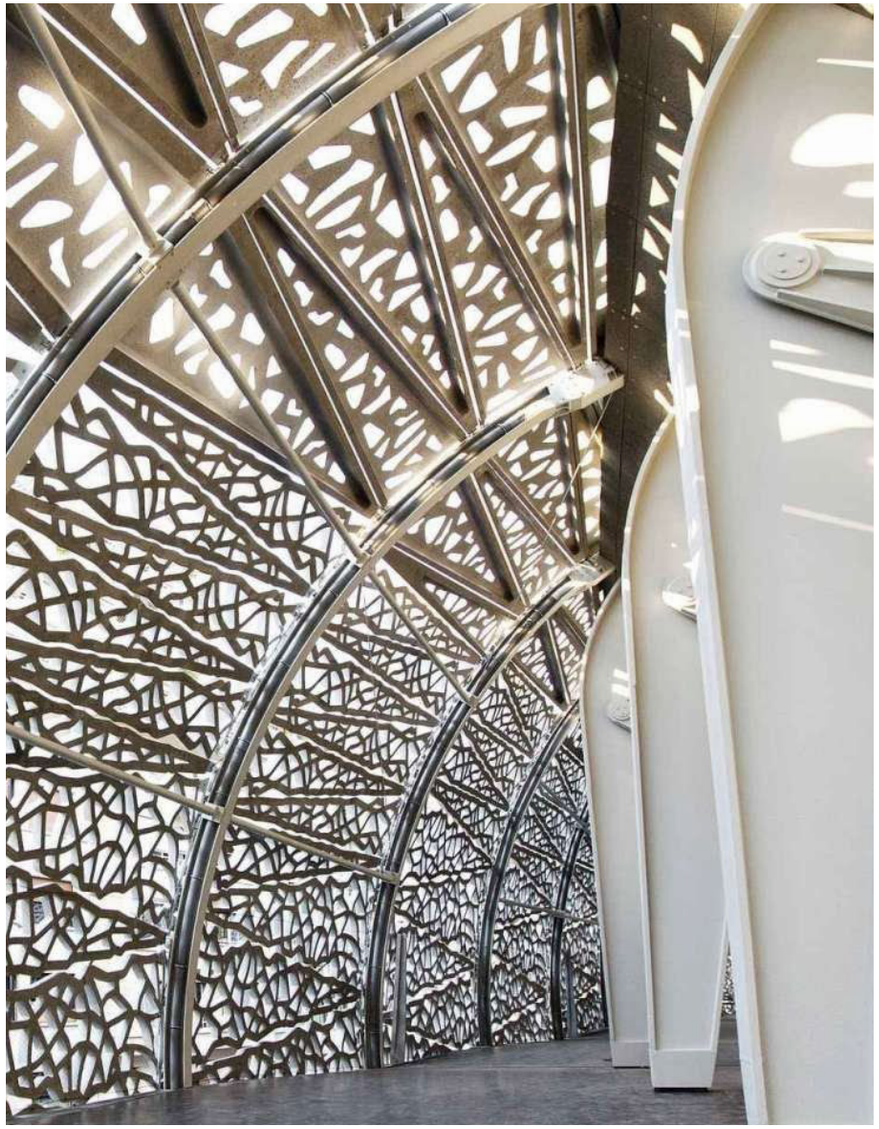
[141] Nardi, G., "La cultura dell'innovazione", *op. cit.*, 1992.

[142] Losasso, M., "Tra teorie e prassi: cultura, tecnologia, progetto", *op. cit.*, 2017, pag. 11.

[143] Nardi, G., "Euristica e Architettura", *op. cit.*, 1998, pp. 114-126.

[144] Losasso, M., "Tra teorie e prassi: cultura, tecnologia, progetto", *op. cit.*, 2017, pag. 13.

[145] Nardi, G., "Cultura tecnica", in Bertoldini, M. (a cura di), *Saperi e saperi. Teoria e pratica nel progetto di architettura*, Libreria Clup, Milano, 2002, pp. 21-38. Vale la pena riportare anche le parole di Lewis Mumford, pressoché analoghe: «non importa, quanto completamente la tecnica dipenda dai procedimenti obiettivi della scienza; essa non forma un sistema indipendente, come l'universo; essa esiste come un elemento della cultura umana, e si rivela nel bene e nel male, a seconda che i gruppi sociali che la guidano la dirigano nel bene e nel male. La macchina in se stessa non pone alcuna domanda e non si prefigge alcuno scopo; è lo spirito umano che pone le domande e si prefigge le mete. Per riconquistare la macchina, e sottometterla alla volontà dell'uomo, occorre prima comprenderla ed assimilarla». Cfr. Mumford, L., *Tecnica e cultura*, trad.it. Gentilli, E., Il Saggiatore S.p.A., Milano, 2005 (ed. orig. *Technics and Civilization*, Harcourt Barace & Company, San Diego, 1934), pag. 22.



Schermature in Ductal® realizzati da Bonna Sabla.
Progetto di Rudy Ricciotti, *Stade Jean Bouin*, Parigi, 2007. Immagine da rudyricciotti.com.

02

Industrializzazione e architettura: pensiero, tecniche, processi

«*Computing is not about computers anymore. It is about living*»

Nicholas Negroponte, *Being Digital*, Vintage Books, New York, 1995, pag. 6

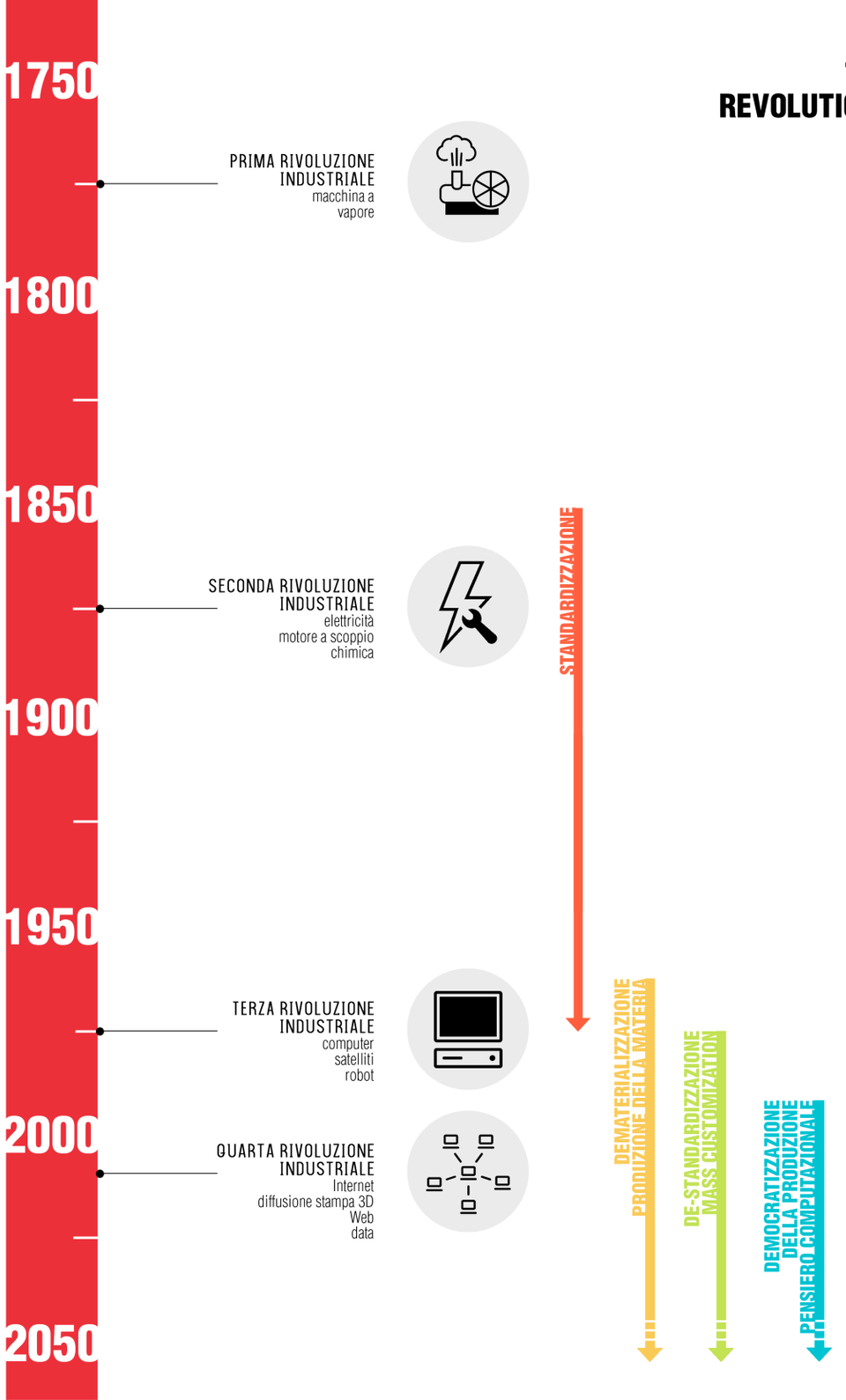
L'obiettivo dei dottorati a caratterizzazione industriale è instaurare un rapporto proficuo tra settore della produzione e i luoghi della progettazione. In tal senso appare evidente la necessità di ripercorre, seppur brevemente, la relazione instaurata tra di essi nel corso degli anni, con particolare enfasi ai momenti di passaggio da una Rivoluzione Industriale a un'altra.

Senza avere l'ambizione di ricostruire la storia dell'industrializzazione, vengono tuttavia analizzati diversi suoi momenti salienti o sfruttando l'opera dei Maestri che per primi ne hanno assimilato i principi nel progetto o traendo spunto da alcuni eventi con grande portata trasformativa (o rivoluzionaria), delineando così un'evoluzione dell'industrializzazione per temi piuttosto che per tempi.

Ciononostante, è stato fatto un tentativo di procedere in ordine lineare, sebbene siano inevitabili alcune sovrapposizioni temporali tra i vari paragrafi, dovute all'incredibile velocità del progresso tecnologico a partire dagli anni '60.

La ricostruzione tematica, dunque, pone l'accento sui tasselli che, scomparendo o comparendo, hanno condotto al *paradigm shift* digitale responsabile della definitiva riscrittura della relazione tra progettazione e produzione industriale: standardizzazione durante la Seconda Rivoluzione, dematerializzazione e produzione della materia a cavallo tra la Seconda e la Terza, de-standardizzazione e *mass customization* tra la Terza e la Quarta e, infine, democratizzazione della produzione e pensiero computazionale come i grandi temi della Quarta.

Tale ricostruzione, riportata solo nel capitolo successivo nel settore degli ultra-performanti, tra l'altro ancora in bilico tra le due rivoluzioni più recenti, è stata fondamentale tanto per inquadrare storicamente la relazione tra produzione industriale e progettazione tecnologica, quanto per inserire sia la "pratica" fatta in azienda che l'innovazione tecnologica degli UHPFRC all'interno di quel processo di interpretazione culturale delle tecniche cui si faceva riferimento in chiusura del capitolo precedente.



2.1 Industrializzazione, prefabbricazione, standardizzazione: impatti sul pensiero progettuale

Com'è noto, la storia della produzione industriale è stata idealmente suddivisa in tre fasi – artigianale, industriale e post-industriale – caratterizzate tanto da diversificazioni oggettive, basate cioè su un'alterità di mezzi e tecniche, sia da differenti sistemi di interpretazione e conoscenza della realtà produttiva, nonché delle sue variabili relazioni con il pensiero progettuale. Ogni fase denota, inoltre proprie e peculiari complessità, raggruppate da Giorgio Giallocosta in "regimi"[1] che, impattano a tal punto sulla relazione tra progettazione e produzione da spostarne continuamente i confini.

A questa iniziale suddivisione, Giuseppe Ciribini[2], in un saggio pubblicato nel 1965, ne sovrappone un'ulteriore, derivante dall'assimilazione della storia dell'industria con la storia della meccanicizzazione, a sua volta divisa in tre momenti. Così, alla fase artigianale, ne seguono due industriali – di fase 1 e di fase 2 – e una post-industriale, coincidente con la terza di Ciribini.

La prima fase, agli albori della rivoluzione, vede affermarsi le macchine generiche o polivalenti, la cui capacità di svolgere una molteplicità di azioni produttive denota ancora un'impostazione del sistema di produzione proveniente dalla struttura artigianale del lavoro, limitandosi alla meccanicizzazione di una serie di operazioni che prima venivano svolte manualmente.

È infatti durante la seconda fase, quando l'intero ciclo produttivo viene compiuto dalle macchine, mediante una sistematica parcellizzazione del lavoro manuale, solo adesso compiutamente "diviso", che «si fa strada il concetto di industria inteso come principio ripetitivo o di iterazione» frutto di una «decisa volontà di ripetere cui la macchina fornisce lo strumento materiale e l'organizzazione e il metodo per porla effettivamente in essere»[3]. All'*unicum* della produzione artigianale, che era ravvisabile anche in una sostanziale omogeneità tra le più svariate forme di tradizione produttiva, si contrappone definitivamente la serialità della produzione industriale[4]. Ciò determina una diversa gestione in senso progettuale del "processo produttivo" che, se prima coincideva quasi interamente con la gestione della figura

[1] Si veda Giallocosta, G., *Riflessioni sull'innovazione…*, *op.cit.*, 2006.
[2] Ciribini, G., "Dal concetto di industria alla produzione industrializzata di beni edilizi", in Fuzio, G. (a cura di), *Industrializzazione dell'edilizia*, Dedalo libri, Bari, 1965, pp.17-25.
[3] *Ivi*, pag. 23.
[4] Si veda Giallocosta, G., *Riflessioni sull'innovazione…*, *op. cit.*, 2006, pag. 11.

dell'artigiano, unitamente alle poche risorse e tecnologie a disposizione, con il fenomeno industriale, che semplifica al massimo gli elementi della costruzione per una loro produzione ripetitiva e seriale, si verifica spesso una mancanza di convergenza fra progettazione tecnologica e realizzazione costruttiva[5].

Il rapporto diretto tra «materia e configurazione dell'oggetto», tra «mestiere e capacità di produrre»[6] va quasi del tutto perduto, anche a causa dell'esternalizzazione di gran parte dei problemi tecnico-esecutivi dei processi produttivi, che prima si risolvevano attraverso la figura dell'artigiano all'interno del prodotto stesso di cui, per questo motivo, erano fisicamente percepibili, e quindi più controllabili, i livelli di complessità[7].

Dopo l'industrializzazione i regimi di complessità incorporano per la prima volta, oltre che ambiti prettamente tecnologici e tecnico-organizzativi – le interazioni sistemiche dei vari componenti seriali, le commistioni possibili con altre filosofie produttive, le economie di scala – ambiti extra-produttivi, quali l'individuazione di segmentazioni omogenee di domanda, la standardizzazione delle tipologie e dei livelli di qualità attesa, l'unificazione delle *performance* di offerta[8].

Ne conseguono interpretazioni e approcci alla complessità calati in un'ottica sistemica e con elementi attinenti alla programmazione e alla pianificazione strategica della produzione, che portano però, paradossalmente, alla realizzazione di prodotti intermedi e componenti che, seppur concorrano a definire beni finali ad alto contenuto di riproducibilità tecnica, presentano «un'immagine semplificata» e una «percettività minimale di complessità»[9] proprio perché questa supera il prodotto, abbracciandone tutta la filiera produttiva e diventando, di fatto, una questione processuale.

Quindi, a partire poi dal 1950, con l'avvio della cosiddetta fase post-industriale, l'introduzione dei processi automatici di produzione implica un definitivo spostamento dal lavoro fisico a quello intellettuale, garantendo, al contempo, una serialità non più intesa come ripetizione di oggetti, ma come flusso di informazioni.

«È allora che l'ideazione e l'elaborazione del progetto si allontana dal luogo della produzione per collocarsi nei luoghi del lavoro intellettuale ricercando nuove espressioni nei linguaggi e nelle tecniche rappresentative caratterizzate e condizionate da una nuova razionalità, imposta dal necessario dialogo con la macchina capace di recepire solo disposizioni obiettive, incapace invece di ricevere messaggi o indicazioni interpretabili. Lo strappo non è stato né radicale né improvviso ma gradualmente nel tempo determina nuovi modi e nuove articolazioni della conoscenza; l'ideazione e l'azione progettuale si collocano in nuovi spazi culturali, lontani dal mestiere e dalle conoscenze tramandate attraverso la tradizione familiare per avvicinarsi al

[5] Spadolini, P.L., "Progettare nel processo edilizio", in Zaffagnini, M. (a cura di), P*rogettare nel processo edilizio. La realtà come scenario per l'edilizia residenziale*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1981.

[6] A tal proposito, ancora Zanuso scrive: «il progetto era intrinseco e contemporaneo al concetto di produzione e la sua elaborazione si identificava come tempo e come luogo nello stesso spazio operativo, nella stessa comunità cooperante, nello stesso luogo di lavoro, e, nei periodi meno lontani da noi, in quella particolare atmosfera della bottega artigiana dove il linguaggio unificante costituiva il tessuto connettivo di apporti collettivi specializzati e non specializzati proprio a livello progettuale e insieme operativo» (Zanuso, M., "Cultura progettuale e cultura industriale", in *Caleidoscopio*, Gruppo Industriale Businelli, n. 29, 1983).

[7] *Ibidem*.

[8] Giallocosta, G., *Riflessioni sull'innovazione…*, *op. cit.*, 2006, pag. 15.

[9] *Ivi*, pag. 16.

mondo della scienza, della ricerca applicata, in un nuovo spazio più lontano dalla produzione, e più vicino ai luoghi delegati alla esercitazione mentale, alle attività intellettuali»[10]. Ciò implica che le traiettorie innovative, non risultando più ancorate a soli fattori tecnico-produttivi, sembrano apparentemente prive di una sostanziale generalizzabilità di impostazione che, in realtà, è leggibile a un ordine superiore – macroscopico – necessario a comprendere un ulteriore ampliamento dei regimi di complessità.

L'articolazione di fasi così descritta può essere ricostruita attraverso l'opera di alcuni Maestri che, a cavallo delle varie rivoluzioni industriali, hanno contribuito ad avviare una lenta e graduale riappropriazione del progetto nella sua totalità, provando ad assimilare all'interno della sua cultura i nuovi dettami della società industrializzata. Durante la prima fase, infatti, il rapporto tra architettura e industria consisteva in una sterile riproposizione dei linguaggi e dei metodi artigianali, impedendo per lungo tempo a nuovi materiali e tecnologie di raggiungere una propria compiutezza formale.

Già con la realizzazione del Crystal Palace per la Grande Esposizione del 1851, Joseph Paxton provò a sovvertire questo rapporto, dimostrando come fosse possibile raggiungere una considerevole potenza espressiva con il solo ausilio di parti semplici e standardizzate. Il progetto del Crystal Palace consisteva in un vero e proprio piano di produzione in cui erano fissati metodo produttivo, montaggio, tempi di realizzazione e costo dell'opera che, assieme alle caratteristiche dei materiali, divennero precondizioni della progettazione[11]. Per la prima volta, un edificio è concepito come sintesi di parti studiate e coordinate attraverso un reticolo modulare, a sua volta stabilito sulla base di criteri economici e produttivi.

L'Esposizione di Londra del 1851 servì anche a sancire il predominio statunitense sull'era della meccanicizzazione. Mentre gli altri paesi europei si erano limitati a meccanicizzare processi artigianali, gli Stati Uniti avevano già introdotto la catena di montaggio e soprattutto compreso che, per contrastare la crescente concorrenza, era necessaria un'ottimizzazione scientifica del lavoro. Fu Frederick Taylor a formulare la teoria, poi passata alla storia con il suo nome, secondo la quale nel procedimento produttivo andavano eliminati tempi morti aumentando il rendimento del binomio uomo-macchina.

La formulazione di Taylor fu applicata da Henry Ford per la produzione del suo "modello universale" di Ford T che riuscì a conquistare il mercato di massa attraverso, prima di tutto, un processo di democratizzazione dell'automobile, adesso economica e accessibile al grande pubblico[12]. La vera novità risiedeva nel fatto che la configurazione formale del prodotto era una diretta conseguenza della struttura e dell'organizzazione del processo industriale.

[10] Zanuso, M., "Cultura progettuale e cultura industriale", *op. cit.*, 1983. Ciribini fa delle considerazioni pressoché analoghe, in un saggio del 1987 (Ciribini, G., "La normativa tecnica di fronte alle problematiche attuali", in *Edilizia scolastica e culturale*, vol. 4, 1987): «quanto va sotto il nome di terza rivoluzione tecnologica non è […] una semplice trasformazione di macchine, come le precedenti, bensì un'evoluzione del pensiero umano, esprimibile sì in termini di maggior rendimento, ma, soprattutto, in termini di diversa penetrazione cognitiva […]. Riusciamo, così ad affrontare nuove razionalità, differenti rispetto a quella classica, fondate sul carattere della complessità: razionalità per le quali il disordine sembra prevalere sull'ordine, l'ambiguo sul chiaro o inambiguo, l'irreversibile sul reversibile, lo specifico sull'universale».

[11] Grisotti, M., "L'industrializzazione edilizia in rapporto alla prima e alla seconda rivoluzione industriale", in Fuzio, G. (a cura di), *Industrializzazione dell'edilizia*, Dedalo libri, Bari, 1965, pp. 27-70.

[12] D'Amato, G., *Storia del design*, Bruno Mondadori editore, Milano, 2005, pp. 17-26.

Pur provenendo dagli Stati Uniti tutte le maggiori innovazioni in termini di processo produttivo, dal punto di vista dell'avanzamento teorico e della definizione di un'estetica industriale, uno tra i contributi più significativi si deve al Deutscher Werkbund, fondato nel 1907 da Hermann Muthesius. Quest'ultimo si era schierato contro la confusione stilistica delle arti applicate tedesche auspicando, addirittura, a un passaggio dalla produzione tipizzata a quella standardizzata in nome del concetto di *Sachlichkeit*, ovvero di pura oggettività, chiarezza e verità[13]. Tra i membri del Werkbund vi era anche uno degli uomini chiave nel dibattito sull'industrializzazione tedesca, Peter Behrens.

Convocato dall'AEG[14] nel 1907 – in piena seconda fase – per rilanciarne completamente l'immagine, dalla pubblicità fino al design dei prodotti, Behrens si occupò per la prima volta nella sua carriera di oggetti alimentati elettricamente e quindi dotati di un meccanismo interno completamente standardizzato e, fino a quel momento, indifferente rispetto alla forma del prodotto finale. Nei prodotti voluti da Behrens, la logica dietro il meccanismo, ovvero la necessità di creare il minor numero di parti producibili industrialmente e facilmente assemblabili, si manifestava anche nell'involucro esterno, realizzato con una serie minima di elementi combinabili in maniera differente e fatti in serie. La produzione industriale entra così in tutti gli aspetti della progettazione dell'oggetto, arrivandone a permeare anche l'estetica con un design che diventa sempre più "consapevole"[15].

L'eredità di Behrens viene raccolta da molte figure autorevoli, tra cui spiccano Mies van der Rohe, Walter Gropius e Le Corbusier, che transitarono tutti per il suo studio.

L'innovazione tecnologica, nell'opera dei tre maestri, interagisce con le scelte formali e funzionali o, addirittura, con vere e proprie reinvenzioni progettuali. «L'entità del loro sforzo si misura considerando l'immensa differenza fra il punto di partenza e il punto di arrivo; quando […] hanno cominciato a lavorare era in corso la battaglia tra l'architettura tradizionale, soggetta all'imitazione degli stili storici, e l'architettura d'avanguardia, che voleva liberarsi da questa soggezione accentuando la libertà delle scelte artistiche, cioè la prerogativa che la cultura tradizionale riconosceva appunto a una classe di specialisti per tenerli lontani dalle responsabilità decisive sull'organizzazione della città. Molti altri hanno sprecato il loro ingegno in questo contrasto fittizio. Gropius, Mies e Le Corbusier hanno saputo respingere questa impostazione e cominciare daccapo una ricerca alternativa»[16].

Fu proprio Mies van der Rohe a volere che la seconda esposizione del Werkbund a Stoccarda nel 1927, avesse un quartiere di abitazioni permanenti, sperimentali dal punto di vista funzionale e tecnico. Vennero definiti standard tipologici e tecnici, prototipi di produzione, elementi ripetibili e intercambiabili dimostrando una ferrea volontà di misurarsi con i problemi dell'industrializzazione edilizia, di cui si iniziarono a comprendere le potenzialità anche rispetto alla questione della qualità dell'abitare.

[13] *Ivi*, pp. 27-35.

[14] L'AEG Turbinenfabrik era una delle più avanzate fabbriche tedesche di inizio Novecento. Utilizzava una produzione a ciclo continuo, con catene di montaggio e criteri di standardizzazione per una produzione di ampio raggio, dalle lampade ad arco fino alle dinamo dei motori. Per fronteggiare la concorrenza, chiamò Peter Behrens con l'obiettivo di avviare una nuova campagna promozionale.

[15] D'Amato, G., *Storia del design*, *op. cit.*, 2005, pp. 36-41.

[16] Benevolo, L., *Storia dell'architettura moderna*, Laterza, Bari, 2008 (ed. orig. 1960).



Peter Behrens, *Turbine Factory*, Berlino, 1910. Immagine da https://www.khanacademy.org/.

Nel tentativo di mettere assieme tali temi, Gropius portò, a partire dal 1926, al centro dell'insegnamento condotto al Bauhaus la relazione tra design, architettura e produzione industriale. Secondo la felice intuizione di Gropius, la prefabbricazione sarebbe avvenuta per componenti e non per modelli, in un ciclo industriale aperto[17] che avrebbe lasciato all'architetto l'apparentemente perduta libertà creativa. Tra le più celebri dimostrazioni di tale assunto, vi è il Packaged House System, proposto per il mercato bellico americano in collaborazione con Konrad Wachsmann a partire dal 1941. Il Packaged House System era un sistema costruttivo e progettuale, realizzato mediante parti coordinate e assemblabili in diverse configurazioni.

Sebbene, in questo caso, venne utilizzato un processo di prefabbricazione di tipo chiuso, ove una «limitata serie di grandi elementi […] prodotti presso stabilimenti attrezzati, vengono poi assemblati in cantiere per sovrapposizione, secondo schemi predeterminati ed univoci»[18], le molteplici configurazioni consentite dai pannelli e dalle connessioni gettarono le basi per un nuovo modo di "pensare" il progetto, in cui la delimitazione dello spazio avveniva attraverso elementi identici e la variabilità si otteneva per addizione di "moduli"[19]. Il Packaged House System, oltre a evidenziare il potenziale sociale della prefabbricazione, contribuì a restituire all'architetto il suo ruolo di costruttore, attraverso una casa progettata per essere costruita e abitata. Tuttavia, la Packaged House non riuscì mai ad entrare nel mercato, sebbene il fatto stesso che fosse stata concepita per esso costituisse di per sé un'importantissima novità. Sebbene Wachsmann avesse progettato con cura maniacale ogni dettaglio del sistema produttivo, dalla fabbricazione alla linea di assemblaggio, dal sistema di spedizione alle tecniche di installazione, ci furono continui rimandi e ritardi nella realizzazione dell'opera che, alla fine, ne decretarono il fallimento.

Ciononostante, oramai assodata la crisi della progettualità nelle sue tradizionali forme soggettive e rifiutata la «scissione dell'operare ideativo-astratto da quello pratico-esecutivo», il Movimento Moderno continuò a cercare il «centro di una cultura integrata, nella quale progetto e tecnica possono permutarsi continuamente l'uno nell'altra, per mediare le esigenze della coscienza inventiva con quelle della coscienza pratica»[20].

In questo senso, il contributo di Le Corbusier all'integrazione della cultura industriale in quella architettonica risultò fondamentale[21]. Affascinato dalla perfezione tecnica di automobili, aeroplani e navi, egli contribuì a definire un'estetica della società industrializzata, a trasferirne i modelli nell'Architettura, fornendo le basi del *low-cost* contemporaneo e delle sperimentazioni successive di abitazioni massive realizzate in moduli prefabbricati. La casa Citrohan, si basava sull'assunto che la razionalizzazione passasse necessariamente dalla standardizzazione, con l'obiettivo di produrre case esattamente come le automobili. «Se eliminiamo dai nostri cuori e dalle nostre menti tutti i concetti defunti riguardo la casa, e guardiamo al problema da un punto di vista critico e obiettivo, arriveremo alla "Casa-Macchina", la casa prodotta in serie, salubre e bella nello stesso modo che gli attrezzi da lavoro e gli strumenti che accompagnano la nostra vita sono belli»[22]. L'assunto generale si basava sull'idea che la produzione in serie riuscisse a garantire livelli di qualità elevati e costanti nel tempo.

Le Corbusier non fu il solo a lavorare sulla concezione di un'abitazione figlia della realtà industriale. La Dymaxion House[23], progettata a partire dal 1929 da Richard Buckminster Fuller, ne è, anzi, una autentica celebrazione. Costituita da un modulo che, se ripetuto, poteva arrivare a formare un grattacielo, la Dymaxion House, di forma esagonale, fatta di elementi standardizzati e futurista anche nell'aspetto, costava al massimo 5000 dollari e poteva essere realizzata esattamente come un'automobile[24]. Mentre Gropius affrontava il problema della produzione di massa attraverso un tentativo di revisione di materiali e tecnologie di produzione puntando alla prefabbricazione, Fuller scommetteva sulla produzione industriale di serie.

L'obiettivo era proporre un progetto di casa basato su di una riflessione sui modi di vivere contemporanei per poi proiettarli su scenari futuri, valutati a partire da considerazioni relativi alle sostenibilità[25], ai modi di produzione e di commercializzazione del "prodotto"[26] in esame. Organizzata attorno a un albero centrale, ospitante collegamenti verticali, impianti e condotte e a cui venivano appesi, mediante cavi d'acciaio, due ponti a delimitare l'appartamento centrale, la Dymaxion era distribuita attraverso le *utility units*, ovvero pareti mobili e sostituibili che consentivano di cambiare continuamente l'organizzazione interna degli spazi.

[17] Ruffilli, M., "Aspetti della progettazione architettonica nella evoluzione della società industriale", in Spadolini P.L (a cura di), *Design e tecnologia, un approccio progettuale all'edilizia industrializzata*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1974.
[18] Petrignani, A., "Introduzione del seminario di studi sulle Problematiche e Prospettive della industrializzazione edilizia per componenti", in *Bollettino n.5 del Centro di documentazione sulla industrializzazione edilizia*, Dedalo, Bari, 1968, pag. 8.
[19] Imperiale, A., "An american wartime dream: the packaged house system of Konrad Wachsmann and Walter Gropius", in *Proceedings of ACSA Fall Conference/Modular Building Institute*, Philadelphia, 27-29 settembre 2012.
[20] Vittoria, E., "Progetto cultura tecnica", in *Controspazio*, vol. 3, 1983, pp. 38-42.
[21] La letteratura al riguardo è molto ampia, si vedano Cohen, J., "Le Corbusier's Modulor and the Debate on Proportion in France", in *Architectural Histories*, vol. 23, pp. 1-14; Cohen, J., *Le Corbusier. Tout l'oeuvre construit*, trad. fr. Hubert, C., Flammarion, Parigi, 2018 (ed. orig. *Le Corbusier. The built work*, The Monacelli Press, New York, 2018.
[22] Le Corbusier, *Verso una Architettura*, trad.it. Cerri, P. e Nicolin, P., Longanesi, Milano, 1973 (ed. orig. *Vers une Architecture*, Cres, Parigi, 1923). Sulle virtù della standardizzazione celebrate da Le Corbusier, Reyner Banham, analizzando le argomentazioni di Le Corbusier finalizzate a dimostrare che un prodotto standardizzato, come un automobile, potesse essere bello come il Partenone scrive: «Il *tertium comparationis* dell'argomentazione è un inganno disonesto – nessuna delle automobili raffigurate è un modello standardizzato di serie; sono tutti esemplari artigianali unici, costosissimi, specializzati, che ben possono essere confrontati con il Partenone poiché, come il tempio greco, sono opere uniche di artigianato. A veicoli di serie come la Ford Modello T non è consentito di infangare queste pagine classiciste» (Banham, R., *Architettura della Seconda Età della Macchina. Scritti 1955-1988*, di Biraghi, M. (a cura di), Mondadori Electa S.p.A., 2004, pag. 20).
[23] La Dymaxion house deve il suo nome alle tre parole che ne hanno guidato l'ideazione: *dynamic, maximum, tension*. La Dymaxion è figlia anche del lavoro svolto da Fuller per la realizzazione del sistema 4D Lightfull Tower Mobile Housing, ovvero una torre residenziale di 12 piani che, completamente finita, lasciava la fabbrica appesa a un dirigibile. Piuttosto interessante anche l'attacco al suolo: il dirigibile, arrivato a destinazione, avrebbe dovuto sganciare una bomba per la creazione dello scavo per il calcestruzzo di fondazione. La struttura della Tower di Fuller è a nucleo centrale, su cui sono impostati gli orizzontamenti, appesi dai bordi anche alla sommità dell'edificio. Il nucleo centrale ospita anche collegamenti verticali ed impianti. È prevista la raccolta e il riutilizzo dell'acqua piovana, una lente sulla copertura per l'utilizzo della luce solare, una turbina eolica per la produzione di energia elettrica. Cfr. Manfron, V., "Buckminster Fuller: la ricerca Dymaxion, una storia americana tra innovazione e utopia", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli s.r.l., Milano, 2002, pp. 81-94.
[24] Esattamente come nelle industrie automobilistiche, era prevista una produzione di circa 5000 alloggi al giorno. Si veda Russo Spena, R., *Progresso e Utopia: la "Metropolis" di King Camp Gillette e la "Universal Architecture" di Richard Buckminster Fuller*, www.esempidiarchitettura.it, 2017.
[25] La sommità dell'abitazione è attrezzata con un complesso sistema di specchi e lenti che, distribuendo luce e calore in tutti gli ambienti e in combinazione con un sistema di ventilazione naturale, garantisce elevati livelli di comfort ambientale. L'acqua piovana viene raccolta in un serbatoio e riutilizzata per fini domestici, mentre i liquami vengono trasformati automaticamente in fertilizzanti.
[26] Manfron, V., "Buckminster Fuller…", *op. cit.*, 2002, pp. 81-94.

James Baldwin, enfatizzando la capacità anticipatrice di Fuller[27], parla per la Dymaxion di approccio dematerializzato al progetto, riferendosi alla riproducibilità di massa, alla resistenza, alla manutenibilità, al peso e alla superficie ridotti[28]. Considerando che il concetto di dematerializzazione troverà una sua formalizzazione culturale solo a partire dagli anni '90, il contributo di Fuller nella definizione della relazione tra progetto e industrializzazione è arrivato con circa sessant'anni d'anticipo.

Accanto a Wachsmann e Fuller, vi era una terza figura che si scontrò con il mondo della prefabbricazione: Jean Prouvè[29]. Fermamente convinto che non si dovesse disegnare nulla che non fosse realizzabile, Prouvè era sempre alla ricerca di sistemi costruttivi in grado di semplificare le operazioni di montaggio, mirando a un'economia di materia, di tempi e di manodopera. Partendo dal presupposto che ogni edificio è un insieme di parti interconnesse, solo l'industria può garantire *a-priori* una ripetitività qualitativa certificabile, raggiungibile attraverso la produzione seriale. Ciò implicava, in sostanza, risolvere il problema della qualità dell'abitare per parti anziché nella sua totalità, generalizzando la questione del dettaglio, teorizzando «lo studio congetturale dell'elemento così che esso possieda una gamma di potenzialità al tempo stesso sostitutorie (un modello al posto di un altro), scambiatorie (un pezzo al posto di un altro), combinatorie e permutatorie (pezzi dello stesso modello al posto di altri e con un ordinamento diverso) atte ad inserirlo per sua natura in una varietà di ipotetici "tutto"»[30]. Era necessario quindi un ripensamento del rapporto tra sistema e parte componente in quanto, per una totale comprensione del processo di progettazione, era richiesto, dal punto di vista metodologico, un costante riferimento a entrambe le scale[31].

Si pone, di conseguenza, un problema di organizzazione complessiva del processo edilizio risolta, in prima battuta, mediante il concetto di metaprogetto, ove «il problema della identificazione e della comprensione dei rapporti tra elementi e sistemi viene considerato prioritario rispetto al risultato finale, inteso come forma espressa degli oggetti e dei sistemi stessi»[32].

Oltre al metaprogetto, che si fissa ad una scala di controllo globale, gli strumenti atti a realizzare una vera coordinazione tra i diversi elementi dell'opera sono la normazione, il design dei modelli industriali e il concetto di 'modulo'[33]. Mentre «l'aspetto integratore della normazione è il sottile filo assicurante una continuità a carattere combinatorio alle diverse categorie di oggetti connettibili ed accoppiabili»[34], il design avviene al livello della tipizzazione cercando

[27] Un'altra intuizione anticipatrice di un approccio più maturo ai temi dell'industrializzazione edilizia risiede nell'utilizzo del un nucleo centrale standardizzabile, al cui interno vengono collocati collegamenti verticali e impianti e attorno al quale possono articolarsi i vani abitativi, con opportune varianti morfologiche, compositive e distributive. Cfr. Si veda Giallocosta, G., *Riflessioni sull'innovazione…*, *op. cit.*, 2006, pag. 11.

[28] Baldwin usa però il termine "*ephemeralization*". Cfr. Baldwin, J., *Bucky Works*, John Wiley & Sons, New York, 1996.

[29] Si veda Zennaro, P., "Lo 'stile Jean Prouvè'", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli s.r.l., Milano, 2002, pp. 99-103.

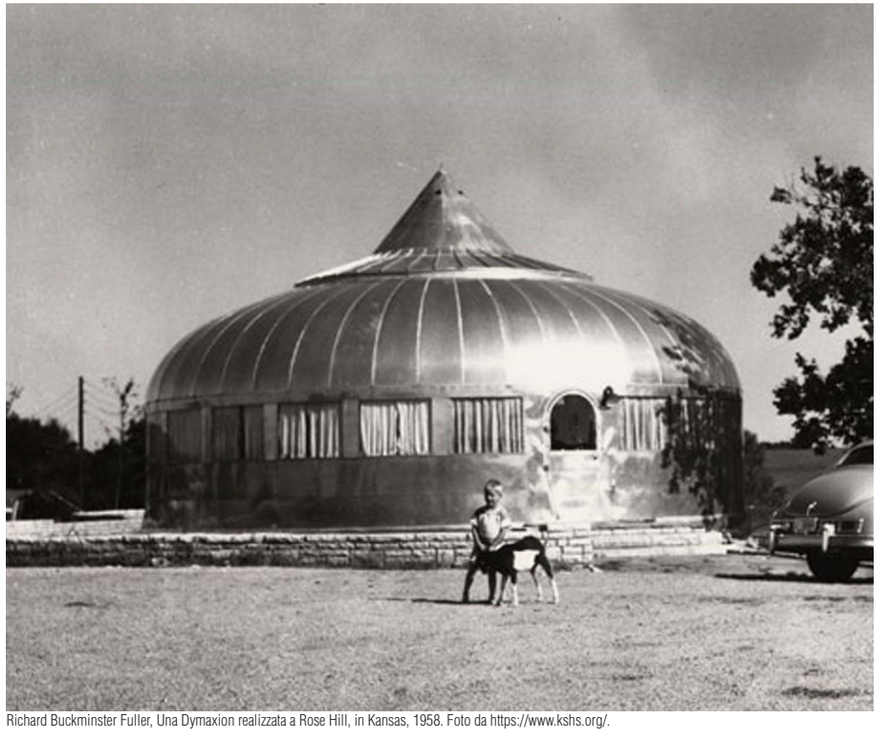
[30] Ciribini, G., "Il processo dell'industrializzazione edilizia: problemi e sviluppi", in Fuzio, G. (a cura di), *Industrializzazione dell'edilizia*, Dedalo libri, Bari, 1965, pp.122-123.

[31] Zaffagnini, M., *Il componenting*, Ente autonomo Fiere di Bologna, Bologna, 1968, pp. 13-14.

[32] Campioli, A., "Enzo Frateili e l'industrializzazione dell'edilizia", in *AIS/Design Storia e Ricerche*, vol. 9, 2017.

[33] Ciribini, G., "Il processo dell'industrializzazione edilizia...", *op. cit.*, 1965, pag. 123.

[34] *Ivi*, p. 123.



Richard Buckminster Fuller, Una Dymaxion realizzata a Rose Hill, in Kansas, 1958. Foto da https://www.kshs.org/.

«soglie di assortimento»[35] – limiti di variabilità – e offrendo una gamma di soluzioni operative ottimali per il montaggio in sito. Il modulo viene considerato, invece, come l'elemento di riferimento che consente «il passaggio a una visione della progettazione nella quale l'attività ideativa muove dalla concezione complessiva dell'oggetto per poi articolarlo nelle sue parti costituenti, a una visione in cui la concezione dell'oggetto nel suo complesso si delinea attraverso una organizzata combinazione di repertori di parti precostituite»[36].

Tuttavia, salvo qualche eccezione, la maggior parte degli interventi realizzati nel dopoguerra rappresentava una sconfitta per l'industrializzazione edilizia. Infatti, l'utilizzo di una manodopera non qualificata, il timore di omogeneizzare le realizzazioni, le sollecitazioni al rispetto di luoghi e tecniche tradizionali presenti nei documenti di indirizzo alla progettazione, nonché le note speculazioni edilizie di quegli anni causarono da un lato, il predominio di tecniche di prefabbricazione pesanti, rapide economiche e di facile applicazione e, dall'altro, il ricorso a tecniche tradizionali che saranno poi definite "evolute"[37].

L'emergenza abitativa del dopoguerra e le migrazioni interne degli anni '50 aumentarono al tal punto la domanda abitativa da gettare all'aria tutti i buoni propositi che avevano caratterizzato il dibattito degli anni precedenti e immediatamente successivi al conflitto. La qualità abitativa divenne un aspetto secondario, scalzata da logiche di puro profitto. Sono questi gli anni in cui la prefabbricazione si veste di quella patina di sfiducia di cui, tutt'oggi, non si è ancora liberata e che sollevò già all'epoca la questione dell'autorialità dell'opera[38], che si credette perduta durante gli anni della cementificazione delle periferie italiane.

Colin Davies, provocatoriamente, sostiene che della prefabbricazione sfidi i pregiudizi più profondi dell'Architettura, a partire dall'idea che la forma debba venir fuori dalla combinazione di fattori particolari derivanti da uno specifico sito di progetto e da una serie di richieste specifiche della committenza: «*most houses are standard products adaptable to almost any site*»[39]. Si tratta dunque, secondo Davies, di una tema se non inesistente, quanto meno irrilevante.

Guido Nardi, riferendosi al tema dello standard, considerato tra i maggiori colpevoli della mercificazione delle opere architettoniche, lo identifica addirittura come una costante storica: «così l'architettura del tempio greco ubbidisce completamente alla logica dello standard, e la nascita stessa dell'ordine classico si deve senz'altro alla volontà di considerare l'architettura in quanto costruzione e alterazione dello spazio naturale come ripetizione di operazioni simili o uguali, proprie sia della produzione degli elementi costruttivi che dei gesti stessi della messa in opera in cantiere. Così anche nell'architettura romana imperiale sono presenti misure modulari ed elementi prefabbricati nonostante che la tecnica del getto di concrezione cementizia fosse la più lontana in senso concettuale dal lavoro fuori opera»[40]. Secondo Nardi, è proprio a partire da questa dimensione storica, che si deve tentare di ricostruire «quella continuità culturale tecnica che si vorrebbe interrotta dal salto tecnologico portato dalla industrializzazione e dalla presunta incapacità della stessa di adattarsi a contenuti connessi con tale continuità»[41]. Non è dunque impossibile né controproducente fare architettura a partire da elementi standardizzati in quanto è nella composizione delle parti che risiede il gesto creativo a patto, naturalmente, di uscire da logiche di carattere speculativo.

Tuttavia, già verso la fine degli '60 – in terza fase – cominciava a delinearsi una nuova via per l'industrializzazione edilizia, votata alla personalizzazione di sistemi e componenti. Già nel 1971 la maggior parte delle lavorazioni meccaniche avveniva in serie di meno di 50 pezzi. L'industria manifatturiera si trovava per la prima volta nella necessità di disporre in tempi brevi di procedure operative versatili ed economicamente valide. Arrivarono in soccorso i sistemi integrati di lavorazione, frutto di una combinazione efficiente di versatilità – intesa come l'attitudine di un sistema produttivo ad adeguarsi facilmente a situazioni operative differenti – e automazione che, tuttavia, almeno in quegli anni, era causa di un certa rigidità del sistema produttivo. Il problema dunque diventava recuperare versatilità in un sistema automatizzato. «La comparsa di sistemi esperti, con i loro spezzoni di intelligenza artificiale elaborati in sede di ingegneria della conoscenza costringe l'attuale contenuto umano dell'intero processo produttivo ad affrontare una seconda alfabetizzazione degli addetti: quella che consente loro di colloquiare con l'ordinatore attraverso segni e linguaggi che acquisisce *ex-novo* e da estendere agli altri operatori, alle macchine, agli automi industriali»[42].

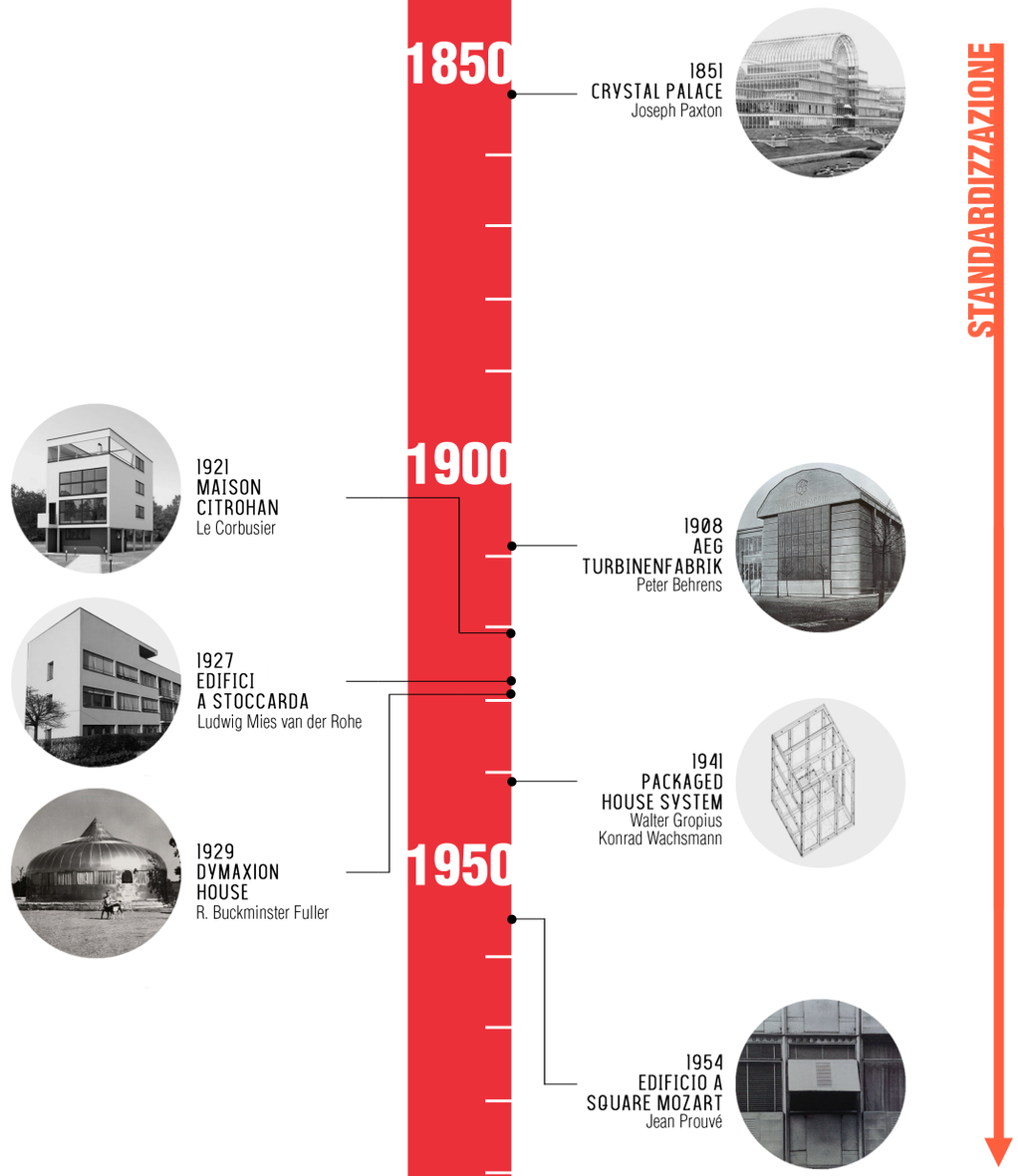
Gli ormai tradizionali lavori ripetitivi finirono per essere sostituiti da lavori di programmazione, di controllo, di pianificazione e di ricerca progettuale. Non si trattava, semplicemente, di uno spostamento verso il "lavoro intellettuale", quanto di un movimento di ordine antropologico[43]. Infatti, a partire dagli anni settanta, diventa sempre più difficile identificarsi professionalmente in un mestiere, in quanto l'avanzamento rapido delle tecniche richiedeva una continua riorganizzazione dei propri saperi e delle proprie attività, mettendo in campo la propria esperienza personale nella vita professionale. Il dissolversi ti tale confine «significa la morte di un certo tipo di economia. Nel momento in cui viene richiesto un vero e proprio coinvolgimento soggettivo degli attori umani, le finalità economiche devono rinviare alla sfera del politico, nel senso più ampio, ovvero all'etica e alla vita della città. Allo stesso tempo, devono rimandare a significati culturali»[44].

[35] *Ibidem*.
[36] Campioli, A., "Enzo Frateili...", *op. cit.*, vol. 9, 2017.
[37] Per ulteriori approfondimenti sull'evoluzione della prefabbricazione si vedano Tatum, C.B. *et alii*, "Constructability improvement using prefabrication, pre-assembly and modularization", in *Technical Report,* vol. 297, Construction Industry Institute, Standford University, novembre 1986; Gibb, A., *Off-site fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*, John Wiley & Sons, Hoboken, 1999; Smith, R., *Prefab Architecture. A guide to modular design and construction*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2011.
[38] Basti pensare che il saggio di Walter Benjamin "L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica. Arte e società di massa" viene tradotto da Enrico Filippini e pubblicato da Einaudi nel 1966, infiammando il dibattito internazionale per molti anni a seguire. Il giudizio dell'autore è inequivocabile, scrive «ciò che vien meno nell'epoca della riproducibilità tecnica è l'"aura" dell'opera d'arte» e ancora «l'intero ambito dell'autenticità si sottrae alla riproducibilità tecnica». Cfr. Benjamin, W., *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica. Arte e società di massa*, trad. it. Filippini, E., Einaudi editore, Torino, 1955 (ed. orig. *Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbakeit*, Suhrkamp Verlag, Francoforte, 1955).
[39] Davies,C., *The Prefabricated Home*, Reaktion Books, Londra, 2005.
[40] Cfr. Nardi, G., "Prefabbricazione chiusa e prefabbricazione aperta", in Nardi, G. (a cura di), *Progettazione architettonica per sistemi e componenti*, Franco Angeli, 1977, pp. 48-55.
[41] *Ibidem*.
[42] Ciribini, G., "Industria e progetto, domani", in Gangemi, V. e Ranzo, P. (a cura di), *Il governo del progetto. La tecnologia per la formazione dell'architetto*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1987.
[43] Lévy, P., *L'intelligenza collettiva. Per un'antropologia del cyberspazio*, trad. it. Colò, M. e Feroldi, D., Giangiacomo Feltrinelli Editore, Milano, 2002 (ed. orig. *L'intelligence collective. Pour une anthropologie du cyberspace*, Éditions La Découverte, Parigi, 1994), pag. 25.
[44] *Ivi*, pp. 25-26.

A questo spostamento che potremmo definire etico, in parte già descritto dal punto di vista dell'innovazione tecnologica nel paragrafo "Le nuove frontiere dell'innovazione architettonica: innovazione *marketing driven*, *open innovation*, *green innovation*" del capitolo precedente, se ne aggiungono altri, tanto di carattere pratico – il rinnovamento dello stock abitativo nonché la contrazione della domanda insediativa, l'affermazione del Mercato Comune Europeo e, di conseguenza, l'aumento della concorrenza – che socio-culturale.

La nascente consapevolezza che gli stati evolutivi ed emergenziali che caratterizzano la realtà non sono più ascrivibili solo a fenomeni straordinari, eccezionali e specifici, ma derivano anche dalle trasformazioni ambientali, dai mutamenti sociali e dalla disgregazione della cultura del costruire, ha generato un progressivo allontanamento tra ambiente naturale e ambiente costruito, nonché tra spazio progettato e spazio abitato. L'industria delle costruzioni inizia a confrontarsi con la sensibilità crescente di progettisti e utenti sul tema della sostenibilità e gli stessi i processi di produzione rivelano l'assunzione «di consapevolezze che appaiono decisamente ispirate a nuove razionalità e in cui, per esempio, connotazioni ormai obsolete di progresso e sviluppo (crescita, iperantropizzazione) mutano spesso in loro palesi dicotomie: contenimento, sostenibilità, recupero delle preesistenze, minimo intervento»[45].

La vera rivoluzione dei paradigmi tecnici arriverà, però, solo dopo la crisi energetica del 1973, che obbligò senza via di scampo progettisti e produttori a confrontarsi definitivamente con una nuova questione, quella ambientale.



[45] Giallocosta, G., *Riflessioni sull'innovazione...*, *op. cit.*, 2006, pag. 41.

II RIVOLUZIONE INDUSTRIALE



2.2 Innovazione nell'industria edilizia tra questione ambientale, dematerializzazione e nuovi mezzi per la "produzione della materia"

La grave crisi energetica che, in seguito alla guerra del Kippur[46], aveva portato il prezzo del petrolio da 3 a 27 dollari a barile, costrinse molti paesi europei a lanciare le prime politiche organiche di contenimento dei consumi. Tuttavia, l'industrializzazione incontrollata degli anni del dopoguerra, assieme alla rapida crescita economica, all'espansione dei centri abitati e delle aree di produzione, avevano già avuto le prime conseguenze negative sull'equilibrio naturale del pianeta.

Nel 1962, Rachel Carson, biologa statunitense, nel suo libro *Silent Spring* aveva denunciato, pressoché inascoltata, gli effetti dei fertilizzanti e degli insetticidi chimici sull'ambiente e sulla salute umana[47]. Tuttavia, saranno solo una serie di disastri ambientali[48], culminati con l'esplosione del reattore nucleare della centrale di Cernobyl del 26 Aprile del 1986, a spostare definitivamente l'attenzione sulla questione ambientale.

Nel 1987, Gro Harlem Brundtland, presidente della Commissione mondiale su Ambiente e Sviluppo istituita nel 1983, presenta un rapporto intitolato *Our common future*[49] dando la prima definizione di sviluppo sostenibile.

[46] Il 6 ottobre 1973, giorno della festività ebraica del Kippur, Egitto e Siria attaccano lo stato di Israele iniziando così la quarta guerra arabo-israeliana. Israele, con il supporto dei paesi occidentali, lancia una controffensiva che si rivela vincente. Come ritorsione, i paesi arabi aderenti all'OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) bloccano le esportazioni di petrolio verso i paesi sostenitori di Israele. Il 22 ottobre viene firmata la risoluzione 338 che decreta la fine dei combattimenti e che avrebbe portato, tra il 1974 e il 1975, agli accordi di disimpegno tra Israele, Egitto e Siria.

[47] Cfr. Carson, R., *Silent Spring*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston, Massachusetts, United States, 1962.

[48] Il 10 luglio del 1976, un incidente alla caldaia di produzione di triclorofenolo, nella sede brianzola dell'ICMESA di Seveso, causò la fuoriuscita di diossine particolarmente nocive. L'incidente viene tenuto nascosto fino al 18 luglio, quando non se ne poterono più ignorare gli effetti devastanti. In seguito all'incidente, nel 1982 l'Unione Europea impone, con la Direttiva Seveso, una regolamentazione per tenere sotto controllo il rischio industriale che comprende la stesura di piani di protezione e di evacuazione delle popolazioni in caso di incidenti rilevanti. Ancora, la notte tra il 2 e il 3 Dicembre in India una fuga di gas tossico da un'azienda parte del gruppo statunitense Dow Chemical causa la morte di circa 4000 persone. La tragedia scatena il dibattito internazionale sui temi della delocalizzazione irresponsabile di produzioni altamente inquinanti.

[49] Disponibile all'indirizzo https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf. Lo sviluppo sostenibile è così definito: «*a process of change in which the exploitation of resources, the direction of investments, the orientation of technological development; and institutional change are all in harmony and enhance both current and future potential to meet human needs and aspirations*» (cap. 2, par. 1).

A fianco. Code alle pompe di benzina in seguito alla crisi energetica del 1973. Immagini tratte da (dall'alto in basso, da sinistra a destra): grayflannelsuit.net; newsroom.ucla.edu; davidblandy.co.uk; kpbs.org; nation.time.com; thebalance.com; theconversation.com; choice.npr.org.

Seguirà la conferenza sulla Terra di Rio del Janeiro del 1992[50], dove governi, università, associazioni, cittadini, stampa, agricoltori e delegazioni di diversi paesi del mondo contribuirono alla stesura della famosa Agenda 21.

La variabile energetica diventa un aspetto predominante del progetto e sistemi e prodotti per la misurazione e il controllo dei consumi spingono verso innovazioni sempre più profonde, che guardano all'industria meccanica, chimica e metallurgica. Queste, attraverso processi di trasferimento tecnologico[51], portano nel mercato edilizio prodotti ad alte prestazioni e nuovi modelli organizzativi.

Cambia anche la struttura delle imprese di costruzione che, anche per adattarsi alla domanda di riqualificazione sempre più pressante, utilizzano diffusamente semilavorati e componenti di produzione industriale, dimostrando una sostanziale apertura del repertorio delle tecniche costruttive disponibili[52].

L'Atelier parigino di Dubosc&Landowski, a partire da una filosofia progettuale improntata sulla leggerezza, contribuirà alla diffusione di tali approcci, utilizzando soluzioni basate su una forte integrazione con il mondo della produzione industriale: l'impiego di acciaio, alluminio, lana di roccia, pannelli in fibro-cemento gli consentì di offrire risposte prestazionali diversificate, guardando anche e soprattutto alla flessibilità degli spazi, al comfort acustico e termico e all'uso passivo delle risorse[53]. Tali principi vennero messi in atto nella progettazione dei 27 alloggi denominati Le Castel Eiffel, realizzati a Digione e inaugurati nel 1987. Allo scheletro portante realizzato in acciaio, si affiancavano ancora sistemi ibridi o in calcestruzzo armato, sebbene il profondo studio delle relazioni tra i materiali nonchè le relative procedure di messa in opera gli permise di favorire decisamente l'utilizzo delle tecnologie a secco[54]. La gestione della facciata orientata a Sud, invece, testimonia l'importanza che andava assumendo la sostenibilità in quegli anni: caratterizzata dall'alternanza di logge e serre, superiormente protette da *brise-soleil* e realizzate in vetro, quest'ultime svolgono un ruolo di captatori termici in inverno mentre, grazie alla presenza di aperture, consentono la dissipazione del calore in estate.

Tuttavia Le Castel Eiffel è un progetto di fine anni '80, in cui si assisteva alla coesistenza tra diverse tendenze: da un lato, la tecnologia era portatrice di istanze di carattere rappresentativo e, dall'altro, iniziavano a comparire architetture in cui, al contrario, era diffusa o nascosta, ovvero permeante l'edificio ma non più protagonista.

Gli anni a cavallo della crisi energetica erano, infatti, ben diversi e, soprattutto, dominati dal *postmodern* e dalla corrente *high-tech*, figlia quest'ultima di un'avanguardia futurista che aveva riferimenti nell'ideologia tecnocratica di Fuller. Era il periodo del gruppo inglese degli Archigram

[50] Il Summit della Terra, il cui nome ufficiale è *United Nations Conference on Environment and Development*, si è tenuto a Rio de Janeiro dal 3 al 14 giugno 1992 ed è stato la prima conferenza mondiale dei capi di Stato sull'ambiente. Ha visto la partecipazione di 172 governi e 2.400 rappresentanti di organizzazioni non governative. Si veda Wikipedia, *Summit della Terra*, https://it.wikipedia.org/wiki/Summit_della_Terra.

[51] L'industria chimica che, fino agli anni Settanta, forniva all'edilizia solo vernici e tubazioni in PVC, immette sul mercato delle costruzioni materiali per l'isolamento termico (poliuretano e polistirene).

[52] Sinopoli, N., "Cinquant'anni di innovazione tra domanda e mercato", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli s.r.l., Milano, 2002, pp. 21-42.

[53] Cfr. Claudi de Saint Mihiel, C., *Innovazione tecnologica e architettura. Logiche e metodologie dell'atelier Dubosc&Landowski, Edizioni del Grifo*, Lecce, 1999, pp. 74-75.

[54] *Ivi*, pp. 94-95.



Bruxelles 1973, una domenica senza auto. Foto da www.rtbf.be.

e del Fun Palace di Cedric Price, in cui gli utenti potevano intervenire nella configurazione spaziale dell'edificio. Tuttavia, essi erano probabilmente più «interessati al richiamo seducente di una figurazione appropriata all'era spaziale [...] che ai processi di produzione o alla pertinenza di simile tecniche sofisticate con i compiti del momento»[55].

Non si può non citare, in tale contesto, il Centre Pompidou a Parigi, costruito nel 1977 su progetto di Richard Rogers e Renzo Piano, e senza dubbio derivante anche della retorica tecnologica e infrastrutturale degli Archigram[56]. Il Centre nasce anche con l'obiettivo di dimostrare le potenzialità espressive della tecnologia incorrendo, tra l'altro, in uno straordinario (e davvero inaspettato) successo popolare. Progettato come un diagramma spaziale evolutivo, la flessibilità degli spazi espositivi, a pianta libera su una superficie di 7500 metri quadri per piano, è il cuore dell'intera opera. Diventato rapidamente un «monumento»[57] di Parigi, rappresenta, secondo Banham, il superamento delle «statue permanenti all'idea di caducità» della tecnologia, grazie a una piena applicazione del concetto di adattabilità dell'edificio nel tempo, portato al suo limite più estremo e a cui sfuggono solo le parti strutturali più massive[58].

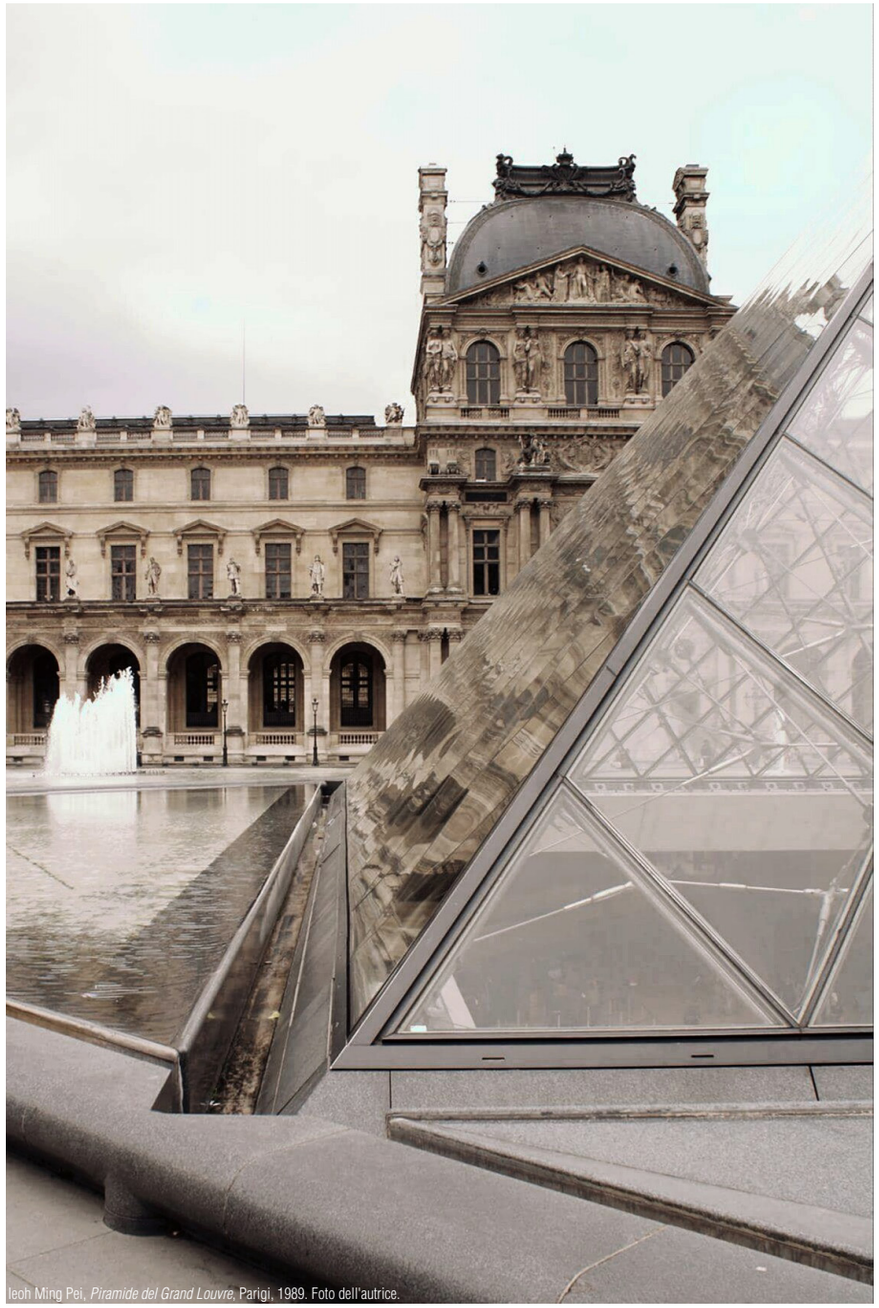
Se con il Centre la tecnologia tocca l'apice del suo potere rappresentativo, le tendenze successive lasciano il campo a prassi progettuali più pragmatiche e diversificate, adottate anche in opere che diventeranno poi paradigmatiche. Si pensi, ad esempio, alla Piramide del Grand Louvre realizzata a Parigi nel 1989 da Ieoh Ming Pei. In questo caso la tecnologia non è enfatizzata, bensì diffusa in tutto l'intervento, diventandone parte integrante, oltre che un mezzo funzionale alla conservazione della percezione complessiva dell'impianto storico in cui si inserisce.

Inizia così l'era post-industriale, che trova il suo nuovo punto di riferimento nel modello giapponese di fabbrica snella (*lean production*), implicando non ancora un abbandono della standardizzazione delle singole componenti dei manufatti, ma introducendo, come abbiamo visto, ampi margini di flessibilità e personalizzazione del prodotto finito[59].

Si tende, quindi, a modalità di intervento sempre più raffinate, mirate, rapide e precise, passando a quelle che Pierre Lévy definirà le "tecnologie molecolari". Queste «si accostano in maniera molto fine agli oggetti e ai processi che controllano. Evitano la massificazione. Ultrarapide, precisissime, agiscono sui propri oggetti a livello di microstrutture, dalla fusione a freddo, alla superconduttività, dalle nanotecnologie all'ingegneria genetica, le tecniche molecolari riducono al minimo gli sprechi e gli scarti»[60].

Non a caso, sono questi gli anni in cui si afferma il concetto di dematerializzazione, inizialmente usato per descrivere la diminuzione nel tempo di materiali ed energia usati nella produzione industriale e spesso banalmente tradotto in una riduzione delle dimensioni fisiche del prodotto.

[55] Frampton, K., *Storia dell'architettura moderna*, trad. it. Milesi, S., Zanichelli Editore, Bologna, 2008, pag. 332 (ed. orig. *Modern Architecture: a critial History*, Thames and Hudson, London, 1980).
[56] *Ivi*, pag. 337.
[57] Banham, R., *Architettura della Seconda Età della Macchina. Scritti 1955-1988, op. cit.*, 2004, pag. 279.
[58] *Ivi*, pag. 287.
[59] Cangelli, E. e Conteduca, M., "Architettura on demand. Nuovi scenari per il progetto e l'industria delle costruzioni", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, 2018, pp. 96-104). Tale argomento sarà ripreso nel paragrafo successivo.
[60] Lévy, P., *L'intelligenza collettiva. Per un'antropologia del cyberspazio*, *op. cit.*, 2002, pag. 56.



Ieoh Ming Pei, *Piramide del Grand Louvre*, Parigi, 1989. Foto dell'autrice.

Inoltre, dal momento in cui la catena produttiva risultava prevalentemente basata sull'utilizzo e sulla trasformazione di materia, non veniva considerato l'impatto dei fattori non materici nel computo finale delle risorse impiegate[61], utilizzando unicamente indicatori *mass-based*[62] per valutare l'efficacia dei processi. A ciò si aggiungenva anche l'assenza di una valutazione prestazionale del prodotto finito e di considerazioni che oggi diremmo *life-cycle*.

Friedrich Schmidt-Bleek cerca di colmare il *gap* legando alla sua definizione di dematerializzazione[63] – una riduzione di un certo fattore "x" dell'uso di materia per la produzione di beni e servizi senza però intaccarne le prestazioni – una nuova concezione dei prodotti che, riletti attraverso il concetto di M.I.P.S.[64], Material Inputs Per Service, diventano *service-producing machines*, spostando così il focus sulla loro funzione o meglio ancora, sul servizio fornito. In tal modo Schmidt-Bleek non solo considera i prodotti come erogatori di servizi, e quindi di prestazioni, ma conferisce loro anche una caratterizzazione temporale, in quanto, una volta interrotto il servizio, perdono la loro ragion d'essere. Inoltre, un prodotto che, privato della sua materialità, diventa servizio, suscita maggiore interesse anche nel suo produttore, che tenderà a estenderne la vita utile, in quanto ne vende l'uso e non la materia. L'aumento della vita utile del prodotto, che viene inserito all'interno di un processo circolare in cui materiali tornano continuamente alla fase dell'utilizzazione sebbene in forme diverse, non è inteso solo come estensione della "durata" dell'oggetto in senso stretto, ma anche dei servizi che ruotano attorno a esso in maniera diretta e indiretta. Ciò significa non solo il servizio fornito, ma anche quello che gravita intorno al prodotto in seguito a una sua eventuale ri-funzionalizzazione, ri-vendita e ri-produzione.

A questo primo aspetto della dematerializzazione, ovvero la predominanza della componente immateriale di servizio su quella materiale di prodotto, se ne associa un secondo, che si verifica praticamente in contemporanea: la progressiva digitalizzazione – o virtualizzazione – delle informazioni conduce infatti alla scomparsa – o almeno alla contrazione – di un certo quantitativo di mezzi fisici di immagazzinamento dell'informazione stessa, intesa in senso ampio. Basti pensare, ad esempio, che musica e fotografie perdono il proprio supporto fisico e vengono conservate sottoforma di *files*, banconote e monete sono sostituite da transazioni elettroniche e, infine, libri e giornali si fruiscono attraverso *e-reader* e *tablet*[65].

[61] Si veda Herman, R., Ardekani, S.A. e Ausubel, J.H., "Dematerialization", in *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 37, 1990, pp. 333-348.

[62] Müller, F. et alii, "Dematerialization – A Disputable Strategy for Resource Conservation Put under Scrutiny", in *Resources*, vol. 6, n. 68, 2017.

[63] Schmidt-Bleek, F., "Dematerialisation – From Concept to Practice", in *Dematerialisering – en strategi för uthållig utveckling, seminar*, Stoccolma, 16 giugno 1996.

[64] «*MIPS is computed in mass per total units of service (S) delivered by the good over its entire life span. Manufacturing, transport, packaging, operating, re-use, re-cycling, and re-manufacturing are accounted for and so is the final waste disposal. It is usually split up into five categories of materials: biotic, abiotic, earth movements, water and air*». La definizione è tratta da Hinterberger, F. e Schmidt-Bleek, F., "Dematerialization, MIPS and Factor 10. Physical sustainability indicators as a social device", in *Ecological Economics*, vol. 29, 1999, pag. 53. Si veda anche Schmidt-Bleek, F., *Wieviel Umwelt braucht der Mensch. MIPS: Das Mass für ökologisches Wirtschaften*, Birkhäuser Verlag, Berlino, 1994. Si veda anche Heiskanen, E. e Jalas, M., "Dematerialization through services. A review and evaluation of the debate", in *The Finnish Environment*, vol. 236, 2000.

[65] Cfr. Van Campenhout, L. *et alii*, "Physical interaction in a dematerialized world", in *International Journal of Design*, vol. 7, 2013, pp. 1-18. Tomàs Maldonado non è d'accordo: «non c'è da stupirsi dunque che in una società come l'attuale, in cui l'informazione sta assumendo un ruolo fondamentale, alcuni tendono a vedere nel processo di informatizzazione in corso una sorta di globale

La virtualizzazione tuttavia, come è oramai noto, è un processo che si consuma attraverso una serie di contrapposizioni, di cui la prima è tra l'ambiente fisico, ovvero lo spazio in cui l'uomo vive, e il cyberspazio[66], cioè il mondo intangibile della digitalizzazione. L'interazione che ne consegue avviene tramite dispositivi di controllo che, seppur rivolti solo alle nostre capacità cognitive, non possono che appartenere al mondo reale in quanto, malgrado l'informazione non abbia forma, ha una sua fisicità in natura che, però, trascende la percezione[67].

Ciò ci conduce alla seconda contrapposizione, ovvero quella tra il tangibile e l'intangibile dove, naturalmente, il primo appartiene all'ambiente fisico ed è fatto di sostanze a esso appartenenti, mentre il secondo è peculiare del cyberspazio. Vi sono poi il contrasto tra lo statico, caratterizzante gli oggetti dell'ambiente fisico, e il dinamico[68], tipico dell'informazione e, infine, quello tra il persistente degli oggetti e il transitorio dei dati[69].

In questo senso, quindi, la dematerializzazione è intesa come l'incorporazione di un artefatto fisico nel mondo digitale[70]: «*the artifact dissolves and its content is liberated and added to the digital world*»[71]. Dematerializzandosi, l'artefatto perde le sue limitazioni fisiche e diventa intangibile, dinamico e transitorio. Tale slittamento verso l'immateriale – o il virtuale – porterebbe, estremizzando il concetto e applicandolo alla cultura e alla società nella sua interezza, a una dematerializzazione della realtà nel suo complesso mettendo in dubbio,

dematerializzazione e persino spiritualizzazione del mondo in cui viviamo. […] è evidente che alcune delle più frequenti attribuzioni di immaterialità sembrano tutt'altro che convincenti. È discutibile, per esempio, definire immateriale il *software*. A ben guardare, il *software* è una tecnologia, ossia uno strumento cognitivo che, in modo diretto o indiretto, contribuisce, a conti fatti, a mutamenti senza dubbio di natura materiale». Cfr. Maldonado, T., *Reale e virtuale*, Feltrinelli Editore, Milano, 2015, pag. 13 (ed. orig. 1992). In realtà il *software* è un mezzo di mediazione o interazione tra mondo reale e virtuale ed è indubbia la sua appartenenza al secondo.

[66] Il termine compare per la prima volta in Gibson, W., *Neuromancer*, Ace Books, New York, 1984. Si veda anche Benedikt, M. (a cura di), *Cyberspace: Firts Steps*, The Mit Press, Cambridge, 1991.

[67] Vallgårda e Sokoler affermano che la tecnologia computazionale è a tutti gli effetti un materiale di design, sebbene non sia percepibile dall'uomo. Per ovviare a tale problema, deve essere combinato con un materiale percepibile, portando alla nascita dei cosiddetti "compositi computazionali". Cfr. Vallgårda, A. e Sokoler, T., "A material strategy: Exploring material properties of computers", in *International Journal of Design*, vol. 4, 2010, pp. 1-14.

[68] La dinamicità è per definizione temporalizzata. Hallnäs *et alii* ritengono che la caratteristica principale di un materiale computazionale (si veda la nota precedente) è la *temporal gestalt*, ovvero la struttura temporale che si crea ogni qual volta che si esegue un programma. Gli autori puntano alla definizione di una *spatial gestalt*, ovvero la forma spaziale di una materiale computazionale combinato con uno percepibile. Aggiungono, inoltre «*the 'surface' we choose for manifesting temporal structures in space will make a considerable contribution to the overall appearance of the thing, and thus it is important that we investigate different combinations of materials to form an understanding of the different inherent expression qualities*». Cfr. Hallnäs, L. *et alii*, "Textile displays: using textiles to investigate computational technology as design material", in *Proceedings of the 2nd Nordic Conference on Human-computer interaction*, New York, Marzo 2002, pp. 157-166.

[69] Ancora Hallnäs *et alii* legano la contrapposizione tra il persistente e il transitorio al concetto di "continuità". Mentre i computer e i prodotti digitali rispondono a una logica *on/off*, mostrando, quindi, una presenza discontinua, gli artefatti dell'ambiente fisico hanno, al contrario, una presenza costante, continua appunto: «*the typical computer has a very distinct on/off nature, where the off state erases every trace of what was going on the moment before (except what is saved on a storage medium). From a phenomenological point of view, it has a very discontinuous appearance*». Cfr. Hallnäs, L. et alii, "Textile displays…", *op. cit.*, 2002.

[70] Maldonado preferisce parlare di fantasmagorizzazione piuttosto che di dematerializzazione in quanto «sebbene le cose in quel mondo trasognato perdano la loro materialità, le non-cose risultanti sono sempre vissute, tutto sommato, come simulacri di cose. O meglio: come se si trattasse di corpi senza corpo. Fantasmi di corpi. Fantasmi di cose». Maldonado, T., *Reale e virtuale*, *op. cit.*, 2015, pag. 14.

[71] Vallgårda, A. e Sokoler, T., "A material strategy: Exploring material properties of computers", *op. cit.*, vol. 4, 2010, pag. 3.

addirittura, l'esistenza reale del mondo materiale[72]. Si assiste all'apertura, con la parole di Tomàs Maldonado, «di una nuova dimensione della realtà: la produzione di mondi simulati, la cui "materialità", o meglio ciò che percepiamo a tutti gli effetti come la loro materialità, è pura informazione. Mondi reali, se per realtà intendiamo qualcosa che esiste al di fuori di noi […], ma al contempo mondi senza fisicità, se si esclude quella delle memorie che li generano e delle interfacce che ce li rendono esperibili»[73].

Tuttavia, una cosa è constatare l'esistenza di una nuova dimensione della realtà, un'altra è sovvertire l'assetto materiale del mondo: significherebbe, infatti, «spingersi oltre il buon senso [e] assumere come plausibile che, nel futuro, la vita degli uomini […] possa svolgersi nei limiti di una fitta ragnatela di miraggi da cui nessuno sarebbe in grado di evadere. […] Piaccia o meno siamo condannati […] a dover fare i conti con la nostra fisicità e con quella dell'ambiente»[74]. In realtà questo processo che conduce a un aumento dell'informazione a discapito della materia, si verifica, non senza ironia, anche nei materiali che perdono alcuni dei loro componenti, le cui proprietà vengono assimilate dalla materia stessa, intervenendo sulle sue qualità più profonde[75].

La dinamica di questa integrazione inizia con le funzioni meccaniche per poi inglobare quelle relative al *comfort* e alla qualità della superficie per giungere, infine, all'assimilazione dell'informazione all'interno del materiale composito, che guadagna così l'appellativo di "avanzato". In pratica, l'idea della virtualizzazione dei materiali si traduce da un lato nella riduzione materica, ovvero una riduzione del peso che architettonicamente si accoppia spesso e volentieri con un'esaltazione della "leggerezza", e dall'altro nell'inglobare più conoscenza e informazione all'interno dei materiali, che ne risultano alterati anche nei modi di relazione con l'uomo che si basano, di fatto, sulla percezione superficiale.

La prima questione – la riduzione del peso – non implica però una perdita di materialità che, più che una caratteristica fisica, quindi misurabile, è una peculiarità espressiva, strettamente legata alle potenzialità formali del materiale: «i nuovi materiali, seppur più lievi, hanno anch'essi, a modo loro, una materialità forte. Anzi: la loro materialità, appunto in quanto più sottile, è subdolamente più invadente di quella, troppo palese, dei materiali tradizionali»[76].

[72] Maldonato, T., *Reale e virtuale*, *op. cit.*, 2015, pag. 10. Maldonato è molto critico (se non polemico) verso il mondo virtuale: «tale esaltazione dell'effimero, occorre ammetterle, pone non pochi interrogativi sul futuro della cultura. […] non va sottovalutato il rischio che questa versione, per così dire, volatile della realtà virtuale possa essere intesa come parte di un disegno alternativo a una cultura dei tempi lunghi, ossia a una cultura la cui produzione e fruizione deve sempre rispettare i ritmi lenti propri della riflessione, dell'approfondimento e della cultura» (pag. 154).

[73] Manzini, E., *Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale*, Domus Academy, Milano, 1990, pag. 23.

[74] *Ivi*, pag. 12. Si veda anche Kastler, A., *Cette étrange matiére*, Stock, Paris, 1976. Inoltre, la predominanza della materialità, secondo Maldonado, si evince anche dall'ingombrante presenza di un enorme quantitativo di oggetti che, inesorabilmente diventano rifiuti (Maldonato, T., *Disegno industriale: un riesame*, Feltrinelli Editore, 2008, pag. 74, ed. orig. 1976). In questo caso, anche Manzini è d'accordo: egli definisce l'abbondanza di oggetti «alta saturazione», ovvero una «materialità non voluta dovuta alla densità di cose, persone e rifiuti» concepita come una sorta di opposto paradossale alla dematerializzazione tecnologica (Manzini, E., *Artefatti…*, *op. cit.*, 1990, pag. 29).

[75] Manzini, E., *The material of invention*, trad. in. Shugaar, A., The Mit Press, Cambridge, 1989 (ed. orig. *La materia dell'invenzione. Materiali e progetto*, Arcadia, Milano, 1986), pag. 29. L'autore specifica che la tendenza è qualla di trasformare meccanismi e sistemi operativi, che prima dovevano essere prodotti come oggetti separati, in qualcosa che è fatto del materiale stesso.

[76] Maldonato, T., *Reale e virtuale*, *op. cit.*, 2015, pag. 81.



Alvaro Siza, *Padiglione EXPO*, Lisbona, 2003. Immagine da archdaily.com.

Si pensi, ad esempio, all'incredibile padiglione portoghese per l'Expo di Lisbona realizzato da Alvaro Siza nel 1994, con progetto strutturale di Ove Arup&Partners e Cecil Balmond. Questi, nel descrivere la famosa vela, dichiara «sappiamo che un'ala spiegata in una corrente termica sostiene il momento della caduta per superare il peso della gravità, ma un successo così privo di sforzo crea un paradosso. Dove prima non c'era nulla, il volo lascia una memoria. [...] Il mistero è nel calcolo invisibile dell'esatto equilibrio, del "sopra" contro il "sotto", della sostanza contro l'immateriale, della luce contro l'ombra»[77]. L'area coperta dalla grande vela, realizzata in cemento bianco precompresso, disegna una catenaria di appena venti centimetri di spessore che, per motivi di durabilità e sismici, è in realtà sconnessa dai cavi in acciaio che la sorreggono. In questo caso, la dematerializzazione deriva dalle capacità strutturali di acciaio e calcestruzzo e, anzichè risultare in una riduzione della loro potenza espressiva, ne è, al contrario, il fulcro.

Se l'impatto di una materialità più sottile è, per certi aspetti, più dirompente di quella massiva tradizionale, anche la sua assenza non è da meno, come dimostrato dal lavoro fatto da Jean Nouvel con la Fondazione Cartier a Parigi (1994), universalmente riconosciuta come un esempio di Light Archietcture. La struttura in acciaio e vetro riflette il verde circostante, dematerializzandosi fino quasi a sparire: la percezione del volume è infatti ritenuta superflua, a favore di una poetica basata sull'ambiguità e sull'evanescenza.

Appurato che una perdita di materiale non implica una perdita di materialità, rimane da esaminare la seconda questione relativa alla dematerializzazione, ovvero l'alterazione delle superfici dei nuovi materiali. Si riparta ancora Maldonado che scrive, non senza polemica: «la superficie di questi materiali sarebbe caratterizzata da una sorta di opacità, in quanto la sua struttura costitutiva rimarrebbe occulta, inaccessibile all'osservatore, la superficie dei materiali tradizionali al contrario sarebbe un esempio di trasparenza, in quanto le loro più intime, recondite articolazioni materiali risulterebbero facilmente percepibili»[78].

Tuttavia, come nota sempre l'autore, è difficile sostenere che le superfici dei materiali tradizionali siano state scarsamente artificializzate, tant'è vero che il rivestimento è una pratica più che consolidata. «Ammesso che la superficie di tali materiali [avanzati] possa (e debba) essere resa nel futuro, per ragioni estetiche, protettive o semplicemente comunicative, più stimolante ai nostri occhi e al nostro tatto, non si vede come da ciò si possano ricavare prove consistenti a favore della famigerata tesi sulla dematerializzazione del mondo. […] A ben riflettere, tutte le superfici, anche quelle con funzioni di rivestimento esprimono sempre la materialità del proprio materiale, e siffatto materiale, dal canto suo, esprime sempre la materialità della propria superficie»[79].

Quindi, sebbene appaia più che fondata la tesi di Maldonado rispetto all'equazione alterazione superficiale (opacità)-dematerializzazione, egli ha sicuramente operato una semplificazione rispetto agli impatti che la prima ha sulla percezione e l'assimilazione culturale dei nuovi

[77] La citazione di Balmod è ripresa da Andriani, C. (a cura di), *Le Forme del Cemento*, vol. 1, AITEC e Gangemi Editori, Roma, 2006-2012, pag. 65.
[78] *Ibidem*. Maldonado si riferisce proprio a Manzini, in particolare a Manzini, E., "Geologia dell'artificiale", in *Alfabeta*, vol. 106, 1988, pp. 1-2.; Manzini, E., "Superfici comunicative. Dal sistema degli oggetti alla scena interattiva globale", in *Quaderni Di*, vol. 8, 1989, pp. 19-26; Manzini, E., *Artefatti…*, *op. cit.*, 1990.
[79] *Ivi*, pag. 84.



Jean Nouvel: *Fondazione Cartier*, Parigi, 1994. Foto dell'autrice.

materiali. «Il nostro rapporto con gli oggetti è sempre e solo un rapporto con delle superfici […]. Ma se la superficie è quella che riconosco come parte di una colonna di marmo, ad essa si collega tutta una serie di immagini già organizzate nella mia memoria, che vanno dalle mie precedenti esperienze del marmo a tutta la storia dei monumenti e delle opere d'arte che con questo materiale sono stati fatti […]. E tutto questo diventa "il marmo": con il suo peso, la sua profondità culturale, la sua "evidente" materialità»[80].

Quindi, tale alterazione, quando avviene su materiali che di per sé non hanno una chiara riconoscibilità, crea un ulteriore livello di complessità che si somma al precedente, in quanto non è possibile ritrovare in essi le forme e le convenzioni culturali, demolendo perfino gli strumenti critici basati sull'estetica tradizionale. Risulta infatti impraticabile quella reiterazione dell'esperienza che consentiva la costruzione dell'identità complessa e precisa del materiale.

Guardando ai prodotti di quello che Ezio Manzini ha definito l'*hyper-artificial*[81] è semplice comprendere le dinamiche di questo processo: «"costruire un materiale" intervenendo sulle molecole e sugli atomi porta a un risultato rispetto al quale esperienza e percezione sensoriale non garantiscono più alcuna riconoscibilità»[82], poiché si interviene a una scala che l'uomo non può comprendere, quantomeno nel settore delle costruzioni, dove il confronto è sempre a livello macroscopico.

Quello che si descrive, insomma, è il definitivo avvento della nanoscienza che, con le manipolazioni della 'chimica', della microstruttura e dell''architettura' della materia[83], ha determinato così un'enorme, e non sempre inquadrabile, espansione dello spazio di progetto dei materiali. Secondo la National Nanotechnology Initiative, fondata nel 2000 sotto la presidenza Clinton, le nanotecnologie per essere tali devono essere frutto di attività di ricerca e sviluppo ai livelli atomico, molecolare e macromolecolare in un range dimensionale compreso approssimativamente tra 1 e 100 nm, nonché avvalersi, per la loro produzione, di strutture, dispositivi e sistemi dotati di nuove proprietà e funzioni dovuti alla dimensione nano e micro. I nanomateriali, strutture cristalline di dimensione inferiore a 100 nm, sono ottenuti dalla manipolazione su scala nanometrica dei propri componenti.

É inoltre possibile classificare i nanomateriali sulla base delle loro dimensioni prevalenti: le strutture zerodimensionali hanno tutte le dimensioni in scala nanometrica, come nel caso delle nanoparticelle; le strutture monodimensionali, presentano due dimensioni nanometriche e una sola dimensione finita, come nanofili, nanorods o nanotubi; le strutture bidimensionali hanno, invece, una dimensione nanometrica a due dimensioni finite, come per i film sottili[84].

L'introduzione delle nanotecnologie, e più in generale di tecnologie *knowledge based*, ha quindi modificato significativamente, come abbiamo visto, sia la relazione esperenziale con i materiali architettonici, sia le caratteristiche del mercato edilizio. La possibilità di avere materiali multifunzionali o altamente specializzati sebbene abbia consentito di moltiplicare le possibilità di innovazione declinando a seconda del prodotto e dell'applicazione specifica le prestazioni incorporate, secondo logiche *tailor-made* e *custom-fit*, ha causato, allo stesso tempo, un'alterazione della percezione del materiale, nonché una sua più difficile collocazione all'interno dell'alfabeto materico della progettazione.

Si citi, al tal proposito, la Chiesa Dives in Misericordia realizzata da Richard Meier a Roma nel 2003, caratterizzata da tre conchiglie a simboleggiare la decostruzione della cupola romana. Esse sono costituite da conci prefabbricati in calcestruzzo, ottenuto con inerti derivanti dalla macinazione di marmo bianco di Carrara e additivato con biossido di titanio: si tratta del cemento fotocatalitico di Italcementi denominato TX Millenium[85]. Progettato per non perdere mai il candido colore che lo caratterizza, non si può negare che crei uno scollamento dall'immagine tradizionale del calcestruzzo, o quantomeno da quella che dovrebbe assumere con lo scorrere del tempo.

L'innovazione nano però non riguarda solo i prodotti: grazie al *nanomanufacturing*, che si basa su meccanismi, attuatori, sensori e macchinari che si evolvono in ambienti biologici, ha investito anche i processi produttivi. Già superato il cosiddetto approccio *top-down*, oramai quasi di comune applicazione in quanto consiste nell'utilizzo di tecniche consolidate di micro-fabbricazione (come, ad esempio, l'estrazione di nano-prodotti dal macro-materiale che li contiene), oggi si utilizza un approccio *bottom-up*, che prevede l'assemblaggio di componenti base in strutture complesse. Queste sono ottenute o per auto-costruzione, mediante una spontanea aggregazione di particelle determinata da vari tipi di forze e legami attrattivi in modo da costituire schemi ordinati, oppure per continua deposizione di nuovo materiale su una base esistente, in un processo di crescita strutturale[86].

Si consuma, così, un deciso sconfinamento in ambito biologico per dirla con Brian Arthur[87], aggiungendo un ulteriore livello di ambiguità a materiali che con Manzini abbiamo definito *hyper-artificial*. Nonostante le contraddizioni riscontrate, la possibilità di variare la dimensione e la forma delle particelle per customizzare le proprietà dei materiali nonché l'utilizzo di logiche di produzione nano ha portato, in un primo momento (siamo in pieni anni Novanta), da un lato a una sorta di "*rational exuberance*"[88] focalizzata, ancora una volta, sulla possibilità di ottenere più proprietà con meno materia in un'ottica votata fedelmente alla dematerializzazione, e, dall'altro, a una speranza di rinascita economica, ritenendo la nanoscienza un elemento critico nella risoluzione di questioni quali l'esaurimento delle risorse, il mantenimento della crescita economica e della produttività e la creazione di capitale e di competitività nel mercato[89].

[80] Manzini, E., *Artefatti…*, *op. cit.*, Milano, 1990, pag. 47.
[81] Manzini, E., *The material of invention*, *op. cit.*, 1986, pag. 27.
[82] *Ibidem*.
[83] La manipolazione della 'chimica' dei materiali fa sì che vengano introdotti nuovi compositi, quella della microstruttura consente di eliminare i difetti del materiale mediante il riposizionamento delle molecole, mentre la manipolazione dell''architettura' lavora sulla combinazione di diverse sostanze. Si vedano Fleck, N. *et alii*, "Micro-architectured materials: past, present and future", in *Proceedings of the Royal Society*, vol. 266, 2010, pp. 2495-2516; Vogt, T., "Buying time – Using Nanotechnologies for a Sustainable Future", in Fiedeler, U. *et alii* (a cura di), *Understanding Nanotechnology*, AKA Verlag, Berlino, 2010, pp. 43-60.
[84] Per successivi approfondimenti si veda Leone, M.F., *Cemento nanotech. Nanotecnologie per l'innovazione del costruire*, CLEAN, Napoli, 2012.

[85] Andriani, C. (a cura di), *Le Forme del Cemento*, vol. 1, *op. cit.*, pp. 35-36.
[86] Rebolj, D. *et alii*, "Can we grow buildings? Concepts and requirements for automated nano to meter-scale building", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, 2011, pp. 390-398.
[87] Arthur, B., *La natura della tecnologia…*, *op. cit.*, 2011.
[88] Vogt, T., "Buying time – Using Nanotechnologies for a Sustainable Future", *op. cit.*, 2010, pag. 46.
[89] Clark, J. e Flemings, M., "Advanced Materials and the Economy", *in* Scientific American, 1986, pp. 51-53.

Sulla scorta di una buona dose di ottimismo tecnologico[90], si vedeva nella dematerializzazione e nelle sue deviazioni nano la riapertura di uno spiraglio per uno sviluppo economico a basso impatto ambientale. L'entusiasmo ha avuto vita breve: si capì ben presto che, a lungo termine, le strategie di dematerializzazione, conducono sì a risultati effettivi ma non possono, da sole, trasformare completamente i processi economici lineari in processi circolari, così come non sarà possibile raggiungere un'economia sostenibile nel senso forte[91] senza una drastica diminuzione della popolazione e un radicale cambiamento dei comportamenti dei consumatori che, naturalmente, si inseriscono in un profondo piano di trasformazione delle politiche di sviluppo[92].

A tal proposito è bene ricordare che il 2019 è stato un anno particolarmente significativo per una presa di coscienza globale e collettiva sui temi della sostenibilità. Il movimento *#FridayForFuture*, guidato dalla sedicenne Greta Tumberg, a confermare ancora una volta il potere dei simboli, ha determinato la mobilitazione di milioni di giovani e soprattutto, ne ha educato i comportamenti. L'uscita del tema al di fuori delle sedi accademiche e istituzionali è testimoniata anche dalla proliferazione di materiale divulgativo finalizzato a sensibilizzare un pubblico non esperto. Si cita solo *Possiamo salvare il mondo, prima di cena*, di Jonathan S. Foer che, lucidamente, scrive: «il problema della crisi del pianeta è che si scontra con una serie di pregiudizi cognitivi innati correlati all'apatia. Anche se molte delle calamità che accompagnano i cambiamenti climatici […] sono vivide, personali e danno pensare a una situazione in via di peggioramento, nel loro complesso non danno questa sensazione. Danno la sensazione di essere astratte, lontane e isolate, anziché presentarsi come gli snodi cruciali di una narrazione sempre più incalzante. […] Se accettiamo una realtà fattuale (stiamo distruggendo il pianeta) ma non siamo in grado di crederci, non siamo migliori di chi nega l'esistenza dei cambiamenti climatici provocati dall'uomo. […] E quando il futuro distinguerà tra queste due forme di negazione, quale apparirà un errore madornale e quale un crimine imperdonabile?»[93].

[90] Reijnders, J., "The factor X debate: setting targets for eco-efficiency", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, pp. 13-21.

[91] Politiche improntate a una sostenibilità forte richiedono che il capitale naturale sia mantenuto costante nel tempo mentre, quelle a sostenibilità debole contemplano la possibilità di sostituirlo con capitale realizzato dall'uomo, tenendo costante la somma dei due. Si vedano Constanza, R. e Daly, H., "National capital and sustainable development", in *Conservation Biology*, vol. 6, pp. 37-46, 1992; Rees, W. e Wackernagel, M., *Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth*, New Society Pub, Gabriola Island, 1995.

[92] È molto interessante il dibattito sviluppatosi su questi temi negli anni Settanta tra Barry Commoner, autore del famoso *The closing circle*, e Paul Ehrlich (autore dell'altrettanto noto *The Population Bomb*), professore di Scienze Biologiche alla Stanford University, e John Holdren, fisico del California Institute of Technology. BC sosteneva che l'economia americana andasse ristrutturata sottostando alle emergenti leggi dell'ecologia, fornendo un'alternativa eco-socialista alle tesi sui limiti della crescita, e postulando che le tecnologie capitaliste fossero le principali responsabili della crisi ambientale. PE, assieme a PH, sosteneva che la sovrappopolazione fosse la causa principe del problema. Una delle maggiori divergenze risiedeva proprio nelle responsabilità dell'uomo poiché, mentre BC sosteneva che, a patto di avere un comportamento sostenibile, l'uomo non potesse effettuare reali danni al pianeta, PE e JH dichiaravamo che l'attività umana produce inesorabilmente una trasformazione ecologica. Si vedano Commoner, B., *The closing circle*, Random House, New York, 1971; Ehrlich, P., *The Population Bomb*, Sierra Club, San Francisco, 1968; Scott, R., "The Closing Circle: A Review of Barry Commoner's Book", in *IUSTITIA*, vol. 1, 1973; Ehrlich, P. e Holdren, J., "A Bulletin Dialogue on 'The Closing Circle. Critique'", in *Bull. At. Sci.*, vol. 28, pp. 16-27, 1972; Commoner, B., "A Bulletin Dialogue on 'The Closing Circle. Response", in *Bull. At. Sci.*, vol. 28, pp. 42-56, 1972. Si consiglia anche il controverso articolo di Hardin, G., "The Tragedy of the Commons", in *Science*, vol. 162, 1968, pp. 1243-1248.

[93] Cfr. Foer, J. S., *Possiamo salvare il mondo, prima di cena. Perché il clima siamo noi*, trad. it. Piccinini, I., Ugo Guanda Editore,



Manifestazione #FridayForFuture, 29 settembre 2019, Napoli.
Immagine da anteprima24.it.

Ciononostante, tutt'oggi non si trovano né le soluzioni alla crisi permanente delle risorse, comprese quelle cosiddette "verdi", cioè sostitutive di analoghe più inquinanti, né le modalità per un riciclo completo ed economicamente affrontabile di materiali e prodotti. Ciò è vero, purtroppo, anche per i materiali nanostrutturati e per i nanomateriali poiché l'elevato contenuto tecnologico – ibridi multifase, film sottili, additivi e solventi – ne rende spesso proibitivo – economicamente e in termini di dispendio energetico – il riciclo.

Chiaramente esistono forme di compensazione: l'aumento di durabilità e di efficienza fa sì che le tecnologie emergenti possano in ogni caso fornire alla società il tempo necessario ad avviare i necessari cambiamenti politici, sociali ed etici per andare alla radice della degenerazione insostenibile della società, sebbene siano anch'esse destinate, prima o poi, a esaurirsi per venire sostituite da una loro versione più performante ed efficiente.

Nella situazione così delineata, la tecnologia, ancora vittima dell'antica dualità che la vede contemporaneamente luogo della speranza di un possibile cambiamento e colpevole della sua a-naturalità, si arricchisce però di un nuovo paradosso: mentre a livello sistemico si consuma la crisi del mito demiurgico di una umanità in grado di controllare i suoi strumenti, nelle singole applicazioni la capacità demiurgica dell'uomo non sembra conoscere limiti[94]: «se per tanto tempo l'agire tecnico era tutto inscrivibile nella categoria della trasformazione, oggi siamo più vicini alla "creazione": si "crea" la materia inanimata (con la progettazione dei materiali), quella vivente (con l'ingegneria genetica), vengono "create" delle forme di intelligenza […]. Proprio questa nostra condizione di "demiurgo debole", che può "creare" a scala locale ma non riesce a controllare la scala globale, sta alla base dei problemi attuali che fanno del sistema artificiale […] una seconda natura, complessa come la prima e altrettanto difficile da conoscere e da prevedere»[95].

«Tra il mito dell'onnipotenza demiurgica e il fatalismo, tra l'accettazione incondizionata dello sviluppo tecnico e il suo aprioristico rifiuto, c'è quest'altra possibilità: essere consapevoli dei propri limiti, ma non per questo rinunciare ad agire, considerare lo sviluppo tecnico come qualcosa che nessuno può davvero decidere "in grande", ma cui tutti portano il loro contributo nella definizione degli esiti finali, pensare la tecnica come un sistema nei confronti del quale non abbassare mai le armi della critica, ma vederla anche come un enorme bacino di risorse e potenzialità»[96]. D'altronde la tecnica, come la natura, è a-etica e non agisce «né per il bene né per il male, in quanto la sua esistenza è al di fuori di queste categorie»[97].

Le parole di Ezio Manzini ricordano, in maniera solo relativamente sorprendente dato che si parla di "produzione di materia", quelle del 1959 del famoso fisico Richard P. Feynman[98] – il

Milano, 2019, pp. 27-29 (ed. orig. *We are the Weather. Saving the Planet Begins at Breakfast*, Farrar, Straus and Giroux, New York, 2019).

[94] Manzini, E., *Artefatti…*, *op. cit.*, Milano, 1990, pag. 38.

[95] *Ibidem*.

[96] Manzini, E., *Artefatti…*, *op. cit.*, Milano, 1990, pag. 39.

[97] *Ivi*, 38.

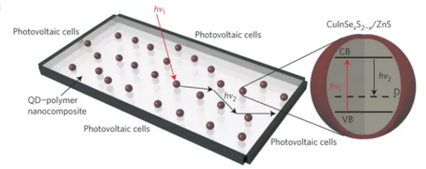
[98] Sebbene appartenga dunque, senza dubbio a Feynman il merito di aver tracciato la rotta per la nano-ingegnerizzazione della materia, il termine 'nanotecnologia' sarà coniato solo nel 1974 da Norio Taniguchi che la definì come un processo di riorganizzazione della materia atomo per atomo o molecola per molecola (cfr. Taniguchi, N., "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'", in *Proc. Intl. Conf. Prod. Eng.*, Part II, Japan Society of Precision Engineering, Tokyo, 1974). Sull' effettiva possibilità di riorganizzare la materia atomo per atomo, si costruisce il dibattito recente che vede protagonista Kim Eric Drexler

NANOTECHNOLOGY
IN ARCHITECTURE

QUANTUM DOTS

Il Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università di Milano-Bicocca, in collaborazione con il Los Alamos National Laboratory (USA) l'azienda UbiQD, ha messo a punto un nuovo tipo di concentratori solari luminescenti (LSC, Luminescent Solar Concentrators), ovvero lastre di plastica o vetro in cui sono incorporate speciali nanoparticelle, i quantum dots, che assorbono la luce solare e la riemettono all'interno della lastra, generando così energia.

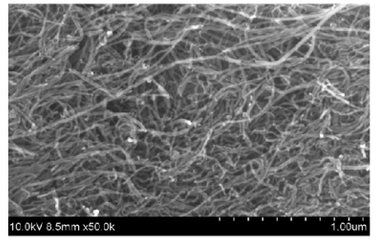
Cfr. Meinardi, F., McDaniel, H., Carulli, F. et alii, "Highly efficient large-area colourless luminescent solar concentrators using heavy-metal-free colloidal quantum dots", in *Nature Nanotech*, vol. 10, 2015, pp. 878–885.



NANOTUBI

I nanotubi di carbonio sono strutture di forma cilindrica con diametro nell'ordine dei nanometri e lunghezza pari anche a qualche millimetro. Hanno proprietà, termiche, elettriche e meccaniche, con un modulo elastico fino a 5 volte quello dell'acciaio, ma con densità fino a 6 volte inferiore. Sono utilizzati dall'elettronica fino all'impiego in vernici e polimeri di vario genere.

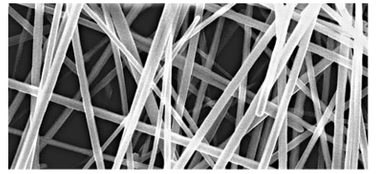
A fianco. Nanotubi Multi Walled con diametro esterno pari a 20-30 nm, adatti per vernici, polimeri ed epossidici. Immagine da www.interatomos.com.



NANOWIRES

I *nanowires* sono nanoparticelle di conduttori o semiconduttori di forma allungata con diametro di poche decine di nanometri, utilizzati generalmente per interconnettori e microchips ma anche per pannelli fotovoltaici.

A fianco. Nanofili d'argento per fotovoltaico, per film conduttori trasparenti e altre applicazioni. Immagine da www.interatomos.com.



UHPFRC

Materiale composito nanostrutturato a base cementizia, con fumo di silice, polvere di quarzo e, in generale, aggregati fini. Presenta rinforzo diffuso sotto forma di fibre in PVA, PP o metalliche. Viene impiegato per la realizzazione di elementi prefabbricati. Il materiale viene ingegnerizzato mediante *nano-indendation testing* e analisi nanomeccanica.

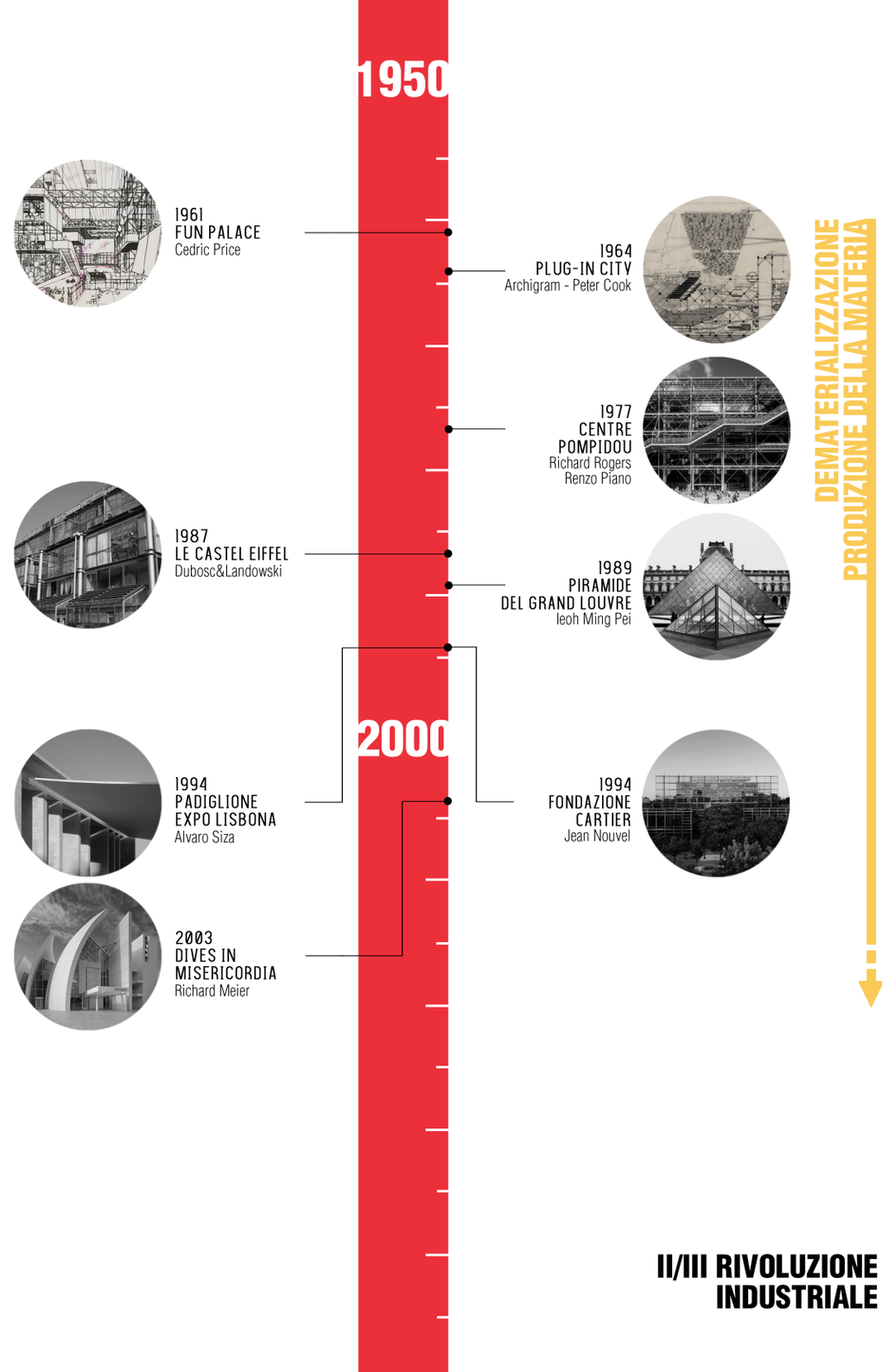
Cfr. Leone, M., *Innovazione tecnologica e materiali avanzati. Alte prestazioni ed eco-efficienza: nanotecnologie per l'evoluzione dei materiali cementizi*, Tesi di dottorato, 2008.

A fianco. Dettaglio di UHPFRC con fibre metalliche.



primo a comprendere le implicazioni dettate dalle possibilità di intervenire sulla materia a livello molecolare – rispetto alla possibilità di ricollocare gli atomi all'interno delle molecole: «non so cosa potrebbe accadere esattamente, ma non posso dubitare del fatto che quando avremo 'controllo' sulla posizione delle cose a una piccola scala, otterremo un enorme *range* di possibili proprietà delle sostanze e di cose che potremmo fare»[99].

La vera sfida dunque, la nuova frontiera del progetto, indipendentemente dal settore in cui ci si trova, si trova in questa incertezza, nei continui passaggi di scala, «nel confronto-scontro con ciò che di più nuovo la tecnica propone. Sta nella capacità di culturalizzarlo. Sta nella sua capacità di contenerlo entro cicli della materia e dell'energia compatibili con l'ambiente. Sta nel difficile e faticoso lavoro che la cultura del progetto può e deve svolgere per "addomesticare" la parte più "selvaggia" della seconda natura artificiale con cui ci troviamo a confrontarci»[100].



grazie alla nozione di assemblatore molecolare, ovvero un dispositivo apparentemente in grado di guidare le reazioni chimiche posizionando le molecole con precisione atomica. Tuttavia, gli assemblatori molecolari secondo Richard Smalley non sono in grado di controllare, nemmeno in linea di principio, i nanofenomeni che si verificano, in quanto gli strumenti adoperati risulterebbero in ogni caso 'fuori scala'. La contestazione di Smalley si basa su due obiezioni definite "*fat fingers*" e "*sticky fingers*", letteralmente "dita grasse" e "dita appiccicose". Non sarebbe possibile, infatti, prelevare e posizionare atomi singoli con la precisione teorizzata da Drexler, in quanto le 'dita' a controllo digitale non sarebbero in grado di svolgere tali operazioni. Sarebbe infatti necessario un braccio manipolatore che tuttavia, essendo fatto a sua volta di atomi, andrebbe a influenzare il posizionamento degli atomi stessi, interagendo con essi. D'altro canto, Drexler ribadisce che i suoi assemblatori molecolari non lavorano affatto con singoli atomi bensì con molecole reattive e, proprio come gli enzimi e i ribosomi, non necessiterebbero affatto delle 'dita' di Smalley. Per ulteriori approfondimenti si vedano Drexler, E., *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, Anchor Books, New York, 1986; Smalley, R., "Of Chemistry, Love and Nanobots", in *Scientific American*, vol. 285, 2001, pp. 76-77; Drexler, E., "Open Letter to Richard Smalley", in *Chemical & Engineering News*, vol. 81, 2003, pp. 38-39.

[99] Cfr. Feynman, R.P., "There is Plenty of Room at the Bottom. An invitation to enter a new fields of physics", *Annual meeting of American Physical Society at Caltech*, trascrizione dell'intervento tenuto il 29 dicembre 1959, pag. 7.

[100] Manzini, E., *Artefatti…*, *op. cit.* , Milano, 1990, pag. 74.



il Cantiere, Pordenone, 2019. Foto dell'autrice.

2.3 De-standardization e mass customization

«Siamo sicuri che non sia una rivoluzione tecnologica che, ciecamente, detta una metamorfosi antropologica senza controllo? Abbiamo scelto degli strumenti, e ci piacciono: ma qualcuno ha badato a calcolare, preventivamente, le conseguenze che il loro uso avrà sul nostro modo di stare al mondo, forse sulla nostra intelligenza, in casi estremi sulla nostra idea del bene e del male?»[101].

Le parole di Alessandro Baricco in *The Game*, significativa analisi degli effetti antropologici della Rivoluzione Digitale, rivelano le stesse perplessità sollevate da Manzini rispetto al ruolo della tecnica e alla nostra incapacità di controllarne pienamente gli esiti a una scala globale.

Ciononostante, le rivoluzioni tecnologiche, sebbene creino uno sconvolgimento dei modi di vivere, raramente producono un ribaltamento dei modi di pensare degli uomini[102]. Ad esempio, l'invenzione della stampa da parte di Gutenberg ha determinato un definitivo abbandono della cultura orale nonché un'ampia diffusione di quella scritta, ma non ha determinato un «terremoto nella postura mentale degli umani»[103]; allo stesso modo, l'invenzione della macchina a vapore, che ha avviato la rivoluzione industriale e ha cambiato tanto le abitudini quotidiane delle persone che la geografia sociale del mondo, non ha veramente causato «una collettiva mutazione mentale»[104]. Non si può dire altrettanto del motore a scoppio, dell'elettricità e della produzione in linea, responsabili dell'avvio della Seconda Rivoluzione Industriale e innegabilmente forieri di una "mutazione mentale", compiutasi soprattutto attraverso la diffusione di due concetti fondamentali, standardizzazione e massificazione della produzione.

Lo spiega molto bene Alfin Toffler, "futurologo" di mestiere, nell'analizzare i principi alla base della Seconda Rivoluzione Industriale: durante la "*Second Wave*", ovvero l'inarrestabile ondata di cambiamento che seguì l'avvento dell'era delle macchine, le procedure amministrative e le strutture organizzative della società, il *software*, subirono lo stesso processo di standardizzazione dell'*hardware*[105].

[101] Baricco, A., *The Game*, Giulio Einaudi Editore, Torino, 2018, pag. 17.
[102] *Ivi*, pag. 27.
[103] *Ivi*, pag. 28.
[104] *Ivi*, pag. 28-29.
[105] Toffler, A., *The Third Wave. The classic study of tomorrow*, William Morrow edition, New York, 1980. Dello stesso autore si veda anche *Future Shock*, Random House, New York, 1970 e *Powershift*, Bantam Books, New York, 1990.

Dagli stipendi al sistema scolastico, fino alla definizione dei giorni feriali e quelli festivi, all'uniformazione delle lingue, della moneta, della pubblicità, tutto finì per obbedire alle ragioni della standardizzazione. «*The principle of standardization ran through every aspect of daily life. […] At many levels, therefore, the Second Wave brought a flattening out of differences through a relentless application of the principle of standardization*»[106].

Il concetto di standard, dunque, diventa parte di un'impostazione culturale profondamente radicata che, è superfluo quasi sottolinearlo, permea pensiero e procedure alla base del progetto architettonico e di design, obbedendo alla fondamentale logica della ripetizione[107], che consentiva la produzione e la distribuzione di massa. È anche vero che tale sovrastruttura culturale garantiva «gradi misurabili o riconoscibili di uniformità e qualità»[108], dal momento in cui il concetto di standard veniva inteso come una «forma qualificante, tendente alla perfezionabilità dell'oggetto in rapporto a un *optimum* ripetibile»[109].

Ovviamente, ciò comportava un'aggregazione degli individui, standardizzati nell'"adulto medio" e associati in gruppi di consumatori con caratteristiche comuni, con il duplice obiettivo di ridurre l'impatto della variabilità dell'utenza sulle operazioni di produzione e semplificarne le interazioni.

Tuttavia, già negli anni Settanta, l'ISO dichiarò che la normativa del settore delle costruzioni doveva partire dal riconoscimento della finalità ultima di un organismo edilizio, cioè la rispondenza a esigenze umane espresse sotto forma di requisiti e prestazioni. Quindi, l'assunzione di riferimenti e requisiti standard si configurò velocemente come un'ipotesi riduttiva, frutto di un'impostazione metodologica avente l'obiettivo di mediare il rapporto tra tecnologia e prodotto, non tra utenza e progetto[110].

Infatti Nardi, nel 1977, fornì una definizione più ampia di standard, visto come l'insieme delle «caratteristiche generali e particolari da riscontrare in un fenomeno, allo scopo di consentire un giudizio sul fenomeno stesso dal punto di vista della sua utilizzabilità»[111], abbandonando così quasi del tutto gli aspetti quantitativi per quelli qualitativi e restituendo allo standard la relazione con l'utilizzabilità e quindi, con l'utenza. Questo ritorno all'utenza, coincide con l'affermarsi di sistemi produttivi improntati sulla flessibilità, ovvero la capacità di un'azienda di adattarsi efficientemente ai cambiamenti provenienti dall'esterno – dalla variabilità al volume della domanda, dalla disponibilità delle materie prime all'innovazione tecnologica – e sull'agilità, ovvero la rapidità con cui si risponde al cambiamento stesso[112]: «si faceva strada, così, l'idea della fabbricazione per piccole e per piccolissime serie e, al limite, per pezzi unici, potendosi, al tempo stesso, prevedere, con nuove impostazioni, un incremento di rendimento»[113].

[106] Toffler, A., *The Third Wave…*, *op. cit.*, 1980, pp. 48-49.
[107] Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", in *Design Studies*, vol.27, 2006, pag. 232.
[108] Reichlin, A., "Standardizzazione", in *Dan*, vol. 6, Roma, 1969, pag. 67.
[109] *Ibidem*.
[110] Cfr. De Paolis, V. e Principe, J., "Qualità del progetto oltre gli standard", in Lucarelli, M. *et alii* (a cura di), *Progettare resiliente*, Maggioli Editore, Santarcalgeno di Romagna, 2018.
[111] Cfr. Nardi, G., "Prefabbricazione chiusa e prefabbricazione aperta", in Nardi, G. (a cura di), *Progettazione architettonica per sistemi e componenti*, Franco Angeli, 1977, pp.48-55.
[112] Si veda Duguay, C., "From mass production to flexible/agile production", in *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 17, pp. 1183-1195.
[113] Ciribini, G., "Industria e progetto, domani", *op. cit.*, 1987.

Il nuovo corso dell'industria manifatturiera era dovuto al progresso tecnologico di quegli anni, iniziato prima introducendo il comando numerico su singole macchine, per poi arrivare al controllo numerico diretto, a quello computerizzato, fino ai sistemi integrati, ovvero versatili, di lavorazione. Si inizia sì a parlare di de-standardizzazione, ma non si nega ancora la «ripetizione e la serialità nell'azione produttiva: si limita a sostituire alla ripetizione icastica una ripetizione analogica, fondata su un supporto segnico unico»[114]. Si abbandona la concezione di un sistema di produzione "ottimale", per ricercarne una basata sulla «disponibilità dei mezzi ai fini della saturazione permanente degli stessi e del rendimento globale dell'operazione produttiva»[115].

In quello stesso periodo si diffonde, sul celebre modello giapponese della Toyota, il processo di miglioramento continuo della produzione, basato su modifiche incrementali realizzate in accordo ai *feedback* provenienti dai processi stessi e dagli utilizzatori con l'obiettivo di innalzarne la qualità globale. Noto anche come *lean* o *just-in-time production*, lo stile Toyota consiste nel produrre "ciò che serve quando serve" e richiede alcuni accorgimenti come l'utilizzo di tempi di *set up* della produzione brevissimi, in modo da aumentare la flessibilità globale, e l'applicazione della tecnica *jidoka* di gestione dei lotti di produzione, resi a tal punto autonomi da avere la facoltà di interrompere il flusso produttivo nel caso di un riscontrato difetto. Un altro celebre approccio è conosciuto come *kaizen*[116], imperniato sull'identificazione, riduzione ed eliminazione dei processi non ottimali di produzione mediante un loro miglioramento graduale e continuo, spesso pensato e realizzato dai lavoratori e, per questo, perfettamente integrato nei meccanismi produttivi.

Negli stessi anni, a partire, quindi, più o meno dal 1980, vengono gettate le basi per quella che sarà poi definita la Rivoluzione Digitale attraverso tre "gesti lunghi", ovvero la digitalizzazione di testi, suoni e immagini, la nascita del Personal Computer e della "rete"[117]. Alla fine degli anni '90, Internet e il World Wide Web, già diffusi, accolgono nel 1998 il motore di ricerca per eccellenza, Google[118], concludendo quella che, nei paragrafi precedenti, è stata definita epoca post-industriale – di terza fase – e sulla cui temporalizzazione vale la pena soffermarsi.

[114] *Ibidem*.
[115] *Ibidem*.
[116] Il termine deriva dal libro di Imai, M., *Kaizen: The Key To Japan's Competitive Success*, McGraw-Hill Education, New York, 1986.
[117] Baricco, A., *The Game*, *op. cit.*, 2018, pag. 68.
[118] Il percorso che porterà alla nascita di Google inizia negli anni '60, quando, durante la Guerra Fredda, gli americani iniziarono a domandarsi come comunicare tra loro senza essere intercettati dai russi: nacque così ARPANET, da un'idea di Joseph C. R. Licklider e Welden E. Clark. Nel 1969, ARPANET viene adattato dall'Università di Los Angeles e dall'Università di Stanford per mettere in comunicazione i computer dei loro ricercatori. Ben presto, diversi stati, università e associazioni si dotarono di un proprio *network* e, nel 1974, due ingegneri informatici americani – Robert Kahn e Vinton Cerf – inventarono un protocollo, il TCP/IP (Transmission Control Protocol e Internet Protocol), che mise in comunicazione *network* tra loro differenti, segnando la nascita ufficiale di Internet. Nel frattempo, tra il 1981 e il 1984, nascono i primi tre Personal Computer, l'IBM, il Commodore 64 e il Mac. Il 1981 è anche l'anno dell'SMTP - Simple Mail Transfer Protocol, che consentì una rapida diffusione della mail, sebbene questa fosse stata inventata da Ray Tomlinson già nel 1971. Nel 1990, Tim Berners-Lee inaugura il World Wide Web, lanciando il primo sito della storia, quello del CERN di Ginevra. Iniziarono a proliferare i motori di ricerca, fino ad arrivare nel 1998 a Google, inventato da due ventiquattrenni di Standford, Sergej Brin e Larry Page. Si veda Pone, S. e Colabella, S., *Maker. La fabbricazione digitale per l'architettura e il design*, Progedit, Bari, 2017.

Infatti, con l'avvento dell'ormai universalmente accettata Quarta Rivoluzione Industriale, è sorto il problema di quando fosse avvenuta in realtà la Terza. Klaus Schwab[119], propone la seguente collocazione temporale delle varie rivoluzioni: «*the first industrial revolution spanned from about 1760 to around 1840. Triggered by the construction of railroads and the invention of the steam engine, it ushered in mechanical production. The second industrial revolution, which started in the late 19th century and into the early 20th century, made mass production possible, fostered by the advent of electricity and the assembly line. The third industrial revolution began in the 1960s. It is usually called the computer or digital revolution because it was catalyzed by the development of semiconductors, mainframe computing (1960s), personal computers (1970s and 1980s) and the internet (1990s)*»[120].

Schwab, ci ritiene, oramai, in piena Quarta Rivoluzione Industriale: «*I believe today we are at the beginning of a fourth industrial revolution. It began at the turn of this century and builds on the digital revolution. It is characterized by a much more ubiquitous and mobile internet, by smaller and more powerful sensors that have become cheaper, and by artificial intelligence and machine learning*»[121].

Jeremy Rifkin invece, nel 2011, parla di Terza Rivoluzione Industriale solo a partire dalla crisi economica del 2008, in quanto «il settore IT e Internet non hanno, in sé per sé, costituito una nuova rivoluzione industriale»[122] poiché era «necessario che le nuove tecnologie convergessero con un nuovo regime energetico»[123] ed era quindi fondamentale che avvenisse prima la crisi del sistema petrolifero[124].

[119] Schwab, K., *The Fourth Industrial Revolution*, Currency, New York, 2016.

[120] *Ivi*, pp. 6-7. Anche la X Commissione Permanente per le Attività produttive, commercio e turismo fa riferimento alla stessa suddivisione temporale: «la prima fase è stata caratterizzata dall'introduzione del telaio meccanico (1784) e dallo sfruttamento dell'energia del vapore; all'inizio del XIX secolo la seconda fase è stata segnata e dalla produzione di massa con metodi tayloristici (1870: prima catena di montaggio nei mattatoi di Cincinnati) e dall'avvento dell'energia elettrica. Nella seconda metà del XX secolo, l'informatica caratterizza la terza fase con l'introduzione del computer che ha rivoluzionato i processi produttivi grazie al progressivo crollo del costo dell'elaborazione, immagazzinamento e della trasmissione dei dati. L'uso di sistemi digitalizzati caratterizza la quarta fase: la connessione tra oggetti è resa possibile congiuntamente alla disponibilità di sensori e attuatori sempre più piccoli, meno costosi e a consumo ridotto, dalla presenza di connessioni internet a basso costo e pervasive e dalla disponibilità di un numero illimitato di indirizzi sulla rete attribuibili anche ad oggetti di poco valore» (X Commissione Permanente per le Attività produttive, commercio e turismo, *Indagine conoscitiva su "Industria 4.0": quale modello applicare al tessuto industriale italiano. Strumenti per favorire la digitalizzazione delle filiere industriali nazionali*, 2016, pag. 27, disponibile all'indirizzo: http://documenti.camera.it/leg17/resoconti/commissioni/bollettini/pdf/2016/06/30/leg.17.bol0665.data20160630.com10.pdf).

[121] *Ivi*, pag. 7.

[122] Rifkin, J., *La Terza Rivoluzione Industriale. Come il «potere laterale» sta trasformando l'energia, l'economia e il mondo*, trad. it. Canton, P., Mondadori, Milano, 2018 (ed. orig. *The Third Industrial Revolution*, Palgrave Macmillan, Londra, 2011), pag. 28.

[123] *Ibidem*.

[124] Secondo Rifkin, la bolla immobiliare scoppiata nel 2007 artefice, assieme alla bolla creditizia e a quella finanziaria che ne derivano, della "Grande Recessione", è in realtà germinata dalla decelerazione della Seconda Rivoluzione Industriale, a partire dagli anni Ottanta. In quel periodo, il mercato edile, fino ad allora fiorente grazie alla costruzione del sistema autostradale americano che aveva consentito l'edificazione delle vaste periferie statunitensi, iniziò a rallentare, portandosi dietro tutta l'economia americana. Nel 1970, gli americani avevano già consumato metà delle risorse petrolifere presenti sul loro territorio e iniziarono a essere dipendenti da quelle estere, come si accorse il mondo intero in seguito alla crisi petrolifera del 1973. Nonostante la battura d'arresto dell'economia, gli americani continuarono a spendere, dando fondo prima ai propri risparmi e poi iniziando a indebitarsi pur di conservare il proprio stile di vita. «La sbornia globale di consumismo e il forte aumento della domanda aggregata che l'ha accompagnata hanno messo sotto pressione le sempre più scarse riserve petrolifere, con la



Copertina di The Economist, 21 aprile 2012.
Illustrazione di Brett Ryder.

Anche l'Economist[125], in un articolo del 21 aprile del 2012, parla ancora di Terza Rivoluzione Industriale, sintetizzandone magistralmente le peculiarità in una famosa vignetta di Brett Ryder (si veda l'immagine a pag. 105), raffigurante diversi oggetti fuoriuscenti da una fabbrica mentre un uomo, vestito come un colletto bianco, ne digita (o ne programma) su un computer le caratteristiche.

Sebbene le perplessità di Rifkin siano più che valide, ormai la locuzione Industria 4.0 è talmente diffusa e pervasiva che, qui, la daremo per buona, anche perché la Quarta Rivoluzione è indubbiamente quantomeno una "rivoluzione mentale", «*which entails nothing less than a transformation of humankind*»[126].

Più veloce, più ampia e profonda delle precedenti rivoluzioni è responsabile, inoltre, del definitivo ribaltamento dei due concetti – standardizzazione e massificazione – che avevano determinato l'altra grande rivoluzione mentale, trasformandoli, addirittura nelle loro dicotomie.

Fatti, quindi, gli opportuni chiarimenti onomastici, resta da capire cosa si intenda oggi per de-standardizzazione e, soprattutto, quale sia la sua collocazione all'interno del nuovo panorama progettuale e manifatturiero che si va delineando. Ai nostri giorni per la prima volta, le tecnologie dette abilitanti consentono infatti una reale de-standardizzazione, segnando il superamento del precedente sistema produttivo ripetitivo e seriale.

L'Internet of Things (IoT), ovvero la rete di oggetti fisici che dispongono della tecnologia necessaria per rilevare e trasmettere informazioni, consente nuove forme di interazione – *Man-Machine* o *Machine-Machine Interaction* – per ottenere un maggiore controllo sugli strumenti che governano la produzione; l'*additive manufacturing* e il *3D printing* aprono alla produzione di oggetti fisici potenzialmente di qualsiasi forma e altamente customizzabili; la raccolta e dall'analisi dei *big data* garantisce una rapida elaborazione di grandi quantitativi di informazioni, a partire da quelle legate al soddisfacimento dei bisogni dell'utenza; la robotica avanzata, infine, consente l'automazione dei processi produttivi che, come già avviene per il settore automobilistico, aumentano incredibilmente la variabilità dell'offerta senza intaccare i costi di produzione[127], salvo, naturalmente, gli investimenti iniziali.

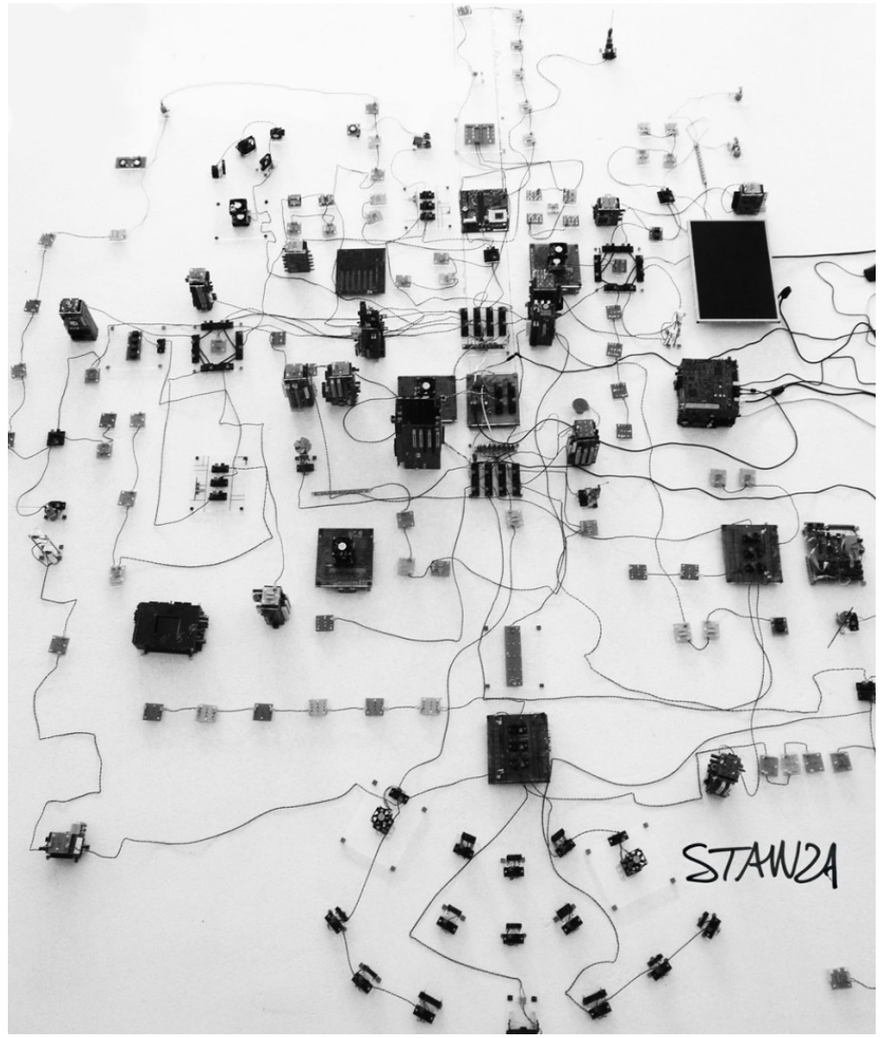
Le de-standardizzazione dunque, si muoverebbe su due binari intimamente connessi, uno tecnologico, legato alle traiettorie offerte dal modello Industria 4.0 e l'altro, potenziato dal primo, legato al riposizionamento del consumatore, e quindi di un'informazione complessa, al centro della strategia produttiva, sempre più spinta verso la customizzazione dei prodotti.

conseguenza di un forte rialzo dei prezzi nel mercato mondiale. La forte accelerazione del prezzo del petrolio ha innescato aumenti incontrollabili lungo tutta la catena dell'offerta dei prodotti più diversi, dai cereali alla benzina, portando alla fine a un crollo globale del potere d'acquisto quando, nel luglio 2008, il petrolio ha toccato il record di 147 dollari a barile». Cfr. Rifkin, J., *La Terza Rivoluzione Industriale..., op. cit.*, 2018, pag. 31.

[125] The Economist, *The third industrial revolution*, 21 aprile 2012.

[126] Schwab, K., *The Fourth…, op. cit.*, 2016, pag. 1.

[127] Alle tecnologie abilitanti elencate, si aggiungono: il *cloud* e il *cloud computing*, ove il primo è un'infrastruttura IT comune, flessibile e modificabile per condividere dati, informazioni e applicazioni attraverso internet, mentre il secondo abilita flessibilità, rilasci di informazione e servizi con cicli di vita brevi; la *cybersecurity*, ovvero l'insieme di tecnologie e processi necessari a proteggere dispositivi e dati da accessi non autorizzati; la realtà aumentata, cioè l'arricchimento della percezione sensoriale umana mediante informazioni manipolate elettronicamente; le *wearable technologies*, una particolare declinazione dell'IoT che integra elettronica, *software* e sensori all'interno di oggetti indossabili. Cfr. X Commissione Permanente per le Attività produttive, commercio e turismo, Indagine conoscitiva su "Industria 4.0", *op. cit.*, 2016, pp. 29-32.



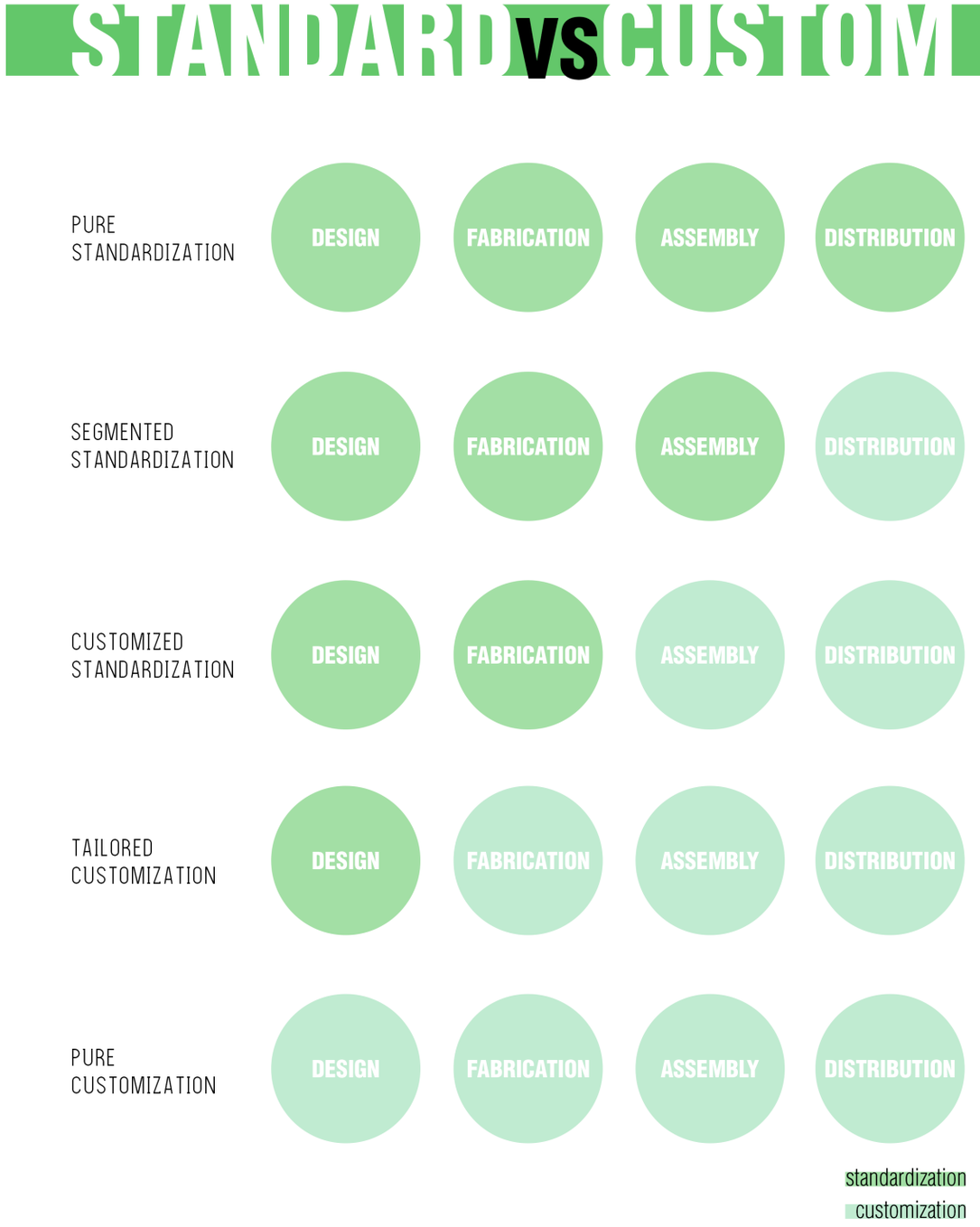
Stanza, *Capacities: Life In The Emergent City*, 2010. Immagine tratta da www.stanza.co.uk.
L'installazione dell'artista britannico cattura lo scorrere del tempo in *real-time*, rappresentando il cambiamento e la complessità dello spazio cittadino. Dati relativi a temperatura, luce, pressione atmosferica, suoni e rumori sono raccolti da sensori e messi in rete, per poi essere esteticamente trasformati in un gioco di cavi all'interno del museo. L'arte nell'epoca digitale passa per l'IoT.

Ne deriva, invece, che standardizzazione e customizzazione sarebbero quindi legate da un rapporto di proporzionalità inversa, tant'è vero che al diminuire della prima, aumenta la seconda. Infatti, Joseph Lampel e Henry Mintzbergl, a partire da una suddivisione della produzione in quattro fasi – design, fabbricazione, assemblaggio e distribuzione –, hanno individuato diverse strategie produttive proprio sulla base dell'articolazione del rapporto tra standardizzazione e customizzazione[128]. L'ipotesi di partenza è che, dal momento che il costo della customizzazione aumenta all'aumentare della variabilità dell'offerta, le aziende tendono a personalizzare la catena produttiva a partire dalle funzioni alla fine di essa procedendo, quindi, dalla distribuzione al design[129].

La prima strategia descritta è quella della pura standardizzazione, basata cioè su un design dominante e su prodotti realizzati e distribuiti su larga scala. Segue la standardizzazione segmentata che, essendo improntata sulla suddivisione dell'utenza in ampi gruppi con caratteristiche comuni, porta alla realizzazione di un prodotto standardizzato entro limiti di variabilità ben definiti. Spinta al limite, questa conduce a una distribuzione iperfina che, sebbene offra grandissima scelta, non risponde ancora alle richieste dirette del consumatore. Quest'ultimo viene coinvolto nel solo processo di assemblaggio di parti modulari nel caso della standardizzazione customizzata, ottenendo quindi una configurazione personalizzata nell'ambito delle componenti disponibili. Vi è poi la customizzazione su misura, dove il produttore presenta a un potenziale acquirente un prototipo che verrà poi personalizzato in accordo ai suoi bisogni. In questo caso, la customizzazione arriva fino alla fabbricazione, ma non al design del prodotto. Infine, solo la pura customizzazione prevede una profonda penetrazione del consumatore all'interno della catena produttiva, arrivando fino alla fase di progettazione e portando, si presume, alla de-standardizzazione completa della produzione.

[128] A seconda di quale delle strategie produttive elencate le aziende utilizzino nella gestione del processo di produzione, di sviluppo del prodotto e nelle transazioni commerciali, esse possono essere suddivise in: industrie di massa, con una produzione meccanicizzata e inflessibile, una distribuzione di massa e transazioni generiche; *thin industries*, dove la customizzazione è protagonista di ogni aspetto della produzione, ogni prodotto è unico così come le transazioni, che sono specifiche per ogni cliente; industrie a catalogo, dove produzione e prodotti sono a standardizzazione segmentata, fornendo cioè un'ampia possibilità di scelta che però rimane generica, mentre le transazioni sono standardizzate; industrie a menù, dove i consumatori possono scegliere le caratteristiche del prodotto finale, in un meccanismo di standardizzazione customizzata con transazioni completamente personalizzate; industrie su misura, dove produzione e prodotti sono customizzati su misura, ovvero il nucleo centrale del prodotto viene adattato alle esigenze del cliente, sebbene la transazione finale sia standardizzata; *routing industries*, come ad esempio una compagnia di spedizioni, dove l'ordine viene raccolto in maniera standardizzata e portato a termine in maniera customizzata, in quanto ogni consumatore ha un suo servizio standard; *agent industries*, come ad esempio quelle che offrono servizi sanitari, dove i venditori agiscono come agenti dei consumatori, custodendo i loro interessi finanziari, sanitari o tecnici. In questo caso, mentre le transazioni tendono a essere standardizzate, sia i servizi offerti che l'intero processo possono essere definito di customizzazione su misura; *bulk industries*, come a esempio i produttori di calcestruzzi, dove i prodotti standardizzati sono venduti attraverso contratti a lungo termine personalizzando transazioni e distribuzione. Si veda, Lampel, J. e Mintzberg, H., "Customizing Customization", in *Sloan management review*, Gennaio, 1996, pp. 21-30.

[129] Blecker, T. *et alii* descrivono un percorso analogo per arrivare alla customizzazione, articolato in quattro livelli differenziabili in base al grado di coinvolgimento dell'utente: i prodotti adattivi, ovvero prodotti standard individualizzati dai consumatori stessi o dai rivenditori; i prodotti "*assembly to order*", in cui i consumatori configurano le loro varianti di prodotto sulla base di moduli standard; i prodotti "*fabricate to order*", in cui i consumatori sono autorizzati a modificare i moduli di partenza; i prodotti completamente customizzati, in cui le parti o i moduli sono progettati in accordo ai bisogni del consumatore. (Blecker, T. *et alii*, *Mass Customization vs. Complexity: A Gordian Knot?*, MPRA Paper n. 5290, 2004, pp. 894-898, disponibile online all'indirizzo: http://mpra.ub.uni-muenchen.de/5290/).



Schema tratto da Lampel, J. e Mintzberg, H., "Customizing Customization", in *Sloan management review*, Gennaio, 1996. Rielaborazione a cura dell'autrice.

Il rapporto di proporzionalità inversa così descritto comporta sì una completa de-standardizzazione, ma se e soltanto se il concetto di standard si inserisce ancora all'interno di una logica seriale e ripetitiva ormai risalente a ben due rivoluzioni industriali fa.

La standardizzazione, infatti, prima di essere ridotta a cardine della produzione di massa, era soprattutto un vincolo culturale, frutto di un'esigenza di riconoscibilità del prodotto, sia cognitiva che legata al suo funzionamento, come infatti già si comprende dalla definizione che ne dà Nardi nel lontano 1977. Un prodotto, infatti, seppur altamente customizzato, manterrà sempre un nucleo progettuale legato al soddisfacimento di principi di usabilità, di funzionalità, di facilità d'uso e di montaggio, di affidabilità delle soluzioni adoperate, di coordinazione, di interscambiabilità[130].

A dispetto delle possibilità offerte dalle tecnologie abilitanti, oggi in grado di ovviare a problemi di produzione prima molto complessi, il design si muoverà sempre all'interno dei limiti imposti dalla standardizzazione, a patto che questa venga ridefinita come insieme di regole finalizzate a garantire proprio usabilità, funzionalità e riconoscibilità, intesa in senso ampio, dei prodotti. Quindi, se è vero che la fabbrica disegnata da Brett Ryder potrà sfornare, liberando la produzione – e lo standard! – dalla serialità e dalla ripetizione, sia un martello che un aereo, il nucleo funzionale dell'aereo sarà sempre lo stesso, a meno che non si trovi un nuovo principio di funzionamento che soddisfi l'esigenza umana di spostarsi via aria che, richiederebbe, naturalmente, un nuovo design e nuovi "standard". La vera rivoluzione, quindi, risiede nello scollegare la standardizzazione dalla ripetizione, proponendo diversità, differenziazione ed evoluzione dinamica[131]. Più che di de-standardizzazione, insomma, si dovrebbe parlare di de-serializzazione.

Si pensi, ad esempio, alla copertura della Great Court – di ben 95 per 74 metri – del British Museum a Londra, realizzata dallo Studio Foster and Partners con progetto strutturale di Buro Happold Engineering che, per l'occasione, ha elaborato un apposito programma per il dimensionamento dei telai a rete e per la definizione della sagoma dei tasselli triangolari in vetro utilizzati. La copertura, costituita da una lega d'acciaio particolarmente duttile, è costretta a fare i conti con la preesistenza, confrontandosi con i supporti irregolari – la Reading Room non è posta esattamente al centro della Great Court, distanziandosi da questa di 28,8 metri sul lato nord, di 14,4 metri sui lati est e ovest e di 23,8 metri a sud – e le restrizioni in termini di altezza, necessarie a minimizzarne l'impatto visivo all'esterno.

Ne deriva una copertura irregolare realizzata con l'ausilio di 4.878 profili scatolari differenti a sezione rettangolare innestati su ben 1.566 giunti a sei vie e con più di 3000 pannelli in vetro customizzati (differenziati anche solo di qualche millimetro)[132]. A dispetto dell'utilizzo di una serie di elementi chiaramente non realizzabili in serie, il processo di produzione, al contrario, è stato accuratamente studiato per essere automatizzato il più possibile.

[130] Si veda Norman, D., *The design of everyday things*, Basic Books, New York, 2013.
[131] Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", *op. cit.*, 2006, pp. 232-233.
[132] L'azienda produttrice è l'austriaca Waagner biro (wb-sg.com). Per ulteriori approfondimenti si vedano: Stansfield, K., "British Museum: the Great Court", in *The Structural Engineer*, vol. 77, 1999; Giuffrè, R. *et alii*, (a cura di), *I linguaggi della riabilitazione. Problematiche di estetica e dei materiali nelle tecnologie del recupero*, Rubettino Editore, Soveria Mannelli, 2003.



Foster and Partners, *British Museum's Great Court*, Londra, 2000.
Immagine da unsplash.com, foto di Ryan Stefan.

I nodi, ottenuti dal taglio laser di piatti in acciaio, e i singoli elementi, preassemblati in sezioni scaltolari mediante saldatura di laminati a caldo, sono stati prodotti implentando nel sistema di produzione computerizzato dati provenienti direttamente dall'ufficio di progettazione, inserendo contemporaneamente anche informazioni fondamentali al montaggio dell'intera struttura. Nodi e scatolari sono stati infatti segnati e nominati in maniera tale da garantirne un corretto assemblaggio e orientamento. I secondi in particolare, sono stati prodotti leggermente più lunghi, per poi venir customizzati mediante taglio laser in accordo al giunto di riferimento[133].

La copertura della Great Court non sarebbe stata possibile senza progettazione computazionale, nè tantomeno senza tecnologie di produzione *computer aided* che hanno quindi consentito una de-standardizzazione, anzi "de-ripetizione", degli elementi ma non delle procedure. Infatti, ogni elemento è stato realizzato in accordo a un preciso "standard" di usabilità, funzionalità e riconoscibilità, con l'obiettivo di minimizzare la complessità dei processi produttivi e di rispondere sempre alle variabili esigenze strutturali che hanno guidato l'intero progetto.

Il prodotto "standard" di Quarta Rivoluzione Industriale acquista così grandi limiti di variabilità e ampi livelli di personalizzazione, sebbene i suoi confini di usabilità rimangano sempre gli stessi, salvo lecite evoluzioni. Infatti, ogni prodotto "non-standard" è così erroneamente definito – si è detto che si dovrebbe parlare di "nuovi standard" – proprio a causa della molteplicità incorporata nella produzione digitale che, però, ha in realtà una struttura comune, sebbene questa non coincida con quella tipica del modello meccanico di produzione. Ogni oggetto derivato da un processo digitale è potenzialmente unico, ma allo stesso tempo appartiene a una serie generata da un algoritmo. Tuttavia, mentre la riproduzione meccanica è supportata dalla ripetizione, la serie digitala lavora per similarità, spostando il *focus* sulle differenze tra gli elementi, piuttosto che sulla loro identità[134], come è avvenuto per la Great Court. La vera rivoluzione, quindi, risiede nell'abbandonare la ripetizione, proponendo diversità, differenziazione ed evoluzione dinamica[135].

Quella data al precedente capoverso è, in realtà, parte della definizione della *mass customization*[136] nella sua declinazione più concreta, sebbene manchi l'aspetto relativo al prezzo dei prodotti così realizzati, che nella customizzazione di massa dovrà essere comparabile con quello di un sistema di produzione standardizzato[137].

[133] Sischka, J., "Engineering the construction of the Great Court Roof fot the British Museum", in Barnes, M. e Dickson, M. (a cura di), *Widespan Roof Structures*, Thomas Telford Publishing, Londra, 2000, pp. 199-207.
[134] Ortega, L., *The Total Designer. Authorship in architecture in the postdigital age*, Actar Publishers, New York-Barcellona, 2017, pag. 34.
[135] Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", op. cit., 2006, pp. 232-233.
[136] Il termine è stato coniato da Stanley Davis nel 1987 (Davis, S., *Future Perfect*, Addison-Wesley, Reading, 1987). Per ulteriori approfondimenti si vedano: Anderson, D., *Agile Product Development For Mass Customization*, IRWIN Professional Publishing, Chicago-London-Singapore, 1997; Gensheng, J. *et alii*, "Impacts of supply chain planning and integration on mass customization", in *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 29, 2018, pp. 608-628; Deshpand, A., "Relationships between advanced manufacturing technologies, absorptive capacity, mass customization, time to market and financial and market performance", in *Asia-Pacific Journal of Business Administration*, vol. 10, 2018, pp. 2-20; Tang, M. *et alii*, "Impact of Product Modularity on Mass Customization Capability: An Exploratory Study of Contextual Factors", in *International Journal of Information Technology and Decision Making*, vol. 16, 2017, pp. 939-359.
[137] Hart, C.W.L, "Mass customization: conceptual underpinnings, opportunities and limits", in *International Journal of Service Industry Management*, vol. 6, 1995, pag. 36.

In una prima fase, la *mass customization* è stata quasi un passaggio obbligato, nato come risposta alla frammentazione del mercato[138]. Infatti, la sua essenza sta nella capacità di produttori e progettisti di individuare nicchie di mercato latenti, sviluppando poi le capacità tecniche per incontrare i bisogni dei consumatori *target*, cercando di essere competitivi o sulla qualità o sui costi o sul *time-to-market* oppure, meglio ancora, su tutti e tre gli aspetti.

La portata innovativa della *mass customization* si comprende rilevando come gli obiettivi che essa si pone – fornire prezzi contenuti e alta differenziazione, avere contemporaneamente economie di scale e di scopo, essere globali e locali – erano un tempo considerati frutto di strategie produttive e commerciali diametralmente opposte[139].

Proprio la possibilità di arrivare a obiettivi produttivi un tempo considerati irraggiungibili, ha fatto sì che il ben noto aspetto visionario della mass customization, cioè fornire al cliente "*anything, anytime, anywhere and anyway*"[140], seppur nella pratica non ancora fattibile né conveniente, venisse in ogni caso internalizzato dai produttori, conducendo a due risultati più che positivi. Da un lato l'utenza risulta così integrata nel processo produttivo da creare vere e proprie "*prosumership*"[141], ovvero intense collaborazioni e/o sovrapposizioni di ruoli tra produttori e consumatori, dall'altro la ricerca, da parte delle aziende, di livelli di qualità sempre più elevati aumenta gli investimenti in processi innovativi[142].

Appare chiaro che la relazione con il consumatore è un aspetto fondamentale dell'efficienza della *mass customization* nonché la fonte della sua intrinseca complessità. Nonostante il ridimensionamento del suo aspetto visionario contribuisca a semplificarne il concetto, è innegabile che il confinamento del mercato al singolo consumatore apra alla questione della gestione della complessità del fenomeno[143].

[138] Pine infatti scrive: «*the amount of uncertainty, instability, and lack of control that firms have in their business environments – the market turbulence – has increased dramatically for companies in almost every industry. So much so, in fact, that the old ways of competing simply do not work any more*» (Pine, J., "Making mass customization happen: Strategies for the new competitive realities", in *Planning Review*, vol. 21, 1993, pag. 23).
[139] Pine, J., "Making mass customization happen…", *op. cit.*, 1993, pag. 23. In un articolo dello stesso anno scrive: «*the development of the continuous-improvement and the mass-customization models show that companies can overcome the traditional trade-offs. In other words, companies can have it all*» (Pine, J., *et alii*, "Making Mass Customization Work", in *Harvard Business Review*, Settembre-Ottobre 1993, pag. 111).
[140] Pine, J., "Making mass customization happen…", *op. cit.*, 1993, pag. 23.
[141] Toffler, A., *The Third Wave...*, *op. cit.*, 1980, pp. 48-49.
[142] Secondo Christopher Hart, qualsiasi azienda che voglia dar vita a una strategia commerciale e produttiva basata sulla *mass customization* deve fondarsi su 4 "pilastri" indispensabili: *customer customization sensitivity, process amenability, competitive environment* e *organizational readiness*. Il primo pilastro, a sua volta, si fonda su due fattori: l'unicità dei bisogni del consumatore, il quale deve avere sempre la percezione che il prodotto o il servizio che gli viene fornito è specificatamente realizzato per lui, e la sua disponibilità al sacrificio. I consumatori, infatti, sono disposti a subire diversi disservizi, dall'inconvenienza, alle lunghe attese, alle difficoltà d'acquisto, etc. etc. Individuare uno dei disservizi, determina la scoperta di un'ampia fascia di mercato teoricamente libera. Il secondo pilastro riguarda le caratteristiche fondamentali dell'intera catena produttiva a partire dai cosiddetti abilitatori, ovvero i mezzi necessari a consentire il cambiamento della struttura fisica dell'azienda, divisi in tecnologici (flessibilità dei macchinari, strumenti di valutazione e di supporto alla decisione) e organizzativi (sistemi di compensazione per i dipendenti, gruppi di lavoro, etc. etc.). Agli abilitatori si aggiunge il marketing, che si occupa materialmente della relazione con il cliente, il design di prodotto e il sistema di produzione e distribuzione, che, naturalmente, deve poter supportare una strategia finalizzata alla mass-customizzazione, contenendone costi e garantendone l'efficienza. Il terzo pilastro si fonda sulla presenza di un ambiente competitivo, mentre il quarto consta nella capacità dell'azienda di capitalizzare le opportunità individuate e, soprattutto, nel capitale finanziario per avviare la trasformazione necessaria. Hart, C.W.L, "Mass customization…", *op. cit.*, 1995, pp. 39-45.
[143] Blecker, T. *et alii, Mass Customization...*, op. cit., 2004, pp. 890-903.

Una delle possibili strategie[144] per ridurne, prevenirne e controllarne gli impatti prevede, prima di tutto, una semplificazione a breve termine delle strutture produttive, eliminando, ad esempio, le varianti di prodotto non strettamente necessarie e sviluppando metodi per bloccare l'aumento di complessità, di solito deducibile da una previsione dei costi della variabilità nonché dalla diversità dei requisiti del mercato di riferimento.

Questa strategia viene solitamente adottata nei casi di ottimizzazione *a posteriori* delle facciate di edifici particolarmente articolati dal punto di vista formale. La necessità di razionalizzare le superfici di progetto per semplificarne la pannellizzazione e quindi la produzione, determina, appunto, l'eliminazione delle soluzioni inutilmente complesse o non compatibili con i dettami della linea produttiva dell'elemento tecnico che si vuole adoperare.

Ad esempio, per il *paneling* della facciata dell'edificio Podium di Zaha Hadid Architects (2017) a Milano, ad ARUP, cui era stato affidato il *task*, si è partiti dall'analisi delle geometrie caratterizzanti ogni singolo pannello. L'analisi della curvatura ha consentito di individuare 4 tipologie di pannelli – piani, fuori piano, a singola curvatura e a doppia curvatura – più una serie di casi particolari non classificabili. La suddivisione in tipologie è stata seguita da una verifica di compatibilità con i vincoli produttivi, valutando la soluzione che garantisse una maggiore riduzione dei costi e il minor spreco di materiale. In sostanza, conservando all'interno delle tipologie opportuni limiti di variabilità dei singoli pannelli, si è ottenuto il massimo della customizzazione al minimo prezzo[145].

Un'altra strategia[146], una sorta di evoluzione di quella precedente, prevede la gestione della complessità in quattro step, di cui il primo prevede un taglio della complessità interna, ovvero quella che non ha relazione con i requisiti provenienti dall'ambiente esterno e, dunque, non ha ragione di esistere, il secondo consiste nel ridurre la correlazione tra complessità esterna e interna, in modo che questa sia meno vulnerabile ai cambiamenti della prima, mentre il terzo consiste in una consapevole riduzione della complessità percepita dell'ambiente esterno che, quindi, si concretizza in una semplificazione del programma di produzione. Infine, il quarto e ultimo aspetto si prefigge di ridurre la complessità modularizzando la produzione[147].

La modularizzazione[148] è infatti ritenuta uno dei meccanismi fondamentali per garantire un'elevata capacità di *mass customization*[149], in quanto riesce a coniugare elevata produttività e flessibilità dei processi.

[144] *Ivi*, pag. 892. Gli autori a loro volta fanno riferimento a Wildemann, H., *Komplexitaetsmanagement: Vertrieb, Produkte, Beschaffung*, TCW Tranfer-Centrum, Monaco, 2000.
[145] Si veda Ambrosini, L., *Data, Digital&Design*, Tesi di dottorato, 2018, pp. 96-101
[146] *Ibidem.*
[147] Rispetto alla moduralizzazione della produzione, Pine specifica che la coordinazione tra i vai moduli deve essere istantanea, ovvero caratterizzata da una immediata rispondenza reciproca tra i vari processi, senza costi aggiuntivi oltre a quelli iniziali di investimento, continua e senza frizioni. Cfr. Pine, J., "Making mass customization happen…", *op. cit.*, 1993, pp. 112-113.
[148] Per ulteriori approfondimenti si veda: Kohlhase, N. e Birkhofer, H., "Development of modular structures: the prerequisite for successful modular products", in *Journal of Engineering Design*, vol. 7, 1996, pp. 279-291; Pahl, G. e Beitz, W., *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer, Londra, 1996.
[149] Tang, M. e Zhang, M., "Impact of Product Modularity on Mass Customization Capability: An Exploratory Study of Contextual Factors", in *International Journal of Information Technology and Decision Making*, vol. 16, 2017, pag. 939. Si veda anche Gallinaro, S., "La modularità nello sviluppo e nella produzione dei servizi", in *Impresa Progetto – Rivista online del DITEA*, vol. 1, 2009, pp. 1-22.



Zaha Hadid Architects, *Torre e Podium a City Life*, Milano, 2017. Immagine tratta da www.impresedilinews.it.

Questo tipo di produzione parte dalla progettazione di prodotti a struttura modulare, ovvero fatti da blocchi costruttivi strutturalmente e funzionalmente indipendenti, consentendone l'interscambiabilità e la riusabilità in prodotti analoghi. In pratica, i prodotti modulari, divisi in nuclei funzionali – in nuclei "standard" –, realizzabili anche con sistemi di produzione di massa, consentono la variabilità sia nelle modalità di assemblaggio dei diversi moduli, sia intervenendo su tutti o alcuni dei moduli stessi, conservando però le interfacce[150].

La condivisione di parti funzionali, moduli e tecnologie tra diversi prodotti li rende parte della cosiddetta piattaforma dei prodotti, ovvero un insieme di sub-sistemi e interfacce sviluppati per formare una struttura comune, da cui è possibile ottenere diverse variabili. Le piattaforme costituiscono, inoltre, sia un repertorio di conoscenza base e tecnica disponibile alla customizzazione, sia un'opportuna tassonomia dei prodotti e dei loro componenti, una sorta di catalogo potenziale.

In sostanza, la piattaforma di prodotto si traduce in una struttura progettuale e fisica condivisa da diverse famiglie di prodotto, ognuna della quali è riferita a uno specifico gruppo di consumatori, raggruppati sulla base dei "*commonality*", ovvero i bisogni che li accomunano[151]. Dalle famiglie di prodotto "assegnate" ai gruppi di consumatori, si derivano le singole variabili di prodotto da destinarsi a ciascun membro del gruppo. Questa logica è alla base del concetto della *product family architecture* (PFA), ovvero la progettazione e la produzione – sempre improntata sulla modularità – di diversi prodotti a partire dalla stessa struttura base – la stessa piattaforma – con l'obiettivo di soddisfare i bisogni dei consumatori in varie nicchie di mercato[152].

La PFA si articola attorno a tre diversi aspetti, funzionale, tecnico e fisico. Il primo aspetto racchiude la linea strutturale del prodotto[153] in accordo ai diversi gruppi di consumatori, ai requisiti funzionali e alla loro importanza reciproca in base alle esigenze di ciascun insieme di utenti. Il secondo, invece, rivela l'applicazione della tecnologia adoperata per la soluzione progettuale, nonché la struttura modulare del prodotto, in questo caso esplicata attraverso la relazione tra i parametri progettuali e l'apparato esigenziale[154]. L'aspetto fisico rappresenta la realizzazione vera e propria del prodotto ed è strettamente correlata al sistema produttivo aziendale, che pone dei vincoli di costruzione atti a garantire che manifattura e assemblaggio non compromettano costi e quantità di beni realizzati[155].

La PFA deve quindi rapportarsi a tutti e tre questi aspetti, con l'obiettivo finale di ottenere la più ampia varietà funzionale possibile, ovvero tutte le differenziazioni degli attributi del prodotto da cui il consumatore trae beneficio, abbassando, nel contempo, la varietà tecnica, ovvero l'insieme delle tecnologie, dei metodi, dei processi produttivi, dei componenti e degli assemblati necessari a raggiungere una certa funzionalità.

[150] Questa è la strategia di Dell Computer che consente al consumatore di assemblarsi il proprio computer attingendo all'ampia offerta di componenti proposti dall'azienda e di intervenire, qualora lo desideri, anche sul componente stesso.
[151] Jiao, J. e Tseng, M.M., "A methodology of developing product family architecture for mass customization", in *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 10, 1999, pag. 4.
[152] *Ivi*, pag. 5.
[153] «*A product line structure is therefore referred to as the underlying patterns of customer requirements captured by product portfolio*», *ivi*, pag. 6.
[154] Si veda anche Suh, N., *The Principles of Design*, Oxford University Press, New York, 1990.
[155] Jiao, J. e Tseng, M.M., "A methodology of developing…", *op. cit.*, 1999, pag. 6.

Sebbene la modularizzazione della produzione sia una delle strategie considerate abilitanti della *mass customization*, in quanto fondamentale a ridurne la complessità intrinseca, appare comunque evidente che i produttori dovranno affrontare delle alle volte imprevedibili interdipendenze inter-modulari e intersistemiche, che richiedono un potenziato sforzo di gestione del sistema produttivo. Ne deriva che, assemblare e configurare i moduli nei prodotti finali implica diversi step di processamento dell'informazione, che diventa a tal punto rilevante da influenzare in larga parte l'efficacia della produzione modularizzata.

Un corretto sistema di elaborazione dell'informazione comporta, tra le altre cose, una rapida ed efficiente traduzione dei bisogni in un design modulare, contribuendo alla definizione della famiglia dei prodotti attraverso la raccolta e l'archiviazione delle scelte e delle preferenze dei consumatori, tenendo conto anche dei tempi e delle capacità dei fornitori[156]. L'abilità di processare correttamente le informazioni, inoltre, può accorciare il tempo delle decisioni, allargare i *database* esistenti, formalizzarne il flusso all'interno dell'organizzazione, facilitare le decisioni di gruppo.

Appare quasi superfluo evidenziare l'importanza dell'*information tecnology* in questo senso: ad esempio, è possibile istallare sensori lungo l'intero corridoio commerciale, per monitorare e tracciare il flusso di beni e servizi, per registrare e comunicare la disponibilità di materia prima, del materiale spedito dai fornitori, per informare l'ufficio centrale delle scorte stoccate in magazzino, per individuare e risolvere le disfunzioni sorte nelle linee di produzione. Ancora, in alcuni punti vendita i sensori arrivano ad aggiornare il reparto vendite e il reparto marketing su quali articoli vengono osservati, toccati rimessi sugli scaffali o acquistati, il che permette di valutare il comportamento del consumatore.

L'era digitale, quindi, si configura sempre di più come l'era dei *data*, ridefinendo prodotti ed esperienze, muovendosi verso un mondo di continui miglioramenti che, tuttavia, tiene l'interazione umana sempre al centro dell'intero processo.

Infatti, se i *data* diventano centrali sia nei luoghi delle decisioni, che in quelli operativi delle aziende, la forza lavoro richiede più competenze e, di conseguenza, il supporto di un sistema sociale adeguato, fondamentale per coordinare e favorire la cooperazione di diversi dipartimenti nell'ambito di una produzione modularizzata. Ne segue un potenziamento del lavoro di gruppo e la formazione di dipendenti *multitasking*, in grado di rispondere alle esigenze di variabilità della *mass customization*: la flessibilità richiesta alla catena produttiva necessita tanto dalla manodopera quanto dalla parte manageriale, una buona capacità adattiva, fino a formare un "network dinamico" dove i link tra persone e processi sono "*loose*", ovvero ampi ed elastici. A ciò si aggiunge l'utilizzo di una struttura organizzativa a doppia direzione, orizzontale e verticale, che garantisce la comunicazione laterale, decentralizza una parte di autorità ai dipendenti[157], responsabilizzandoli e integrandoli nella macchina aziendale.

Se ne deduce che il grado di specializzazione e di autodeterminazione richiesto all'operaio fa sì che questo si allontani di molto dalla vecchia figura del lavoratore fordista, soprattutto perché non è più vero che «un processo produttivo può essere ottimizzato a patto che sia prevedibile e facilmente controllabile: il lavoro non può comportare creatività, in quanto la creatività

[156] Tang, M. e Zhang, M., "Impact of Product …", *op. cit.*, 2017, pag. 943.
[157] *Ivi*, pp. 944-945.

non è prevedibile e quindi è un elemento di perturbazione della produzione»[158]. Vi è stato, in realtà, quasi un ribaltamento: un processo produttivo per essere ottimizzato deve possedere gli opportuni mezzi per gestire l'inesorabile imprevedibilità della domanda che, molte volte, richiede una riorganizzazione creativa della produzione.

Tuttavia, se è vero che la riorganizzazione creativa della produzione è indubbiamente frutto della sua componente umana, è anche vero che la sua parte automatizzata viene sempre più affidata alle nuove tecnologie. È interessante notare che la crescente abilità degli algoritmi, robot e altre forme non-umane di lavoratori non è l'unica responsabile di questa trasformazione. Un fattore abilitante fondamentale deriva addirittura dalla Seconda Rivoluzione Industriale, cioè quando le compagnie hanno scorporato le lavorazioni complesse in una serie di operazioni semplici, compartimentalizzando la produzione e, quindi, rendendone estremamente più agevole l'automazione.

È quindi fuori discussione che le nuove tecnologie abbiamo un impatto considerevole sul mondo del lavoro, determinato da un lato dall'automatizzazione dei processi e, dall'altro, dalla domanda di nuovi e beni servizi, che richiede nuovi tipi di lavoro e nuovi modi, come abbiamo visto, di svolgere quelli vecchi.

Sorge, dunque, una domanda: «*is this the beginning of a new and flexible work revolution that will empower any individual who has an internet connection and that will eliminate the shortage of skill?*»[159].

La risposta è naturalmente incerta, anche se è già chiaro che il lavoro aumenterà nei settori creativi ad alto reddito e in quelli manuali a basso reddito ma, non si potrà dire altrettanto di quelli cui fa riferimento la classe media[160]. Al di là di ciò che accadrà, appare evidente che necessitiamo di nuove forme di regolamentazione e di tutele coerenti con la nuova natura del lavoro: «*in a world where essential public functions, social communication and personal information migrate to digital platform, governments need to create the rules, checks and balances to maintain justice, competitiveness, fairness, inclusive intellectual property, safety and reliability*»[161].

In conclusione, il ribaltamento avvenuto nel mondo del lavoro, descritto parzialmente e in relazione alla produzione industriale, è solo l'ultimo punto trattato per delineare l'ondata di cambiamento che, iniziata probabilmente negli anni '80, è ai giorni nostri talmente rapida da sembrare incontrollabile. La complessità della trasformazione in atto è stata trattata attraverso i temi della de-standardizzazione e della customizzazione di massa, così come precedentemente lo sguardo era stato filtrato dalla dematerializzazione e dalla produzione della materia, con l'obiettivo di entrare all'interno del *paradigm*[162] *shift* di cui tutti parlano.

[158] Costantini, M. e Secco, L., "Avanzamenti nell'industria e realtà produttive", in Ciribini, G. (a cura di), *Tecnologie della costruzione, La nuova Italia Scientifica*, Roma, 1992, pag. 96. John Ruskin, proprio riferendosi alla divisione del lavoro, scriveva: «non è infatti il lavoro ad essere diviso, ma l'uomo. Diviso in meri segmenti d'uomo, frantumato in frammenti e briciole di vita, sicché la piccola porzione di intelligenza che gli vien lasciata, non è sufficiente per fare un ago o un chiodo, ma si esaurisce nell'atto di fare la punta dell'ago o la testa del chiodo». Cfr. Ruskin, J., *La natura del Gotico*, trad. it. Mattioli, C., Jaca Book, Milano, 2016 (ed. orig. "The nature of Gothic", in *The Stones of Venice*, vol. 2, London, 1851-1853).

[159] Schwab, K., *The Fourth…*, *op. cit.*, 2016, pag. 48.

[160] *Ivi*, pp. 35-50.

[161] *Ivi*, pag. 70.

[162] Rifkin, con riferimento all'opera di Thomas Kuhn (Kuhn, T., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, trad. it. Carugo, A., Einaudi, 2009, ed. orig. *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962), descrive il concetto di "paradigma", ovvero un «sistema di assunti e credenze che concorrono a creare una visione del mondo integrata e unificata che risulti così convincente e coinvolgente da essere considerata senz'altro la realtà». L'autore continua «la forza affabulatoria di un paradigma si basa sul carattere onnicomprensivo della sua descrizione della realtà. […] Questa accettazione acritica, e il rifiuto di accettare spiegazioni alternative, porta a un accumulo di incongruenze, che cresce fino a raggiungere un punto di svolta: qui il paradigma esistente viene smantellato e sostituito con un nuovo paradigma esplicativo, più adeguato a ordinare le anomalie, le intuizioni e i nuovi sviluppi in una nuova grande narrazione», cfr. Rifkin, J., *La società a costo marginale zero. L'Internet delle cose, l'ascesa del «Commons» collaborativo e l'eclissi del capitalismo*, trad. it. Vanni, L., Mondadori, Milano, 2017, pag. 15 (ed. orig. *The Zero Marginal Cost Society*, Palgrave Macmillan, Londra, 2014).

Paradigm shift che, secondo Jeremy Rifkin[163], implica l'abbandono del sistema capitalistico, messo in crisi sia da una nuova generazione di studiosi che, abbandonate le vecchie teorie economiche e le loro metafore attinte dalla fisica newtoniana, deviano a favore di una nuova economia basata sulle leggi della termodinamica e sull'«indissolubile rapporto tra l'attività economica e i vincoli ecologici imposti dalle leggi dell'energia»[164]. L'Internet delle cose è, quindi, l'infrastruttura intelligente della Quarta Rivoluzione Industriale, esattamente come le reti elettriche, e più in generale dell'energia, lo erano per la Seconda.

Tutto ciò fa sì che la rivoluzione tecnologica abbia «una portata che di solito le rivoluzioni tecnologiche non hanno»[165], ovvero «la capacità di generare una nuova idea di umanità»[166]. Mentre Baricco, ritiene che anziché essere la causa di tutto, il mondo digitale sia in realtà solo «un effetto: la conseguenza di una qualche rivoluzione mentale»[167], qui si ritiene che l'aspetto fondamentale piuttosto che essere quale delle due rivoluzioni venga prima, è ancora una volta la nostra capacità di controllarne gli esiti che dipende, come sempre avviene, dagli strumenti culturali[168] di cui vogliamo dotarci.

A questo punto, per completare la ricostruzione delle Rivoluzioni, mancano ancora due grandi temi, ovvero la democratizzazione della produzione e il pensiero computazionale, ultime due voci del *paradigm shift* in cui siamo immersi.

[163] *Ivi*, pag. 15-16.

[164] *Ivi*, pag. 16. Si veda inoltre il Capitolo 1.

[165] Baricco, A., *The Game*, *op. cit.*, 2018, pag. 29.

[166] *Ibidem*.

[167] *Ivi*, pag. 31.

[168] Affermando che il rapporto con la tecnica vada affrontato in termini culturali – come si è discusso in conclusione del paragrafo 2.2 – implica che alla questione della tecnica si possa rispondere in termini non "tecnici", sfatando così il mito che a ogni problema debba necessariamente esservi una soluzione di questo tipo. Ne parla, non senza ironia, Garrett Hardin: «*an implicit and almost universal assumption of discussions published in professional and semipopular scientific journals is that the problem under discussion has a technical solution. A technical solution may be defined as one that requires a change only in the techniques of natural sciences, demanding little or nothing in the way of change in human values or ideas of morality. [Anyway, a certain kind of problems] has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality*» (Hardin, G., "The Tragedy of the Commons", *op. cit.*, 1968, pag. 1243).



IAAC, *Fab Lab House*, Madrid, 2010. Immagine da divisare.com, foto di Adrià Goula.

2.4 Rivoluzione digitale tra democratizzazione della produzione e pensiero computazionale

From bits to atoms

David Gauntlett, nel suo *La società dei Makers*[169], nell'ambito di una riflessione sul ruolo e sul potere della Rete, riporta il seguente passo tratto da *La convivialità* di Ivan Illich[170]: «se vogliamo ampliare il nostro angolo di visuale, […] dobbiamo ammettere che non esiste un unico modo di utilizzare le scoperte scientifiche […]. C'è un uso della scoperta che conduce alla specializzazione dei compiti, alla istituzionalizzazione dei valori, alla centralizzazione del potere: l'uomo diviene l'accessorio della mega macchina, un ingranaggio della burocrazia. Ma c'è un secondo modo di mettere a frutto l'invenzione, che accresce il potere e il sapere di ognuno, consentendo a ognuno di esercitare la propria creatività senza per questo negare lo stesso spazio di iniziativa e di produttività agli altri».

In questo passo di Illich è racchiusa la contraddizione insita nella tecnologia in generale e del Web in particolare, essendo questo, da un lato, un forte strumento di controllo delle informazioni – come testimoniato dal rilievo che sta assumendo la ridefinizione dei confini del diritto alla *privacy*[171] – e, quindi, di centralizzazione del potere e, dall'altro, un mezzo per potenziare le nostre conoscenze e connessioni – com'era nelle intenzioni del suo fondatore Tim Berners-Lee – nonché un luogo in cui esercitare la propria creatività.

[169] Cfr. Gauntlett, D., *La società dei Makers. La creatività dal fai da te al Web 2.0*, trad. it Bonini, T. e Maestro, S. Marsilio Editori, Venezia, 2013, pag. 221 (ed. orig. *Making is Connecting. The Social Meaning of Creativity from DIY and Knitting to YouTube and Web 2.0*, Polity Press Ltd., Cambridge, 2011).

[170] Illich, I., *La convivialità. Una proposta libertaria per una politica dei limiti allo sviluppo*, trad. it. Cucchi, M., Boroli Editore, Novara, 2005, pag. 14 (ed. orig. *Tools for Conviviality*, Calder and Boyars, Londra, 1973).

[171] A proposito della *privacy*, Rifkin descrive come a essa, soprattutto tra i giovani, si sia sostituita una nuova idea di condivisione: «lo sviluppo dell'IDC sta rimuovendo uno dopo l'altro i livelli di protezione che hanno reso la *privacy* un principio sacrosanto e un diritto considerato non meno importante del diritto alla vita, alla libertà o alla ricerca della felicità. Per la giovane generazione che sta crescendo in un mondo globalmente interconnesso, ansiosa di rendere pubblico e condividere con tutti ogni momento della propria vita […], la *privacy* ha perso molto del suo fascino. Per questi ragazzi la libertà non è legata all'idea della piena autonomia e dell'esclusione, ma al piacere di essere accessibili agli altri e all'inclusione in un'agorà pubblica di carattere globale e virtuale» (Rifkin, J., *La società a costo marginale zero…*, *op. cit.*, 2017, pag. 105). Al di là di questa paradossale evoluzione della *privacy* verso un concetto che le era opposto, resta comunque da capire in che modo si debba tutelare da accessi indesiderati questa enorme quantità di dati messi più o meno consapevolmente in circolazione. Non è casuale che la *cybersecurity* – l'insieme dei mezzi e delle tecnologie per la protezione dei sistemi informatici in termini di disponibilità, confidenzialità e integrità – sia tra i settori più redditizi dell'IoT.

Il libro di Gauntlett parla proprio di questo, di come il Web abbia reso più semplice «per gli utenti comuni condividere il frutto della propria creatività con altri, e creare in maniera collaborativa spazi culturali interessanti, istruttivi e divertenti»[172], diventando così un'occasione per una società più conviviale, ovvero «una società che dà all'uomo la possibilità di esercitare l'azione più autonoma e creativa, con l'ausilio di strumenti meno controllabili da altri»[173].

Chris Anderson in *Makers* – senza dubbio la pubblicazione più famosa con questo titolo – riconosce che uno dei cambiamenti più profondi del Web consiste proprio in questa volontà di condivisione[174] che, si tramuta, anche con risultati inaspettati e spesso non voluti, in innovazione. Anche Luciano Floridi, nel suo *La quarta rivoluzione*, interrogandosi su come e dove ci porterà il digitale, scrive: «certamente smartphone e tablet non stanno portando le persone sulla Luna. La risposta è un'altra: a interagire»[175].

Su questa impalcatura fondata sulla triade creatività-connessione-condivisione, si è innestata la digitalizzazione di testi, suoni, immagini e video portando alla nascita, tra i tanti, di Wikipedia e YouTube[176] e alla proliferazione di tali contenuti sul Web con l'obiettivo, per chi postava, semplicemente di essere parte di una comunità e di esercitare la propria creatività. Ben presto si inizia a comprendere che queste comunità online, oltre a essere depositarie di contenuti e informazioni, sono luoghi virtuali in cui trovare sostegno, raccontare le proprie esperienze e cercare aiuto. Insomma, una rete globale di supporto sociale.

Il valore acquisito dalla Rete in questo senso assume un particolare rilievo dal momento in cui secondo alcuni studiosi, tra cui spicca Robert Putnam, a partire dalla seconda metà del XX secolo, la tendenza degli americani – a cui è rivolta l'analisi – a instaurare relazioni sia radicalmente entrata in crisi, determinando di conseguenza anche una riduzione del capitale sociale[177]. Putnam, dopo aver dato una definizione di quest'ultimo – «riguarda le relazioni

[172] Gauntlett, D., *La società dei Makers…*, *op. cit.*, 2013, pag. 17.

[173] Illich, I., *La convivialità…*, *op. cit.*, 2005, pag. 20.

[174] «Se fai qualcosa, gira un video. Se registri un video, postalo. Se lo posti, diffondilo tra i tuoi amici. I progetti condivisi online diventano ispirazione per altri e opportunità di collaborazione». Cfr. Anderson, C., *Makers. Il ritorno dei produttori. Per una nuova rivoluzione industriale*, trad. it. Carozzi, M., Merlini, R. e Ubbiali, G., Rizzoli Etas, Milano, 2013, pp. 15-16 (ed. orig. *Makers. The New Industrial Revolution*, Crown Business, New York, 2012).

[175] Cfr. Floridi, L., *La quarta rivoluzione. Come l'infosfera sta trasformando il mondo*, trad. it. Durante, M., Raffaello Cortina Editore, Milano, 2017, pag. 9 (ed. orig. T*he Fourth Revolution. How the Infosphere is reshaping human reality*, Oxford University Press, Oxford, 2014).

[176] La storia di queste piattaforme di condivisione è stata ampiamente raccontata e discussa ed è, ovviamente, facilmente reperibile in rete. A titolo esemplificativo, si racconterà brevemente di Wikipedia. Wikipedia, «la figlia scapestrata dell'Enciclopedia Britannica» (Ratti, C., *Architettura Open Source. Verso una progettazione aperta*, Giulio Einaudi Editore, Torino, 2014, pag. 73), «è un'enciclopedia online a contenuto libero, collaborativa, multilingue e gratuita, nata nel 2001, sostenuta e ospitata dalla Wikipedia Foundation, un'organizzazione non a scopo di lucro statunitense. Lanciata da Jimmy Wales e Larry Sanger il 15 gennaio 2001, inizialmente nell'edizione in lingua inglese, nei mesi successivi ha aggiunto edizioni in numerose altre lingue. […] Etimologicamente, Wikipedia significa "cultura veloce", dal termine hawaiano *wiki* (veloce), con l'aggiunta del suffisso -pedia (dal greco antico *paideia*, formazione). Con più di 45 milioni di voci in oltre 280 lingue, è l'enciclopedia più grande mai scritta, è tra i dieci siti web più visitati al mondo e costituisce la maggiore e più consultata opera di riferimento generalista su Internet». Cfr. Wikipedia, *Wikipedia*, https://it.wikipedia.org/wiki/Wikipedia.

[177] Lyda Judson Hanifan sembra sia stata la prima a utilizzare l'espressione "capitale sociale": «l'individuo che non ha legami sociali non ha risorse […]. Se, invece, entra in relazione con altri e questi a loro volta con altri ancora, ci sarà un'accumulazione di capitale sociale, che può comportare una potenzialità sociale sufficiente per un sostanziale miglioramento delle condizioni di vita dell'interna comunità. La comunità nel suo insieme trarrà beneficio dalla cooperazione delle sue parti, mentre l'individuo troverà in tali associazioni i vantaggi che derivano dall'aiuto, dalla comprensione e dall'amicizia dei suoi vicini». Cfr. Hanifan, L.,

tra gli individui, le reti sociali e le norme di reciprocità e di affidabilità che ne derivano»[178] – individua quattro ragioni responsabili del suo declino nonché di quello del coinvolgimento civico dei cittadini nella cosa pubblica[179]: il ricambio generazionale, in quanto sembrerebbe che le ultime generazioni siano meno impegnate politicamente e socialmente di quelle che le hanno precedute; la diffusione delle televisione, che privatizza il tempo libero sottraendolo ad attività comunitarie; la suburbanizzazione, il pendolarismo e l'espansione urbana che hanno causato un allontanamento delle persone dalle proprie comunità locali; lo stress quotidiano.

Putnam, naturalmente, è ben consapevole del ruolo che potrebbe ricoprire Internet nel risolvere questa sorta di crisi comunitaria, data la sua capacità di creare capitale sociale, seppur virtuale. Tuttavia, l'autore non manca di domandarsi se il "capitale sociale virtuale" non sia in realtà una contraddizione in termini[180], dato che esclude, di fatto, la vicinanza fisica. Nondimeno, «la comunicazione rappresenta un prerequisito fondamentale per le relazioni sociali ed emotive. Le telecomunicazioni in generale e Internet in particolare, accrescono la nostra capacità di comunicare; di conseguenza sembra ragionevole assumere che il loro effetto netto sarà di valorizzare la comunità, magari anche in modo drastico. Il capitale sociale riguarda le reti e Internet è la rete di tutte le reti»[181].

Quindi, appurato che la Rete sia un mezzo efficace per accrescere il capitale sociale dell'intera comunità[182], questa finisce per assumere una nuova valenza che si articola in due aspetti fortemente collegati: se si parte dal presupposto che il capitale sociale venga riconosciuto come un elemento in grado di umanizzare il modello eccessivamente razionale e individualistico dell'economia tradizionale[183], la Rete inizia a configurarsi, di conseguenza, come un'alternativa a tale modello; la Rete, inoltre, contribuisce a produrre capitale umano, ovvero quello che si crea dalle relazioni personali disinteressate e, assieme al primo, coadiuva l'accrescimento del benessere dell'intera collettività, diventando un motore di sviluppo sociale[184].

"The Rural School Community Center", in *Annals of the American Academy of Political and Social Scienze*, vol. 67, 1916, pp. 130-138, cit. in Gauntlett, D., *La società dei Makers. La creatività dal fai da te al Web 2.0*, trad. it Bonini, T. e Maestro, S. Marsilio Editori, Venezia, 2013, pp. 171-172 (ed. orig. *Making is Connecting. The Social Meaning of Creativity from DIY and Knitting to YouTube and Web 2.0*, Polity Press Ltd., Cambridge, 2011)

[178] Cfr. Putnam, R., *Capitale sociale e individualismo*, trad. it Cartocci, R., Il Mulino, Bologna, 2004, pag. 14 (ed. orig. *Bowling Alone: The Collpase and Revival of American Community*, Simon and Schuster, New York, 2001).

[179] La sintesi fatta di seguito è opera di Gauntlett, D., *La società dei Makers…*, *op. cit.*, 2013, pp. 187-192.

[180] *Ivi*, pag. 196.

[181] Cfr. Putnam, R., *Capitale sociale e individualismo*, *op. cit.*, 2004, pag. 212. Putnam non è tuttavia una vittima della febbre di Internet e individua quattro sfide (pp. 216-222) che ci attendono: il *digital divide*, ovvero l'impossibilità di accedere a Internet, già in diminuzione; la mancanza di segnali non verbali nella comunicazione online; la cyber-balcanizzazione, cioè la preoccupazione che il livello di specializzazione di certi gruppi online sia così elevato da diventare esclusivo; la possibilità che Internet diventi un nuovo modo di guardare la televisione.

[182] Nicolas Carr individua nella condivisione *online* un forte pericolo di sfruttamento del lavoro svolto che, tra l'altro, genera profitto per le piattaforme che lo ospitano. In realtà coloro che pubblicano online mantengono il *copyright* sui contenuti, tra l'altro sempre pubblicati volontariamente, autorizzandone però la diffusione (Cfr. Carr, N., "Is Google Making Us Stupid?", in *Atlantic*, luglio/agosto, 2008, disponibile all'indirizzo https://www.theatlantic.com/magazine/archive/2008/07/is-google-making-us-stupid/306868/; Carr, N., *The Shallows: What the Internet Is Doing to Our Brains*, W. W. Norton & Company, New York, 2010; Carr, N., *The Glass Cage: Where Automation is Taking Us*, W. W. Norton & Company, New York, 2015).

[183] Si veda Coleman, J., "Social Capital in the Creation of Human Capital", in *American Journal of Sociology*, vol. 94, 1988, pp. 95-120.

[184] *Ibidem*.

Quindi, quello che era un semplice desiderio di condivisione viene riconosciuto come una forma di accumulazione di capitale sociale e, dal momento in cui l'aumento di quest'ultimo è a sua volta responsabile di una possibile modificazione dell'attuale modello economico, quel desiderio di condivisone inizia a trasformarsi in una economia vera e propria, con un cuore sociale, dove i guadagni quantificabili, finanziari, estrinseci sono surclassati da vantaggi di tipo sociale, da uno stile di vita sostenibile, dai legami collettivi[185]. Jeremy Rifkin, in apertura de *La società a costo marginale zero*, la definisce «l'economia della condivisione nel Commons collaborativo»[186], il quale «sta già trasformando il nostro modo di organizzare la vita economica, rendendo possibile una drastica riduzione delle disparità di reddito, democratizzando l'economia globale e dando vita a una società ecologicamente più sostenibile»[187]. Insomma, il «benessere economico si misura meno in termini di accumulo di capitale di mercato e più in termini di aggregazione di capitale sociale»[188].

Sebbene recentemente abbia invaso anche il lato *hardware*, l'economia della condivisione e della democratizzazione è nata decisamente dal *software* e, in particolare, dalla mente di Richard M. Stallman. Convinto che i *software* a pagamento che si andavano diffondendo fossero una grave minaccia alla libertà di parola in quanto ben presto sarebbero diventati un potente strumento di comunicazione, Stallman inventa GNU[189], un sistema operativo basato su *software* libero, modificabile dagli utenti[190]. Nel 1985 fonda la Free Software Foundation, con un apposito sistema di licenze gratuite: le GNU General Public License (GPL)[191], chiamate con affetto "*copyleft*", a rimarcare la loro distanza dal *copyright*. Pochi anni dopo, nel 1998, Eric S. Raymond[192] e Bruce Perens, già parte del movimento GNU, fondano la Open Source Initiative (OSI), con l'obiettivo di dar vita a versione più moderata della GPL[193].

[185] Ratti, C., *Architettura Open Source..., op. cit.*, 2014, pag. 76.
[186] Rifkin, J., *La società a costo marginale zero…, op. cit.*, 2017, pag. 3.
[187] *Ibidem.*
[188] *Ivi*, pag. 32.
[189] Il manifesto GNU recita: «*GNU is not in the public domain. Everyone will be permitted to modify and redistribute GNU, but no distributor will be allowed to restrict its further redistribution. That is to say, proprietary modifications will not be allowed. I want to make sure that all versions of GNU remain free*». Si veda Stallman, R., "Manifesto GNU", in *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, vol. 10, 1985, disponibile all'indirizzo https://www.gnu.org/gnu/manifesto.en.html.
[190] Rifkin, J., *La società a costo marginale zero…, op. cit.*, 2017, pag. 243. Si veda anche Arvind Kumar, C., *Welcome to the "Free" World: A Free Software Initiative*, Chennai, Indian University Press, Chennai, 2011.
[191] A GNU si ispira Linus Torvalds per la creazione di Linux, lanciato con licenza GPL nel 1992. Com'è noto, può essere modificato e ampliato da chiunque. Torvalds in un'intervista al The New York Times del 2003 ha dichiarato: «*I'm interested in Linux because of the technology, and Linux wasn't started as any kind of rebellion against the "evil Microsoft empire". Quite the reverse, in fact: from a technology angle, Microsoft really has been one of the least interesting companies. So I've never seen it as a "Linus versus Bill" thing. I just can't see myself in the position of the nemesis, since I just don't care enough. To be a nemesis, you have to actively try to destroy something, don't you? Really, I'm not out to destroy Microsoft. That will just be a completely unintentional side effect*» (cfr. Diamond, D., "The way we live low: 9-28-03: questions for Linus Torvalds", in *The New York Times Magazine*, 28 Settembre 2003, disponibile all'indirizzo: https://www.nytimes.com/2003/09/28/magazine/the-way-we-live-now-9-28-03-questions-for-linus-torvalds-the-sharer.html?searchResultPosition=1; Linux.it, Cos'è Linux, https://www.linux.it/linux).
[192] Per ulteriori approfondimenti si veda Raymond, E., *The Cathedral and the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary*, O'Reilly Media, Sebastopol, 1999. Qui l'autore afferma che il successo dei *software open source* è dovuto al più ampio team di sviluppatori cui fanno affidamento.
[193] Rifkin, J., *La società a costo marginale zero…, op. cit.*, 2017, pag. 245.

The GNU Manifesto

What's GNU? Gnu's Not Unix!

GNU, which stands for Gnu's Not Unix, is the name for the complete Unix-compatible software system which I am writing so that I can give it away free to everyone who can use it. (1) Several other volunteers are helping me. Contributions of time, money, programs and equipment are greatly needed.

So far we have an Emacs text editor with Lisp for writing editor commands, a source level debugger, a yacc-compatible parser generator, a linker, and around 35 utilities. A shell (command interpreter) is nearly completed. A new portable optimizing C compiler has compiled itself and may be released this year. An initial kernel exists but many more features are needed to emulate Unix. When the kernel and compiler are finished, it will be possible to distribute a GNU system suitable for program development. We will use TeX as our text formatter, but an nroff is being worked on. We will use the free, portable X Window System as well. After this we will add a portable Common Lisp, an Empire game, a spreadsheet, and hundreds of other things, plus online documentation. We hope to supply, eventually, everything useful that normally comes with a Unix system, and more.

GNU will be able to run Unix programs, but will not be identical to Unix. We will make all improvements that are convenient, based on our experience with other operating systems. In particular, we plan to have longer file names, file version numbers, a crashproof file system, file name completion perhaps, terminal-independent display support, and perhaps eventually a Lisp-based window system through which several Lisp programs and ordinary Unix programs can share a screen. Both C and Lisp will be available as system programming languages. We will try to support UUCP, MIT Chaosnet, and Internet protocols for communication.

GNU is aimed initially at machines in the 68000/16000 class with virtual memory, because they are the easiest machines to make it run on. The extra effort to make it run on smaller machines will be left to someone who wants to use it on them.

To avoid horrible confusion, please pronounce the g in the word "GNU" when it is the name of this project.

Gnu's Not Unix

La prima parte del manifesto GNU redatto da Richard Stallman.

L'idea di Raymond e Perens mirava a liberare il concetto di licenza dall'idea che il possesso esclusivo di informazioni fosse immorale[194].

Nel solco tracciato dall'OSI, si inserisce Lawrence Lessing che, nel 2001, fonda l'organizzazione no-profit Creative Commons che, poco dopo, inizia a pubblicare una serie di licenze libere che consentono agli utilizzatori di scegliere quali diritti cedere a beneficio del pubblico. Nel documento, *The Future of Creative Commons*, pubblicato sul sito creativecommons.org, si legge: «*our vision is nothing less than realizing the full potential of the Internet – universal access to research, education, and full participation in culture – for driving a new era of development, growth, and productivity*»[195]. Vi è, tuttavia, nei Creative Commons, rispetto ai loro predecessori, un maggiore rilievo all'autorialità, in quanto il progettista originario deve essere sempre citato[196].

Per comprendere gli impatti dell'*open source* sull'economia capitalista, basti ricordare che nel 2000 il Presidente dell'americana Information Technology Advisory Committee ha raccomandato al governo federale l'*open source software* come una scelta nazionale strategica finalizzata a conservare la *leadership* statunitense nel settore di riferimento. Yochai Benkler, Professore di Legge alla New York University, ne spiega efficacemente la portata rivoluzionaria: «*imagine that back in the days when what was good for GM was good for the country an advisory committee of economists had recommended to the President of the United States that the federal government should support the efforts of volunteer communities to design and build their own cars, either for sale or for free distribution to automobile drivers. The committee members would probably have been locked up in a psychiatric ward*»[197].

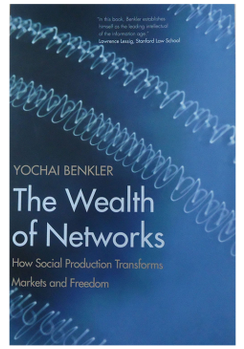
Come si intuisce, lo sconfinamento in ambito economico, tuttavia, non sarebbe stato possibile senza il concetto di Commons, che assume un ruolo decisivo in quanto fornisce una vera alternativa ai due tipi di regimi di proprietà riconosciuti dall'economia neoclassica: privato e pubblico. Non è un caso, infatti, che sia sempre esistita una categoria di beni dal carattere «intrinsecamente pubblico»[198], in cui la proprietà è "posseduta" e gestita dalla società in senso ampio e non dallo stato e che coincide con i Commons come oggi li intendiamo.

[194] *Ivi*, pag. 246.
[195] *The Future of Creative Commons*, https://wiki.creativecommons.org/images/c/ce/Future-of-creative-commons.pdf.
[196] Jeremy Rifkin ritiene che questo rinnovato interesse per i Commons sia una conseguenza indiretta del movimento economico reaganiano-thatcheriano che, spingendo molto verso la privatizzazione, segnò un depauperamento del potere collettivo di cittadini singoli e in associazioni. Successivamente, politici neoliberisti come Bill Clinton e Tony Blair promossero l'idea che l'unica chiave per lo sviluppo economico fosse il mercato, come dimostrato, tra l'altro, dal crollo dell'URSS che, al contrario, era improntata su un'economia fortemente nazionalizzata. «Non ci volle molto tempo, tuttavia, perché varie voci della società civile riuscissero a riprendere fiato, fare il punto della situazione e renderci conto che il settore privato aveva in un lampo ghermito e divorato in un unico enorme boccone il grosso della dotazione mondiale per la produzione della ricchezza» (pag. 228). A questo si aggiunse la forte devastazione degli ecosistemi locali, dovuta in gran parte alla deregolamentazione normativa che aveva gettato le risorse comuni in balia delle multinazionali. Solo nell'ultimo quarto del XX secolo «ha fatto la sua comparsa un nuovo complesso di tecnologie che hanno aperto vaste e inedite prospettive economiche, innescando un dibattito globale su quanto delle residue risorse della Terra potrebbe o dovrebbe essere privatizzato, e come, e su quanto invece potrebbe o dovrebbe essere affidato all'amministrazione pubblica» (pag. 229) e ai Commons. Cfr. Rifkin, J., *La società a costo marginale zero…*, *op. cit.*, 2017, pp. 227-229.
[197] Cfr. Benkler, Y., "Coase's Penguin, or, Linux and the Nature of the Firm", in *The Yale Law Journal*, vol. 112, 2002, pag. 371.
[198] Rose, C., "The Comedy of the Commons: Custom, Commerce, and Inherently Public Property", in *The University of Chicago Law Review*, vol. 53, 1986, pag. 720.

CC - CREATIVE COMMONS

The Wealth of Networks
CC BY-NC-SA
YOCHAI BENKLER

Il libro "The Wealth of Networks", sugli impatti socio-economici dell'Information Technology, è scaricabile gratuitamente in PDF senza scopo di lucro (NC) e condivisibile senza modifiche di licenza (SA). Benkler ha dichiarato che l'opera si configura come un esperimento sui libri del futuro, in cui autori e lettori collaborano reciprocamente.



Khan Academy
CC BY-NC-SA

Khan Academy è un'organizzazione no-profit creata da Salman Khan nel 2008 (non commerciabile e condivisibile senza modifiche di licenza). L'obiettivo è creare un set di *tool* educativi online, presentati sotto forma di brevi video. Il sito include esercizi pratici e materiale per i docenti.

khanacademy.org

KHANACADEMY

La Stampa
CC-BY-NC-ND

Il quotidiano italiano La Stampa consente la diffusione senza scopo di lucro e senza la possibilità di modifica dei contenuti.

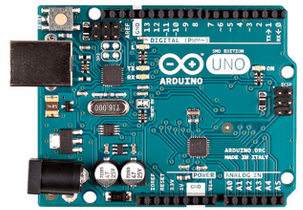
lastampa.it

LA STAMPA

ARDUINO
CC BY-SA
MASSIMO BANZI

Arduino è una società di *software* e *hardware open-source*, nonché una comunità di utenti che progetta e produce microcontrollori *single-board* e per dispositivi digitali. Arduino, inoltre, consente l'utilizzo dei prodotti a scopo commerciali.

arduino.cc



Riscoperti nel 1968 da Garrett Hardin[199] nel suo *The Tragedy of the Commons*[200] solo per essere riproposti in chiave assolutamente negativa – «*the inherent logic of the commons remorselessly generates tragedy*»[201] – in quanto «la libertà dei Commons porta tutti alla rovina»[202], sarà Carol Rose[203], docente di diritto alla Northwestern University, a donare ai Commons il valore positivo adesso riconosciutogli.

Il lavoro di Rose, *The Comedy of the Commons*, è, a partire dal titolo, in aperta polemica con quello di Hardin. Quest'ultimo negava infatti, anche se non esplicitamente, la possibilità di autoregolamentazione e autodisciplina cui volontariamente obbediscono i sottoscriventi di un Commons, che quindi finiva inesorabilmente per condurre a un depauperamento delle risorse condivise.

Nonostante Hardin riconoscesse la capacità degli esseri umani di accettare, seppur sbuffando, sistemi "coercitivi" come le tasse a causa del senso di responsabilità derivante dall'adesione a un patto sociale, egli non sembra accorgersi che gli stessi Commons sono un patto sociale volontario e regolamentato, che verrebbe quindi rispettato in virtù dello stesso senso di responsabilità di cui sopra. Inoltre, come nota la Rose, «a dispetto dei ben noti problemi derivanti dall'accesso collettivo alle risorse – la "tragedia dei Commons" – problemi altrettanto gravi sorgono nel caso di gestione governativa»[204]. I Commons, dunque, presenterebbero difficoltà se non inferiori quanto meno analoghe a quelle di un normale sistema di gestione governativo della cosa pubblica.

A sostegno del valore dei Commons, Rose afferma che è addirittura l'attività commerciale, il regno del privato, a giovare maggiormente, in alcuni casi, dell'attribuzione di carattere "pubblico" a proprietà come il sistema dei trasporti e le vie d'acqua, che ne costituiscono l'infrastruttura distributiva. Dopotutto, è la "dimensione pubblica" di beni e servizi a creare «la rendita della proprietà, e le dottrine della proprietà pubblica hanno tutelato quella rendita pubblicamente creata dall'appropriazione da parte dei privati»[205].

La necessità di conservare "pubblici" alcuni dei luoghi del commercio nonché garantirne a tutti un libero l'accesso, deriva dal fatto che esso, tra tutte le attività, è quella che acquista

[199] L'autore parte dal presupposto che ogni essere razionale tende a massimizzare il proprio profitto. Ad esempio, un pastore che condivide con altri un pascolo vorrà, a certo punto, aggiungervi un altro capo di bestiame. Ne trarrebbe, infatti, un vantaggio significativo, in quanto avrebbe un animale in più a procurargli profitto ottenendo, di contro, che il sovraccarico del pascolo così determinato risulterebbe in uno svantaggio da dividere tra tutti i pastori che lo utilizzano. Naturalmente, dal momento che gli aspetti positivi superano i negativi, il pastore, seguito da tutti gli altri, aggiungerà un animale al pascolo, portando, alla fine, all'inevitabile deterioramento di quest'ultimo. La conclusion è drammatica, tragica, appunto: «*ruin is the destination toward which all men rush, each pursuing his own best interest in a society that believes in the freedom of commons*» (pag. 1244). Cfr. Hardin, G., "The Tragedy of the Commons", in Science, vol. 162, 1968, pp. 1243-1248.

[200] La letteratura sulla tragedia dei *commons* è stata originata dal testo di Gordon, H. S., "The Economic Theory of a Common-Property Resource: The Fishery", in *The Journal of Political Economy*, vol. 62, 1954, pp. 124-142. L'autore dichiara che la causa dell'eccessivo sfruttamento delle risorse ittiche è una chiara conseguenza dei danni prodotti dalla loro *common-property nature*.

[201] Hardin, G., "The Tragedy of the Commons", *op. cit.*, 1968, pag. 1244.

[202] In originale «*freedom in a commons brings ruin to all*», *ibidem*.

[203] Rose, C., "The Comedy of the Commons…", *op. cit.*, 1986.

[204] In originale: «*despite the well-known problems of unorganized collective access to a resource – the "tragedy of the commons" – equally difficult problems are posed by governmental management: the cost of instituting that management and, perhaps, the temptations of politically motivated redistribution*», Rose, C., "The Comedy of the Commons…", *op. cit.*, 1986, pag. 720.

[205] *Ivi*, pag. 774.

maggior valore all'aumentare dei partecipanti[206], non solo a causa di un incremento della rendita e dall'aumento del benessere economico, ma anche perché, richiedendo un'interazione tra persone[207], garantisce un aumento della socializzazione[208] e del dialogo reciproco. Ciò vale, naturalmente, per tutte le attività "interattive" – comprese quelle ricreative – che creano valore sociale e comunitario e che necessitano, appunto, di un luogo in cui svolgersi.

Quanto detto ci riconduce alla questione del capitale sociale precedentemente trattata e, come un serpente che si morde la coda, riapre ancora al valore della Rete: se la Rete è un luogo di condivisione pubblico – "intrinsecamente pubblico" – in grado di accrescere il capitale sociale, sembra essere per sua natura destinata a ospitare – e a rilanciare come abbiamo visto – i Commons[209], che si configurano come lo strumento legale ideale a garantirne un accesso libero.

D'altronde, Internet nasce con un'anima libertaria e su questa, anche gratuitamente, si accresce: «sviluppandosi, Internet è diventato un banco di prova involontario e un laboratorio per un nuovo genere di progettazione. Internet ha creato tramite i suoi utenti un sistema autopoietico: le persone hanno usato Internet per creare Internet»[210].

Dunque, a partire dal software open source e grazie ai Commons, l'economia della condivisione «ha fatto tremare l'*establishment* sociopolitico [e] lo ha fatto sulla spinta di un'economia alternativa, non monetaria»[211]: «per la prima volta nella storia moderna, [si costruiscono] strumenti e servizi di produzione guidati da norme sociali e culturali, oltre che dalle forze del mercato»[212].

Ben presto e, del tutto naturalmente, gli *hacker* si resero conto «delle possibilità che si sarebbero aperte concependo gli atomi come nuovi bit e, da autentici pionieri, immaginarono di espandere il dominio dell'*open source* dal mondo dei *software* e dei computer alla produzione di "cose"»[213], in quanto, «a dispetto del fascino che i monitor esercitano su di noi, viviamo ancora

[206] *Ibidem*.

[207] *Ivi*, pag. 770.

[208] Rose scrive: «*customary doctrines suggest that commerce might be thought a "comedy of the commons" not only because it may infinitely expand wealth, but also, at least in part, because it has been thought to enhance the sociability of the members in an otherwise atomized society*», *ivi*, pag. 723.

[209] Fondamentale per lo sviluppo dei Commons è il lavoro di Elinor Ostrom che le è valso, tra le altre cose, il premio Nobel per l'Economia nel 2009. La Ostrom dimostrò definitivamente che nella gestione delle risorse comuni, nella maggior parte dei casi, l'interesse personale è scavalcato da quello della comunità. Sono sette i principi cui riferirsi per garantire un corretto funzionamento dei Commons: una chiara definizione dei confini, ovvero stabilire chi ha accesso al Commons e chi no; una sistema di regole che definisca tempi, spazi, quantità e modalità di appropriazione delle risorse; creare un'associazione per la gestione dei Commons finalizzata ad assicurare una partecipazione democratica e condivisa; la sorveglianza dei Commons deve essere affidata a coloro che vi partecipano o a loro rappresentanti; il mancato rispetto delle regole deve essere sanzionato senza scadere nell'eccesso; l'associazione deve elaborare procedure rapide ed economiche per risolvere eventuali contenziosi interni o esterni; la legittimità del Commons e delle sue regole deve essere riconosciuta e avallata dalle autorità governative. Cfr. Ostrom, E., *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

[210] Ratti, C., *Architettura Open Source…*, *op. cit.*, 2014, pag. 70.

[211] *Ivi*, pag. 72. Anche Benkler è d'accordo: «*as computer become cheaper and as network connections become faster, cheaper, and more ubiquitous, we are seeing the phenomenon of nonprofessional peer production of information scale to much larger sizes, performing much more complex tasks than were in the past possible for, at least, non professional production*». Cfr. Benkler, Y., "Coase's Penguin…", *op. cit.*, 2002, pag. 377.

[212] *Ivi*, pag. 77.

[213] Cfr. Rifkin, J., *La società a costo marginale zero…*, *op. cit.*, 2017, pag. 129.

nel mondo reale. Il cibo che mangiamo, le nostre case, i vestiti che indossiamo, le macchine che guidiamo. Le nostre città e i nostri giardini, gli uffici e i cortili sul retro. Sono tutti atomi, non bit»[214].

Esattamente come la Rete ha democratizzato i bit, l'Internet of Things e le tecnologie per la prototipazione rapida[215], sebbene con due ruoli diversi, stanno democratizzando gli atomi: «*personal fabrication will bring the programmability of the digital worlds we've invented to the physical world we inhabit*»[216].

L'IoT è l'infrastruttura di collegamento tra il mondo virtuale e quello reale, nonché il completamento dei Commons collaborativi: il suo carattere distribuito facilita la collaborazione e la condivisione di idee e cose, spingendo al massimo la produzione paritaria, l'accessibilità e l'inclusione aumentando, per definizione, il capitale sociale. Esattamente come il commercio del XX secolo si avvaleva dell'infrastruttura fisica dei trasporti, l'economia condivisa fa dell'IoT la sua strada: «l'IoT è concepita per consentire a miliardi di persone di inserirsi in reti sociali paritarie e creare insieme le molte, nuove opportunità e pratiche economiche di cui si sostanzia la vita dell'emergente Commons collaborativo. La piattaforma trasforma ogni persona in un prosumer e ogni attività in una collaborazione»[217].

Neil Gershenfeld[218] afferma, infatti, che la vera novità non è costituita dalle nuove tecnologie in sé, quanto dal fatto che queste siano ormai accessibili a tutti perché presenti ovunque: la piena accessibilità sembra essere, a questo punto, proprio l'ultimo passo per completare la trasformazione avviata con la rivalutazione della creatività, del capitale sociale, dei Commons e con l'economia della condivisione.

Sarà proprio Gershenfeld ad avviare il primo esperimento riuscito in questo senso, avvalendosi delle tecnologie per la prototipazione rapida, che, assieme ai software open source, costituiscono il complesso abilitante della democratizzazione della produzione. Nascono così i FabLab[219] – Fabrication o Fabulous Lab – ovvero laboratori digitali che forniscono strumenti di fabbricazione economici e accessibili. Evoluzione inaspettata del celebre corso tenutosi al MIT "How to Make (Almost) Anything" de 2001– a sua volta figlio del Center for Bits and Atoms fondato dallo stesso Gershenfeld nel 1998 –, i FabLab si basano su un concept ambizioso: realizzare un modello di laboratorio replicabile in tutto il mondo, autosufficiente e "intrinsecamente pubblico" che andasse a costituire una rete distribuita di produzione di massa, nel senso che è proprio la massa a produrre.

[214] Anderson, C., *Makers..., op. cit.*, 2013, pag. 16.

[215] In realtà, il termine "*rapid prototyping*", riferito a processi additivi, formativi e sottrattivi, nasce contestualmente ai primi sistemi di stampa 3D. Cfr Pone, S. e Colabella, S., *Maker. La Fabbricazione digital per l'architettura e il design*, Progedit, Bari, 2017, pag. 14.

[216] Si veda Gershenfeld, N., *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop*, Basic Books, New York, 2005, pag. 17.

[217] Rifkin, J., *La società a costo marginale zero…*, *op. cit.*, 2017, pag. 29.

[218] Si veda Gershenfeld, N., *Fab…*, *op. cit.*, 2005.

[219] Gershenfeld scrive: «*a fab lab is a collection of commercially available machines and parts linked by software and processes we developed for making things. The firs labs have a laser cutter to cut out two-dimensional shapes that can be assembled into three-dimensional structures, a sign cutter that uses a computer-controlled knife to plot flexible electrical connections and antennas, a milling machine that moves a rotating cutting tool in three dimensions to make circuit boards and precision parts, and the tools for programming tiny high-speed microcontrollers to embed logic*», cfr. Gershenfeld, N., *Fab…*, *op. cit.*, 2005, pag. 12.



Locandina di un evento presso il FabLab di Napoli. Immagine da fablabnapoli.it.

Le tecnologie per la *digital fabrication* che si trovano all'interno dei FabLab – ad esempio *laser cutter*, *sign cutter*, *milling machine* e *vacuum former* – non sono una novità sconvolgente – basti pensare che la prima macchina a Controllo Numerico è stata sviluppata proprio al MIT ed è entrata in commercio nel 1952[220] –, lo è piuttosto il fatto che siano uscite dal mondo della produzione industrializzata e siano entrate prima in un'aula universitaria per poi arrivare nelle più remote parti del mondo. Infatti, a partire dal 2002, solo un anno dopo il corso tenutosi al MIT, compaiono i primi FabLab – assemblabili, inizialmente, con circa 20.000 dollari – in India, Costa Rica, Norvegia e in Ghana. Dimostrandosi una soluzione efficace al "*tool*' *divide*, ovvero il mancato accesso agli strumenti di fabbricazione da parte di coloro che vivono nei paesi sottosviluppati, è innegabile che i FabLab siano il sintomo di un cambiamento epocale ed è lo stesso Gershenfeld a spiegarci perché: «*instead of bringing information technology to the masses, fab labs show that it's possible to bring the tools for IT development, in order to develop and produce local technological solutions to local problems*»[221].

Mentre Gershenfeld sposta le tecnologie di produzione dalle fabbriche ai FabLab, Dale Dougherty fa un altro passo e le porta a casa dei consumatori: nel 2005, con la pubblicazione della rivista "Make", nasce ufficialmente il movimento dei Makers: «*what you see in the Maker Movement is a wide range of people, young and old, who are developing their talents and discovering new ways to solve interesting, everyday problems by working together on projects. Making is a meaningful form of personal expression that fosters creativity, builds community and encourages the collaborative practice of innovation*»[222].

Il movimento dei Makers inizia, come sempre, come un cambiamento culturale, derivante sia dal movimento di arti e mestieri – Arts and Crafts[223] – «per evidente consonanza culturale, [sia dal] Do-It-Yourself, […] per evidente corrispondenza di obiettivi»[224]. Mentre con quest'ultimo la discendenza è più diretta, in quanto entrambi i movimenti condividono l'idea che il "fare da soli" – sempre visto in chiave anticonsumista – può risolvere un problema per cui, di solito, servirebbe un esperto, ma è anche un processo che conduce a una profonda soddisfazione personale, con il movimento Arts and Crafs le tematiche diventano più complesse, a tratti politiche.

Con il gruppo capitanato da William Morris, i *maker* condividono tanto l'aspirazione di liberare, grazie a una ritrovata creatività collettiva, l'umanità dal lavoro alienato[225] quanto il desiderio di tornare a un'epoca in cui l'uomo produce artigianalmente tutto ciò che gli serve[226]. Nonostante siano molto frequenti i riferimenti alla cultura artigianale, seppur rinnovata

[220] Naboni, R. e Paoletti, I., *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Springer, Berlino, 2014.
[221] *Ivi*, pag. 13.
[222] Make:community, https://make.com.
[223] Il movimento artistico Arts and Crafts nasce verso la fine dell'Ottocento (la prima esposizione si ebbe nel 1888 presso l'Exhibition Society di Londra) con l'obiettivo di rivalutare l'artigianato a discapito della produzione industriale. Fu fondata da William Morris con la collaborazione, tra i tanti, di W. Crane e C.R. Ashbee. Enciclopedia Treccani, *Arts and Crafts*, http://www.treccani.it/enciclopedia/arts-and-crafts.
[224] Pone, S. e Colabella, S., *Maker…*, *op. cit.*, 2017, pag. 26.
[225] Si veda Greenhalgh, P., "The History of Craft", in Dormer, P. (a cura di), T*he Culture of Craft*, Manchester University Press, Manchester, 1997, pag. 22.
[226] Si veda Benevolo, L., *Storia dell'architettura moderna*, Laterza, Bari, 2008 (ed. orig. 1960), pag. 197.

grazie alle più recenti tecnologie e globale grazie ai nuovi mezzi di comunicazione[227], vi è una differenza sostanziale tra *maker* e artigiano classico, in particolare se italiano, che risiede nel rapporto con la tradizione[228]. Mentre un *maker* «gioca, sperimenta e magari prende in giro l'establishment tecnologico e culturale, [l'artigiano] tende a trovare in alcuni riferimenti classici il suo ruolo e la sua missione. Il primo gioca e stravolge gli assunti del mondo che sperimenta; il secondo onora una tradizione di cui si fa carico»[229].

In realtà, le due culture non sono antitetiche, anzi si completano: così come i *maker*, se vogliono diventare economia, non possono che confrontarsi con il mondo del design abbracciandone quindi l'estetica condivisa – d'altronde moltissimi *maker* sono designers –, allo stesso modo gli artigiani tradizionali, se vogliono restare economia, dovranno integrare nella propria cultura progettuale strumenti e metodi 2.0, immaginando una committenza più giovane, nativa digitale[230].

È infatti «la convergenza fra queste due culture [che] genera la figura di un artigiano digitale capace di dialogare con il mercato grazie a un mix tutto nuovo di passione per il sapere fare, sperimentazione tecnologica e capacità di realizzare prodotti»[231].

Siamo ben lontani, quindi, dal bricolage da giardino: oltre ad avere profonde radici culturali, che vanno da William Morris, alla rivalutazione del lavoro artigiano fino ad arrivare ad *Autoprogettazione?* di Enzo Mari[232], i maker si ricollegano felicemente all'anticonsumismo do-it-yourselfer, rientrando senza problemi all'interno della profonda trasformazione della domanda, decisamente più ambientalista. A questo proposito, basti pensare alla Repair Revolution – «*repair saves you money. It saves the environment. And it connects us to our things. Ditch the throwaway economy*»[233] – che promuove la riparazione di qualsiasi tipo di oggetti, dagli smartphone alle scarpe. Sul sito iFixit, è possibile trovare 56.645 – in continuo aumento – manuali di riparazione di oggetti ad alto contenuto tecnologico con l'obiettivo di ridurre l'e-waste, ovvero i rifiuti provenienti dai beni elettronici il cui smaltimento è costoso e complesso.

In questo contesto si può dire rivoluzionario compare, a un certo punto, la tecnologia cui si pensa quando si parla di digital fabrication e l'accessorio per eccellenza del *maker*: la stampa 3D. In realtà, si parla una tecnologia che ha più di trent'anni: tuttavia, ancora una volta, è l'accessibilità che fa la differenza.

[227] Tra i portali web di vendita più famosi per i prodotti artigianali, vi è Etsy.it. È possibile leggere sul sito una breve manifestazione d'intenti, intitolata "Preservare l'aspetto umano del commercio": «Etsy è il mercato globale dei prodotti originali e creativi. È la sede di un universo di articoli speciali e straordinari, dai prodotti originali fatti a mano ai tesori vintage. Nei tempi del crescente automatismo, la nostra missione è mantenere alla base del commercio il contatto umano. Ecco perché abbiamo creato un luogo dove la creatività vive e prospera poiché alimentata dalle persone. Aiutiamo la nostra community di venditori a trasformare le loro idee in attività commerciali di successo. La nostra piattaforma li mette in contatto con milioni di acquirenti in cerca di qualcosa di speciale e alternativo, con un tocco personale, per i momenti della vita che meritano una dose di fantasia.Come azienda, ci impegniamo per guidare con i nostri principi guida e per diffondere i concetti di sostenibilità e responsabilità, i cui effetti vanno ben oltre la nostra attività» (Etsy, https://www.etsy.com/it/about).
[228] Micelli, S., *Fare è innovare. Il nuovo lavoro artigiano*, Il Mulino, Bologna, 2016, pp. 48-51.
[229] *Ivi*, pag. 50.
[230] *Ibidem*.
[231] *Ivi*, pag. 51.
[232] Mari, E., *Autoprogettazione?*, Edizioni Corraini, Mantona, 2002, pag. 1 (ed. orig. 1974).
[233] iFixit, *Right to Repair*, https://it.ifixit.com/Right-to-Repair.

Infatti, il primo metodo additivo di prototipazione rapida nasce +addirittura nel 1986, quanto Charles W. Hull, deposita il brevetto per la stereolitografia[234], che consiste nell'impilare in strati laminati sottili una resina per rivestimenti allo stato liquido, poi cotta in un unico pezzo grazie ai raggi ultravioletti[235]. Era tuttavia un sistema costoso e pensato per il mondo industriale. La situazione cambia radicalmente quando la stampa 3D incontra il mondo open source.

Le prime stampanti 3D con Open Source Hardware nascono recentemente, tra il 2005 e il 2006, con il progetto americano Fab@home[236] e quello inglese RepRap[237]. Il primo nasce a opera di Evan Maole e Hod Lipson – studenti del Dipartimento di Ingegneria Meccanica della Cornell University di New York – con l'obiettivo di produrre una stampante *low cost* che si avvalga dell'utilizzo di materiali non riscaldati ma usati direttamente allo stato plastico[238]. Invece Adrian Bowyer, Senior Lecturer all'Università di Bath, con la sua REPlicating RAPid prototyper punta, oltre che alla massima diffusione della tecnologia e al basso costo, alla creazione di un sistema auto-riproducibile, in grado di stampare i pezzi necessari alla sua realizzazione. Sul lavoro di Bowyer si innesta l'azienda fondata da Bre Pettis, Adam Mayer e Zach Smith, MakerBot[239] che per prima proverà ad ampliare il mercato della stampa 3D dai *maker* al grande pubblico, lanciando sul mercato Cupcake CNC nel 2009[240]. I

nfatti, uno dei principali problemi era che per stampare in 3D serve comunque una certa conoscenza del sistema, oltre che una serie di competenze specifiche, come ad esempio quelle necessarie a progettare e modellare un oggetto in 3D. Proprio per risolvere questo problema, MakerBot offre una libreria di oggetti tridimensionali già pronti per essere prodotti, caricandoli in rete sul sito thingiverse.com con licenza GPL o CC.

Nonostante non sia ancora presente su ogni scrivania, la diffusione della stampa 3D è in costante crescita, continuando a impattare sulle tradizionali modalità di produzione, a partire dal passaggio a processi additivi anziché sottrattivi.

Sebbene sia enorme il potenziale trasformativo della tecnologia anche a livello economico, il dibattito sull'*additive manufacturing* (AM) si consuma ancora sulla sua presunta incapacità di generare economie di scala, ovvero di diminuire il costo di produzione aumentandone il volume: è, in realtà, a tratti una questione paradossale, considerando che il maggiore vantaggio dell'AM è proprio la possibilità di produrre in parallelo parti non correlate.

[234] Cfr. Hull, C. W., *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, brevetto depositato presso United States Patent, 1986.

[235] Hull elabora anche il *software* che trasforma il modello solido tridimensionale nel formato .stl compatibile con la stampa 3D. Tre anni dopo, cioè 1989, Scott Crump deposita il brevetto per metodo Fused Deposition Modelling, in grado di utilizzare diversi materiali. Questi, portati allo stato plastico da un ugello metallico posto su una testa mobile, vengono depositati in strati sovrapposti su un piatto anch'esso mobile. Cfr. Pone, S. e Colabella, S., *Maker…*, *op. cit.*, 2017, pp. 15-16.

[236] Fab@Home, in produzione dal 2005 al 2012, è stata la prima stampante 3D disponibile al pubblico. L'obiettivo di Fab@Home era di creare una stampante hackerabile, versatile e *low-cost* per accelerare l'innovazione tecnologica e favorirne la migrazione nello spazio Maker. Cfr. www.creativemachineslab.com.

[237] Si legge sul sito «*RepRap is humanity's first general-purpose self-replicating manufacturing machine*». RepRap, https://reprap.org/wiki/RepRap.

[238] Cfr. Pone, S. e Colabella, S., *Maker…*, *op. cit.*, 2017, pag. 17.

[239] Cfr. MakerBot, https://www.makerbot.com/.

[240] Cfr. Pone, S. e Colabella, S., *Maker…*, *op. cit.*, 2017, pp. 20-21.



Repair Manifesto. Immagine da ifixit.com.

Tuttavia, è anche vero che un sottoutilizzo del volume produttivo a disposizione crea inefficienza nell'intero processo e, quindi, perdita economica: è chiaro che produrre tante piccole serie differenti potrebbe creare attriti all'interno della produzione[241].

La produttività è infatti un *driver* centrale nel determinare i costi di produzione delle tecnologie AM che, inoltre, si basano fondamentalmente su approcci demand pull, che richiedono grande flessibilità.

Ciò implica la convenienza di un aumento del volume di produzione in quanto, seppur siano assenti gli ammortamenti derivanti dalla ripetizione tipica delle economie di massa, alcune operazioni restano comunque in comune: si pensi, ad esempio, al riscaldamento del materiale di stampa o al raffreddamento degli elementi prodotti. Non a caso, molte aziende produttrici di stampanti stanno aumentando il volume delle macchine, consentendo così anche un più rapido abbattimento dei costi fissi di investimento, ridotti anche dalla scomparsa delle spese derivanti dall'attrezzaggio industriale conseguente l'introduzione di un prodotto innovativo, facilitato proprio dall'utilizzo della stampa 3D[242].

Al di là di considerazioni strettamente economiche, in realtà, l'ancora ridotta diffusione dell'AM deriva anche da una mancata evoluzione del mind set necessario al suo utilizzo. Hull, padre della stereolitografia, afferma che il suo successo sul mercato è frutto dell'individuazione di una ben definita nicchia di consumatori, le cui esigenze, in un compiuto approccio *demand pull*[243], hanno stimolato la nascita dell'innovazione.

Nata quindi per la prototipazione, la stampa 3D solo in un secondo momento si è rivelata idonea a una conversione in una tecnologia produttiva vera e propria, innovandosi secondo logiche di tipo *technology push*. L'AM soffre, quindi, ancora la contraddizione derivante dall'essersi evoluta in due spinte concettualmente opposte, che hanno causato una divergenza delle modalità di progettazione che solo recentemente stanno abbandonando la strada a tratti empirica della prototipazione per avviarsi su quella rigorosa della produzione industriale.

Quindi, mentre l'AM trova pian piano la sua definitiva affermazione in diversi settori industriali e la più recente delle rivoluzioni ha oramai pervaso ogni aspetto della quotidianità, la triade definita in partenza, creatività-connessione-condivisione, si è evoluta infine in una vera e propria economia, dotandosi non solo del regime di normazione necessario alla sua attuazione, ovvero i commons, ma anche degli strumenti e delle tecnologie per auto-alimentarsi, formandosi e si riformandosi continuamente con esse e confermandosi, con Brian Arthur, autopoiesi perpetua, generativa, sempre insoddisfatta[244].

La prima e la più fondamentale delle implicazioni di questa trasformazione riguarda la relazione tra il sistema di produzione industriale e la struttura della società: infatti, se in passato era il primo a impattare sulla seconda, con conseguenze anche politiche derivanti non solo dal sistema in sé e dall'organizzazione del lavoro ma anche dagli artefatti in quanto tali[245], adesso

[241] Si veda Baumers, M. *et alii*, "The cost of additive manufacturing: machine productivity economies of scale and technology push", in *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 102, 2016, pp. 193-201.

[242] *Ibidem.*

[243] Si veda Hull, C., "On Stereolithography", in *Virtual Phys. Prototyp*, vol 7, 2012.

[244] Arthur, B., *La natura della tecnologia…*, *op. cit.*, 2011.

[245] Cfr. Winner, L. "Do Artifacts Have Politics?", in *Daedalus*, vol. 109, 1980, pp. 121-136. Winner analizza la relazione tra i sistemi tecnici e la società contemporanea soffermandosi, in particolare, sulla risposta di quest'ultima agli imperativi tecnici. L'attenzione però non è né indirizzata alle ragioni sociali che hanno portato alla nascita e alla diffusione di una certa tecnologia, né a teorie improntate su una sorta di determinismo tecnologico, secondo il quale la tecnologia si sviluppa obbedendo a dinamiche che sono ad essa interne. L'autore osserva gli oggetti e i sistemi in quanto tali concentrandosi su due aspetti: come il design di un certo oggetto o sistema determini alcuni dei modi di sviluppo e di esistenza di una comunità e come certe tecnologie richiedano necessariamente una peculiare organizzazione sociale e politica su cui fondarsi. In molti casi, lo sviluppo di una tecnologia (ad esempio, alla fine degli anni '40, l'Università della California progettò una macchina agricola per la raccolta dei pomodori che distrusse gradualmente le piccole aziende che non potevano permettersela) finisce per favorire, non sempre intenzionalmente, un gruppo sociale al posto di un altro oppure ad influenzare, a causa della sua conformazione fisica, la quotidianità degli individui. La partecipazione spinta dell'utenza alla progettazione di sistemi e componenti e l'avvicinamento rapidissimo del consumatore al produttore tendono a sovvertire questo rapporto, consentendo ad una molteplicità di gruppi sociali di partecipare a processi decisionali che prima gli erano preclusi e quindi, per quanto detto, di intervenire politicamente sulla struttura della società.

la democratizzazione dei mezzi di produzione, delle idee, della commercializzazione dei prodotti, fa sì che siano la società e le sue recenti modificazioni strutturali a impattare sui processi di industrializzazione, costringendo non solo le aziende, ma anche l'intero modello economico a reinventare se stesso.

Quindi, se l'architettura ha, tanto con la struttura della società che con quella della produzione, una relazione diretta, nel contesto così delineato, la domanda che sorge spontanea è in che misura e in che modo essa sarà sfiorata dalla democratizzazione della produzione.

Quest'ultima ha infatti due conseguenze fondamentali, di cui una che definiremo, semplicisticamente, di carattere pratico, e l'altra invece molto più profonda e connessa al riposizionamento del ruolo dell'architetto all'interno del nuovo regime sociale, economico e produttivo.

La conseguenza pratica risiede nelle potenzialità e nell'accessibilità delle nuove tecnologie digitali: quest'ultime, sono a loro volta responsabili di offrire pressoché illimitati range di customizzazione che, con la collaborazione del pensiero computazionale, aprono a esplorazioni formali fino a poco tempo fa nemmeno rappresentabili, figurarsi se producili. A ciò si aggiunge il significativo accorciamento della distanza tra progettazione e costruzione, magistralmente esemplificata dalla possibilità di stampare direttamente edifici in grande scala o di realizzarli in maniera completamente automatizzata, spostando, di fatto, l'intervento dell'architetto nella costruzione verso la modellizzazione virtuale dell'edificio[246].

Tuttavia, un modello non è una semplice ricostruzione – o costruzione – virtuale, in quanto fornisce una struttura dinamica e aperta per la simulazione della realtà, consentendoci di simulare progettando e di progettare simulando, sovrapponendo, attraverso sistemi desing-to-fabrication, progetto, modello e costruzione[247].

Tali approcci sono applicabili tanto a singoli componenti che all'opera nella sua interezza, con impatti ironicamente proporzionali alla dimensione della realizzazione.

[246] Per maggiori approfondimenti sull'utilizzo di stampa 3D e tecnologie di prototipazione rapida nel settore delle costruzioni si vedano: Wu, P. *et alii*, "A critical review of the usa of 3-D printing in the construction industry", in *Automation in Construction*, vol. 68, 2016, pp. 21-31; Labonnote, N. *et alii*, "Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities", in *Automation in Construction*, vol. 72, 2016, pp. 347-366; Buswell, R. A. *et alii*, "Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction", in *Automation in Construction*, vol. 16, 2007, pp. 224-231; Keating, S. e Oxman, N., "Compound fabrication: A multi-functional platform for digital design and fabrication", in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, 2013, pp. 439-448.

[247] Saggio, A., *The IT Revolution in Architecture. Thoughts on a paradigm shift*, trad. eng. Jackson, S., Carocci, Roma, 2007, pag. 16 (ed. orig. *Introduzione alla Rivoluzione Informatica in Architettura*, Carocci, Roma, 2007).

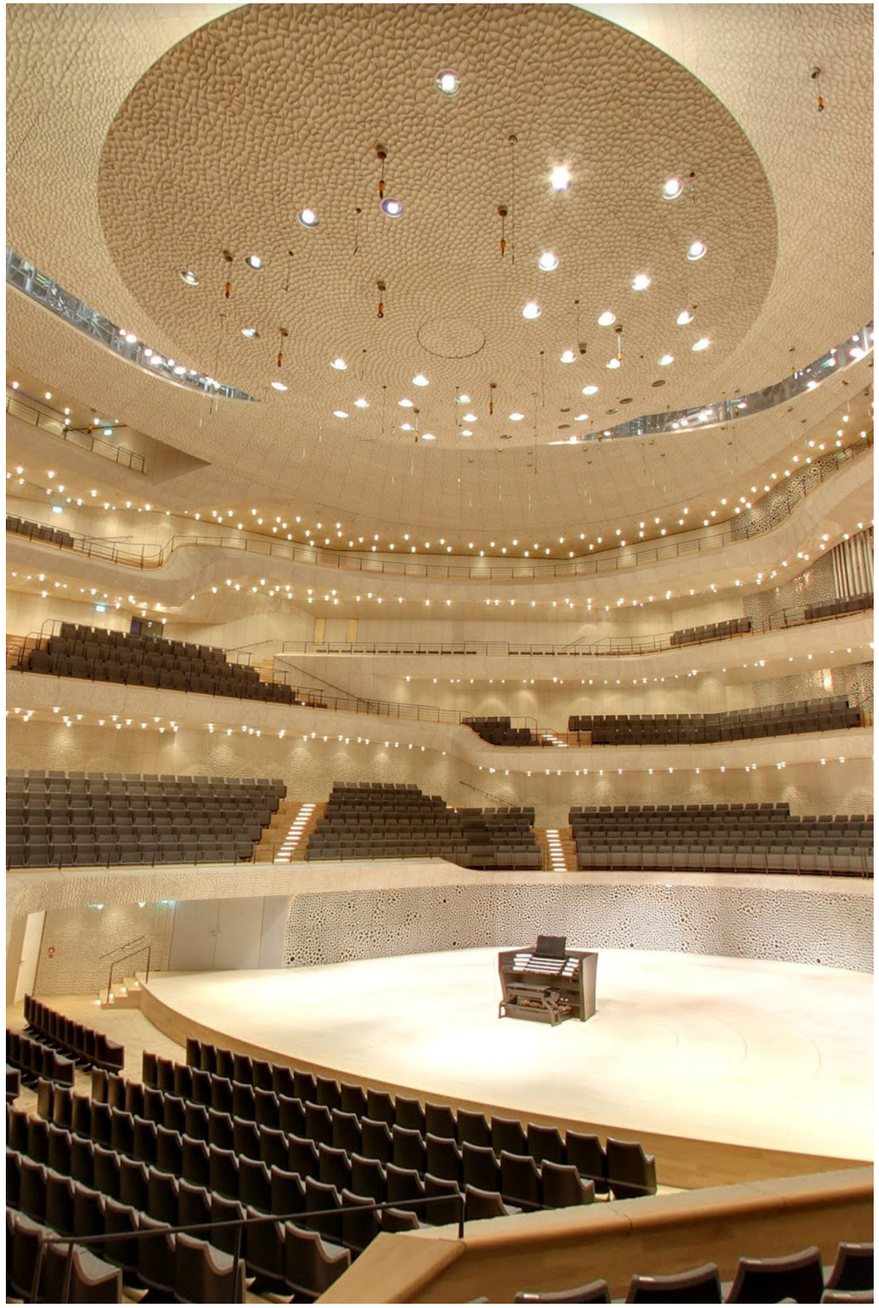
Nel primo caso, particolarmente significativa è la produzione dei pannelli acustici per la *concert hall* della Elbphilarmonie di Amburgo, progettata da Herzog e de Meuron e inaugurata nel 2017. In realtà il progetto è stato avviato molti anni prima, circa a metà degli anni 2000, rappresentando una notevole sfida soprattutto dal punto di vista della fabbricazione. Il progetto, infatti, estremamente ambizioso, come tra l'altro dimostra il rilievo che ha avuto sulle riviste negli ultimi anni, è stato minuziosamente indagato dal punto di vista acustico dalla società di ingegneria Nagata Acousticts.

Sin da subito la collaborazione tra architetti e ingegneri del suono è stata proficua, cercando di lavorare sia sulla forma complessiva della *hall*, in maniera tale da garantire un corretto posizionamento delle superfici riflettenti, sia per elaborare la geometria dei singoli pannelli diffondenti, optando alle fine per la scelta di una superficie a celle, con profondità variabile dai 5 ai 90 millimetri e larghezza dai 40 ai 160. Per l'occasione è stato sviluppato sia un *plug-in* di Rhino 3D per la generazione di circa un milione di NURBS differenti controllate parametricamente e rappresentanti le piccole celle, sia un *software* per la produzione digitale dei 10.000 pannelli in cartongesso, poi prodotti tramite una macchina per la fresatura a controllo numerico a 5 assi. La riuscita del progetto è in questo caso da attribuirsi sia alla stretta cooperazione tra le varie figure professionali coinvolte, sia a un corretto utilizzo dei *tool* digitali, in questo caso fondamentali tanto per la concezione che per la realizzazione del progetto[248]. In questo caso infatti, l'introduzione di un prodotto innovativo – le macchine per la fresatura a più assi, ad esempio, non erano ancora disponibili quando è partita la progettazione – ha determinato anche un'innovazione processuale, andando oltre le logiche convenzionali che, solitamente, si limitano a un'innovazione delle tecnologie ma non del pensiero progettuale.

Risulta ancora più interessante quando un *workflow* di tipo *design-to-fabrication* viene applicato a un'intera struttura: a tal proposito il progetto Infundibuliforms, da una ricerca dell'University of Michigan[249], ha l'obiettivo principale di approfondire l'indagine sui sistemi cinetici super leggeri, creando involucri spaziali con la capacità di riconfigurarsi dinamicamente a partire da reti piane che, sottoposte a carico, sono in grado di generare catenoidi. La complessità del *task* ha fatto sì che la produzione deviasse sulla robotic additive manifacturing che ha consentito la stampa di una reta elastica piana, messa successivamente in forma sulla base di alcune simulazioni condotte utilizzando il *plug-in* di Grasshopper – noto linguaggio di programmazione visuale – Kangaroo, dedicato a processi iterativi di rilassamento dinamico. Per produrre una superficie sufficientemente resistente è stata estrusa in pannelli separati una termoplastica mixata con gomma (TPE) mediante l'utilizzo di un braccio robotico a 7 assi. Il prototipo finale, montato su un anello principale e tre secondari, copre una superficie di 28 metri quadri. Processi di questo tipo mostrano chiaramente come sia diminuito lo spazio che separava progettazione e produzione, riducendo in parte i confini della professione, almeno nella sua tradizionale concezione.

[248] Per ulteriori approfondimenti si veda, Koren, B. e Muller, T., "Digital fabrication of non-standard sound-diffusing panels in the large hall of the Elbphilharmonie", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 122-129.

[249] Si veda, Velikov, K., Thun,G. e Tish, D., "Infundibuliforms. Kinetic systems, additive manufacturing for cable nets and tensile surface controls", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londr-a, 2017, pp. 84-91.



Herzog e de Meuron, *Elbphilarmonie*, Amburgo, 2017. Immagine da Google Arts and Culture.

A questa riduzione, che si aggancia quindi alla seconda questione relativa al riposizionamento della figura dell'architetto, si aggiunge un ulteriore tema fondamentale, ovvero quello della "proprietà intellettuale dell'opera" che, da concetto pregnante tutta la cultura occidentale, è adesso sottoposto a un processo di frammentazione parallelo a quello dell'informazione e della conoscenza.

Infatti, la modificazione di certi riferimenti canonici e permanenti derivanti dalle precedenti modalità di produzione ha cambiato la classica definizione di autorialità. In passato, il lavoro di artigiano si riconosceva sulla base della similarità che accumunava le sue opere che, essendo simili ma non identiche, rimanevano comunque uniche[250]. Nell'epoca della riproducibilità tecnica, tali concetti si sono ribaltati: l'autore era riconosciuto come tale sia dell'oggetto di partenza che delle sue infinite riproduzioni[251], segnando il passaggio da una cultura della similarità a una improntata sull'identità.

Con l'introduzione dei mezzi digitali, si è tornati all'idea della variabilità, ma con una differenza sostanziale rispetto a quella artigianale: l'assenza di una limitazione quantitativa. Sembrerebbe quasi una banalità se non fosse che si tratta, in parole povere, della possibilità di realizzare e progettare serie di oggetti diversi la cui variabilità, anziché dipendere esclusivamente da un'incertezza delle tecniche o da scelte progettuali, può anche essere frutto di una relazione con l'ambiente esterno. Ciò significa che dagli oggetti si passa a progettare sistemi che sono in grado di evolversi e adattarsi, adeguandosi alle interferenze provenienti dall'esterno[252].

Ed è l'interferenza di fattori esterni nei processi progettuali e l'infinita variabilità che ne segue a condurci alla questione dell'autorialità, in quanto l'apertura che ne deriva implica anche una condivisione e collettivizzazione del progetto[253], che ne può risultare anche sostanzialmente modificato.

È dunque vero che l'autore è destinato a sparire?

Con il rischio di anticipare le argomentazioni successive, rispondiamo già con Ortega: «la definizione [di autore] si amplia e si qualifica in virtù di altre potenzialità. Mentre in passato ci si limitava ad associare l'autore all'opera, adesso vi è un processo a cui tanto l'autore che il sistema prendono parte. I sistemi parametrici risultano in un designer che è autore di un sistema che può essere dinamicamente attualizzato in una varietà di modi»[254].

In realtà, non è che manchino in architettura esempi di questo approccio per "sistemi". Si guardi, ad esempio, ad *Autoprogettazione?* di Enzo Mari: nel celebre manuale, l'autore elabora una serie di progetti pensati in maniera tale che chiunque possa realizzarli – con tanto di licenza tipo Creative Commons[255] – con l'obiettivo di "insegnare costruendo". Sebbene si tratti di design open source, in quanto sono messe a disposizione informazioni da comunicare e

[250] Ortega, L., *The Total Designer…*, *op. cit.*, 2017, pag. 52. L'autore continua: «Il concetto di similarità è più complesso di quello di identità, dato che nel primo le variazioni, seppur sostanziali, sono riconducibili allo stesso autore. Spero l'autorialità diventa collettiva, diventando una "scuola" o un "movimento", diventando identificabile come una tecnica». Traduzione a cura dell'autrice.
[251] *Ibidem.*
[252] *Ivi*, pp. 48-49.
[253] Mario Carpo parla di passaggio dalla *mass customization* alla *mass participation*. Cfr. Carpo, M., "Introduction", in Carpo, M. (a cura di), *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*, John Wiley and Sons Publication, Chichester, 2013, pag. 13.
[254] Ortega, L., *The Total Designer…*, *op. cit.*, 2017, pag. 49.
[255] «Chiunque, ad esclusione di industrie e commercianti, potrà utilizzare questi disegni per realizzarli da sé», Mari, E., *Autoprogettazione?*, *op. cit.*, 2002, pag. 1.

diffondere, rielaborabili e implementabili da chi le utilizza, nessuno si sognerebbe di mettere in dubbio l'appartenenza del progetto a Mari, non solo per una questione di autorialità, ma per una legata alla professionalità. Ciò è confermato dall'intenzione che guida la sperimentazione, ovvero trasmettere un certo tipo conoscenza, come ribadisce lo stesso Mari: «questi oggetti non vogliono essere alternativi agli oggetti dell'industria, la loro realizzazione vuole essere una sorta di esercizio critico alla progettazione, è per questo che questo esperimento è stato chiamato di autoprogettazione, non di autorealizzazione»[256].

Mari, dunque, insegna che per demandare la costruzione bisogna sì operare una semplificazione delle tecniche ma, soprattutto, "aprire" il progetto alla trasformazione: solo un progetto aperto è in grado di accogliere correttamente eventuali modifiche provenienti dall'esterno.

Quindi la democratizzazione della costruzione, che qui crediamo avverrà con una percentuale comunque fortemente dipendente tanto dal sistema costruttivo utilizzato che dalle tecnologie messe in campo, non implica necessariamente anche quella della progettazione che, tuttavia, sarà indubbiamente molto più condivisa, nonché più articolata, in quanto, anziché progettare per la permanenza, si dovrà progettare per la diversificazione e per il cambiamento.

Per fortuna i riferimenti non mancano: si pensi a quello che ha fatto Alejandro Aravena nel 2004 con Elemental, quando 93 famiglie sono diventate proprietarie degli appartamenti realizzati sotto la direzione dell'architetto. Agli abitanti, coinvolti anche nella fase di progettazione, sono state attribuite una serie di abitazioni incomplete, da modificare e integrare. Elemental offre infatti un modello insediativo diverso, in cui lo spazio è collettivo e ogni elemento è studiato per essere economico e facilmente manutenibile. «Nessun compiacimento pittoresco o populista affiora nelle case di Quinta Monroy: bisogna realizzare la struttura, la base indispensabile per cominciare una nuova vita, quello che da soli gli abitanti, installati precariamente per troppi anni, non sono stati in grado di costruire. Il progetto di architettura è una strategia di appropriazione del territorio che permette molteplici tattiche abitative differenti, evitando un ruolo predittivo e prescrittivo ma anzi lasciandosi manipolare dai suoi abitanti – indifferente alla permanenza della propria forma. Paradossalmente Alejandro Aravena progetta un'archeologia rovesciata, tracciando ora il sedime delle preesistenze sulle quali si appoggerà la vita, una traccia dura, che già adesso deve essere decifrata tra le prime ripitture, i sopralzi, gli ampliamenti»[257]. In questo caso, l'architetto è «mediatore all'interno di processi sociali, tecnici e politici [e si ha la sensazione] che questa ridefinizione del ruolo del progettista sia stata raggiunta, sottraendolo al cannibalismo dell'immagine e della spettacolarizzazione dell'architettura»[258].

L'approccio di Aravena, catapultato nell'era digitale, può essere ritrovato nel progetto per la Fab Lab House, realizzata da un consorzio di organizzazione e aziende guidate dall'Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), il Center for Bits and Atoms del MIT il Global Fab Lab Network.

[256] *Ivi*, pag. 44.
[257] Gallanti, F., "Elemental, Aravena!", in *Domus*, 15 novembre 2005, disponibile all'indirizzo https://www.domusweb.it/it/architettura/2005/11/15/elemental-aravena-.html. Si veda Aravena, A. e Iacobelli, A., *Elemental Chile. A handbook on progressive housing*, Actarbirkhauser, Basilea, 2008.
[258] Gallanti, F., "Elemental, Aravena!", *op. cit.*, 2005.

Concepita come un centro attivo per la produzione di risorse piuttosto che uno spazio di consumo passivo, la casa genera più di due volte l'energia necessaria al suo sostentamento grazie alla presenza del sistema fotovoltaico che la alimenta. Dotata di un piccolo Fab Lab collegato al Global Network per la produzione degli oggetti quotidiani, la House è sviluppata con un open design ed è quindi modificabile oltre che costruibile da chiunque in ogni parte del mondo[259]. Al di là del divario tecnologico che li separa, Aravena e l'IAAC hanno fatto, in realtà, quasi la stessa cosa, ovvero dar vita a un sistema, una sorta di architettura potenziale che si configura come il luogo in cui avviene il dialogo tra tutti gli attori coinvolti, a partire dagli utenti.

In conclusione, l'architetto nel senso tradizionale del termine è destinato non a sparire, bensì a evolversi: «*the paternalistic character of the traditional design process will disappear. The enormous variety of emotional (intuitive) solutions which can be invented by a large number of future users might give an incredible richness to this new "redesigned" design process*»[260].

L'architetto, quindi, diventato ormai digitale, anziché sparire riemerge come un *total designer*, ovvero «né l'architetto moderno del controllo, né l'anti-architetto post-moderno, ma un *meta-systematizer* che prioritizza una logica circolare che include i *feedback*, concentrandosi sugli aspetti performativi anziché su quelli descrittivi. Questo nuovo architetto lavora per sistemi aperti, progettando protocolli che formano sistemi relazionali aperti, proponendo forme di negoziazione tra generiche soggettività personali ed evolute soggettività collettive. I nuovi autori operano computazionalmente, anche se non usano i computer per farlo»[261]. Vediamo adesso come.

[259] Si veda, IAAC, *Fab Lab House*, https://divisare.com/projects/332964-iaac-adria-goula-fab-lab-house.
[260] Cfr. Friedman, Y., "Flatwriter: Voice by Computer", in *Progressive Architecture*, vol. 52, 1971, pag. 99.
[261] Ortega, L., *The Total Designer…*, *op. cit.*, 2017, pag. 49. Traduzione a cura dell'autrice.

ELEMENTAL ALEJANDRO ARAVENA

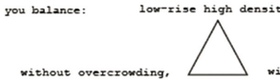
IQUIQUE (CILE)
2004

Out of the 3 billion people living in cities today, 1 billion is under the line of poverty. By 2030 out of the 5 billion people that will be living in cities, 2 billion are going to be under the line of poverty. That means that we will have to build a 1 million people city per week with 10,000 dollars per family. Given the magnitude of the housing shortage, we won't solve this problem unless we add people's own resources and building capacity to that of governments and market. That is why we thought of putting in place an OPEN SYSTEM able to channel all the available forces at play. In that way people will be part of the solution and not part of the problem.

On the other hand, it is a fact that available resources are not enough . To face such scarcity of means, the market tends to do two things: Reduce and Displace; reduce the size of the houses , threatening the quality of life of its inhabitants, and displace them to underserved peripheries where land costs nothing, segregating people from the opportunities that made them come to cities in the first place. In order to face scarcity we propose a principle of INCREMENTALITY.
If you can't do everything, focus on:
A. What is more difficult
B. What cannot be done individually
C. What will guarantee the common good in the future

We identified 5 design conditions as the ABC of incremental housing:
1. Good location: dense enough projects able to pay for expensive well located sites.
2. Harmonious growth in time: build strategically the first half (partition structural and firewalls, bathroom, kitchen, stairs, roof) so that expansion happens thanks to the design and not despite it. Frame individual performances and actions, so that we get a customization instead of deterioration of the neighborhood.
3. Urban layout: introduce in between private space (lot) and public space (street), the collective space, not bigger than 25 families, so that social agreements can be maintained.
4. Provide structure for the final scenario of growth (middle class) and not just for the initial one.
5. Middle-class DNA: plan for a final scenario of at least 72m2 or 4 bedrooms (3x3m) with space for closet or double bed, bathrooms should not be at the front door (which is the typical case to save pipes) but where bedrooms are; they may include a bathtub and not just a shower receptacle and space for washing machine; there should be possibility of parking place for a car. None of this is even close to be the case in social housing nowadays.

In other words, make sure you balance:



HERE you will find 4 examples, with four different designs that pursue the same goals and principles. From now on they are **public knowledge**, an open source that we hope will be able to rule out one more excuse for why markets and governments don't move in this direction to tackle the challenge of massive rapid urbanization. These designs may require to be adjusted to comply with local regulations and structural codes, follow local realities and use pertinent building materials. But they are knowledge that we have tested, that has proved to be beneficial to communities and that have been implemented accepting very pressing budget and policy constraints.

Documento tratto www.elementalchile.cl



Foto di Cristobal Palma.

Think Digital

William Mitchell, già nel 1977[262] aveva intuito che interfacciando i macchinari industriali con la computer grafica sarebbe stata possibile una significativa evoluzione sia dell'intero impianto design/produzione sia delle modalità di progettazione. Qualche anno dopo, scriveva: «*it is worth asking wheter the difference between, say, Frank Gehry's Bilbao Guggenheim and the characteristically rectangular slabs and towers of the late twentieth century is due to something more fundamental? Does the curved shape of London's Swiss Re Building, the twisted profile of New York's proposed Freedom Tower, or the non-repetitive roof structure of the British Museum courtyard represent some significant change in the conditions of production of architecture? The shift, I suggest, is a direct outcome of the new conditions created by the digital revolution*»[263].

Le nuove condizioni create dalla Rivoluzione Digitale cui fa riferimento Mitchell non si limitano però a determinare un utilizzo della tecnologia come mezzo per ridurre il tempo e il costo della produzione, bensì rappresentano l'apertura di «nuovi domini per l'esplorazione della forma architettonica, misurando l'opportunità di produrre progetti in grado di rompere le vecchie regole»[264]. Tra le regole infrante vi è indubbiamente l'uscita dalla sede industriale di alcuni macchinari entrati poi nei FabLab e nelle case dei *maker* o, come nel caso delle stampanti 3D, l'uscita è dai FabLab e l'entrata è nelle grandi industrie: nate per la prototipazione rapida, quasi amatoriale, adesso scuotono le fondamenta di interi settori produttivi. La trasformazione delle condizioni materiali di produzione è causata sia dallo sviluppo delle metodologie CAM (Computer Aided Manifacturing) che dalla sostituzione dei metodi manuali di progettazione con altri digitali (CAD – Computer Aided Drafting e Computer Aided Design)[265].

Lo sviluppo simultaneo di sistemi per il *computer design* e delle tecnologie per la fabbricazione digitale ha consentito – oltre che una notevole espansione dei confini d'apprendimento del digital design, la cui materializzazione sottoforma di prototipi facilita la comprensione degli aspetti materici del progetto[266] – una più rapida diffusione di entrambi, innescata da una continua relazione di reciproca interdipendenza.

[262] Mitchell, W. J., *Computer-aided architectural design*, Petrocelli/Charter, New York, 1977.

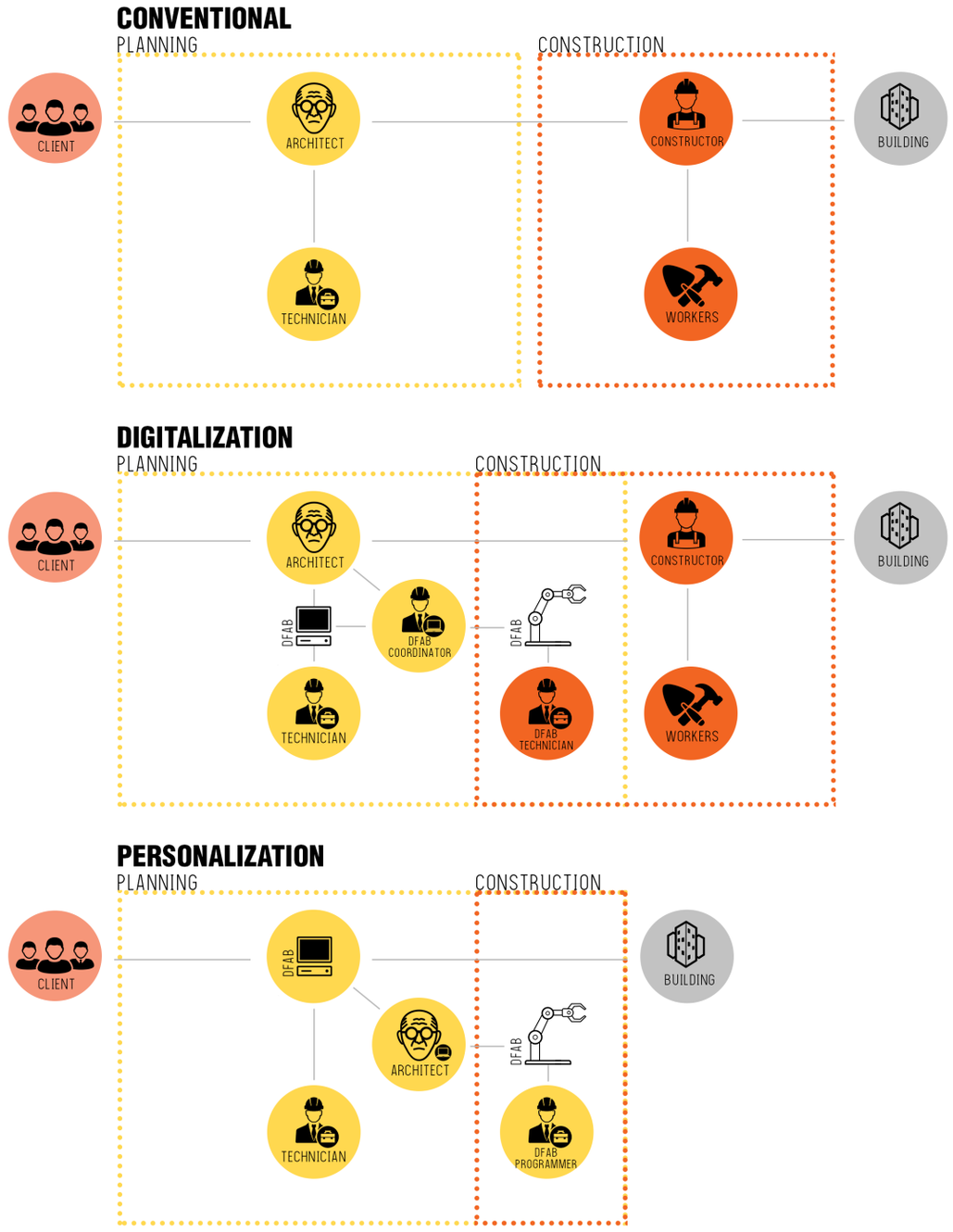
[263] Cfr. Mitchell, W. J., "Constructing complexity", in *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures*, Vienna, 20-22 giugno 2005, pag. 41.

[264] *Ivi*, pag. 42. Traduzione a cura dell'autrice.

[265] Con l'obiettivo di imitare le capacità predittive dei già ben diffusi *software* per il calcolo strutturale, negli anni '60 nasce il primo sistema grafico per il *computer design*: Sketchpad, ideato da Ivan Sutherland al MIT. Sketchpad aveva subito gli influssi della diffusione della Cibernetica che, oltre a essere improntata sulla teoria sistemica, implicava l'esistenza di una relazione uomo-macchina in grado di espandere l'intelletto umano anziché limitarsi a svolgere operazioni ripetitive al suo posto. Sulla base di questi presupposti, Sutherland aveva sviluppato un sistema di vincoli variabili, pensati per verificare e sperimentare diverse relazioni geometriche. Dopo Sketchpad arrivò GRASP, sviluppato da Eric Teicholz, della School of Design di Harvard. Sebbene il *software* si occupasse prevalentemente di *space-planning*, aveva le caratteristiche di un sistema generativo basato su procedure di *form making* derivanti da vincoli relativi a diversi requisiti prestazionali. Menges, A. e Ahlquist, S., "Introduction", in Menges, A. e Ahlquist, S. (a cura di), *Computational Design Thinking*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2011, pp. 11-13.

[266] Cfr. Sass, L. e Oxman, R., "Materializing design: the implications of Rapid Prototyping in digital design", in *Design Studies*, vol. 27, 2006, pag. 334. Consapevoli della forte relazione tra *computer design* e fabbricazione digitale, gli autori propongono un metodo denominato Digital Design Fabrication (DDF), che integra due funzioni automatizzate, ovvero modellazione generativa e prototipazione rapida. Il processo sfrutta lo *scripting* per generare modelli con parametri variabili, poi verificati matericamente con prototipi reali fornendo l'opportunità per un design continuo, in cui concezione, materializzazione, fabbricazione e costruzione sono parte di una progettazione integrata (*ivi*, pag. 339).

CONSTRUCTION WORKFLOW



Evoluzione del *workflow* del processo costruttivo a causa della digitalizzazione del settore delle costruzioni. Schema tratto da De Shutter, G. *et alii*, "Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials", in *Cement and Concrete Research*, vol. 112, 2018, pag. 32. Rielaborazione a cura dell'autrice.

Un rapporto di biunivoca influenza che si svolge praticamente dagli anni '60 e che Giacomo Chiesa riorganizza in tre "ere", definite dalle implicazioni di strumenti e metodi della Rivoluzione Digitale tanto nella prassi costruttiva e produttiva che nella cultura tecnologica del progetto[267]: mentre la prima era digitale è incentrata sulla relazione tra rappresentazione, generazione, valutazione e ottimizzazione del modello, la seconda si basa sulla materializzazione – intesa come processo opposto alla modellizzazione – di quest'ultimo e, infine, la terza era, che si configura decisamente come quella dei dati, vede nascere nel progetto una relazione diretta tra oggetto virtuale e oggetto reale.

Per comprendere gli impatti dei mezzi digitali sulla progettazione, è necessario esaminarne quantomeno due aspetti, ovvero l'evoluzione della figura del progettista, comprese le sue modalità di interazione con i nuovi strumenti, e le modalità con cui questi sono stati assimilati nella pratica progettuale.

Il ruolo del progettista, sebbene ancora centrale, si evolve a causa di una nuova e più articolata relazione con le informazioni che, non più relegate all'inizio del processo progettuale, sono con esso continuamente interagenti. L'introduzione della digitalizzazione, inoltre, ha richiesto al progettista addirittura uno sforzo ontologico: la realizzazione di un modello virtuale richiede infatti l'esplicitazione di conoscenze implicite per poter implementare e interagire con una loro rappresentazione[268].

Ciò significa che il progettista dovrà conoscere e comprendere gli ambienti digitali, e non solo le rappresentazioni digitalmente generate, per poter dialogare con essi in maniera progettuale.

Le modalità, nonché la profondità, di assimilazione degli strumenti digitali all'interno del progetto determinano o un approccio di tipo "computazionale" oppure uno "computerizzato" alla progettazione[269]. Mentre un approccio *computer-aided*, ovvero solo computerizzato, si limita a incapsulare le informazioni all'interno di una rappresentazione simbolica, un processo computazionale richiede, come anticipato, l'esplicazione dei processi cognitivi: «la modellazione parametrica introduce un cambiamento fondamentale: "segna" le parti di un progetto relazionandole e cambiandole in modo coordinato. Tale messa in relazione richiede un pensiero esplicito sul tipo di relazione richiesta»[270].

È chiaro dunque come sia ben diverso un utilizzo "computazionale" o semplicemente "computerizzato" dei *tool* digitali. Ne nasce, di conseguenza, un'importante questione teoretica sul ruolo del *digital design*, da un lato inteso come una nuova e radicale forma di design metodologicamente specificata e definita e, dall'altro, come mera somma di risultati ottenuti grazie ai mezzi digitali[271]. È infatti indubbio che molte delle nuove caratteristiche formali apparse

[267] Si vedano Chiesa, G., "La prassi progettuale esplicito-digitale e l'approccio prestazionale", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, 2017, pp. 236-242; Chiesa, G., *Paradigmi, tecnologie ed ere digitali. Il dato come parametron di innovazione in architettura e urbanistica*, Accademia University Press, Torino, 2015.

[268] Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", *op. cit.*, 2006, pag. 242. L'autore scrive che mentre con i modelli *paper-based* l'interazione del designer con la forma è diretta o esterna, quella con i mezzi digitali può essere di tre tipi: l'interazione semplice con costrutti digitali, tipica del design *cad-based*, ancora esterna; l'interazione – interna – con una rappresentazione digitale generata da un particolare meccanismo; l'interazione – interna – con un ambiente digitale che genera a sua volta una rappresentazione digitale (*ivi*, pp. 243-244).

[269] Menges, A. e Ahlquist, S., "Introduction", *op. cit.*, 2011, pag. 10.

[270] Si veda Woodbury, R., *Elements of Parametric Design*, Routledge, Londra-New York, 2010, pag. 11.

[271] Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", *op. cit.*, 2006, pp. 229-230.

nel design risultino influenzate dagli impianti computazionali dei *software* che hanno consentito la generazione di forme complesse tuttavia, è anche vero che design performativo, tettonica e geometria topologica riflettono una critica alla produzione della generazione precedente di progettisti, dai moderni ai post-moderni.

Infatti, quando Robert Venturi[272] si batteva per strategie formali basate su discontinuità, frammentazione ed eterogeneità, interpretazioni di una realtà complessa basata su incongruenze, giustapposizioni e opposizioni, generava già risposte reazionarie al suo conflitto di forme. Si cercavano infatti linguaggi architettonici espressione di una ritrovata unità, presa in prestito dal passato oppure ricercata in vernacolari specificità regionali. Tuttavia, dato che né la contraddizione post-moderna né la ricerca dell'unità sembravano idonee alla rappresentazione della contemporaneità, ben presto comparve un'alternativa in grado di ovviare alla contrapposizione dialettica tra l'eterogeneità post-moderna e la sua risposta unificatrice: ovvero un'integrazione intensiva delle differenze all'interno di un sistema continuo e, allo stesso tempo, eterogeneo[273]. Si trattava di una sorta di processo di "levigatura" che anziché eliminare le differenze, le incorporava[274] allineando, per la prima volta, la complessità alla flessibilità e alla continuità in un'architettura per definizione fortemente dipendente dalle influenze esterne.

Anche i decostruttivisti, notoriamente a favore della frammentazione, iniziano ad ammorbidire la logica del contrasto a favore di un approccio che integrava la diversità attraverso la flessibilità, abbracciando una nuova «*curvilinear sensibility*»[275], ovvero una deformazione determinata da fattori strutturali, economici, estetici, politici e sociali.

In questo contesto, nel Guggenheim di Bilbao, Frank Gehry, oltre a introdurre la morfogenesi come processo di *form finding*, si avvale, almeno in parte, di questa sensibilità continua, coprendo una serie di gallerie ortogonali con strutture flessibili in grado di rispondere alla scala della città medievale, al fiume, alle infrastrutture di collegamento. L'obiettivo è quello di tener conto di tutte le possibili interazioni tra elementi apparentemente senza relazione, connettendoli e conciliandoli nell'opera architettonica. Il Guggenheim di Gehry quindi, seppur rappresenti una pietra miliare nell'introduzione dei mezzi digitali nel processo progettuale, è figlio, prima di tutto, di uno spostamento nel panorama culturale che trova nei nuovi strumenti un'occasione di sperimentazione formale[276]. Che sia solo questo o molto altro, non si può negare che il Guggenheim sia indizio di una nuova cultura, una sorta di ritorno in grande stile della comunicazione come motore di una nuova fase dell'architettura, strutturalmente legata alla società dell'informazione[277].

[272] Si veda Si veda Venturi, R., Complexity and Contradiction in Archtitecture, Museum of Modern Art, New York, 1977 (ed. orig. 1966).

[273] Lynn, G., "Architecture Curvilinearity: the Folded, the Pliant and the Supple", in Carpo, M. (a cura di), *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*, John Wiley and Sons Publication, Chichester, 2013, pp. 29-30 (ed. orig. 1993).

[274] *Ivi*, pag. 30. L'autore cita anche Deleuze che definisce la "*smoothness*" come variazione continua e un continuo sviluppo della forma (Deleuze, G., *A Thousand Plateaus: Capitalism and Schizophrenia*, University of Minnesota Press, Minneapolis, 1987).

[275] *Ivi*, pag. 32.

[276] Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", *op. cit.*, 2006, pp. 232-235. Si veda anche Jencks, C., "Landform Architecture: Emergent in the Nineties", in Carpo, M. (a cura di), *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*, John Wiley and Sons Publication, Chichester, 2013, pp. 88-107 (ed. orig. 1997).

[277] Saggio, A., *The IT Revolution in Architecture…*, *op. cit.*, 2007, pag. 30.

Il design digitale, quindi, non è solo il risultato dell'introduzione dei nuovi strumenti, quanto piuttosto il punto di arrivo di un'evoluzione del pensiero che parte quantomeno dal *post-modern*. Appurato che il *digital design* ha, a tutti gli effetti, la dignità di una corrente architettonica vera e propria, ne vanno esaminati gli aspetti fondamentali in virtù sia dei diversi approcci progettuali utilizzati, sia della profondità dell'assimilazione degli strumenti digitali nel *design process*. A tal proposito, Oxman individua cinque classi[278] paradigmatiche dei modelli di design digitale[279].

La prima è rappresentata dai modelli CAD: mentre la prima generazione dei sistemi CAD era solo di tipo descrittivo, non difforme quindi dai modelli *paper-based*, oggi la modellizzazione descrittiva sta gradualmente entrando nella logica materiale del processo produttivo, diventando generativo-valutativa e predittiva.

Ai modelli CAD seguono i cosiddetti modelli di formazione digitale, in cui i mezzi di rappresentazione, sfruttando processi *emergence-based*, diventando ambienti abilitanti. L'impiego, ad esempio, di tecniche come lo *scripting* consente al designer di operare e interagire all'interno di logiche generative non deterministiche, confrontandosi con la rappresentazione implicita di diverse forme, piuttosto che con quella esplicita di una forma particolare. Sebbene ci sia un elevato contenuto tecnologico, l'enfasi è qui ancora focalizzata sulle qualità geometriche e formali del progetto. I modelli di formazione digitale sono classificabili in sotto-categorie: modelli di formazione topologica, in cui le coordinate statiche delle forme dei mezzi digitali tradizionali sono sostituite da costrutti computazionali dinamici; modelli di formazione associativa, basati sul design parametrico, ovvero su relazioni esplicite tra gli oggetti le cui variazioni, una volta generate, possono facilmente essere trasformate e manipolate; modelli di formazione *motion-based*, dove il design diventa interattivo, dinamico e responsivo[280].

Un esempio interessante di formazione topologica finalizzato all'esplorazione formale e geometrica è il Serpentine Gallery Pavilion del 2002, progettato da Toyo Ito assieme a Cecil Balmond di ARUP. L'obiettivo era realizzare un padiglione in cui una serie di intersezioni casuali frammentassero un cubo. Il problema, quindi, divenne quello di individuare – o meglio di esplicitare – una regola di generazione del "caos", ovvero un processo di razionalizzazione della geometria, della struttura e della costruzione. L'analisi è stata condotta per tentativi, escludendo le soluzioni non ritenute compatibili con gli obiettivi di progetto. Infine, la struttura risulta concepita come una serie di pannelli che si supportano e si stabilizzano reciprocamente, utilizzando sempre lo stesso tipo di connessioni. In questo caso la complessità è ottenuta da una ripetizione ricorsiva di una semplice regola da cui nascono forma e struttura, consentendo un'esplorazione che tenesse conto, però, anche dei requisiti costruttivi[281].

[278] Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", *op. cit.*, 2006, pp. 245-260.

[279] Nicholas Negroponte individua tre modi in cui le "*machine*" possono entrare nel processo progettuale: automazione delle procedure correntemente adoperate; modificazione dei metodi esistenti per un loro adeguamento alle specifiche dei nuovi *tool*; il processo, considerato evolutivo, viene inserito all'interno di un meccanismo e, mediante un apprendimento biunivoco, cresce e si sviluppa. Cfr. Si veda, Negroponte, N., "Towards a Humanism Through Machines", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 78-85 (ed. orig. 1969).

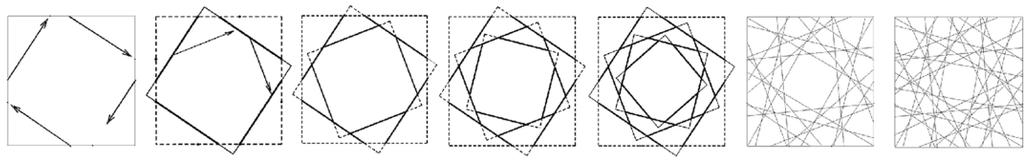
[280] Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", *op. cit.*, 2006, pp. 251-254.

[281] Toyo Ito&Associates e Balmond, C., "Geometric Algorithm. Serpentine Gallery Pavilion 2002", in Sakamoto, T. e Ferré, A. (a cura di), *From Control to Design. Parametric/Algorithmic Architecture*, Actar-D, Barcellona, 2012, pp. 36-43.

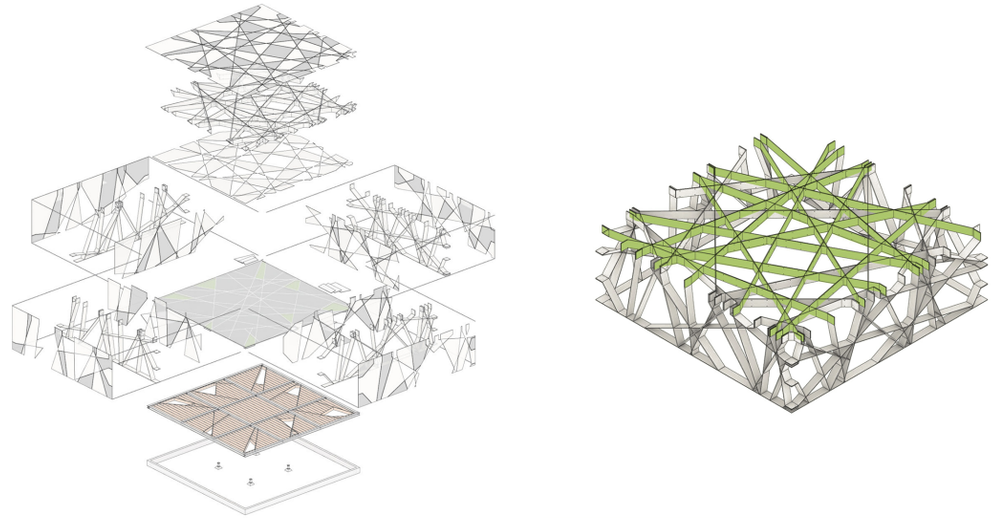
SERPENTINE PAVILION

TOYO ITO
CECIL BALMOND

LONDRA
2002



Configurazione geometrica: il pattern apparentemente irregolare è basato su rotazioni e scaling di una serie di quadrati inscritti gli uni negli altri, tratta da Toyo Ito&Associates e Balmond, C., "Geometric Algorithm. Serpentine Gallery Pavilion 2002", in Sakamoto, T. e Ferré, A. (a cura di), *From Control to Design. Parametric/Algorithmic Architecture*, Actar-D, Barcellona, 2012, pp. 36-43.



Esploso assonometrico e sistema costruttivo. Immagini di C. M. Jordan, J. Faust, J. Jiang e Felipe Oropeza, tratte da http://chasemitchelljordan.com/structural-analysis-toyo-itos-serpentine-pavilion.



Foto di Sylvain Deleu

Successivamente, vi sono i modelli generativi che, a differenza di quelli di formazione dove il controllo geometrico e topologico delle varianti di generazione formale avviene all'interno di condizioni prestabilite, sono caratterizzati da meccanismi computazionali avanzati: il designer interagisce non con la forma, ma con le regole, le relazioni e i principi – gli algoritmi – che la determinano. Nella definizione di Menges e Ahlquist l'algoritmo è «*a set of procedures consisting of a finite number of rules which define a succession of operations for the solution of a given problem. In this way, an algorithm is a finite sequence of explicit, elementary instructions described in an exact yet general manner*»[282].

Attualmente è possibile individuare due approcci al design generativo, ovvero la grammatica delle forme e i modelli evolutivi. La prima è costituita da espressioni matematiche che guidano i processi di generazione mediante regole di trasformazione, mentre i secondi fanno affidamento alla stesura di "codici genetici". Nei cosiddetti algoritmi genetici o generativi, la valutazione della forma è quindi basata sulle regole che ne definiscono il codice genetico.

L'approccio evolutivo è particolarmente significativo in quanto è *open-ended*, ovvero fornisce una moltitudine di soluzioni, dette popolazione, che però, escludono i precedenti storici registrati dal linguaggio formale. Ciò implica che la computazione evolutiva, piuttosto che rinforzare la conoscenza già accumulata mediante variazioni o ricombinazioni, tende a fornire esplorazioni completamente nuove, causando un superamento del concetto tradizionale di tipo architettonico[283]. Per chiarire meglio, si consideri un oggetto architettonico con tutte le sue possibili configurazioni formali, dipendenti dal materiale o da vincoli fisici, costruttivi, produttivi etc. etc. Il totale delle configurazioni descrive l'insieme di tutti le possibili trasformazioni dell'oggetto. La differenza tra tipo e popolazione sta nel fatto che mentre, nel primo caso, l'insieme è definito in base a un principio d'identità storicamente immutato dell'oggetto, nel secondo sono le configurazioni possibili – i *range* di variabilità – ottenute dalla popolazione a consentirci di riconoscere l'oggetto come appartenente all'insieme di partenza. Ne consegue che l'oggetto architettonico è definito attraverso il suo processo morfogenetico e da un principio di molteplicità piuttosto che da uno d'identità[284].

È bene chiarire, a questo punto, che progettazione parametrica e algoritmica, appartenenti rispettivamente ai modelli di formazione e a quelli generativi, sebbene frequentemente utilizzate come sinonimi, rappresentano in realtà due livelli di pervasività delle tecnologie computazionali nel *digital design*[285].

Nel livello parametrico le «connessioni relazionali tra elementi variano in uno specchio di *output* definito da un dominio di *input*»[286], mentre in quello algoritmico «le relazioni tra *input* e *output* si legano alle caratteristiche della modalità d'impiego e della descrizione formale»[287] della funzione che li associa. In sostanza, l'approccio algoritmico, in quanto evolutivo, è basato su un ordine sistemico capace di differenziare i risultati ed è dotato di tecniche auto-organizzative.

In ogni caso, il fine di questo tipo di progettazione, «non è quello di trovare la forma migliore o l'unica soluzione per un dato problema progettuale, ma quello di generare variazioni e configurazioni fornendo al progettista un quadro di possibilità»[288].

Infine, i modelli performativi sono, in realtà, tanto una branca di quelli di formazione che di quelli generativi, guidati però dalla ricerca di una *performance* desiderata. Nel *performance-based formation design* alcune forze esterne sono applicate per guidare un processo di formazione sulla base di classi complesse di requisiti prestazionali. Nel *performance-based generative design* i processi generativi sono governati ancora dalla *performance* desiderate, con la differenza che tra le forze applicate è compresa anche l'informazione. Ad esempio, i dati provenienti da una simulazione ambientale integrata al processo di progettazione può far sì che la forma sia frutto dalla minimizzazione di un particolare fattore climatico.

Un esempio di *performance-based generative design* è rappresentato dalle sperimentazioni condotte all'ETH di Zurigo per la realizzazione di una lastra in calcestruzzo ottimizzata dal punto di vista strutturale (si veda immagine a pag. 155): l'utilizzo del *binder jetting* – una tecnica di *additive manifacturing* che consiste nel depositare selettivamente un legante allo stato liquido su un letto di materiale polveroso – ha infatti consentito di superare i vincoli imposti dalla produzione convenzionale in calcestruzzo, concentrandosi così solo sulla massimizzazione delle *performance* strutturali[289] e la minimizzazione del materiale impiegato, in un riuscito sodalizio tra progettazione computazionale e manifattura avanzata.

È doveroso, a questo punto, fare una considerazione sulla trasformazione del processo progettuale verso logiche computazionali, in quanto si è parlato di modalità di generazione, configurazione ed evoluzione formale e di "codici genetici", ma non si è specificato come tali modalità debbano essere implementate all'interno dei sistemi digitali. In poche parole, se anziché progettare edifici si progettano sistemi di "regole", quali sono i loro criteri di selezione e messa a punto?

Ancora una volta, sembrerebbe un problema banale se non si considerasse che l'applicazione di un approccio computazionale richiede un pensiero esplicito e l'esplicitazione delle "regole" che guidano un processo creativo non è né semplice né immediata, in quanto esso si consuma spesso in maniera "incerta", procedendo ciò per tentativi e inserendo continuamente nuovi fattori contestuali[290]. Si pensi, per iniziare, alle complesse implicazioni di un progetto architettonico che, come sappiamo, sono economiche, sociali, culturali e politiche e in tali contesti vanno accuratamente esaminate. Per tali motivi, la fase di problem setting risulta altrettanto articolata e di difficile gestione ed è pertanto necessario discretizzare secondo criteri gerarchici di rilevanza le problematiche introdotte. Ciò non toglie che, di solito, «uno

[282] Menges, A. e Ahlquist, S., "Introduction", *op. cit.*, 2011, pag. 11.
[283] *Ivi*, pag. 21.
[284] Si veda Trummer, P., "Associative Design. From Type to Population", in Menges, A. e Ahlquist, S. (a cura di), *Computational Design Thinking*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2011, pp. 181-182. Mayr scrive: «per il tipista, il tipo è reale e la variazione è un'illusione, mentre per il popolazionista il tipo è un'astrazione e solo la variazione è reale», cfr. Mayr, E., *Populations, Species and Evolution*, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, 1963, pag. 4.
[285] Chiesa, G., *Paradigmi, tecnologie ed ere digitali…*, *op. cit.*, 2015, pp. 14-15.
[286] *Ivi*, pag. 15.
[287] *Ibidem.*
[288] De Luca, F. "Diagramma and Script", in A. Saggio, *Architettura e Information Technology*, m.e. architectural book and review, Roma, 2011, pag. 82. L'autore fa riferimento alla progettazione parametrica, rientrante nella famiglia dei modelli di formazione.
[289] Si veda, Meibodi, L. *et alii*, "The smart takes from the strong. 3D printing stay-in-place formwork for concrete slab construction", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 210-217.
[290] Si veda Mitchell, W., "A New Agenda for Computer-Aided Design", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 90-91 (ed. orig. 1990).

schizzo progettuale è un incompleto, ambiguo e probabilmente inconsistente ritratto di un possibile artefatto. Ciò autorizza la formulazione di osservazioni contraddittorie da cui derivano contraddittorie interferenze critiche. Lo sviluppo del progetto è, in larga parte, una questione di identificazione e risoluzione di queste inconsistenze, da cui il frequente commento che afferma che un progetto alle fasi iniziali è solitamente "irrisolto"»[291]. L'indeterminatezza del pensiero critico e quella del processo creativo creano quindi un'incongruenza con il funzionamento dei sistemi di analisi digitale, che lavorano in framework di regole e codici uniformi. Al contrario, i primi sono non-uniformi, in quanto il sistema di regole su cui si basano è a sua volta mutevole.

In sostanza, anche negli approcci computazionali più avanzati è, se non impossibile, quantomeno poco realistico assumere che si possa stabilire a priori un set fisso di criteri o parametri o regole sulla base del quale "desumere" la forma o l'edificio corretto. Non c'è altra possibilità dunque, che stabilire strutture costitutivi instabili, regole provvisorie, fluide e mutevoli, in grado di adattarsi a una ragione critica che non è vincolata a un pensiero fisso. Sono questi i motivi per cui l'approccio evolutivo è così rivoluzionario, perché consente di assimilare all'interno del progetto fattori a esso esogeni ma per esso determinanti, adeguandosi alla variabilità e offrendo range di soluzioni senza pretendere di sostituirsi al giudizio critico del progettista, cui alla fine è dato scegliere l'opzione migliore. Il progetto si evolve assieme alle "regole" che lo determinano, consentendo una reale progettazione per sistemi aperti.

I nuovi architetti nativi digitali si trovano, quindi, a dar forma a paesaggi fatti di interconnessioni dinamiche, interrelazioni, mutazioni, geometrie topologiche: la formalizzazione matematica garantita dall'*information technology* conduce così alla nascita di strategie progettuali che, lentamente ma inesorabilmente, conducono a nuovi concetti di architettura. In questo contesto, l'IT entra direttamente «nelle fibre stesse dei nuovi edifici, prima progettandoli digitalmente e poi costruendoli tramite le nuove tecnologie di costruzione, ma soprattutto sfruttando le dinamiche interconnessioni elettroniche per creare ambienti che reagiscono alle variazioni in situazioni reali»[292].

In definitiva, volendo trarre delle conclusioni che siano valide per l'intero paragrafo, possiamo dire che le ripercussioni del digital turn sono riconducibili a quattro assi, ovvero la riduzione dei confini tra mondo reale e mondo virtuale, l'ibridazione tra natura e artificio, il passaggio dalla scarsità all'abbondanza di dati e informazioni e il passaggio dal primato dell'entità a quello dell'interazione[293].

Rispetto ai primi due assi, ovvero la relazione reale/virtuale – di cui si è parlato anche nel paragrafo 2.2 – e quella natura/artificio, potenziata mediante la diffusione di tecnologie in grado di interagire con il territorio circostante, se si pensa che il progetto è, per definizione, uno strumento di prefigurazione che agisce sull'ambiente mediante strumenti artificiali/virtuali, è facile comprendere come la digitalizzazione ne abbia enormemente accresciuto il potere di intervento che, tra le altre cose, non è nemmeno più mediato dal tempo lungo che intercorreva tra la progettazione e la sua reale concretizzazione.

[291] *Ivi*, pag. 91. Traduzione a cura dell'autrice.
[292] Saggio, A., *The IT Revolution in Architecture…*, *op. cit.*, 2007, pag. 47.
[293] Floridi, L., *The OnLife Manifesto*, Seminario, Centro Nexta su Internet&Società, Politecnico di Torino, DAUIN, Torino, 24 maggio 2013.



Lastra in calcestruzzo ottimizzata topologicamente, realizzata all'ETH di Zurigo. Dopo aver stampato mediante *binder jetting* la cassaforma in *sandstone*, questa è stata riempita con calcestruzzo ultra-performante fibrorinforzato. Immagine tratta da Meibodi, L. *et alii*, "The smart takes from the strong. 3D printing stay-in-place formwork for concrete slab construction", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 210-217.

Inoltre, la relazione natura/artificio, ricondotta alla scala della città, si manifesta in un paesaggio integrato, dove la presenza degli elementi naturali è enfatizzata da una loro "sensorizzazione", che li riconduce al mondo dell'informazione. La stessa consapevolezza ecologica si traduce spesso nella creazione di ambienti non solo intelligenti ma anche sensitivi, in maniera tale da poterne valutare e controllare le trasformazioni[294].

Ciò ci riporta al terzo asse, ovvero il passaggio dalla scarsità all'abbondanza di informazione. La progressiva espansione dei *big data*, del *cloud computing* e *manufacturing* determinano, a loro volta, almeno tre cambiamenti rispetto alle loro modalità di analisi: la possibilità di gestione di grandi quantità di dati consente di andare oltre la logica dell'analisi a campione, permettendo di lavorare sulla totalità di informazioni a disposizione; nonostante la presenza di tanti dati implichi necessariamente un aumento dell'errore, l'aggregazione di diverse letture fornirà comunque una visione più esauriente del problema; l'aumento delle correlazioni consente di scoprire nuove relazioni e quindi, di aumentare la conoscenza[295]. Proprio il passaggio al primato dell'interazione dimostra un definitivo abbandono delle visioni finite dell'object based, a favore altre interattive, più ampie e aperte[296].

Tuttavia, la questione dei *big data* è molto più complessa e deve, partire, necessariamente dall'individuazione del problema epistemologico che li concerne, erroneamente individuato proprio nella loro abbondanza. Da questo errore, ne viene fuori un altro: la soluzione al problema epistemologico è di fatti frettolosamente ritenuta di natura tecnologica[297].

Naturalmente non è così, in quanto la soluzione risiede nel possedere strutture di piccola scala per la comprensione dei dati, ovvero che indichino come reperire all'interno di questi enormi database pattern di informazioni dotate non solo di senso, ma anche di valore aggiunto rispetto alla conoscenza pregressa: «i big data sono destinati a crescere. L'unico modo per fronteggiare tale evento e sapere chi siamo e cosa stiamo cercando. Non si fa scienza semplicemente accumulando dati»[298].

È chiaro, dunque, che siamo di fronte alla rivoluzione mentale diagnosticata da Baricco che ha pervaso il nostro settore come tutti gli altri, andando ben oltre le innovazioni degli strumenti e risultando in un ribaltamento del pensiero progettuale: «*what confronts us is a new style rather than merely a new set of techniques*»[299]. D'altronde se l'architettura è specchio del sistema sociale, economico e culturale in cui è immersa, certamente non poteva essere altrimenti. Da quanto la società di massa caratterizzata da standard universali di consumo si è evoluta nella società eterogenea della moltitudine, segnata da una proliferazione di diversi stili di vita ed estensive differenziazioni lavorative, è compito dell'Architettura organizzare e articolare la crescente complessità della società post-fordista, adoperando, probabilmente, mezzi e processi tutti digitali.

[294] Saggio, A., *The IT Revolution in Architecture…*, *op. cit.*, 2007, pag. 42.
[295] Chiesa, G., *Paradigmi, tecnologie ed ere digitali…*, *op. cit.*, 2015, pp. 47-50.
[296] *Ivi*, pag. 50-51.
[297] Cfr. Floridi, L., *La quarta rivoluzione…*, *op. cit.*, 2017, pag. 15 .
[298] *Ivi*, pag. 17.
[299] Si veda Schumacher, P., "A New Global Style", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pag. 243 (ed. orig. 2009).



1997
GUGGENHEIM MUSEUM
Frank Gehry

1998
CENTER OF BITS AND ATOMS
Neil Gershenfeld

2000



2002
SERPENTINE PAVILION
Toyo Ito e Cecil Balmond

2002
GREAT COURT BRITISH MUSEUM
Foster&Partners e Buro Happol Engineering



2004
ELEMENTAL
Alejandro Aravena





2006
KAKAMIGAHARA CREMATORIUM
Toyo Ito



2008
NATIONAL STADIUM BEIJING
Herzog&de Meuron e ARUP

2010

2010
FAB LAB HOUSE
IAAC





2017
ELPPHILARMONIE
Herzoug&de Meuron

2014
PATHE' FOUNDATION
Renzo Piano





2017
PODIUM
Zaha Hadid Architects e ARUP

DEMOCRATIZZAZIONE DELLA PRODUZIONE / PENSIERO COMPUTAZIONALE

DE-STANDARDIZZAZIONE / MASS CUSTOMIZATION

III/IV RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

03

Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete per l’architettura

«*Ce qu'est le béton, les formes révolutionnaires qu'il exige*»

Le Corbusier a Charles L'Eplattenier, 22 novembre 1908

Protagonista del XX secolo, fautore di alle volte discutibili sperimentazioni progettuali, materiale tra i più usati al mondo, il calcestruzzo continua inesorabile la sua evoluzione rimanendo, però, «flagellato da un pregiudizio»[1]: nonostante sia il simbolo del Moderno e il materiale plastico per eccellenza, ha subito le conseguenze del suo basso costo e della sua adattabilità invadendo, complice della prefabbricazione pesante, molte delle periferie del mondo[2].

A dispetto della sua cattiva reputazione, il calcestruzzo acquista oggi l'appellativo di materiale innovativo, diventando *high*, ultra, fibro-rinforzato, additivato, trasparente, leggero, sottile, sostenibile: «*widely pronounced dead, concrete has, however, not only been resuscitated, but has also entered a new astonishingly vital cycle*»[3].

Si è aperta, quindi, una nuova stagione dove il calcestruzzo tradizionale lascia il posto agli Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete che, oltre a vivere le contraddizioni di ciò che li ha preceduti, devono fare i conti con un panorama industriale a sua volta travolto da rapidi cambiamenti tecnologici.

A partire da questo capitolo, oltre a raccontare la storia degli ultra-performanti attraverso ricercatori, aziende e progettisti che ne hanno consentito l'affermazione, saranno affrontati gli effetti della Quarta Rivoluzione Industriale sul settore dei calcestruzzi, i problemi derivanti dalla gestione della complessità dei materiali avanzati con particolare attenzione alla questione della conoscenza arrivando a delineare, infine, le prospettive di applicazione dell'UHPFRC all'interno del mercanto italiano delle costruzioni.

[1] Andriani, C., "Introduzione", in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futuro*, Skira Editore, Milano, 2016, pag. 15.
[2] A tal proposito, Jean-Louis Cohen e Martin Moeller scrivono: «*the prominent role of this material in the sphere of modernization has all too often led to a general association of concrete with the brutality of many urban renewal schemes and the monotony of contemporary suburban developments. Despite the considerable amount of ingenuity spent in trying to "animate" its surface, concrete is widely perceived as dull and repetitive*» (Cohen, J. e Moeller, M., "Introduction", in Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete*, Birkhäuser – Publisher for Architecture, Basel-Berlin-Boston, 2006, pag. 6).
[3] *Ibidem.*



Passerella pedonale in Ductal® realizzati da Bonna Sabla.
Progetto di Rudy Ricciotti, *Pont du Diable*, Gignac, 2005. Immagine da https://www.flickr.com/photos/bricer/7846190458, foto di Brice R.

3.1 UHPFRC TRA INNOVAZIONE, TECNICA E PROGETTO

Quando, negli anni Settanta, un gruppo di ricerca scandinavo capitanato dal professor Hanse H. Bache dimostrò che la resistenza a compressione del calcestruzzo dipende non solo dalla qualità, quantità ed efficienza delle componenti, ma anche dal grado di compattezza e porosità della matrice cementizia[4], nessuno si immaginava che sarebbe iniziata una nuova era dei calcestruzzi, che avrebbe rivoluzionato «il pensiero tecnico come il motore a reazione quello a elica»[5].

Inizia così un percorso di ricerca e progettuale che avrebbe condotto alla formulazione degli Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC), definiti dall'Associazione Francese del Genio Civile (AFGC)[6] come materiali compositi a matrice cementizia con resistenza caratteristica a compressione compresa tra 150 e i 250 MPa e resistenza a trazione fino a 7 MPa. Composti da Portland a basso contenuto di alcali, fumo di silice, polvere di quarzo, sabbia fine, fibre, acqua e super-fluidificante, si caratterizzato per un controllo delle proprietà alla scala nanometrica, sfruttando sia la forma che la granulometria delle particelle. Gli UHPFRC si caratterizzano per un'elevata densità che gli attribusce elevate performance strutturali e di durabilità.

Nati nel laboratorio di Ricerca & Sviluppo della Aalborg Porland[7], poi perfezionati dal Lafarge[8]

[4] Bache, H.H., "Densified cement/ultra-fine particle based materials", in *Second International Conference on Superplasticizers in Concrete*. Ottawa, 10-12 giugno 1981, pp. 1-35.
[5] Ricciotti, R., *L'architecture est un sport de combat*, Textuel, Paris, 2013. Traduzione italiana a cura dell'autrice.
[6] L'Associazione Francese del Genio Civile ha pubblicato le prime linee guida per la progettazione con UHPFRC nel 2002, poi aggiornate nel 2013. La Francia è stata uno dei primi paesi a fornire un apparato normativo dettagliato a supporto della progettazione con ultra-performanti. Il testo aggiornato è SETRA-AFGC, *Interim recommendations for ultra high performance fiber-reinforced concrete, Association Française du Génil Civil* (AFGC), 2013.
[7] L'azienda danese, fondata nel 1889 da Hans Holm, Frederik Læssøe Smidth, Poul Larsen e Alexander Foss con il nome di Aktieselskabet Aalborg Portland-Cement-Fabrik, entra nel 2004 nel Cementir Group, multinazionale nata nel 1947 in seno al Gruppo Caltagirone e specializzata nella produzione e distribuzione di cemento bianco e grigio, calcestruzzo, inerti e manufatti. Oggi, l'Aalborg Portland Holding Group ha sedi in Danimarca, Belgio, Egitto, Malesia, Cina, Turchia e Stati Uniti. Cfr. Aalborg Portland, *History*, https://www.aalborgportlandholding.com/history/; CementirHolding, http://www.cementirholding.it/.
[8] LafargeHolcim LTD è un'azienda multinazionale nata dalla fusione della francese Lafarge (quotata alla borsa di Parigi già nel 1923) e dalla svizzera Holcim nel 2015. Opera nel settore dei materiali da costruzione, producendo principalmente cementi, clinker e granulati in 270 fabbriche sparse per il mondo (75.000 impiegati in 80 paesi). Si veda LafargeHolcim, https://www.lafargeholcim.com/.

Research Centre, in partnership con Rhodia[9] e Bouygues[10], gli UHPFRC sembrano ricalcare alla perfezione la definizione di innovazione di prodotto[11].

In realtà, non mancano di una serie di contraddizioni a partire dal fatto che mentre il prodotto in sé, ovvero quello che lascia in *big-bag* da una tonnellata le *bulk industries* sparse per il mondo, è un'innovazione qualitativamente *disruptive* – dato il forte impatto economico avuto nel settore di riferimento – e quantitativamente radicale – in quanto sta sostituendo il calcestruzzo in diverse applicazioni[12] –, le componenti prefabbricate e le applicazioni in opera hanno subito sì un processo di innovazione delle tecniche produttive ma, nella maggior parte dei casi, solo incrementale di tipo funzionale, non differente da quanto accaduto a metodologie e processi usati per il calcestruzzo convenzionale. In pratica, a un'innovazione del materiale non è corrisposta una significativa innovazione delle sue tecniche di produzione.

Raramente, infatti, è possibile trovare un oggetto – quasi sempre complementi d'arredo – stampato in 3D o un pannello realizzato con la tecnica dello *shotcrete*[13] – il calcestruzzo ultra-performante viene spruzzato su un supporto con la stessa forma dell'elemento che si deve realizzare – ma si tratta di casi isolati che, per essere identificati come innovazioni vere e proprie, mancano ancora di una compiuta realizzazione in ambito economico. Tuttavia, se durante il getto il rapporto con l'innovazione è parzializzato, questa emerge nelle lavorazioni antecedenti a esso, dove l'atteggiamento generalmente empirico che caratterizzava l'industria del calcestruzzo deve essere sostituito da un controllo preciso delle quantità di materiale impiegato, della reologia, del rapporto acqua/cemento, della lavorabilità.

Situazione altrettanto complessa si trova nel caso dell'innovazione nel settore del marketing e in quello organizzativo, a causa della relazione peculiare tra produttori e prefabbricatori, essendo i secondi clienti dei primi, in un classico schema *business to business*. Le industrie di produzione svolgono infatti per tutta la durata del contratto attività di consulenza e controllo della qualità, offrendo un pacchetto comprensivo di aspetti intangibili – un vero e proprio prodotto-servizio – e applicando una politica innovativa di gestione della relazione con il cliente, facendo sì che i prefabbricatori, dal canto loro, assumano il ruolo di *lead-user* e, tramite processi di *open innovation*, forniscano alla casa madre informazioni e *feed-back* rispetto al comportamento del materiale in termini di lavorabilità, usabilità, *performance* meccaniche e di durabilità.

[9] Rhodia, fondata nel 1998, era un gruppo specializzato nella produzione di prodotti chimici, fibre sintetiche e polimeri, acquistata nel 2011 dalla belga Solvay. L'azieda aveva 65 centri di produzione in tutto il mondo e 4 centri di ricerca. Wikipedia, *Rhodia* (company), https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodia_(company).

[10] Fondato da Francis Bouygues nel 1952 e quotato in borsa dal 1970, il Gruppo è specializzato in edilizia, attraverso Colas Group – nato in seguito all'acquisizione negli anni Ottanta delle società di costruzione stradale Screg, Sacer and Colas – e Bouygues Construction, in sviluppo immobiliare (Bouygues Immobilier), in *media* (TF1 Group, acquisito nel 1996), e in telecomunicazioni (Bouygues Telecom, lanciato nel 1996). Nel 2017 aveva oltre 115.530 dipendenti in 90 paesi, con un fatturato di €32,9 miliardi di euro. Wikipedia, *Bouygues*, https://it.wikipedia.org/wiki/Bouygues; Bouygyes Group, https://www.bouygues.com/en/

[11] Si veda il paragrafo 1.3.

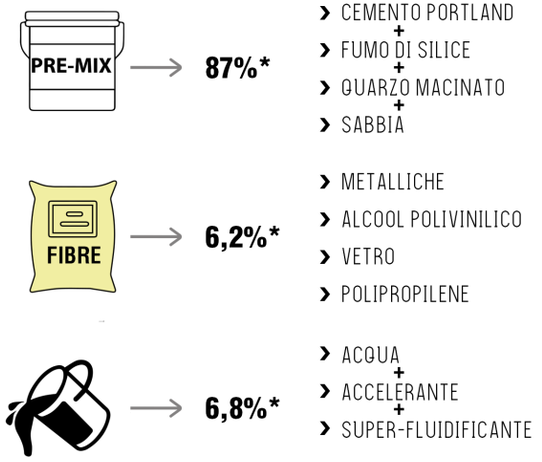
[12] Si fa riferimento al caso della Federal Highway Administration, ente pubblico che si occupa della manutenzione e gestione dell'intero sistema dell'infrastrutture viarie degli Stati Uniti, che ormai dal 2002 utilizza solo UHPFRC per la riqualificazione di ponti autostradali.

[13] La tecnica sarà approfondita nei prossimi paragrafi. In questo caso si fa riferimento allo *shotcrete* per la prefabbricazione, in quanto nei casi di applicazione in opera è piuttosto diffuso.

UHPFRC

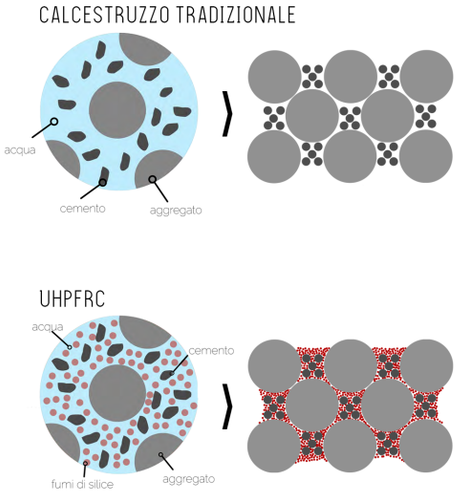
Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete

01_COMPOSITION

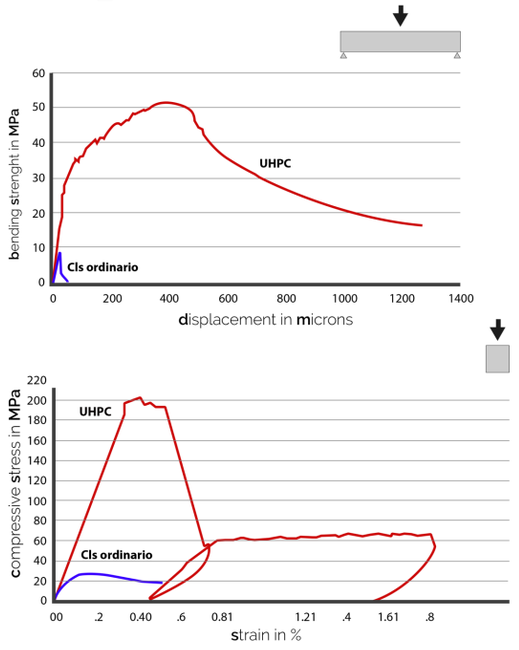


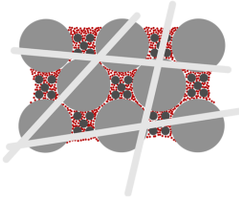
*percentuale in 1 mc

02_PACKING

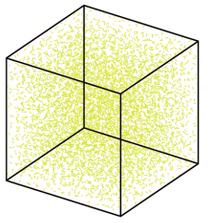


03_STRUCTURAL BEHAVIOUR





La presenza delle fibre conferisce dutttilità al composito



Disposizione delle fibre in un mc di UHPFRC

Rielaborazione di immagini tratte da Nocerino, G., *Tecnologie digitali e Advanced Materials. Design computazionale di schermature solari in calcestruzzi ultra-performanti*, Tesi di Laurea, Unina DiArc, Napoli, 2018.

La collaborazione reciproca tra produttori e prefabbricatori pone, di conseguenza, la parola fine ai vecchi "monopoli di conoscenza" dei laboratori di R&S delle grandi imprese che, anzi, traggono dalle PMI una serie di innovazioni *soft*[14], ovvero non-tecnologiche in senso stretto, ma derivanti sia da miglioramenti di tipo estetico o funzionale, come, ad esempio, diversificazione e personalizzazione delle finiture oppure ottimizzazione della forma in virtù delle caratteristiche di produzione, sia dall'assimilazione del prodotto nella cultura del costruire[15].

Ben si comprende, quindi, la rinnovata importanza delle PMI in particolare e dell'imprenditorialità in generale nel mercato contemporaneo, dimostrando come sia ormai completo il passaggio dall'"economia controllata" all'"economia imprenditoriale"[16]. Infatti, mentre agli inizi del XX secolo – in regime schumpeteriano di tipo I[17] – l'imprenditore era visto come l'innovatore per eccellenza, colui in grado di introdurre nuove attività produttive dal nulla, a cavallo della Seconda Guerra Mondiale, Schumpeter rivede la propria visione rilevando il ruolo predominante delle grandi imprese – regime schumpeteriano di tipo II[18] –, le uniche dotate del potere economico per investire in innovazione. Solo alla fine degli anni '70, con il cambiamento dei consumi e l'abbandono definitivo della vecchia produzione industrializzata, il ruolo delle piccole e medie imprese nell'innovazione diventa rilevante, in quanto – brevemente – la maggiore flessibilità richiesta alla linea produttiva, il sempre più facile accesso alla conoscenza nonché la presenza sul mercato globale consentita dalla Rete, consentono alle PMI di competere ad armi pari con le grandi aziende.

Tuttavia, l'innovazione non proviene, com'è ovvio, solo dai prefabbricatori in quanto anche quest'ultimi traggono molti vantaggi dalla relazione con i clienti che, in questo particolare settore, sono quasi sempre designer o architetti. Per questa ragione, anche all'interno di modelli *business to consumer*, si compie in realtà una relazione *business to business*. Ne vengono fuori esempi di *collaborative design* che si traducono nella nascita all'interno delle aziende di uffici di progettazione che, in alcuni casi, instaurano un rapporto di crescita bidirezionale con gli studi di architettura, capaci di stimolare innovazioni processuali e di prodotto. Altre volte, purtroppo, alle aziende viene delegata non solo l'ingegnerizzazione del prodotto, ma anche una vera e propria riprogettazione del prodotto stesso, altrimenti estraneo ai vincoli imposti dalla produzione.

[14] Si veda Stoneman, P., *Soft Innovation. Economics, Product Aesthetics, and the Creative Industries*, Oxford University Press, Oxford, 2010. L'autore qui attribuisce al termine *soft* un significato diverso rispetto a quello convenzionalmente attribuitogli, ovvero un'innovazione di processo sul versante della gestione e dell'organizzazione della produzione, in contrapposizione a quella *hard*, relativa cioè alla realizzazione fisica del prodotto.

[15] Le innovazioni *soft* così descritte sono state definite nel paragrafo 1.3 come innovazioni di design che possono essere, infatti, estetiche, tipologiche, funzionali, d'uso e di senso.

[16] Si veda Casoni, G. e Fanzini, D., *I luoghi dell'innovazione…*, *op.cit.*, 2011, pp. 71-77. Gli autori fanno riferimento a Audretsch, D. e Thurik, R, "The Model of the Entrepreneurial Economy", in *International Journal of Entrepreneurship Education*, vol. 2, pp. 143-166; Thurik, R, "Entreprenomics: Entrepreneurship, Economic Growth, and Policy", in Acs, Z. *et alii* (a cura di), *Entrepreneurship, Growth, and Public Policy*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009, pp. 219-249.

[17] Detto anche Mark I. Si veda Nelson, R.R e Winter, S.G., *An Evolutionary Theory …*, *op. cit.*, 1982, Kamien, M. e Schwartz, N., *Market Structure and Innovation*, *op. cit.*, 1982, e il paragrafo 1.1.

[18] Detto anche Mark II. Si veda Schumpeter, J.A., *Capitalism, Socialism and Democracy,* Harper and Row, New York, 1975 e il paragrafo 1.1.

Nella migliore e più rara delle ipotesi, si trova nelle aziende una sensibilità tale da garantire un potenziamento dell'elemento da realizzare, arricchito da una ricerca della perfezione del dettaglio spesso pretesa, dati anche i costi non irrisori, dal cliente a monte del processo e indispensabile nei casi in cui la posizione di vantaggio competitivo della firma, come sempre più spesso accade, si basi sul mantenimento del marchio di qualità del *brand*, soprattutto per le aziende che fanno del *Made in Italy* la propria bandiera.

La distanza che alle volte separa la progettazione dai processi produttivi in UHPFRC ha, tuttavia, radici molto più profonde. I calcestruzzi ultra-performanti si trovano, infatti, in una condizione singolare, ambivalente. Senza dubbio rientranti nel panorama dei materiali avanzati, grazie all'utilizzo nel *mix-design* di materiali ottimizzati alla scala nanometrica responsabili dell'elevata densità e resistenza, nell'immaginario collettivo vengono ancora assimilati ai calcestruzzi convenzionali, sia nelle modalità produttive che nell'espressione morfologica ed estetica.

Rispetto alle modalità produttive, come già accennato, esse conservano una forte continuità con il passato, che si manifesta tutta nella permanenza dello stampo che, seppur innovandosi nella tecnologia, rimane l'emblema di una tecnica che rimane sostanzialmente uguale a se stessa. È sì vero che la fabbricazione digitale abbatte i limiti della sua costruzione attraverso macchine a controllo numerico, stampanti 3D e quant'altro, ma è altrettanto vero che la realizzazione dello stampo è una questione che rimane tutta artigianale, indubbiamente evolutasi, ma nei mezzi più che nelle logiche. Ciononostante, sono notevoli gli impatti sulla concezione di un materiale che inizia a liberarsi del suo "contenitore", guadagnando in gradi di libertà formale e strutturale.

Tuttavia, come fa notare Stefano Micelli, «rimane da capire in che modo le tecnologie della manifattura digitale spingono verso un nuovo dialogo fra artigiano e design. È lecito domandarsi, in altre parole, in che modo il design potrà farsi carico di valorizzare il potenziale di flessibilità offerto dalle nuove tecnologie attribuendo all'artigiano un ruolo chiave nella manifattura di qualità»[19].

Va detto che la capacità plastica dell'UHPFRC si presta bene anche all'applicazione di tecnologie quali il *concrete printing* – ovvero la stampa di *layer* sovrapposti di calcestruzzo – in cui proprio la possibilità di produrre forme più complesse rispetto a quelle ottenibili con i tradizionali processi di colatura, apre a esplorazioni concernenti non necessariamente solo l'aspetto formale del progetto. Infatti, il *concrete printing*, consentendo la reificazione e la materializzazione dei modelli digitali, riduce la distanza tra prodotto e prototipo e quella tra progettazione e costruzione, ampliando i confini del design fino ad abbracciare intere famiglie di oggetti, sistemi progettuali o processi produttivi[20].

Altrettanto articolata e contraddittoria è la relazione con gli aspetti morfologici ed estetici in quanto, l'UHPFRC eredita dal calcestruzzo molte delle sue contraddizioni, *in primis* quella derivante dalla sua plasticità, che gli consente di riprodurre forme e aspetto solitamente associate ad altri materiali.

[19] Micelli, S., *Fare è innovare…*, *op. cit.*, 2016, pag. 87.

[20] Antonelli, P., "States of Design 03: Thinkering", in *DOMUS*, vol. 948, 2011.

Infatti, come fa notare Adrian Forty[21], mentre all'inizio della sua storia il calcestruzzo era considerato un materiale senza un linguaggio, alla fine del Novecento sembra averne fin troppi: «siamo costretti ad ammettere che il calcestruzzo armato, dopo tutto, non ha un'estetica? Se ciò vi sembra poco corretto, potrebbe essere solo perché siamo oramai abituati ad aspettarci che ogni materiale debba avere una sua forma specifica»[22].

La ricerca della forma "giusta" ha interessato passato e presente di questo materiale: basti ricordare che mentre August Perret sosteneva che l'architettura in calcestruzzo dovesse consistere in articolate strutture trabeate, fatte di travi e pilastri, l'ingegnere americano Francis S. Onderdonk[23] riteneva che la forma emblematica del calcestruzzo fosse l'arco. Tuttavia, quando a partire dagli anni '30 fecero la loro comparsa le *shell structure*, si iniziò a credere che queste fossero la chiave per il massimo sfruttamento delle potenzialità del calcestruzzo. Risulta particolarmente significativo evidenziare che, praticamente nello stesso periodo, Le Corbusier costruiva in *béton brut*[24], che con la sua ridondanza materica costituiva una variazione estetica opposta alla chiarezza costruttiva delle *shell*[25]. Sulla scia delle sperimentazioni di Le Corbusier con il calcestruzzo faccia-vista, si inserisce Louis I. Kahn che aveva esplorato le possibilità espressive del materiale tenendolo a vista nel progetto per la Yale Art Gallery del 1953, anche in contrasto con l'utilizzo già molto industriale che se ne faceva all'epoca, in piena ricostruzione post-bellica. Pochi anni dopo, anche Eero Sarineen sperimenta con il calcestruzzo a vista, realizzando, sempre a Yale, due edifici – i *college* Ezra Stiles e Morse – ispirati alla tradizione medievale italiana, con pareti realizzate in conci irregolari in pietra affondati in un getto di calcestruzzo. Un'interpretazione molto diversa da quella di Kahn, ma altrettanto valida[26].

L'interesse per la superficie del calcestruzzo diventerà predominante negli anni, sino a diventare il luogo di molteplici sperimentazioni arrivando infine, a un ampliamento del rapporto contraddittorio che già aveva con la forma: man mano che il calcestruzzo aumenta il suo contenuto tecnologico diventando ultra-performante e acquisendo la capacità di riprodurre qualsiasi finitura, qualsiasi colore, qualsiasi dettaglio, non solo gli si richiede di somigliare tanto nella granulometria che nella tattilità al calcestruzzo tradizionale o, addirittura, a materiali più nobili come il marmo, ma anche di apparire irregolare, "fatto a mano", *brut*.

[21] Forty, A., "The Material without a History", in Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete, Birkhäuser – Publisher for Architecture*, Basel-Berlin-Boston, 2006, pp. 34-45.
[22] *Ivi*, pag. 34. Traduzione a cura dell'autrice.
[23] Si veda Onderdonk, F., *The Ferro-concrete Style: Reinforced Concrete In Modern Architecture, With Four Hundred Illustrations Of European And American Ferro-concrete Design*, Hennessey & Ingalls, Los Angeles, 1998 (ed. orig. 1928).
[24] Il dibattito post-bellico sul calcestruzzo faccia-vista è originato da due opere di Le Corbusier: le Unité d'habitation di Marsiglia del 1952 e il Monastero di Sainte Marie-de-la-Tourette, presso Lione, del 1960. In entrambi i casi, Le Corbusier decide di lasciare impresso sul calcestruzzo il disegno delle casseforme, tuttavia a Marsiglia, complici anche operai non troppo avvezzi all'utilizzo del materiale, l'impatto è più grezzo – béton brut appunto –, con una chiara lettura del lavoro umano, mentre nel Monastero, utilizzando la tecnica del béton banché, ovvero un tipo di casseforme scorrevoli, l'effetto è più industriale, meno rustico. Si veda Legault, R., "The Semantincs of Exposed Concrete", in Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete, Birkhäuser – Publisher for Architecture*, Basel-Berlin-Boston, 2006, pag. 47; Cohen, J., *Le Corbusier. Tout l'oeuvre construit*, trad. fr. Hubert, C., Flammarion, Parigi, 2018 (ed. orig. *Le Corbusier. The built work*, The Monacelli Press, New York, 2018).
[25] Forty, A., "The Material without a History", *op. cit.*, 2006, pag. 35.
[26] Legault, R., "The Semantincs of Exposed Concrete", *op. cit.*, 2006, pag. 48.



Louis I. Kahn, *Yale University Art Gallery*, New Haven, 1953. Foto di Elizabeth Felicella.

Ricordando, con le parole di Manzini, che il nostro rapporto «con gli oggetti è sempre e solo un rapporto con delle superfici»[27], risulta evidente come l'alterazione superficiale così prodotta nel caso di materiali che di per sé non hanno una chiara riconoscibilità, crea un livello di incertezza ulteriore, soprattutto quando si utilizzano processi mimetici anziché reinterpretativi.

Sin da subito, dunque, l'incertezza ha dominato tanto l'estetica che la morfologia del calcestruzzo, lasciando i progettisti nell'illusione di averne trovato ogni volta definitivamente, la forma "giusta" e l'aspetto "naturale"[28].

A ben vedere, le opere più interessanti realizzate in calcestruzzo sono quelle che ne riconoscono la natura ambigua che, soprattutto in un contesto fatto di materiali – calcestruzzi – modificabili alla scala molecolare, rende se non superfluo quantomeno controproducente fare un appello a una sua fantomatica purezza, tanto formale quanto superficiale. È invece necessario rimarcare come sia proprio la mutevolezza insita nel calcestruzzo, "pietra liquida"[29] del Novecento, l'unico vero elemento di continuità con la tradizione. Infatti, il calcestruzzo, ormai diventato avanzato, «ci obbliga a riconsiderare cos'è che noi definiamo un materiale e cosa possiamo aspettarci da esso»[30]. Sebbene appaia un po' audace, come fa Forty, affermare che il calcestruzzo non sia un materiale, bensì un processo[31], si dirà piuttosto che è anche un processo e come tale va trattato: «il cemento è un brevetto, è materia in continuo divenire. […] Non è semplice materiale da costruzione: è piuttosto costruzione esso stesso»[32]. Non è un caso che il calcestruzzo sia sempre stato commercializzato come un sistema costruttivo – una sorta di prodotto-servizio *ante litteram* –, fatto tanto dal materiale quanto dalle sue modalità realizzative.

In sostanza, gli UHPFRC, oltre a subire tutte le contraddizioni del calcestruzzo tradizionale, ne vivono alcune tutte nuove ma comunque derivanti dall'assimilazione con il materiale che lo ha preceduto. L'UHPFRC è un calcestruzzo a tutti gli effetti, ma si pensa e si progetta diversamente. Infatti, sebbene condivida, come abbiamo visto, molte delle contraddizioni del calcestruzzo, ha tuttavia performance molto diverse che richiedono una progettazione estremamente accurata, sia perché, dati i costi, un sovradimensionamento avrebbe ripercussioni economiche, sia perché un suo cattivo utilizzo finirebbe per renderne vano l'impiego, sia in termini di caratteristiche strutturali sia rispetto ai vantaggi ottenibili da un approccio dematerializzato alla progettazione.

[27] Manzini, E., *Artefatti…*, *op. cit.*, Milano, 1990, pag. 47.

[28] Tale ambiguità arriverà a riversarsi anche nella sua percezione, causandone una certa impopolarità: «è chiaro che abbiamo a che fare con un materiale con un problema di immagine» (Forty, A., "The Material without a History", *op. cit.*, 2006, pag. 37). Il perché di questa ostilità è probabilmente da ricercarsi anche nell'associazione tra calcestruzzo e costruzioni di scarsa qualità sebbene, in realtà, le obiezioni gli erano mosse sembrerebbero piuttosto riferirsi alla modernità, di cui è l'indiscutibile simbolo: «*like modernity, it brings people together but cuts them off from one another; it overcomes the forces of nature but obliterates nature; it emancipates us but ends up destroying old ways of life and old craft skills. And, like modernity, it is irreversible, there is no turning back*» (*ivi*, pag. 38).

[29] Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete, Birkhäuser – Publisher for Architecture*, Basel-Berlin-Boston, 2006.

[30] Picon, A., "Architecture and Technology: Two Century of Creative Tensions", in Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete, Birkhäuser – Publisher for Architecture*, Basel-Berlin-Boston, 2006, pag. 17. Traduzione a cura dell'autrice.

[31] L'autore scrive: «*Concrete, let us be cleat, is not a material, it is a process*». Cfr. Forty, A., "The Material without a History", *op. cit.*, 2006, pag. 35.

[32] Andriani, C., "Introduzione", op. cit., 2016, pag. 21.



Pannello in UHPFRC con finitura effetto cassero, o *béton brut*, realizzata presso Il Cantiere.

Dunque, per un materiale che si trova in un limbo tra la superficie "effetto cassero" e il Pond du Diable di Rudy Ricciotti, viene da domandarsi quali possano essere i riferimenti progettuali cui fare affidamento. Occorre guardare a coloro che hanno spinto il calcestruzzo oltre i propri limiti, applicando principi progettuali per forma e sfruttandone al massimo plasticità e capacità strutturali, accettandone la peculiare incertezza. È questo l'approccio di Sergio Musmeci che, nel progettare il ponte sul Basento a Potenza, ricerca una superficie sottile equi-compressa, lavorando così sulle potenzialità strutturali del calcestruzzo: «la forma strutturale per Musmeci non è arbitrariamente estetica, ma rigorosamente frutto del principio del minimo strutturale»[33]. Ancora, «la pensilina ad ala di uccello che Pier Luigi Nervi progetta per lo Stadio Berta di Firenze nel 1932 è il frutto di una intuizione formale – la torsione di una trave che sale – realizzata attraverso lo sbalzo di 22 metri di una struttura snella affiancata dal movimento elicoidale delle scale. La rampa del Guggenheim Museum di Wright è una spirale rovesciata, come quella di una conchiglia: l'onda curva che non si frange mai espande e comprime al tempo stesso uno spazio che fluisce dall'interno all'esterno e viceversa, in un reciproco trasformarsi e misurarsi. Il ponte svizzero di Maillart […] è una struttura essenziale che funziona come un ponte sospeso ribaltato, e che, alleggerita di ogni materia non necessaria, traccia una linea dinamica nello spazio»[34]. Tra i riferimenti più recenti, la Möbius House di UNStudio (1998) è un esempio di realizzazione informale, in cui interno ed esterno sono mescolati senza inizio né fine. Qui la struttura in calcestruzzo armato crea una spirale la cui realizzazione richiede una profonda conoscenza delle proprietà strutturali del materiale, qui integrate nella volontà architettonica dei progettisti[35]. Ugualmente interessanti sono le sperimentazioni portate avanti da Mutsuro Sasaki che, a partire dall'idea che la forma perfetta è quella con la minima energia di deformazione e sfruttando il metodo agli elementi finiti, mette a punto la "*sensitive analysis*" che consente la realizzazione del crematorio Meiso no Mori nonché la struttura dell'EPFL Rolex Learning Center di Losanna, su progetto di SANAA[36]. Sasaki, con l'obiettivo di generare da zero una forma ottimale, si affida a un algoritmo genetico – denominato Evolutionary Structural Optimization[37] – che si basa sulla progressiva eliminazione delle parti inefficienti della struttura[38].

[33] Iori, T. e Poretti, S., "Pop structures/Pop Concrete", in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futuro*, Skira Editore SpA, Milano, 2016, pag. 45. Luigi Spinelli scrive, a proposito del rapporto tra la carreggiata e la struttura sottostante: «un ponte come questo scatena un ripensamento sulla consueta dicotomia tra il mondo superiore, quello della carreggiata e dei suoi orizzonti distesi, e quello dei luoghi sottostanti, quasi sempre sacrificati allo scavalcamento e oggetto di una recente letteratura di frontiera. In questo caso è il 'sotto' a essere lo spazio qualificato dall'infrastruttura, che riprende la fluidità e l'organicità del corso d'acqua e della natura. La passeggiata pedonale a saliscendi inventata da Musmeci sul dorso della membrana […] apre prospettive alterne e sempre nuove fra i profili curvi ritagliati nel guscio, e costruisce un paesaggio interno all'infrastruttura». Si veda Spinelli, L., "Quando l'infrastruttura diventa paesaggio", in *Domus*, 2007, disponibile all'indirizzo https://www.domusweb.it/it/architettura/2007/10/17/quando-l-infrastruttura-diventa-paesaggio.html.

[34] Si veda Andriani, C., "Introduzione", in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futuro*, Skira Editore SpA, Milano, 2016, pag. 17. Della stessa autrice si veda anche Andriani, C. (a cura di), *Le Forme del Cemento*, vol. 1, 2, 3, 4, AITEC e Gangemi Editori, Roma, 2006-2012.

[35] Andriani, C., "Introduzione", *op. cit.*, 2016, pag. 19.

[36] Iori, T. e Poretti, S., "Pop structures/Pop Concrete", *op. cit.*, 2016, pag. 47.

[37] Si veda Sasaki, M., *Morphogenesis of Flux Structures*, AA Publications, Londra, 2007; Cui, C. *et alii*, "Computational Morphogenesis of 3D Structures by Extended ESO Method", in *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, vol. 44, 2003, pp. 51-61.

[38] Il metodo ESO, sviluppato nei primi anni '90 da Xie e Steven (Xie, Y e Steven, G., "Shape and layout optimization via an evolutionary procedure", in *Proceedings of the International Conference on Computational Engineering*, Hong Kong, 1992; Xie,



Frank L. Wright, *Guggenheim Museum*, New York, 1943. Foto dell'autrice.

Sasaki, quindi, mette in pratica un'intuizione già avuta da Musmeci secondo il quale «il calcolo automatico, lungi dal limitare le possibilità di immaginazione [dei progettisti], ne rappresenterà un efficiente supporto, oltre che un potente mezzo di amplificazione della loro portata e della loro presa sulla realtà»[39].

Addirittura, le tecniche di design e analisi computazionale hanno determinato e contemporaneamente derivano da un sovvertimento della relazione tra architettura e ingegneria e più in generale del rapporto tra forma, struttura e materiale, che Rivka e Robert Oxman hanno definito *new structuralism*[40]. Gli autori individuano nella Sidney Opera House, realizzata tra il 1959 e il 1973, il punto di rottura rispetto agli approcci progettuali del passato, in cui il momento della configurazione architettonica era generalmente antecedente a quello dell'ingegnerizzazione. La collaborazione tra Jorn Utzon, Ove Arup e Jack Zunz[41] porta alla simultanea risoluzione di problemi inerenti alla pannellizzazione della copertura e alla sua conformazione formale e strutturale. «*No longer a posteriori, the design engineer is now up-front at the earliest generative stage, bringing to the fore the design content of materialization and fabrication technologies*»[42]. Ne deriva un nuovo metodo di progettazione – lo *structuring* – che consente una discretizzazione dei *pattern* strutturali, fornendo, allo stesso tempo, una conoscenza generale del potenziale configurativo e degli attributi geometrici e morfologici del progetto[43], portando, infine, alla nascita della cosiddetta tettonica digitale.

Y e Steven, G., "A simple evolutionary procedure for structural optimization", in *Computers and Structures*, vol. 49, 1993, pp. 885-886) consiste nella discretizzazione di un volume – o un'area – in accordo alle forze che agiscono su di esso, sfruttando il metodo agli elementi finiti. Sulla base dei dati così ottenuti, si eliminano tutte le parti inefficienti ottenendo, alla fine, quasi sempre forme organiche, che risultano spesso le più performanti. Nel corso degli anni l'ESO è stato declinato in diversi modi, portando alla nascita dei seguenti metodi: l'*additive ESO* (AESO), utilizzando un approccio inverso rispetto a quello ESO classico, lavora partendo da una piccola quantità di materia che si accresce depositandosi nelle aree maggiormente sollecitate; il *bi-directional ESO* (BESO), una combinazione di ESO e AESO che consente, quindi, sia l'aggiunta che l'eliminazione di materiale; il *3D extended ESO* (EESO), ovvero un ampliamento della versione precedente che si avvale di processi di calcolo iterativi. È quest'ultimo, in realtà, il metodo utilizzato da Sasaki. Si veda Januszkiewicz, K. e Banachowicz, M., "Non-linear Shaping Architecture Designed Using Evolutionary Structural Optimization Tools", in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 245, 2017, pp. 1-9.

[39] Musemeci, S., citato da Iori, T. e Poretti, S., "Pop structures/Pop Concrete", op. cit., 2016, pag. 45.

[40] Si veda Oxman, R. e Oxman, R. (a cura di), "The New Structuralism. Design, engineering and architectural technologies", in *Architectural Design – Special Issue*, vol. 80, 2010.

[41] Nel 1961, nonostante il progetto fosse stato avviato nel 1959, non era stata ancora presentata una soluzione ingegneristica alla configurazione morfologica della copertura voluta da Utzon, in cui ogni guscio era unico e pensato come una *shell*, in modo da avere all'interno della superficie una struttura liscia e continua. L'ostinazione di Utzon per una forma che, obbedendo al principio di onestà strutturale, avesse una funzione portante e non fosse un mero rivestimento, portò infine alla soluzione finale, opera anche di Jack Zunz. Quest'ultimo aveva sostituito Ronald Jenkins che, assieme al suo associato Hugo Mollman, continuava a proporre per le *shell* un approccio parabolico, rifiutato da Utzon. Sia Zunz che Arup continuavano a trattare come immodificabili le forme proposte da Utzon che, invece, era aperto a una loro possibile modificazione. Infatti, fu proprio quest'ultimo ad avere l'idea di trattare le shell come se fossero porzioni di sfera. Oltre a risolvere una serie di problemi distributivi e spaziali, la soluzione pensata da Utzon consentiva anche una razionalizzazione della struttura che, quindi, ben si prestava all'utilizzo di elementi prefabbricati, garantendo di conseguenza anche un significativo risparmio in termini economici. Tuttavia, quando il progetto fu presentato alla Municipalità di Sidney, non fu accolto con l'entusiasmo che ci si aspettava e fu richiesta una seconda opinione. L'ingegnere francese Yves Guyon, chiamato a esprimersi sul progetto, diede un parere positivo. Finalmente, si potè procedere con la realizzazione. Si veda, The Opera House Project, *Concept, Design, Architecture*, http://theoperahouseproject.com/#!/concept-design-architecture/.

[42] Oxman, R. e Oxman, R., "Introduction", in *Architectural Design – Special Issue*, vol. 80, 2010, pag. 17.

[43] *Ivi*, pag. 18.

In particolare, lo *scripting*, come mezzo progettuale dello *structuring*, produce "codici" che, sulla base dei modelli di tettonica digitale[44], consentono di generare parametricamente varianti geometriche di classi di strutture.

Quanto affermato diventa particolarmente significativo nel caso di materiali *knowledge-based* come l'UHPFRC che ben si prestano a processi di ottimizzazione formale, particolarmente idonei a sfruttarne le elevate prestazioni strutturali, a garantire un risparmio di materiale e a controllarne i processi produttivi[45].

Tuttavia, per le nuove strutture e per i nuovi materiali, «*it is not simply a matter of optimising the building from an architectural point of view, but also from the standpoints of creating energetic structural planning and production techniques. If this is not accomplished, the resulting buildings tend rather to represent aesthetically motivated endeavours potentially limited in their habitability of usability*»[46].

La progettazione in ambiente digitale, infatti, mediante un approccio olistico in grado di tenere insieme l'intero sistema prestazionale dell'opera, consente di gestire contemporaneamente al processo di ottimizzazione degli aspetti morfologici e strutturali, anche quelli ambientali ed energetici.

Quindi, con Nardi, «se nuovi materiali e sistemi informativi applicati alle costruzioni costituiscono i potenziali strumenti per la definizione del linguaggio architettonico dell'età delle macchine, il compito irrinunciabile di chi opera nel settore progettuale, dovrà essere quello di sviluppare una cultura dell'innovazione in grado di evitare quel processo di mimesi formale con gli stereotipi della tradizione, che troppo spesso ha caratterizzato l'innovazione nel costruire»[47].

Tuttavia, non può esservi cultura dell'innovazione senza conoscenza, da cui bisogna sempre ripartire. Nei prossimi paragrafi saranno perciò esplorati gli aspetti più significativi dell'UHPFRC, fino ad arrivare alle possibilità che offre nel settore italiano delle costruzioni.

[44] *Ivi*, pag. 20.

[45] Si veda anche il paragrafo 3.4.

[46] Sobek, W., "Radical sources of design engineering", in *Architectural Design – Special Issue*, vol. 80, 2010, pag. 33.

[47] Nardi, G., "La cultura dell'innovazione", *op. cit.*, 1992, pag. 86.



Getto di un elemento in UHPFRC. Foto scattata presso il Cantiere, Pordenone.

3.2 L'EVOLUZIONE DELLA TECNOLOGIA: STATO DELL'ARTE E PRIME APPLICAZIONI

L'americana Federal Highway Administration[48] definisce l'UHPFRC[49] come un materiale composito a matrice cementizia, con inerti a granulometria ottimizzata, un rapporto acqua-particelle ultra-fini (w/F_v) inferiore a 0,25 e la presenza di un rinforzo discontinuo sotto forma di fibre.

Le eccellenti *performance* degli UHPFRC – resistenza a compressione fino a 150 MPa – sono prevalentemente dovute all'elevata densità della matrice cementizia, a capillarità pressoché nulla. Le particelle, normali e ultra-fini (fumo di silice, polvere di quarzo e polveri calcaree), di dimensione massima pari a 1 mm, determinano la formazione di una microstruttura omogenea in grado di rispondere uniformemente alle sollecitazioni esterne. Il valore w/F_v è indice della qualità della gradazione della granulometria, in quanto i pori residui vengono saturati dall'acqua e dunque, più elevato sarà tale rapporto, maggiore sarà la porosità della matrice e quindi, minore la densità e la variabilità dimensionale delle particelle. Proprio la struttura molecolare del materiale, caratterizzata dall'assenza di porosità capillare, garantisce eccezionali *performance* in termini di durabilità, rendendolo particolarmente idoneo ad applicazioni in ambienti esterni aggressivi. Ciò che distingue radicalmente gli UHPFRC dai calcestruzzi convenzionali è la resistenza a trazione – fino a 7 MPa – sia relativa a comportamento pre-fessurazione che post-fessurazione, in cui entrano in gioco le fibre.

I primi tentativi di produrre cementi ad alte prestazioni risalgono al 1936[50], quando Eugène Freyssinet, nel brevetto depositato presso l'United States Patent Office che ha segnato la nascita del calcestruzzo precompresso, affermò che l'applicazione di pressione a calcestruzzi non induriti, quindi ancora a stato liquido, ne comportava un incremento della resistenza[51].

[48] Gli UHPFRC sono entrati in commercio negli Stati Uniti a partire dal 2000. Da allora sono stati applicati con successo soprattutto per la realizzazione e la riqualificazione di grandi infrastrutture per il trasporto su ruote, dando vita ad una lunga serie di linee guida e norme tecniche costantemente aggiornate dalla Federal Highway Administration, tra cui le più recenti, "Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections", edite da Benjamin Graybeal, risalgono al 2014.

[49] Graybeal, B., *FHWA TECHNOTE: Ultra High Performance Concrete*, FHWA Publication, 2011.

[50] Si veda Korpa, A. *et alii*, "Principles of development, phase composition and nanostructural features of multiscale Ultra High Performance Concrete modified with pyrogenic nanoparticles – A review article", in *American Journal of Materials Science and Application*, vol. 2, 2014, pp. 17-30. L'invenzione del calcestruzzo precompresso è fondamentale, in quanto è il primo passo per eliminare la dicotomia insita del calcestruzzo armato, ovvero quella tra trazione e compressione.

[51] Cfr. Freyssinet, E., *Method and apparatus for the manufacture of hollow bodies of reinforced concrete*, brevetto depositato

Sulla base del lavoro di Freyssinet, negli Stati Uniti all'inizio degli anni Settanta, Roy *et alii*[52] diedero vita a una campagna di sperimentazioni basata sulla densificazione di compositi cementizi con un basso rapporto acqua-cemento, attraverso l'applicazione di pressione elevate che ne riducevano la porosità e, di conseguenza, ne incrementavano le prestazioni strutturali. Già allora si capii che tale procedimento contribuiva a superare le limitazioni imposte dalla geometria delle particelle di cemento, la cui ottimizzazione granulometrica, basata sulla variazione dei *range* dimensionali, portò a una ulteriore riduzione della porosità.

Negli anni '70 un gruppo di ricerca scandinavo guidato dal professor Hanse H. Bache dimostrò che la resistenza a compressione del calcestruzzo dipende dal grado di compattezza e porosità della matrice cementizia dopo che il processo di indurimento è terminato[53].

Il lavoro svolto dal Bache in Danimarca nella seconda metà del Novecento ebbe un ruolo fondamentale nell'evoluzione degli ultra-performanti. Fino a quel momento, per ottenere significativi incrementi di resistenza erano stati utilizzati solo strumenti di compressione meccanica che consentivano di aumentare la densità dei calcestruzzi, mantenendo però fisso il rapporto acqua-cemento intorno a 0,20. Bache, in accordo con la teoria di Griffith[54] sulla rottura fragile dei materiali, secondo la quale la resistenza diminuisce con l'aumento delle dimensioni dei pori e delle particelle, iniziò a lavorare sulla loro distribuzione e geometria, studiando le potenzialità dei materiali "ultra-sottili"[55]. A questo proposito, fu importante la conoscenza della micro-silice le cui particelle, molto più sottili di quelle del cemento oltre che amorfe, permettevano il raggiungimento di livelli di densità fino a quel momento impensabili[56] sebbene risultassero molto difficili da sciogliere in acqua. Tale problema venne risolto con l'aiuto dei super-fluidificanti, che garantivano sia la formazione di una micro struttura molto stretta sia la lavorabilità del calcestruzzo, senza però intaccare le altre caratteristiche del composito, come il tempo di indurimento, la resistenza o la stabilità.

A maggio del 1978 i primi campioni realizzati con la micro-silice raggiunsero resistenze vicine ai 128 MPa, ottenendo così i DSP, acronimo di Densiefied Sytems containing homogeneously arranged ultra-fine Particles. L'elevata densità della matrice lasciava poco spazio alle molecole d'acqua, con un rapporto a/c che oscillava tra 0,18 e 0,25. Le ricerche successive si concentrarono sulla modifica della composizione degli aggregati, arrivando a ottenere una resistenza del composito molto maggiore di quella dei sui singoli componenti.

presso United States Patent Office, 1936. Freyssinet scrive «*I have found that the resistance of concrete to penetration by the reinforcement is proportioned to the pressure to which the concrete is subjected*».

[52] Roy, D. *et alii*, "Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques", in *Cement and Concrete Research*, vol. 2, 1972, pp. 349-366.

[53] Bache, H.H., "Densified cement…", *op. cit.*, 1981.

[54] Cfr. Griffith, A., "The phenomena of rupture and flow in solids", in *Philosophical transactions of the royal Society of London*, vol. 221, 1921, pp. 163-197.

[55] I recenti sviluppi della nanoscienza aprono alla possibilità di posizionare con precisione le particelle, in modo da ottenere le *performance* desiderate. Tuttavia, ciò non è semplice nel caso del calcestruzzo, in quanto i componenti utilizzati hanno tutti dimensioni e forme diverse e, di conseguenza, non possono che posizionarsi in maniera casuale (cfr. Van Damme, H., "Concrete material science: Past, present, and future innovations", in *Cement and Concrete Research*, vol. 112, 2018, pag. 10). È possibile però, come insegna Bache, lavorare sulla distribuzione granulometrica alla scala molecolare. Per questo motivo gli UHPFRC si considerano materiali nano-strutturati.

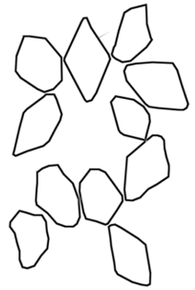
[56] Buitelaar, P., "Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications during 25 years", in M. Schmidt *et alii* (a cura di) P*roceedings of the International Symposium on UHPC*, Kassel, 13-15 settembre 2004.

DSP CONCRETE

Densiefied Sytems containing homogeneously arranged ultra-fine Particles

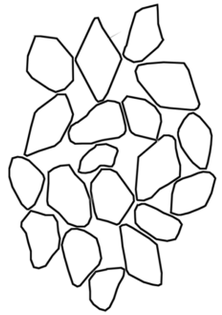
01_PACKING

CEMENT PASTE



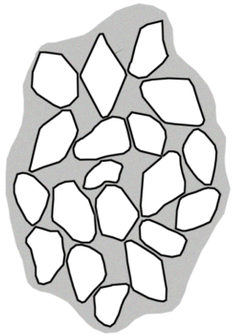
Pasta composta da solo cemento Portland

SUPERPLASTIZED CEMENT PASTE



Pasta composta da cemento Portland e super-fluidificanti

DSP - PASTE



Pasta composta da cemento Portland, super-fluidificanti e fumo di silice

02_BEHAVIOUR

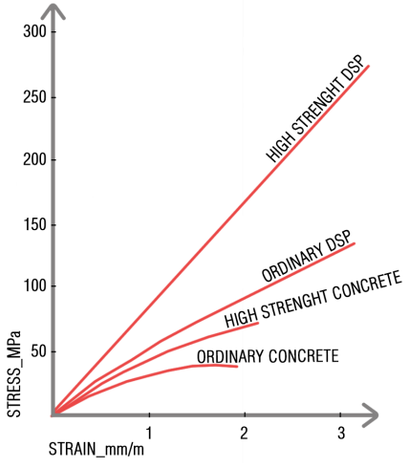
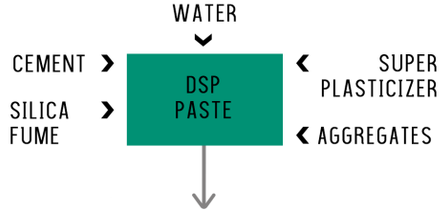


Diagramma tensione-deformazione (stress-strain) di varie tipologie di calcestruzzo

03_COMPOSITION AND PRODUCTS DERIVED



A_ Fiber-reinforced DSP (steel fibers)
B_Fiber-reinforced DSP (steel fibers) + reinforced steel: CRC
C_Reactive Powder Concrete (+ fibers): RPC

I dati riportati sono rielaborazioni tratte da Bache, H.H., "Densified cement/ultra-fine particle based materials", in Second International Conference on Superplasticizers in Concrete. Ottawa, 10-12 giugno 1981, pp. 1-35 (01-02) e da Guerrini, G. L., "Applications of High-Performance Fiber- Reinforced Cement-Based Composites", in Applied Composite Materials, vol. 7, 2000, pp. 195-207 (03).

Risultati significativi si ebbero con la bauxite, arrivando a sfiorare i 280 MPa di resistenza.

Le scoperte di Bache furono presentate alla seconda conferenza internazionale sui super-fluidificanti del 1981 ed ebbero un impatto sorprendente sulla comunità scientifica dell'epoca. A detta dello stesso autore le principali caratteristiche del DSP erano: l'eliminazione del *locking effect* dovuto alle forze superficiali tra le particelle adiacenti grazie all'utilizzo di super-fluidificanti; l'alto grado di coerenza interna del materiale allo stato liquido, che elimina fenomeni di *bleeding*; la resistenza e la durabilità elevate, nettamente superiori a quelle dei calcestruzzi ordinari[57].

Una delle prime applicazioni del DSP fu la ristrutturazione del bacino di dissipazione della diga di Kinzua (Pennsylvania) nel 1983: il calcestruzzo esistente, gravemente eroso a causa di fenomeni di cavitazione, venne sostituito con elementi non rinforzati in DSP dallo spessore di 30 cm. Nonostante alcuni problemi relativi alla formazione di fessurazioni, al ritiro autogeno e alla applicabilità e lavorabilità del materiale connessi alla scarsa conoscenza dello stesso, l'intervento ebbe un discreto successo.

Tuttavia, la rottura fragile del materiale iniziava a diventare un ostacolo importante. Così, negli stessi anni, Bache avviò una ricerca con l'obiettivo di studiare un *mix* di DSP e fibre, per fare in modo che il materiale avesse un comportamento duttile[58]. Con tali obiettivi nasce nel 1986 il Compacted Reinforced Concrete[59], additivato con fibre metalliche, che sarà brevettato dallo stesso Bache in Danimarca con il nome di Densit®[60].

Parallelamente (1985), David R. Lankard[61] presentava i suoi studi sullo Slurry Infiltred Fiber Concrete (SIFCON) con percentuali di fibre pari al 20% del volume del composito. Tuttavia, il SIFCON aveva elevati costi di produzione a causa proprio dell'alta quantità di fibre (alla fine pari al 12-13 % del volume complessivo) e delle difficoltà d'esecuzione connesse al loro posizionamento, effettuato direttamente in cassaforma prima del getto.

[57] Bache, H.H., "Densified cement…", *op. cit.*, 1981. In quegli stessi anni, si svilupparono prodotti a base di paste polimeriche, come il Macro Defect Free (MDF). Con una resistenza a compressione prossima ai 300 MPa, l'MDF deve le sue proprietà all'eliminazione dei difetti normalmente presenti nei prodotti gettati, grazie all'utilizzo di cemento alluminato, alcool polivinilico oppure copolimeri di acetato e a un processo di produzione basato sulla laminazione. La laminazione si divide in tre fasi: la prima consiste nel lavorare l'impasto iniziale, a consistenza sabbiosa, fino a renderlo omogeneo anche con l'aggiunta dell'alcool polivinilico, con velocità di taglio molto elevate; durante la seconda fase l'impasto viene ripetutamente passato attraverso i rulli per circa 30 secondi; l'ultima fase prevede la calandratura a bassa velocità di taglio. Per approfondimenti si faccia riferimento a Young J. F. e Berg M., "Macro-defect-free cement: A novel organoceramic composite", in *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 271, 1992; Birchall, J. *et alii*, "Flexural strength and porosity of cements", in *Nature*, vol. 289, pp. 388-390, 1981. A Birchall *et alii* si attribuisce la paternità dell'MDF.

[58] Era stato infatti dimostrato che incrementando la percentuale di fibre si riscontrava un aumento sia della resistenza a flessione che della duttilità post-fessurazione. Si veda Hannah, D., *Fibre Cements and Fibre Concretes*, John Wiley & Sons, Somerset, 1978.

[59] Hans H. Bache depositò il brevetto per Il Compat Reinforced Concrete nel 1986 presso l'United States Patent.

[60] Nel 1972 la compagnia danese Aalborg Portland diede vita ad un programma di ricerca finalizzato a sviluppare cementi ad alta resistenza. Nell'ambito di questa ricerca rientra anche il lavoro di Bache degli anni '80 (Bache, H.H., "Densified cement…", *op. cit.*, 1981). Nel 1983 Densit divenne una compagnia indipendente del FLSmidth Group, mentre il brevetto venne depositato da Bache, con concessione alla Aarlborg Portland-Cement-Fabrik, nel 1987 presso l'European Patent Specification. Si veda Bache, H.H., *Compact Reinforced Concrete*, brevetto depositato presso United States Patent Office, 1987.

[61] Lankard, D., "Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON): Properties and Applications", in *Materials Research Society*, vol. 42, 1985, pp. 227–286.



Rivestimento per facciate in Ductal.
Emmanuel Combarel e Dominique Marrec, *RATP Station*, Thiasis, 2007. Immagine da archdaily.com.

Tuttavia, il suo contributo servì a togliere ogni dubbio rispetto alla compatibilità delle fibre con la matrice cementizia[62]. All'inizio degli anni '90 la cooperazione tra la Aalborg Portland, già casa madre di Bache, e la francese Bouygues portò, sotto la guida di Pierre Richard e Marcel Cheyrezy[63], allo sviluppo del Reactive Powder Concrete, anche sulla base di quanto fatto qualche anno prima da De Lallard e Sedran. Quest'ultimi, infatti, con l'obiettivo di testare il massimo livello di resistenza possibile del conglomerato utilizzando solo cemento, fumo di silice, super-fluidificanti e trattamenti termici convenzionali[64], riuscirono a massimizzare la densità della matrice cementizia, portando il rapporto acqua-cemento a 0,14 e raggiungendo una resistenza a compressione pari a 236 MPa[65], realizzando, di fatto, un prodotto che poteva essere commercializzato perché economicamente sostenibile. A partire da questi presupposti, l'RPC si sviluppò grazie agli studi condotti sulla composizione molecolare del calcestruzzo nonché sui vantaggi forniti dai trattamenti al calore. L'obiettivo di Richard e Cheyrezy era quello di aumentare l'omogeneità della matrice cementizia sia alla scala macroscopica, riducendo il rapporto tra il modulo di Young del composito e quello degli aggregati, sia a quella microscopica incrementando la densità della struttura attraverso l'ottimizzazione della granulometria e diminuendo il rapporto a/c. L'utilizzo di trattamenti al calore per assicurarsi una microstruttura più resistente, responsabile sia dell'aumento della durabilità che delle caratteristiche *waterproof*, e l'incremento della duttilità grazie alle microfibre in acciaio consentirono, infine, di raggiungere valori di resistenza pari a 800 MPa. Infatti, i trattamenti al calore a temperature superiori a 90° C accelerano la reazione del fumo di silice e dei materiali pozzolanici. Richard e Cheyrezy realizzarono due diverse formulazioni, differenziate per tipologia di aggregati, quantità e dimensione delle fibre e resistenza caratteristica a compressione. L'RPC 200, indicato maggiormente per l'utilizzo direttamente in cantiere senza rinforzo passivo, presentava prestazioni e modalità di applicazioni analoghe a quelle dei cementi *high performance*, mentre l'RPC 800 era più idoneo a soluzioni prefabbricate, in quanto l'elevata resistenza raggiunta richiedeva un'accuratezza superiore sia in termini di preparazione che di lavorazione del composto.

Su questi presupposti, l'RPC sarà ottimizzato dal Lafarge Research Centre, in partnership con Rhodia e Bouygues, e commercializzato con il nome di Ductal®. Poco dopo anche Eiffage[66] lanciò sul mercato il proprio UHPFRC, il BSI®.

[62] L'aggiunta di fibre in acciaio consente di produrre un calcestruzzo più leggero, resistente e duttile. Le proprietà così ottenute dipendono dalle dimensioni, dalla percentuale volumica e dalla qualità dell'adesione delle fibre alla matrice cementizia. Le fibre, inoltre, controllano la comparsa di fessure a carichi elevati, determinando un comportamento *strain-hardening* (all'aumentare del carico applicato aumenta la deformazione garantendo, così, una dissipazione dell'energia in eccesso).

[63] Richard, P. e Cheyrezy, M., "Composition of Reactive Powder Concrets", in *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp. 1501-1511, 1995.

[64] Fino a questo momento erano stati ottenuti valori molto alti di resistenza con tecniche come l'autoclavaggio, la compattazione ad elevate pressioni oppure con l'aggiunta di polimeri o di aggregati speciali, come la bauxite. Tuttavia, tali procedure risultavano particolarmente onerose nonché di difficile applicazione. Cfr. De Larrard F e Sedran T., "Optimization of ultra-high performance concrete by using a packing model", in *Cement and Concrete Research*, vol. 24, 1994, pp. 997-1009.

[65] Cfr. Wong, H. e Kwan, A., "Packing density of cementitious materials: part 1-measurement using a wet packing method", in *Materials and Structures*,vol. 41, 2008, pp. 689-701.

[66] Eiffage è una compagnia francese che opera nel settore delle costruzioni, immobiliare e di ingegneria civile. È il terzo gruppo del suo settore in Francia, alle spalle di Bouygues. Si veda Wikipedia, *Eiffage*, https://it.wikipedia.org/wiki/Eiffage; Eiffage, eiffage.com.

Fondamentale a sviluppare la conoscenza del materiale, fu la riqualificazione della centrale nucleare di Cattenom negli anni '90 dove si utilizzarono l'RCP 180®, poi diventato DUCTAL®-FM, e il BSI 150®. Tale intervento divenne centrale ai fini della stesura delle famose linee guida AFGC[67], in quanto la campagna di sperimentazioni condotta consentì di scoprire molte delle proprietà del materiale come, ad esempio, il basso coefficiente di *creep* che, a sua volta, consentì una riduzione delle forze di *prestress* applicate. Allo stesso modo l'ottimizzazione della geometria delle parti strutturali, con forme inusuali rispetto a quelle utilizzate per calcestruzzi tradizionali, e il processo necessario alla completa caratterizzazione del materiale, per cui sono necessari prototipi in scala reale, segnarono un passo in avanti indispensabile alla diffusione del UHPFRC. A partire dal 2000, moltissime aziende hanno sviluppato la propria formula di UHPFRC, registrando altrettanti marchi: oltre ai già citati Ductal®, BSI® e Densit®, una collaborazione tra Sika[68] ed Eiffage ha portato alla nascita di CERACEM®, mentre nel 2004 compare il tedesco DUCON®, seguito nel 2006 da DURA®, sviluppato in Malesia. In Italia, invece, Italcementi[69] lancia all'interno della linea i.nova, in cui tutti i prodotti del marchio sono aggregati in undici famiglie di *performance*, EFFIX®, un ultra-performante pensato per le applicazioni architettoniche e di design[70]. Come dimostra la proliferazione di UHPFRC, a partire da quegli anni iniziarono ad aumentare anche le applicazioni. Il ponte pedonale di Seoul (2002) di Rudy Ricciotti[71], con la sua luce di 120 metri ottenuta mediante 6 elementi lunghi 20, è una dichiarazione delle capacità strutturali dell'UHPFRC nonché testimonianza delle sue potenzialità espressive. Invece il ponte di Bourg-lès-Valence del 2001, sebbene per aspetto non differisca da una normale opera in calcestruzzo armato, ebbe il merito di essere il primo in assoluto realizzato per il traffico veicolare nonché occasione di ulteriori sperimentazioni finalizzate alla redazione di una prima normativa[72].

Nel frattempo, si diffusero rapidamente interventi finalizzati alla riqualificazione di elementi strutturali, entrando rapidamente anche nel campo della riparazione di infrastrutture viarie. In questo caso, come anticipato, risulta significativo il lavoro svolto dalla Federal Highway Administration negli Stati Uniti a partire dal 2000, ove gli UHPFRC sono stati applicati con

[67] Cfr. SETRA-AFGC, *Interim recommendations…*, *op. cit.*, 2013 (versione più recente).

[68] Fondata nel 1910 in Svizzera da Kaspar Winkler, Sika si occupa da sempre di prodotti chimici per l'edilizia. A dettarne il successo fu l'additivo impermeabilizzante per malta chiamato Sika®-1 che, nel 1918, fu utilizzato dalle Ferrovie Federali Svizzere in 67 gallerie. Nel 1968, nasce la Sika Finanz AG e, qualche anno dopo, il suo prodotto più celebre, il Sikaflex, che aprì la strada per il settore Automotive. Tra il 2000 e il 2008 Sika acquista 36 aziende, portando il fatturato da 2 a oltre 4,6 miliardi. Cfr. Sika, *Chi siamo: storia*, https://ita.sika.com/it/chi-siamo/storia.html.

[69] Italcementi, nata nella seconda metà del XIX secolo a Scanzo, in provincia di Bergamo, con il nome di Società Bergamasca per la fabbricazione del cemento, nel primo Novecento viene acquisita dai fratelli Presenti, che la quoteranno in borsa già nel 1925. Nel 1927 diventa Italcementi. Nel 1992 acquista Ciments Français che ne segnerà la definitiva internazionalizzazione. Nel 2012 viene inaugurato alle porte di Bergano i.lab, centro di Ricerca progettato da Richard Meier, con cui vi era già stata la prolifica collaborazione per la realizzazione della Chiesa del Giubileo, rivestita con il cemento fotocatalitico Bianco TX Millenium. Nel 2016 entra a far parte HeidelbergCement Group, con oltre 62.000 dipendenti e più di 3.000 siti produttivi. Si veda Italcementi, *La nostra storia*, https://www.italcementi.it/it/la-nostra-storia.

[70] Si veda, Italcementi, *Effix*, https://www.italcementi.it/it/idesign-EFFIX.

[71] Il footbridge di Seoul è realizzato in Ductal®. Si veda Nematollahi, B. *et alii*, "A review on ultra high performance 'ductile' concrete (UHPdC) technology", in *International Journal of civil and structural engineering*, vol. 2, 2012, pp. 1003-1018.

[72] Si veda Thibaux, T., "UHPFRC Development: The Experience of BSI® Applications", in Resplendino, J. e Toutlemonde, F. (a cura di), *Designing and Building with UHPFRC. State-of-the-Art and Development*, ISTE, London and John Wiley & Sons, Hoboken, 2011, pag. 63-76.

successo soprattutto nella sostituzione di manti stradali, o realizzando elementi prefabbricati in calcestruzzi convenzionali giuntati con ultra-performanti in modo da sfruttarne la duttilità, oppure gettando in opera *layer* sottili del materiale. Nel 2017 vi erano più di 180 ponti aperti al traffico negli Stati Uniti e in Canada riparati con connessioni in UHFRC. Il successo di questo tipo di applicazioni è anche dovuto all'utilizzo di tecniche di posa in opera e di strumentazioni non difformi da quelle adoperate per i calcestruzzi convenzionali. La diffusione dell'UHPFRC sul mercato americano ha portato alla nascita di diverse aziende che, sfruttando la buona fama del materiale, tentano adesso anche la strada della prefabbricazione oltre che quella del gettato in opera. Tra queste, la Kulish Design Company[73], ha lanciato nei primi anni del 2000 lo Steelike® limitandosi però alla sua produzione, mentre TAKTL[74] è tanto un'azienda di produzione – il suo ultra-performante è l'A|UHPC® – che di prefabbricazione, focalizzata sulla realizzazione di pannelli per facciate.

Più o meno negli stessi anni anche in Svizzera un massivo programma di sperimentazioni[75] ha provato che attraverso l'addizione di un *layer* di UHPFRC su una sezione esistente in calcestruzzo armato, è possibile incrementare la resistenza di tutta la struttura, a patto che sia garantita una buona aderenza tra i due materiali. Le sperimentazioni hanno portato alla stesura nel 2016 delle Norme SIA 2052[76] per il calcolo di strutture composite in UHPFRC e calcestruzzo armato, fornendo quindi una fondamentale metodologia di riferimento.

L'esperienza maturata grazie agli interventi sulle infrastrutture viarie ha aperto il campo all'utilizzo del materiale per la protezione dalla corrosione dei pali di fondazione delle piattaforme petrolifere *offshore*, mediante una sorta di stuccatura di rivestimento. Sebbene la tecnica sia in realtà abbastanza diffusa, l'impiego di ultra-performanti anziché malte e cementi additivati risulta in una maggiore capacità portante[77]. Altrettanto diffuse sono le applicazioni per la realizzazione di elementi di protezione o di sicurezza, come barriere autostradali o bunker prefabbricati e assemblati in opera.

Grazie all'esperienza maturata nelle riqualificazioni di infrastrutture viarie, iniziarono a farsi strada anche progetti di retrofit strutturale di edifici pubblici e residenziali, nonostante le difficoltà incontrate per far sì che la validità del materiale fosse riconosciuta sia dalle autorità che dagli operatori del settore edilizio.

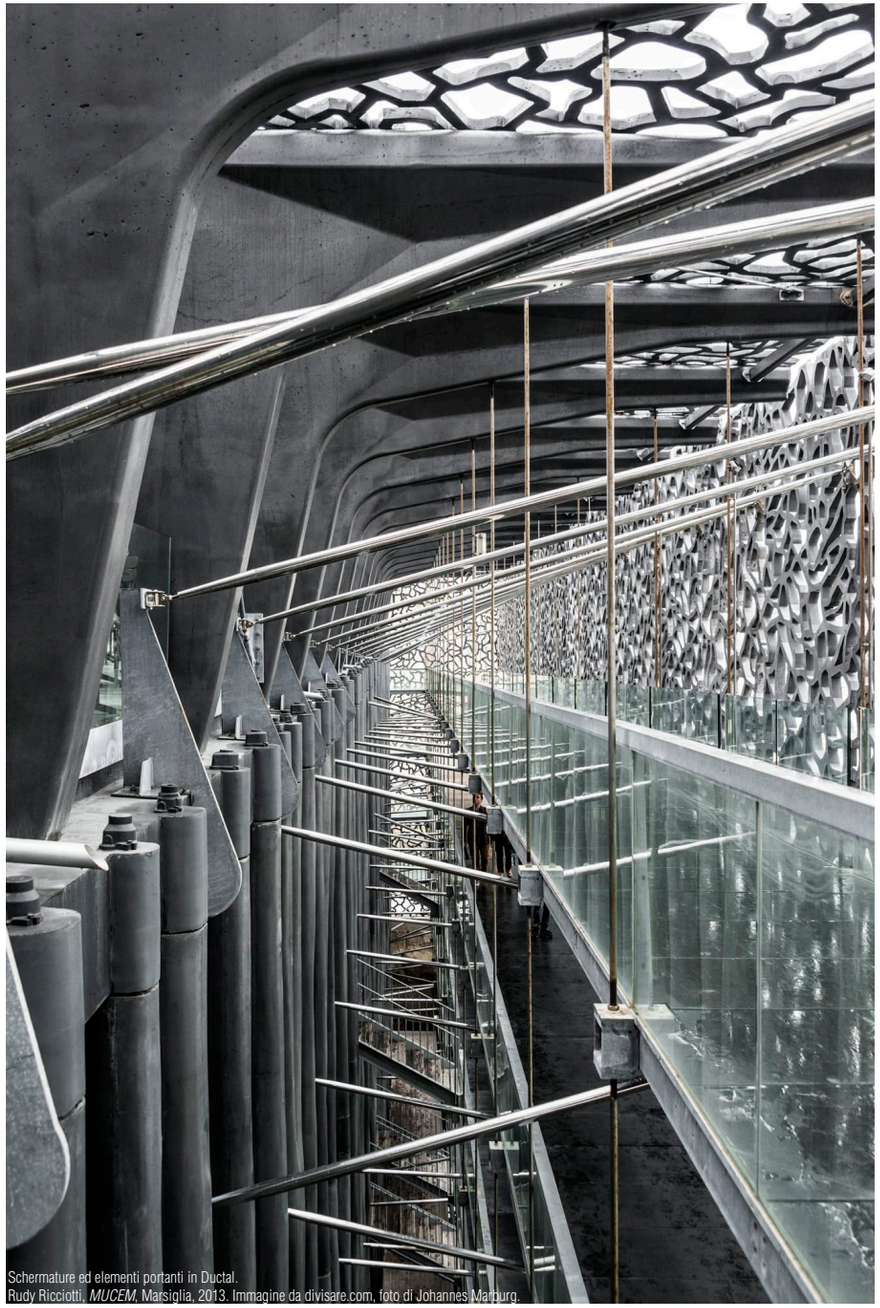
[73] La Kulish Design Co. ha sede a Springfield. Si veda Kulish Design Co., https://kulishdesignco.com/.

[74] Taktl, con sede a Pittsburgh, nasce nel 2010 staccandosi dall'azienda madre Forms + Surfaces in seguito alla formulazione di un UHPC realizzato con materie prime locali e destinato alla sola realizzazione di prodotti per facciate. Si veda, Taktl, https://www.taktl-llc.com/.

[75] Si vedano: Brühwiler, E., e Denarié, E., "Rehabilitation of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete", in Fehling, E. *et alii* (a cura di), *Proceedings of The Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel University Press, Kassel, 2008, pp. 895–902; Makita T., e Brühwiler, E., "Fatigue behaviour of bridge deck slab elements strengthened with reinforced UHPFRC", in *Proceedings of IABMAS: Bridge Maintenance, Safety and Management*, Stresa, giugno 2012, pp. 1974-1980; Noshiravani, T. e Brühwiler, E., "Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear", in *ACI Structural Journal*, vol. 110, 2013, pp. 251-262; Oesterlee, C., *Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members*, Tesi di Dottorato, N. 4848, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Svizzera, 2010

[76] *Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution*, Technical Leaflet SIA 2052, 2016.

[77] Buitelaar, P., "Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications during 25 years", in M. Schmidt *et alii* (a cura di) *Proceedings of the International Symposium on UHPC*, Kassel, 13-15 settembre 2004.



Schermature ed elementi portanti in Ductal.
Rudy Ricciotti, *MUCEM*, Marsiglia, 2013. Immagine da divisare.com, foto di Johannes Marburg.

Tra i primi progetti, vi è la trasformazione degli uffici di Gécina[78], società immobiliare con sede a Parigi. La riqualificazione ha previsto la sostituzione di pilastri in acciaio, che avrebbero richiesto misure di protezione al fuoco, con colonne sottili in UHPFRC. È chiaro che durante i primi anni di diffusione del materiale, la sorprendente resistenza meccanica ha portato prevalentemente a un utilizzo in applicazioni strutturali spinte, che ne hanno dominato l'impiego per un lungo periodo. Solo in un secondo momento le caratteristiche riguardanti l'aspetto estetico e la durabilità dell'UHPFRC, ne hanno avviato l'utilizzo anche in campo prettamente architettonico con applicazioni non strutturali e addirittura, più recentemente, di design. Vale la pena di citare la Stazione RAPT a Thiais in Francia (2007) di Emmanuel Combarel e Dominique Marrec, il lavoro di Rudy Ricciotti a cui aggiungiamo, oltre al già citato Pont du Diable del 2005, il MUCEM di Marsiglia del 2013 e la splendida pensilina di Villa Navarra del 2008 e, infine, il recentissimo Louvre di Abu Dhabi, inaugurato nel 2017, su progetto di Jean Nouvel, che già aveva usato gli ultra-performanti per Museo Reina Sofia (Madrid) nel 2003.

Negli ultimi anni, quindi, il campo dei componenti architettonici rappresenta un settore *leader* soprattutto per le schermature solari e per gli elementi di chiusura verticale. I vantaggi del materiale sono sicuramente forniti dalle possibilità connesse all'esplorazione formale consentita dall'assenza di rinforzi passivi. Celebre è il progetto, ancora una volta di Ricciotti, del 2013 dello stadio Jean Bouin a Parigi, completamente rivestito di pannelli triangolari forati in UHPFRC a formare un guscio.

Negli anni a seguire una sempre maggiore consapevolezza delle proprietà degli UHPFRC ha consentito di analizzare e implementare caratteristiche più specifiche del materiale. Particolar attenzione è stata data al comportamento al fuoco, in quanto l'elevata densità e la scarsa porosità dell'UHPFRC causano una scagliatura di tipo esplosivo, in caso di esposizione al fuoco. Gli studi condotti in Giappone[79] a metà degli anni '90 avevano già dimostrato gli effetti benefici dell'inclusione di fibre in polipropilene che, raggiunti 160° C, si fondono aumentando la porosità del materiale e riducendo così la pressione interna. Invece, più recentemente, si guarda alla questione della sostenibilità che, oltre a essere una caratteristica immanente della costruzione in UHPFRC, data l'elevata durabilità del materiale e le capacità strutturali che consentono di utilizzare sezioni sottili e quindi un minore quantitativo di materia, deriva anche dall'applicazione delle nanotecnologie. La ricerca nanotecnologica sui calcestruzzi[80] è attualmente orientata a ridurre i consumi energetici e le emissioni di CO_2 durante i processi produttivi, sostituendo, ad esempio, le materie prime impiegate oppure cercando di aumentare l'efficienza delle reazioni di idratazione che formano il C-S-H, responsabile della resistenza meccanica del materiale. Basti pensare che per i calcestruzzi ultra-performanti con fumo di silice, meno del 20% dei silicati tricalcici e bicalcici vengono idratati, facendo sì che una parte di cemento e reagenti risultino utilizzati semplicemente come *filler* inerti[81].

[78] Thibaux, T., "UHPFRC Development: The Experience of BSI® Applications", *op. cit.*, 2011.
[79] Si veda Nishida, A. *et alii*., "Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene fibre for spalling resistance", in *Proceedings of the International Symposium on Concrete under Severe Conditions*, Sapporo, agosto 1995.
[80] Per ulteriori approfondimenti si veda Leone, M., *Cemento nanotech. Nanotecnologie per l'innovazione del costruire*, CLEAN, Napoli, 2012.
[81] Cfr. Van Damme, H., "Concrete material science…", *op. cit.*, 2018, pag. 20.

Si è rivelata particolarmente efficace la sostituzione del Portland, da solo responsabile di circa l'60% delle emissioni durante la produzione[82], o con sostanze dalla composizione chimica simile, generalmente note come *supplementary cementitious materials* (SCM)[83], oppure utilizzando i cosiddetti "clinker alternativi"[84], considerati meno impattanti.

Per gli ultra-performanti la prima soluzione è quella più auspicabile (i clinker alternativi sono generalmente più costosi e meno resistenti), sebbene tanto la reperibilità che la qualità degli SCM sia attualmente in calo: lo stesso fumo di silice, un tempo considerato un rifiuto industriale, è adesso una materia prima rara e preziosa mentre la cenere volante è sempre più difficile da ottenere[85]. Appare dunque fondamentale individuare materiali "verdi" alternativi con buona reattività pozzolanica: ottimi risultati sono stati ottenuti con cenere di olio di palma[86] e scorie fosforose, derivanti dalla produzione di fosforo giallo e prodotte in grandi quantità sia in Cina che negli Stati Uniti (8 e 3,6 milioni di tonnellate rispettivamente)[87].

Tuttavia, l'utilizzo di SCM è paradossalmente in contrasto con la ricerca sulla stampa 3D in quanto quest'utlima richiede alte *performance* e presa rapida, di solito tanto maggiori quanto maggiore è il contenuto di cemento[88].

Anche in questo caso però si può intervenire chimicamente: è stato dimostrato che, ad esempio, l'aggiunta di alcali può incrementare la resistenza iniziale senza interferire con il controllo globale delle proprietà reologiche[89].

[82] Dong, Y., "Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts", in *Construction and Building Materials*, vol. 167, 2018, pag. 421.
[83] Si vedano Lothenbach, B. *et alii*, "Supplementary cementitious materials", in *Cement and Concrete Research*, vol. 41, 2015, pp. 1244-1256; Juenger, M. e Siddique, R., "Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete", in *Cement and Concrete Research*, vol. 78, 2015, pp. 71-80.
[84] Si veda il paragrafo 3.4 per ulteriori approfondimenti.
[85] Si veda Yang, R. *et alii*, "Low carbon design of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) incorporating phosphorous slag", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 240, 2019, pp. 118-128.
[86] La cenere di olio di palma (POFA) è stata impiegata con un discreto successo come materiale pozzolanico. La produzione di olio di palma produce infatti molti residui organici (fibre e gusci), tipicamente utilizzati per generare energia elettrica mediante combustione, provocando la formazione di POFA. È stato dimostrato che quest'ultima può sostituire fino al 10 % della massa di cemento all'interno dei calcestruzzi, onde evitare la perdita di prestazioni (Tay, J., "Ash from oil-palm waste as concrete material", in *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 2, 1990, pp. 94-105). Recentemente un'ulteriore lavorazione della POFA ha consentito la produzione di cenere ultrafine (UPOFA) (Megat Johari, M. *et alii*, "Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash", in *Construction and Building Materials*, vol. 30, 2012, pp. 281-288), molto più reattiva e impiegabile nei cementi ultra-performanti (Aldahdooh, M. *et alii*, "Influence of palmo il ash on ultimate flexural and uniaxial tensil strenght of green ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites", in *Materials and Design*, vol. 54, 2014, pp. 694-701). Ulteriori avanzamenti hanno visto la combinazione di fibre in PET e UPOFA, ottenendo una resistenza massima a compressione a 28 giorni di 144 MPa. Cfr. Alani, A. *et alii*, "Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC)", in *Construction and Buildings Materials*, vol. 209, 2019, pp. 395-405.
[87] Yang, R. *et alii*, "Low carbon design...", *op. cit.*, 2019, pag. 119. Yang *et alii* hanno condotto un programma di prove finalizzato a valutare le proprietà di un UHPC con scorie fosforose (PS), sostituendo dal 10 al 50% di cemento. Sebbene l'aggiunta di PS causi un abbassamento delle prestazioni meccaniche durante le prime fasi di *setting*, a 28 giorni sono stati raggiunti circa 120 MPa di resistenza a compressione. Le PS causano inoltre un allungamento dei tempi di presa che, tuttavia, in alcune circostanze potrebbe addirittura rivelarsi favorevole. Si è inoltre riscontrata una significativa riduzione del ritiro autogeno, dovuta proprio alla sostituzione del cemento (*ivi*, pag. 127).
[88] De Shutter, G. *et alii*, "Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials", in *Cement and Concrete Research*, vol. 112, 2018, pag. 33.
[89] Marchon, D. *et alii*, "Molecular design of comb-shaped polycarboxylate dispersants for environmentally friendly concrete", in *Soft Matter*, vol. 9, 2013, pp. 10719-10728.

Un altro aspetto riguarda l'analisi degli impatti ambientali prodotti lungo l'intero ciclo di vita, che risulta ancora ostica a causa della mancanza di *database* appropriati, dal momento in cui le prime applicazioni risalgono solo alla seconda metà degli anni Novanta[90]. Le analisi LCA analizzano le *performance* di un prodotto lungo tutto il ciclo di vita, inclusi i processi di estrazione delle materie prime, la produzione, la costruzione, l'ispezione, la manutenzione, la riqualificazione e le modalità di smaltimento e riciclo[91].

Tipicamente gli indicatori utilizzati sono il *global warming potential*[92], il tasso di acidificazione del suolo e delle risorse idriche, la tossicità per l'uomo, l'utilizzo di risorse non rinnovabili *etc. etc.* per ciascuna delle fasi del ciclo di vita indicate. Paragonando, ad esempio, un ponte realizzato in calcestruzzo armato con uno in UHPFRC, si vede che nella fase di fabbricazione, le emissioni di CO_2 del primo corrispondono a circa il 70% di quelle del secondo, in quanto quest'ultimo utilizza materie prime di più articolati reperimento e produzione[93], nonché un maggiore quantitativo di cemento[94].

Tuttavia, la situazione si sovverte considerando le emissioni dovute alla manutenzione: quelle dell'UHPFRC sono circa 1/3 di quelle in calcestruzzo armato, facendo sì che l'utilizzo del materiale risulti, infine, in una riduzione globale delle emissioni di anidride carbonica del 30%[95]. La proporzione è ancora più favorevole nel caso in cui si intervenga riparando le strutture esistenti.

Risultati altrettanto promettenti provengono dalle valutazioni di impatto ambientale di elementi realizzati mediante fabbricazione digitale che hanno dimostrato come, anche in questo caso, le maggiori emissioni sono imputabili ai processi di produzione della materie prime e non alla costruzione dei componenti in sè. Anzi, al contrario i benefici ambientali indotti sono tanto maggiori quanto maggiore è la complessità dell'elemento realizzato[96].

Una questione che resta spinosa è quella del riciclo in quanto, sia per i materiali nanostrutturati che per i nanomateriali, l'elevato contenuto tecnologico lo rende spesso proibitivo, sia economicamente che in termini di dispendio energetico. Per gli UHPFRC, inoltre, resta oggi molto complesso separare le fibre dalla matrice cementizia, sebbene siano in atto sperimentazioni con fibre biodegradabili che consentirebbero una macinazione e un riutilizzo del materiale come inerte a fine vita. Un'altra strategia consiste nell'impiegare fibre provenienti da materiali riciclati, come nel caso dell'impiego di bottiglie in PET (polietilene tereftalato). È stato infatti dimostrato che l'utilizzo di piccoli volumi di PET in forma di fibre o aggregati aumenta tanto la resistenza che la durabilità (porosità, permeabilità, assorbimento d'acqua e penetrazione degli ioni cloruro) del materiale[97].

In conclusione, avendo delineato la storia dell'UHPFRC, è facile comprendere come il materiale sia ormai sempre più presente all'interno del panorama costruttivo internazionale. È altrettanto chiaro, per quanto detto, che l'approccio progettuale e produttivo è, tutto sommato, lontano da quello cui siamo abituati con il calcestruzzo a partire dal fatto che, in questo caso, le applicazioni in opera sono relegate solo al settore della riqualificazione strutturale, sia per opere di ingegneria civile che per quelle di ingegneria edile. Al contrario, quelle architettoniche e di design richiedono sempre una relazione con le industrie di prefabbricazione facendo sì che risulti imprescindibile conoscerne tecniche, processi e modalità produttive.

[90] Per la stessa ragione risulta altrettanto problematica la valutazione dei meccanismi di deterioramento e degli effetti prolungati dei carichi, rendendo molto complessa la valutazione delle performance nel tempo e, di conseguenza, la definizione di eventuali strategie di manutenzione. Si veda, Dong, Y., "Performance assessment and design …", *op. cit.*, 2018, pp. 414-419.

[91] Si veda anche Zhong, R. *et alii,* "Material efficiency in the design of UHPC paste from a life cycle point of view", in *Construction and Building Materials*, vol. 160, pp. 505-513.

[92] Il *global warming potential* (GWP) esprime il contributo all'effetto serra di un gas, tenendo la CO_2 come riferimento (GWP pari a 1). Il GWP si calcola su uno specifico intervallo di tempo.

[93] Dong, Y., "Performance assessment and design …", *op. cit.*, 2018, pag. 420.

[94] Un calcestruzzo con una resistenza a compressione di 25 MPa contiene circa 350 kg/m^3 di cemento, mentre un UHPC con resistenza a compressione pari a 200 MPa ne contiene circa 700 kg/m^3 (cfr. Van Damme, H., "Concrete material science…", *op. cit.*, 2018, pag. 14).

[95] Dong, Y., "Performance assessment and design …", *op. cit.*, 2018, pag. 423.

[96] Si vedano Agustì-Juan, I. e Habert, G., "Environmental design guidelines for digital fabrication", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, 2017, pp. 2780-2791; Agustì-Juan, I. *et alii*, "Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 154, 2017, pp. 330-340.

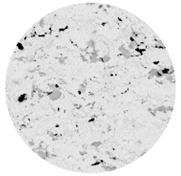
[97] Si veda Pelisser, F. *et alii*, "Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete", in *Material Research*, vol. 15, 2012, pp. 679-686; Pereira De Oliveira, L. e Castro-Gomes, J., "Physical and mechanical behaviourof recycled PET fibre reinforced mortar", in *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011, pp. 1712–1717; Ramadevi, K. e Manju, R., "Experimental investigation on the properties of concrete with plastic PET (bottle) fibres as fine aggregates", in *Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, 2012, pp. 42–46; Al-Hadithi, A., e Hilal, N., "The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers", in *The Journal of Building Engineering*, vol. 8, 2016, pp. 20-28. In particolare, Al-Hadithi e Hilal hanno individuato, per un volume di fibre pari all'1,5%, un massimo incremento di resistenza a compressione pari al 43,3 % rispetto al mix di controllo.



1972
ROV ET ALII
"Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques", in *Cement and Concrete Research*, vol. 2, 1972, pp. 349-366



1983
DIGA DI KINZUA
Ristrutturazione del bacino di dissipazione



1986
HANSE H. BACHE
Compacted
Reinforced Concrete



1994
DE LARRARD E SEDRAN
"Optimization of ultra-high performance concrete by using a packing model", in Cement and Concrete Research, vol. 24, 1994, pp. 997-1009



1997
SHERBROOKE
FOOTBRIDGE
Progetto:
Bouygues
Produzione:
Ductal
Béton Bolduc



2002
SEOUL
FOOTBRIDGE
Progetto:
Rudy Ricciotti
Produzione:
Bouygues

NORME
AFCG



2005
PONT DU
DIABLE
Progetto:
Rudy Ricciotti
Produzione:
Ductal
Bonna Sabla



2016
NORME
SIA
Norma
svizzera per
le strutture
U-RC



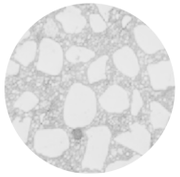
1985
DAVID R. LANKARD
Slurry Infiltred Fiber
Concrete (SIFCON)



2001
BOURG
LES-VALENCE
Primo ponte
per il traffico veicolare



2013
MUCEM
Progetto:
Rudy Ricciotti
Produzione:
Ductal



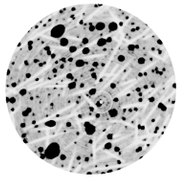
1978
HANSE H. BACHE
Densiefied Sytems with
homogeneously arranged
ultra-fine Particles



1999
CENTRALE DI
CATTENOM
Riqualificazione con
RCP 180 e BSI 150



2008
VILLA NAVARRA
Progetto:
Rudy Ricciotti
Produzione:
Dcutal



1995
RICHARD E CHEVREZV
"Composition of Reactive Powder Concrets", in Cement and Concrete Research, vol. 25, pp. 1501-1511, 1995

1970
1980
1990
2000
2010
2020

THE PATH OF UHPFRC



Levigatura di un *tabletop*.
Immagine scattata presso il Cantiere, foto dell'autrice.

3.3 Modelli attuali di produzione e prefabbricazione e prospettive 4.0

Le industrie di produzione e di prefabbricazione di UHPFRC, sebbene si trovino entrambe in una fase di transizione tra la Terza e la Quarta Rivoluzione Industriale, presentano un approccio diverso sia rispetto ai processi di design, fabbricazione, assemblaggio e distribuzione dei prodotti, sia nella relazione con il cliente.

Le industrie di produzione oscillano tra la definizione di *bulk industries* e *tailored industries*[98]. Nel primo caso, in maniera piuttosto convenzionale, prodotti standardizzati sono venduti attraverso contratti a lungo termine personalizzando cliente per cliente transazioni e distribuzione, con modalità che definiremmo di tarda Seconda, se non fosse che si parla, da un lato, di prodotti ad alto contenuto di tecnologia – nano-tecnologia per la precisione – e, dall'altro, di processi di innovazione di tipo *open* e *collaborative* che, come è noto, si avvalgono di strumenti e metodi provenienti dalla Quarta. Nel secondo caso, avanzando ancora verso l'ultima Rivoluzione, il nucleo centrale del prodotto viene adattato alle esigenze del cliente, arrivando a personalizzare la ricetta dell'ultra-performante – progettazione e produzione della materia – e adoperando, quindi, strategie innovative derivanti dal *customer based management*.

Infatti, la maggior parte delle aziende di produzione, oscillando tra un modello *bulk* e uno *tailored*, realizza varie tipologie di *premix*, venduto in *big bag* da una tonnellata oppure in sacchi da 25 kg, con prestazioni meccaniche calibrate e customizzate a seconda dell'applicazione. Un'ulteriore strategia, adesso piuttosto diffusa, consiste nel realizzare un prodotto cui vanno poi aggiunti inerti sottili reperibili in *loco*: è lo stesso produttore ad adeguare la "ricetta" alle materie prime disponibili in zona.

Per quanto riguarda la composizione vera e propria del *premix*, i cementi utilizzati per gli UHPFRC sono Portland a basso contenuto di alcali, con alta resistenza ai solfati e basso calore di idratazione, estremamente vantaggiosi in quanto richiedono poca acqua e presentano un basso ritiro autogeno. I cementi d'altoforno sono particolarmente idonei per componenti in UHPFRC sottoposti a rischio di fessurazioni da ritiro e da variazioni di temperatura, come pavimentazioni per strade o elementi esposti a sostanze chimiche. Fondamentale nel *premix* è il fumo di silice, avente la funzione di *micro-filler* e contribuendo a un aumento della resistenza.

[98] Si veda la classificazione delle aziende di Lampel e Mintzberg descritta nella nota 128 del paragrafo 2.3, nonchè Lampel, J. e Mintzberg, H., "Customizing Customization", *op. cit.*, 1996.

Dato l'elevato costo, in alcuni *premix* si sostituiscono al fumo di silice *filler* calcarei inerti[99] che, tuttavia, riducono le prestazioni meccaniche in quanto la silice, reagendo più lentamente del Portland, partecipa a una sorta di seconda idratazione del materiale, contribuendo ad aumentarne la resistenza meccanica.

A causa alla sua ampia superficie specifica e alle forze di coesione tra le particelle, il fumo di silice è il principale responsabile nella determinazione del contenuto d'acqua e di super-fluidificante necessari al cambio di stato del calcestruzzo, nonché delle proprietà reologiche della miscela allo stato liquido. L'aggiunta di loppa granulata d'altoforno macinata, in sostituzione di un certo quantitativo di cemento, riduce ulteriormente il bisogno d'acqua e di super-fluidificante, senza intaccare né la resistenza né la consistenza del calcestruzzo. In alternativa, la loppa può essere scambiata con cenere volante, molto efficace grazie alle sue buone proprietà reologiche e a particelle prevalentemente sferiche e amorfe. Tra gli elementi non reagenti a elevata resistenza vi è la polvere di quarzo, utilizzata a granulometria variabile in modo da garantire un *filler effetc*. Fondamentali inoltre, sono gli additivi che, aggiunti al *premix*, possono inibire la corrosione delle fibre metalliche o di eventuali rinforzi, ridurre il ritiro, proteggere il calcestruzzo dalle basse temperature, incrementarne la viscosità.

Dunque, i termini di personalizzazione offerti dalle industrie di produzione si esprimono maggiormente nelle possibilità di variazione del *premix*, cui va aggiunta anche una certa flessibilità nella gestione della relazione con il cliente.

Ben diversa e sicuramente più complessa è la struttura produttiva delle aziende di prefabbricazione, che portano la personalizzazione in tutte le fasi del processo di produzione, dal design alla distribuzione. Si può fare una prima generalizzazione affermando che si tratta o di industrie a catalogo, dove sia linea di produzione che i prodotti sono a standardizzazione segmentata, fornendo cioè un'ampia possibilità di scelta che però rimane generica, oppure di "*almost*" *thin industries*, dove ogni prodotto è unico così come le transazioni, che sono specifiche per ogni cliente. Tuttavia, come si è visto, dovendo obbedire alle regole di una linea produttiva che ha dei forti caratteri di permanenza derivanti dalla tradizione costruttiva, non è possibile arrivare alla pura customizzazione.

Nel caso delle *almost-thin industries*, un'ulteriore distinzione va fatta in base alla tipologia dell'elemento realizzato. Facendo riferimento alle applicazioni per il settore architettonico e di design e tenendo a mente le quattro fasi in cui si può suddividere la produzione – design, fabbricazione, assemblaggio e distribuzione –, è chiaro che vi è una forte differenza, ad esempio, tra la realizzazione di elementi di arredo – maggiormente per esterni – e quella di componenti architettonici.

Naturalmente in entrambi i casi le quattro fasi di produzione saranno altamente personalizzate – con i limiti di cui sopra – sebbene, nel caso dell'arredo, la customizzazione avvenga *una tantum*, ovvero nelle fasi iniziali del processo, facendo sì che il prodotto possa essere inserito in linea sfruttando le economie di scala. Naturalmente può anche accadere che un elemento d'arredo debba essere prodotto in piccolissime serie – meno di 10 pezzi – ma si tratta sempre di casi unici, in cui il vantaggio più che monetario è sul ritorno di immagine. Invece, per le

[99] Vacca, H. *et alii*, "Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete with calcium carbonate as a substitute of cementitious material", in *Proceedings of the 2nd International Interactive Symposium on UHPC*, Albany, 2-5 giugno, 2019.

applicazioni architettoniche o può verificarsi un caso analogo a quello discusso per l'arredo, con la personalizzazione *una tantum*, oppure, può capitare di dover realizzare una "serie" di pezzi unici che richiedono – all'estremo – uno stampo per ogni elemento. Non si può negare infatti che, nonostante la diffusione del *concrete printing*[100], che potrebbe ovviare al problema, le aziende di prefabbricazione lavorano ancora tutte – o quasi – per colatura. La stampa 3D putroppo, al di là di alcuni problemi tecnici che vedremo a breve, offre livelli prestazionali ancora lontani da quelli ottenibili per getto, che ne inibiscono la diffusione.

In sostanza, qualora si debba affrontare la produzione di un progetto architettonico "speciale", è sempre richiesta una ridefinizione continua del sistema produttivo che, nonostante la flessibilità che oramai caratterizza le PMI, causa comunque un allungamento dei tempi di produzione, dovuto sia alla mancanza di ripetizione sia all'assenza di un opportuno periodo di verifica delle operazioni produttive. A ciò si aggiunge una dilatazione dei costi, nonché un aumento della difficoltà di gestione dell'intera linea, costretta a stravolgere la propria *routine*.

Va chiarito che sia per l'arredo che per i progetti d'architettura, è in ogni caso richiesta una riprogettazione finalizzata all'ottimizzazione e della produzione in senso stretto – sostituzione di alcune delle lavorazioni con altre più rapide ed economiche, semplificazione dello stampo (tanto per un abbassamento dei prezzi che per una velocizzazione delle operazioni di scassero, getto e rimontaggio della cassaforma), accorpamento di operazioni analoghe con altri progetti in corso, eventuale riutilizzo di materiale presente in magazzino, etc. etc. – e dell'elemento in sé – spessori e distanze minime per accogliere gli inserti sia di fissaggio che di movimentazione, dimensioni massime dell'elemento in accordo alle condizioni produttive e di stoccaggio.

Oltre che nella gestione della produzione e della relazione con il consumatore, la complessità del panorama produttivo si manifesta anche nella variabilità delle tecniche di prefabbricazione, distinte, in una prima approssimazione, in due momenti: fase di mescolamento e di realizzazione dell'elemento.

L'UHPFRC viene impastato con mescolatori discontinui a doppio asse, mescolatori semplici, *mixer* planetari con spatole extra oppure *mixer* intensivi: il prerequisito fondamentale è un'energia di *mixing* sufficientemente alta in modo da solubilizzare l'alta proporzione di particelle ultrafini.

Esattamente come avviene per i calcestruzzi convenzionali, si inseriscono nel *mixer* prima i materiali secchi e si mescolano da asciutti per tempi che variano dai 30 secondi ai 2 minuti. Dopodiché si aggiunge acqua[101] e super-fluidificante, con tempi di mescolamento che oscillano dai 3 ai 15 minuti. L'aggiunta di fibre, metalliche, in alcool polivinilico, in polipropilene o in vetro, contribuisce a completare il calcestruzzo. Fibre in acciaio ad alta resistenza di diametro di 0,2 mm e lunghezza variabile dai 9 ai 17 mm si sono dimostrate le migliori per applicazioni strutturali. Nel caso di componenti sottoposti a un alto rischio di corrosione è possibile adoperare acciaio inossidabile, laddove siano attese fessurazioni consistenti.

[100] Si intende, questo caso, la totalità delle tecniche di stampa 3D con calcestruzzi.

[101] Come conseguenza del basso contenuto d'acqua, il primo strato superficiale si asciuga molto rapidamente, generando una "pelle" di qualche millimetro che previene la de-areazione dell'UHPFRC e, per contro, ne impedisce qualsiasi altra forma di livellamento. Per evitare l'indurimento del primo strato, è sufficiente coprire la superficie del calcestruzzo con fogli di plastica immediatamente dopo il getto, previo utilizzo di un agente chimico che determina la formazione di un film protettivo.

Risulta fondamentale assicurarsi che la consistenza desiderabile per la lavorabilità sia stabile e che non avvenga un'ulteriore fluidificazione dopo il mescolamento. Le condizioni di getto determinano l'orientamento delle fibre all'interno del conglomerato influenzando, di conseguenza, la resistenza a trazione post-fessurazione. Le fibre, infatti, tendono a posizionarsi parallelamente alla direzione della luce maggiore[102] nonché in base al flusso del getto.

È possibile applicare, poche ore dopo la presa, trattamenti di *curing* a temperature e umidità relativa controllate che incrementano significativamente la durabilità e riducono sia il ritiro da essiccamento che lo scorrimento viscoso. Trattamenti al vapore più tradizionali, applicati subito dopo il getto anticipano i tempi di indurimento e di presa, con benefici minori rispetto ai precedenti[103].

Le tecniche di getto, invece, si dividono sostanzialmente in colatura, a sua volta suddivisa in *table moulding*, *injection moulding*, *pressed moulding*, *static 3D moulding* e *flexible moulding*, e laminazione, affiancate dalle più innovative tecniche dello *shotcrete*, della stampa 3D, a sua volta suddivisa in *contour crafting*, *concrete printing* e *particle-bed printing*[104] e, ancora a livello molto sperimentale, la tecnica del *vacuumatics 3D-formwork system*.

Tra le più semplici tecniche di colatura vi è sicuramente il *table moulding* che consente la realizzazione di elementi a sviluppo superficiale di spessore ridotto, come ad esempio pannelli di facciata e di rivestimento, basi di tavoli, schermature verticali e parapetti. È possibile utilizzare sia casseforme in metallo che in gomma, ottenute tramite controstampo. Per realizzare eventuali forature nell'elemento, si possono usare svuotamenti realizzati con polistirolo resinato, legno, strati di MDF tagliati al laser e sovrapposti a formare un elemento tridimensionale, forme in legno fresato etc. etc. In questo caso, la superficie non a contatto con il cassero, ovvero quella di getto, se a faccia-vista, andrà trattata in post-produzione.

L'*injection moulding* è utilizzata per la realizzazione di elementi tridimensionali complessi, che richiedono ovunque una superficie finita. In questo caso la cassaforma metallica è completamente chiusa e opportunamente rinforzata per sopportare la pressione sviluppata dal getto di calcestruzzo, colato a pressione attraverso dei fori in cui sono inserite delle apposite cannule. L'ingresso del materiale dovrà essere consentito da diversi punti, onde evitare un eccessivo scorrimento dell'UHPFRC che potrebbe causare un disomogeneo posizionamento delle fibre e quindi ridotte prestazioni strutturali.

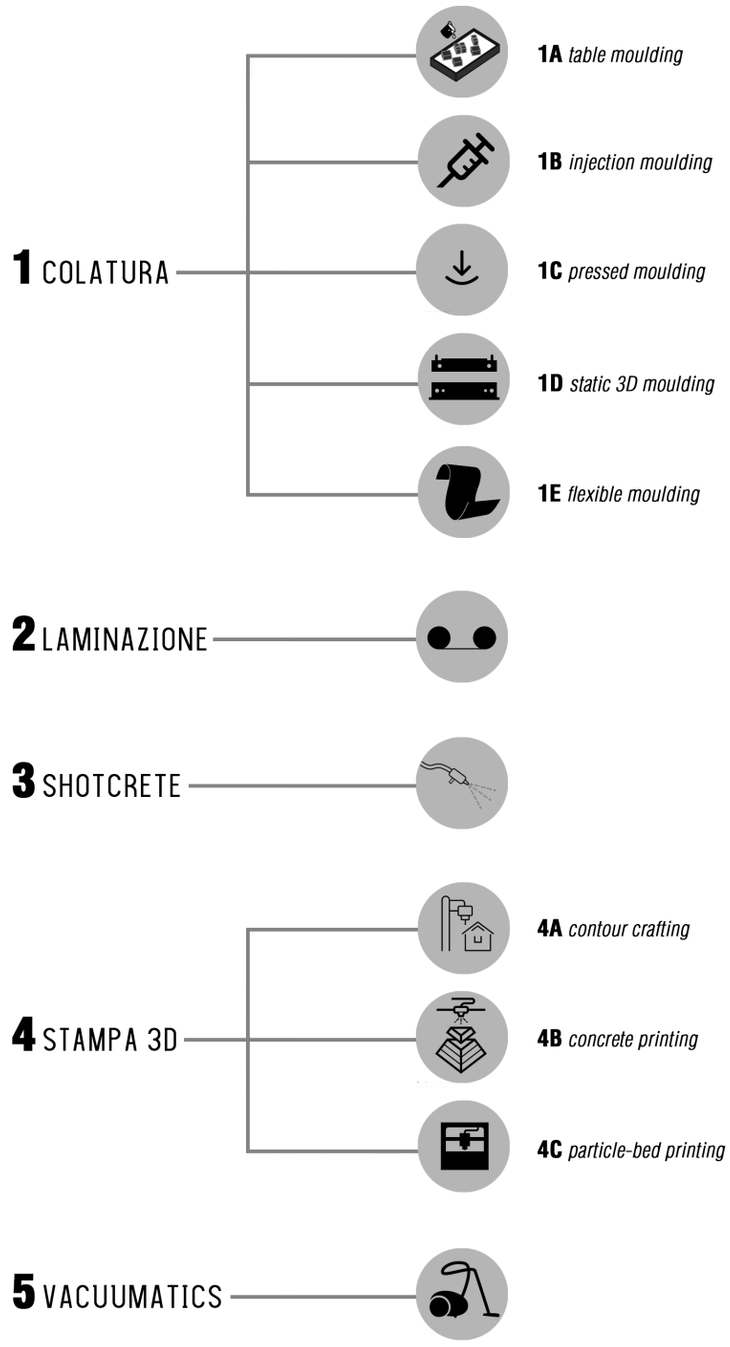
Questa tecnica è stata adoperata per la realizzazione della copertura della nuova stazione TGV di Montpellier (inaugurata nel 2018), su progetto di Marc Mimram Architecture et Ingégnerie. La copertura è stata realizzata con elementi monolitici autoportanti – "palme" – in UHPFRC di 17,5 metri.

[102] Vitek *et alii*, "Precast structural elements made of UHPC", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, UHPFRC 2017, Montpellier, 2-4 marzo 2017, pp. 115-124.

[103] Si veda Resplendino, J., "Introduction: what is a UHPFRC?", in Resplendino, J. e Toutlemonde, F. (a cura di), *Designing and Building with UHPFRC. State-of-the-Art and Development*, ISTE, London and John Wiley & Sons, Hoboken, 2011, pp. 3-14; Resplendino, J. e Toutlemonde, F., "The UHPFRC revolution in structural design and construction", in *Proceedings of RILEM, fib, AFGC Int. Symposium on Ultra-high Performance Fibre-Reinforced Concrete*, UHPFRC 2013, Marsiglia, 1-3 ottobre 2013.

[104] La tecnica del D-shape fa parte della categoria delle tecniche del *binder getting*, basate sull'iniezione di un legate all'interno di stradi di materiale polveroso. Cfr. Wu, P. et alii, "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry", in *Automation in Construction*, vol. 68, 2016, pp. 21-31.

TECNICHE PRODUTTIVE



La realizzazione delle casseforme, a opera di Méditerranée Préfabrication, ha garantito una tolleranza di soli 5 mm, scesi a 2 mm nei punti di carico, nonché il non semplice posizionamento dei cavi post-tesi, poi messi in tensione a tre settimane dal getto. Inoltre, ciascuna delle palme includeva il posizionamento di 120 piccoli elementi in vetro per creare gli effetti di luce previsti dal progetto. In questo caso, data la significativa dimensione degli elementi realizzati, è stato modificato, in accordo con i produttori (Eifface – BSI® con fibre metalliche) il *premix* in modo da aumentare i tempi di lavorabilità[105].

La *pressed moulding* invece viene utilizzata per la realizzazione di elementi a sezione variabile, come ad esempio elementi di facciata articolati che presentano svuotamenti a perdere. Quest'ultimi, di solito in polistirolo modellato mediante taglio a caldo, vengono pressati all'interno della cassaforma base quando l'UHPFRC è ancora allo stato liquido in modo da spostare il materiale nei punti desiderati. In questo caso è molto importante fissare lo svuotamento in modo che possa mantenere la posizione. Tale tecnica è stata adoperata per la realizzazione della facciata del Budin Daycare Center del 2012 a Parigi, su progetto di Emmanuel Combarel e Dominique Marrec. Realizzati con Ductal® con fibre organiche dall'azienda di prefabbricazione il Cantiere, i 68 moduli della facciata presentano già annegato all'interno un pannello in polistirolo con funzione di isolamento termico.

La *static 3D moulding* include genericamente le casseforme costituite da più elementi complessi realizzati in materiali differenti. È solitamente utilizzata per la realizzazione di pezzi tridimensionali particolarmente articolati con diverse tipologie di finitura. Può includere parti in gomma, in metallo, inserti, svuotamenti a perdere, etc. etc. Non di rado per la realizzazione di questi pezzi viene utilizzato un controstampo stampato in 3D, successivamente lavorato a mano per ovviare a eventuali difetti. Questa tecnica è stata adoperata per la realizzazione della nuova scala – in Ductal® con fibre organiche – della Somerset House a Londra, su progetto di Eva Jiricna. I vari elementi, prodotti da il Cantiere, sono stati realizzati con una cassaforma in metallo multi-parte in modo da agevolare lo scassero dell'elemento. In questi casi, è sempre richiesta una lavorazione successiva per eliminare sul pezzo le linee di giunzione dello stampo, fedelmente riprodotte dal materiale.

Rientrano in questa categoria anche le ricerche svolte negli ultimi anni dall'Istituto per il Design Strutturale (ITE) e dall'Istituto per i Materiali da Costruzione – entrambi parte dell'Università TU Braunschweig – che, sulla base del lavoro di Osterle *et alii*[106], hanno sviluppato un sistema di casseforme per UHPC[107] realizzate a partire da blocchi in cera[108]

[105] Le 105 palme realizzate sono state posizionate con l'ausilio di una gru motorizzata in un'unica operazione di appoggio notturna, per non interferire con le traiettorie aeree dell'aeroporto di Montpellier. Cfr. Mimram, M. *et alii*, "Roofing of Montpellier – South of France TGV station", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, UHPFRC 2017, Montpellier, 2-4 marzo 2017, pp. 837-856.

[106] Osterle, S. *et alii*, "Zero Waste Free-Form Formwork", in *Proceedings of ICFF 2012*, University of Bath UK, 2012.

[107] È stato utilizzato Nanodur®, di Dyckerhoff, del gruppo di BuzziUnicem.

[108] Sono state impiegate diverse tipologie di cera, ma alle fine le più indicate sono la paraffina e la montana. Si veda Mainka, J. *et alii*, "Non-Waste wax formwork-technology: Innovative precision formwork for concrete members made of recyclable industrial waxes", in Bögle, A. e Grohmann, M. (a cura di), *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017*, Amburgo, 22-25 settembre 2017, Amburgo; Mainka, J. *et alii*, "A novel precise formwork-technology based onCNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements", in *Proceedings of the International Society Of Flexible Formwork (ISOFF) Symposium 2015*, Amsterdam, 16-17 agosto 2015.

COLATURA

1A TABLE MOULDING

DESCRIZIONE:
Cassaforma piana in metallo o in gomma, con eventuali forature in polistirolo resinato, legno, strati di MDF tagliati al laser e sovrapposti a formare un elemento tridimensionale, forme in legno fresato etc. etc.

PROGETTO:
Annalaura Spalla, *Muro della Costituzione*, Roma, 2011

MANIFATTURA:
il Cantiere



1B INJECTION MOULDING

DESCRIZIONE:
Cassaforma metallica completamente chiusa in cui il calcestruzzo viene colato a pressione attraverso dei fori in cui sono inserite delle apposite cannule

PROGETTO:
Marc Mimram Architecture et Ingégnerie, *TGV Station*, Montpellier, 2017

MANIFATTURA:
Bonna Sabla



1C PRESSED MOULDING

DESCRIZIONE:
Cassaforma per la realizzazione di elementi a sezione variabile, con svuotamenti a perdere in polistirolo modellato mediante taglio a caldo e pressati all'interno della cassaforma quando l'UHPFRC è ancora allo stato liquido

PROGETTO:
Emmanuel Combarel e Dominique Marrec, *Budin Daycare Center*, Parigi, 2012

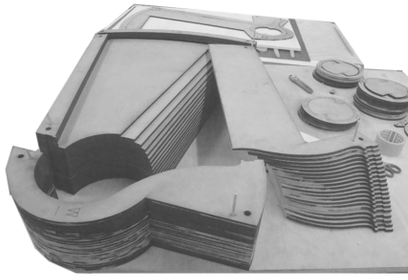
MANIFATTURA:
il Cantiere



1D STATIC 3D MOULDING

DESCRIZIONE:
Casseforme costituite da più elementi complessi realizzati in materiali differenti. È solitamente utilizzata per la realizzazione di pezzi tridimensionali particolarmente articolati con diverse tipologie di finitura

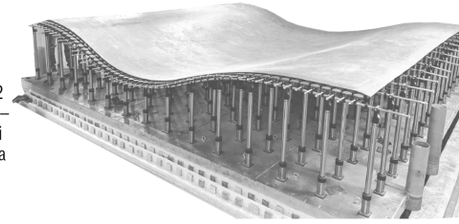
PROGETTO:
Salomé Jammet, Giulia Napolitano, Enrico Pizzuti, Rossella Scognamiglio, Barbara Tartarone, Spiral Stair, realizzata nell'ambito del Workshop Internazionale Technological and structural design with high performance concrete, ed. 2015 (Unina DiArc e ENSA Paris Belleville)



1E FLEXIBLE MOULDING

DESCRIZIONE:
Casseforme mobili e modificabili

PROGETTO:
L'adaptive mould di ADAPA consiste in una membrana flessibile in silicone di 2 mm posta in aderenza tramite pressione sottovuoto a una seconda più spessa – dai 15 ai 20 mm – in silicone ferromagnetico che, mediante una serie di alloggi cavi, viene fissata su sistema formato da pistoni magnetici movibili. Variando la posizione dei pistoni è possibile ottenere una doppia curvatura



lavorati con *CNC-milling machine* (a 3 e 5 assi)[109]. Oltre ai vantaggi derivanti dal fatto che la cera può essere completamente riciclata per un'applicazione successiva, essa consente un'ottima resa del dettaglio[110]. Tuttavia, possono sorgere problemi durante il processo di idratazione del calcestruzzo che, com'è noto, rilascia energia sotto forma di calore. È necessario quindi adoperare cere che abbiano una buona resistenza meccanica anche con l'aumentare della temperatura, che all'interno del materiale può raggiungere anche gli 80° C. Per questa ragione resta da capire l'efficacia della tecnica per pezzi di grandi dimensioni aventi inoltre solo una piccola superficie esposta all'aria, rendendo così più ostica la dispersione del calore di idratazione.

Nelle *flexible mould* rientrano tutte le casseforme mobili e modificabili. A tal proposito vale la pena citare uno dei progetti realizzati – con una vera e propria *maker attitude* – nell'ambito del Workshop internazionale *Progettazione Tecnologica e Strutturale con calcestruzzi ad altissime prestazioni* (edizione 2016) organizzato dal Dipartimento di Architettura dell'Università Federico II di Napoli ed ENSA Paris Belleville[111]. Il progetto, su design di Ilaria Amato, Antonia Angelone, Arianne Dehais, Sylvain Totaro e Jenny Wahlgren, esplora il principio della resistenza per forma, realizzando dei rombi tridimensionali piegati lungo la direttrice principale che, assemblati, costituiscono una struttura cilindrica. L'angolo di piegatura è considerato variabile all'interno del progetto e richiede dunque una cassaforma in grado di essere facilmente modificabile. È stata quindi utilizzata una tasca di silicone fissata su una sottostruttura in legno con una cerniera al centro. Dopo aver gettato l'UHPFRC in piano, è stato messo in forma avvicinando, mediante un tenditore, le due parti della sottostruttura in legno che, di conseguenza, si piegava in corrispondenza della cerniera.

Sebbene si possa considerare un successo in contesto accademico, questa tecnica di realizzazione presenta diversi problemi, quali ad esempio lo scivolamento del materiale verso le estremità della sezione a "V" capovolta, nonché la risalita delle bollicine d'aria formatesi durante il mescolamento verso l'alto, che creano la tipica pelle a "buccia d'arancia".

Il problema della risalita d'aria è piuttosto frequente negli stampi chiusi o dalle forme complesse, in quanto se non ne è consentita la fuoriuscita crea delle zone fragili. Si consiglia quindi sia la realizzazione di sfiati in prossimità dei punti in cui l'aria potrebbe incastrarsi, sia di lasciare il materiale a riposare qualche minuto dopo il mescolamento (due al massimo per non perdere di lavorabilità e solo qualche decina di secondi nei mesi estivi) per consentirne la de-areazione.

[109] In realtà, l'utilizzo della cera per la realizzazione di stampi non è una novità, tuttavia in passato era necessario l'utilizzo di un controstampo. Inoltre la cera ritira durante l'asciugatura, perdendo in rifinitezza.

[110] Per testare la capacità della tecnica di riprodurre dettagli architettonici complessi, Mainka *et alii* hanno settato la *milling machine* a diversi livelli di precisione, constatando che con il valore di 0,1 mm la superficie resa è completamente liscia, anche se il risultato è buono anche a 0,5 mm, con una significativa riduzione dei tempi di lavorazione. Per verificare la rispondenza del pezzo al modello digitale di riferimento, l'elemento in UHPC è stata scannerizzato con un 3D scanner di tipo ASOS. I dati così acquisiti sono stati utilizzati per condurre un'analisi volumetrica e morfologica cha ha dimostrato una riproduzione del dettaglio fino al decimo di millimetro. Cfr. Mainka, J. *et alii*, "Non-Waste wax formwork-technology…", *op. cit.*, 2017.

[111] Si veda Fabbri, R. *et alii*, "Exploring UHPFRC Possibilities", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, UHPFRC 2017, Montpellier, 2-4 marzo 2017, pp. 905-914.

Rientra ancora nella categoria delle *flexible mould*, il sistema di stampi flessibili Rundflex®, sviluppato dall'azienda tedesca di prefabbricazione PERI, ideale per la costruzione di elementi murari a singola curvatura, con raggio minimo pari a un metro. Partendo dal centro del modulo e poi spostandosi verso l'esterno della cassaforma è possibile adattarne la curvatura con la presenza di soli due addetti[112]. Inizialmente utilizzato solo per edifici industriali o di servizio, recentemente è stato impiegato per applicazioni architettoniche, tra cui il Chan Center di Vancouver, Canada, su progetto di Bing Thom Architects. Inoltre, PERI ha sviluppato un *software* per consentire agli architetti di ottimizzare facilmente la struttura in accordo a una ragionevole pannellizzazione.

Partendo dallo stesso concetto di stampo flessibile, la danese Adapa, a differenza di Rundflex®, è in grado di gestire pannelli di facciata a doppia curvatura. L'*adaptive mould* consiste in una membrana flessibile in silicone di 2 mm posta in aderenza tramite pressione sottovuoto a una seconda più spessa – dai 15 ai 20 mm – in silicone ferromagnetico che, mediante una serie di alloggi cavi, viene fissata su un sistema formato da pistoni magnetici movibili. Variando la posizione dei pistoni è possibile ottenere la doppia curvatura[113]. Dopo aver gettato il calcestruzzo[114] sulla membrana piana, si aspetta un certo tempo di *curing* prima di procedere alla messa in forma. Per ottenere buoni risultati è tuttavia necessario un preciso controllo della viscosità del materiale, dal momento in cui l'idratazione del cemento è sensibile ai più piccoli cambiamenti ambientali.

A questa tecnica innovativa, che potenzialmente condurrebbe a una notevole semplificazione dei processi di realizzazione di complessi elementi tridimensionali, se ne aggiungono altre provenienti dalle sperimentazioni condotte all'ETH di Zurigo. Partendo dalla tradizionale tecnica della cassaforma scorrevole[115], ampiamente utilizzata per la realizzazione di strutture a grande sviluppo verticale[116] come grattacieli, silos e fondazioni in ambiente marino che beneficiano particolarmente di una rapida costruzione e dell'assenza di giunti freddi, è stato elaborato lo Smart Dynamic Casting (SDC)[117].

[112] La curvatura si regola con chiavi a cricchetto. Sono inoltre disponibili dime per una regolazione più agevole. Si veda PERI, Rundflex, https://www.peri.it/prodotti/casseforme/rundflex.html.

[113] Si veda Adapa, https://adapa.dk/.

[114] Il sistema è compatibile con materiali compositi, termoplastiche, calcestruzzi – autocompattanti e ultra-performanti – e vetro. Adapa, *Materials*, https://adapa.dk/materials/.

[115] Lo *slipforming* fu inventato nel 1899 dall'ingegnere Charles F. Haglin. È un processo di produzione in continuo: il calcestruzzo viene gettato all'interno di una cassaforma di altezza inferiore rispetto all'intero elemento da realizzare e, gradualmente, viene sollevata in verticale con una velocità coerente con quella di idratazione del calcestruzzo. Nel 1944 l'invenzione dei pistoni idraulici consentì l'automatizzazione del processo (Cfr. Lloret, E. *et alii*, "Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication", in *Computer-Aided Design*, vol. 60, pag. 43). È abbastanza frequente la formazione di micro-fessurazioni superficiali, dovute principalmente alle forze di adesione tra materiale e pareti verticali della cassaforma. Cfr. Craipeau, T. *et alii*, "Evolution of Concrete/Formwork Interface in Slipforming Process", in Wangler, T. e Flatt, J. R. (a cura di), *Proceedings of the First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*, Zurigo, 10-12 settembre 2018, pp. 12-23.

[116] Dati gli elevati costi di *setting* iniziale, la tecnica risulta conveniente solo per strutture oltre i 10 metri. Lloret, E. *et alii*, "Complex concrete structures…", *op. cit.*, pag. 43.

[117] Lo SDC nasce da un progetto di ricerca interdisciplinare guidato dai Prof. Flatt, Prof. Hermann, Prof. Gramazio e Prof. Kohler all'ETH di Zurigo. Si veda Lloret, E. *et alii*, "Complex concrete structures…", *op. cit.*, pp. 43-49.

Nello SDC viene fissata a un braccio robotico a sei assi una cassaforma scorrevole significativamente più piccola della struttura che si andrà a realizzare[118]: man mano che si getta automaticamente il calcestruzzo, la cassaforma sale gradualmente creando così la forma desiderata. L'automazione del processo consente un controllo preciso della velocità e dello spostamento dello stampo nello spazio, determinati dalle condizioni di presa e indurimento del calcestruzzo[119] e messi in relazione con il braccio robotico tramite un *software* specifico. Per tale motivo, le condizioni del materiale devono essere monitorate per tutto il processo, in modo da integrarne dinamicamente le caratteristiche per far sì che rimanga autoportante e lavorabile durante tutta la produzione[120]. La complessità della tecnica quindi consiste nel trovare il giusto equilibrio tra la velocità di spostamento – da 1,2 a 2,4 centimetri al minuto – della cassaforma e il tasso di idratazione del calcestruzzo, influenzato tanto dalla propria composizione che dalle condizioni ambientali[121].

Il progetto *SmartCast*[122] nasce proprio con l'obiettivo di rispondere a problematiche di questo tipo, sviluppando un calcestruzzo di cui è possibile controllare attivamente reologia e indurimento, mediante il principio dell'Active Stiffening Control (ASC) e dell'Active Rheology Control (ARC), che si avvalgono di campi e particelle magnetici. Nell'ASC, ad esempio, un impasto responsivo garantisce un allineamento al campo magnetico, formando così una struttura più rigida, mentre l'utilizzo di particelle magnetiche si è dimostrato in grado di aumentare la resistenza al taglio della pasta cementizia. Ancora, una combinazione dei due metodi consente un arresto del flusso del materiale.

Le prospettive di sviluppo dell'ARC invece, sempre avvalendosi delle proprietà dei campi magnetici, prefigurano possibilità di controllo delle sollecitazioni di taglio con impatti sullo scorrimento del materiale allo stato liquido[123].

Oltre alle tecniche di colatura, molto diffusa è anche la laminazione, sebbene si utilizzi prevalentemente per la realizzazione di elementi bidimensionali, solitamente additivati con *layer* di fibre di vetro. Il calcestruzzo viene gettato in lastre, compattate e messe e in forma dopo un parziale indurimento. Sebbene la tecnica funzioni molto bene per la realizzazione di elementi a sviluppo monodirezionale, caso in cui risulta anche il processo più economico, la qualità estetica del prodotto finito non è sempre eccellente.

[118] *Ivi*, pag. 41.
[119] Per la ricerca in esame è stato sviluppato un apposito calcestruzzo denominato Formwork Free Concrete. Per dettagli sul materiale si veda Shahab, A. *et alii*, "Smart dynamic casting or how to exploit the liquid to solid transition in cementitious materials", in P*roceedings of the 1st international conference on rheology and processing of construction materials and of the 7th international conference on self-compacting concrete*, Parigi, 2013.
[120] *Ivi*, pag. 43. In particolare l'SDC richiede al calcestruzzo tre requisiti fondamentali: un tempo aperto molto lungo, riattivabile mediante un accelerante; deve essere pompabile; deve essere auto-compattante e abbastanza fluido da riempire una cassaforma, ma senza segregazione (Szabo, A. *et alii*, "Adapting Smart Dynamic Casting to Thin Folded Geometries", in Wangler, T. e Flatt, J. R. (a cura di), *Proceedings of the First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*, Zurigo, 10-12 settembre 2018, pag. 82).
[121] *Ivi*, pag. 47.
[122] Si veda De Shutter, G., "Smart casting of concrete structures by acrive control of rheology", in AA.VV., *Smartcast. ERC Advanced Grant Progect*, European Research Council, 2016-2021.
[123] De Shutter, G. *et alii*, "Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials", in *Cement and Concrete Research*, vol. 112, 2018, pp. 26-27.

SHOTCRETE/VACUUMATICS

3 SHOTCRETE

DESCRIZIONE:
La tecnica dello shotcrete consiste nello spruzzare, con l'ausilio di aria compressa, il calcestruzzo mescolato alle fibre su un supporto, senza che sia necessario l'utilizzo di casseforme pesanti

PROGETTO:
Emmanuel Combarel e Dominique Marrec, *Campus EDF*, Parigi, 2017

MANIFATTURA:
Betsinor



5 VACUUMATICS

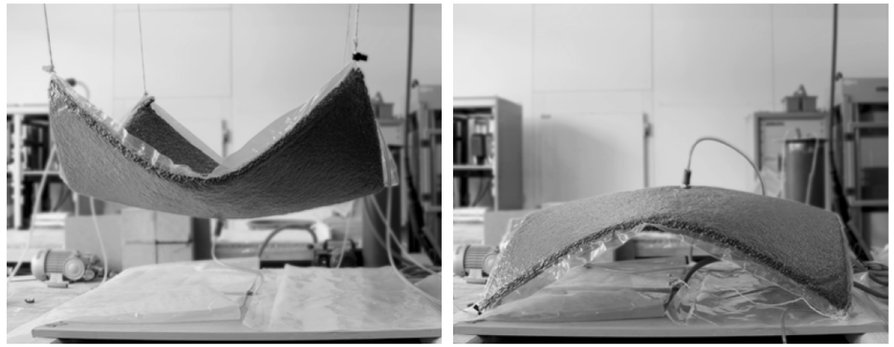
DESCRIZIONE:
Tecnica che sfrutta il principio del sottovuoto: riempita una membrana del materiale che si desidera plasmare, si applica un certo livello di pressione atmosferica che causa una perfetta adesione dei due componenti. Dopo aver messo il materiale in forma, si porta il sottovuoto al suo valore massimo e si attende l'indurimento

PROGETTO:
"Vacuumatics: 3D Formwork Systems" deriva da una ricerca condotta da Frank Huijben all'Eindhoven University of Technology (TU/e)



0% vacuum

100% vacuum



messa in forma

vacuum

Le immagini del vacuumatics sono tratte da Huijben, F., *Vacuumatics: 3D Formwork system*, Tesi di Dottorato, Eindhoven University of Technology, 2014.

Tra le tecniche più innovative sta conoscendo buona diffusione anche lo *shotcrete*, utilizzato più che altro per la riqualificazione di tunnel e canali sotterranei in metallo, il cui rivestimento è solitamente molto complesso. La tecnica dello *shotcrete*[124] consiste nello spruzzare[125], con l'ausilio di aria compressa, il calcestruzzo mescolato alle fibre su un supporto, senza che sia necessario l'utilizzo di casseforme pesanti. Le difficoltà maggiori ancora una volta si incontrano nella definizione di un *mix* umido compatibile con il processo spraiato, per cui vanno considerati i seguenti parametri: una tensione di snervamento superiore ai 100 Pa[126], che garantisca l'adesione della malta alla superficie verticale senza scorrimenti, e un comporamento *rheo-thinning*, ovvero una riduzione della viscosità del materiale – che generalmente deve essere inferiore a 23 Pa al secondo – con l'incremento della velocità di taglio. Tale proprietà risulta fondamentale in quanto è necessario che la malta riesca a muoversi attorno alle fibre per far sì che ci sia una migliore aderenza[127]. In ambito architettonico, la tecnica è stata applicata dall'azienda di prefabbricazione francese Betsinor per la produzione dei pannelli di facciata in Ductal® di uno degli edifici del Campus EDF, vicino Parigi, su progetto di Emmanuel Combarel e Dominique Marrec.

Nonostante le molteplici tecniche innovative presentate, quella che occupa un posto di rilievo è sicuramente la stampa 3D, che ha indubbiamente il maggiore potenziale di crescita. Tuttavia, la prima difficoltà che si incontra è relativa proprio al calcestruzzo la cui formula deve essere adattata in base al processo adoperato. Per essere stampabile infatti, il calcestruzzo deve avere dei requisiti ben precisi: estrudibilità, costruibilità, stabilità e rigidezza, fondamentale affinchè non vi siano crolli in fase di produzione[128].

Il primo tipo, elaborato da Behrokh Khoshnevis[129], è il *contour crafting* (CC)[130], ovvero una tecnica di prefabbricazione automatizzata che, mediante una sorta di carroponte mobile,

[124] Si veda Bernardi, S. e Trucy, L., "Sprayed UHPC with glass fibers for 3D panels", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 marzo 2017, pp. 145-152; Trucy, L. *et alii*, "Ultra High Performance Shotcrete: yes we can!", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 marzo 2017, pp. 153-161.

[125] Le pompe utilizzate per lo spruzzo sono del tipo a pistone, attivate da cilindri idraulici. Al livello dell'ugello di solito arrivano due condotti, uno per il prodotto e un altro per l'aria che, tuttavia, può passare anche da entrambi. Cfr. Trucy, L. *et alii*, "Ultra High Performance Shotcrete…", *op. cit.*, 2017, pag. 156.

[126] A differenza dei calcestruzzi da *shotcrete*, i materiali autolivellanti hanno solitamente una tensione di snervamento molto bassa. Cfr. Trucy, L. *et alii*, "Ultra High Performance Shotcrete…", *op. cit.*, 2017, pag. 154.

[127] Bernardi, S. e Trucy, L., "Sprayed UHPC…", *op. cit.*, 2017, pag. 146.

[128] Cfr. Wu, P. *et alii*, "A critical review of the use of 3-D printing...", *op. cit.*, 2016, pag. 27.

[129] Behrokh Khoshnevis, professore di Ingegneria all'University of Southern California, è anche il CEO della Contour Crafting Corporation, un'azienda «*with the mission to commercialize disruptive construction technologies*». Oltre al *contour crafting*, la compagnia ha sviluppato un'altra tecnologia di stampa 3D alla grande scala, la Selective Separation Shaping: dopo aver depositato singoli strati di polvere di metallo, si nebulizza lungo la superficie esterna dell'elemento una soluzione chimica in grado di inibire la fusione delle parti trattate durante la successiva fusione. Tale tecnica è praticamente opposta alla Selective Laser Sintering, dove si sinterizza l'oggetto mediante un raggio laser. Si veda Contour Crafting, *Home*, http://contourcrafting.com/.

[130] Khoshnevis definisce così la tecnica: «*Contour Crafting in an additive fabrication technology that uses computer control to exploit the superior surface-forming capability to troweling to create smooth and accurate planar and free-form surfaces*»(cfr. Khoshnevis, B., "Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies", in *Journal of Automation in Construction*, vol. 13, 2004, pag. 6). Si veda anche Khoshnevis, B. e Hwang, D., "Contour crafting – a mega scale fabrication technology", in *Journal of Industrial and Manufacturing Systems Engineering*, vol. 6, 2004, pp. 221-251.

prevede la sovrapposizione di strati di circa 13 mm di spessore – depositati contro un elemento metallico a forma di "L" in modo da avere una superficie liscia – particolarmente indicata per la realizzazione di piccole strutture o sub-componenti. Il processo di estrusione realizza solo il contorno esterno dell'elemento che può essere successivamente riempito con calcestruzzo o materiali analoghi.

Tra i vantaggi della tecnica vi è sicuramente la flessibilità progettuale, cui si aggiunge anche la possibilità di utilizzare diverse tipologie di materiali, sia per il "contorno" che per il suo riempimento. Nell'ottica dell'automazione del processo costruttivo, Khoshnevis suggerisce di realizzare, sfruttando il carroponte mobile, moltissime lavorazioni, prima fra tutte la realizzazione degli impianti, sia idrici che elettrici, seguita dalla pavimentazione, pitturazione etc. etc. Khoshnevis si pone, dunque, obiettivi molto ambiziosi, come tra l'altro dichiara sul sito della Countour Crafting Corporation, da lui fondata: «*CC Corp is initially focusing its efforts on transforming and revolutionizing home-building. We envision that when CC is fully developed it could enable the building of a house in as little as few hours and at far lower costs than traditional methods. The Company's business plan is to initially leverage the CC technology to support building of low-cost and emergency housing projects in various areas of the world, including in developing countries*»[131].

Come il *contour crafting*, anche il *concrete printing*[132] prevede l'estrusione di una malta cementizia strato per strato (dai 4 a 6 mm di spessore), sebbene non sia previsto, come nel caso precedente, l'utilizzo di contrasto metallico per garantire una superficie liscia. È un processo che ha, quindi, una risoluzione inferiore rispetto a quella del *countour crafting* anche se, di contro, ha un maggiore controllo delle geometrie esterne e interne[133]. L'assenza del contrasto metallico assiema alla stampa di *layer* aventi lo stesso spessore, aumenta di molto i tempi di realizzazione, soprattutto nel caso di elementi curvi che, inoltre, perdono in risoluzione a causa del cosiddetto "*staircase-effect*", ovvero l'effetto seghettato che ancora caratterizza gli elementi stampati[134].

Entrambe le tecniche di stampa 3D descritte devono confrontarsi tanto con problemi attinenti al ritiro che al comportamento strutturale. Mentre nel caso del ritiro, l'assenza della cassaforma causa un aumento della velocità di evaporazione dell'acqua, a sua volta responsabile di un probabile aumento del ritiro da essiccazione, la struttura a *layer* sovrapposti determina un comportamento anisotropo, dal momento in cui è possibile che si formino dei vuoti tra i diversi strati di calcestruzzo, riducendone così la capacità portante. Ciò risulta particolarmente rilevante, in quanto sia la normativa per il calcolo strutturale che quella per la valutazione della durabilità si basano sull'assunto che il materiale sia omogeneo.

[131] Contour Crafting, *Home*, http://contourcrafting.com/.

[132] Il *concrete printing*, originarimante noto come *freeform construction*, nasce da una ricerca condotta all'Università di Loughborough nel 2007. Si veda, Buswell, R. A. *et alii*, "Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction", in *Automation in Construction,* vol. 16, 2007, pp. 224-231.

[133] Perkins, I. e Skitmore, M., "Three-dimensional printing in the construction industry: a review", in *International Journal of Construction Management*, vol. 15, 2015, pag. 3.

[134] Cfr. Lim, S. *et alii*, "Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components", in *Additive manufacturing*, vol. 12, 2016, pp. 216-230. Gli autori affermano che una delle possibili strategie per ovviare allo "*staircase-effect*" è migliorare i percorsi di stampa, trasformandoli da bidimensionali a tridimensionali e tenendo l'ugello sempre perpendicolare al piano di stampa.

Risulta perciò necessaria da un lato sia l'adozione di nuove metodologie per il calcolo di strutture stratificate, in cui l'interfaccia tra i singoli strati assume, a questo punto, un'importanza centrale, sia la ridefinizione dei convenzionali metodi di verifica prestazionale del materiale, in quanto, ad esempio, il comportamento meccanico non è più correttamente restituito dai classici campioni cubici o cilindrici, e dall'altro, un completo ripensamento degli elementi di rinforzo, non più implementabili in maniera tradizionale[135].

Tanto al ritiro quanto alla questione del rinforzo, si potrebbe rispondere con l'aggiunta di fibre all'impasto, utilizzando, quindi UHPFRC, che presentano anche bassi valori di ritiro da essiccamento. Tuttavia rimane comunque il problema dell'aggiunta di rinforzi, ancora necessari dal momento che le fibre non sono in grado di sostituire, ad esempio, quelli lineari verticali, o di cavi per il pre-stress.

A partire da questi presupposti, è possibile distinguere diversi approcci più o meno innovativi per risolvere la questione dei rinforzi. Khoshnevis propone l'utilizzo di un braccio robotico, integrabile all'interno del carroponte già utilizzato per la stampa vera e propria, che posiziona e connette dinamicamente il rinforzo man mano che la stampa avanza[136]. Ancora, l'Eindhoven University of Technology ha avviato un progetto di ricerca basato sull'inclusione all'interno del *layer* di calcestruzzo di un rinforzo sotto forma di filamento[137] che ha già dimostrato la sua efficacia nei primi test condotti, rivelandosi anche idoneo all'utilizzo delle convenzionali metodologie di calcolo per il calcestruzzo armato[138].

L'ETH di Zurigo, invece, con la tecnologia del Mesh Mold[139], automatizza il rinforzo anziché il calcestruzzo, proponendone uno sottile automaticamente fabbricato piegando, tagliando e assemblando in *situ* barre convenzionali – diametro di 4,5 e 6 mm – a formare una *mesh* estremamente densa, che fa anche da cassero a un calcestruzzo – anche un fibrorinforzato – specificatamente progettato affinché non fuoriesca dalla "cassaforma". Lo strato più esterno viene poi spraiato[140].

All'Università Federico II di Napoli, Domenico Asprone *et alii*[141] hanno realizzato due differenti travi stampate in 3D con il rinforzo posizionato esternamente, evitando così qualsiasi interferenza con il processo di stampa. Le travi, topologicamente ottimizzate in base alle *performance* richieste, sono suddivise in segmenti poi assemblati proprio tramite il rinforzo, ancorato affondando appositi tiranti all'interno di alloggi riempiti con malta cementizia ad alte prestazioni.

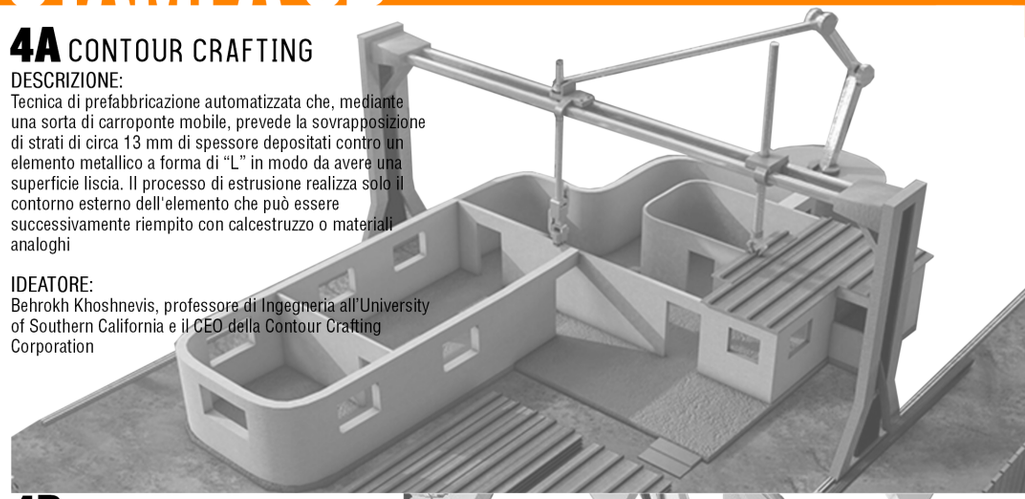
[135] De Shutter, G. *et alii*, "Vision of 3D printing...", *op. cit.*, 2018, pp. 27-28.
[136] Khoshnevis, B. e Hwang, D., "Contour crafting...", *op. cit.*, 2004, pp. 221-251.
[137] Si veda Bos, F. *et alii*, "Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D printing", in *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, 2016, pp. 209-225.-
[138] Bos, F. *et alii*, "Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete", in *Materials*, vol. 10, 2017. Gli autori hanno inoltre effettuato dei test di *pull-out* dei cavi che hanno dimostrato come il legame tra rinforzo e calcestruzzo sia ancora fino a 3 volte superiore nel caso del calcestruzzo gettato per colatura.
[139] Hack, N. e Lauer, W. V., "Mesh-mould: robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork", in *Architectural Design*, vol. 84, 2014, pp. 44-53.
[140] Si veda anche Asprone, D. *et alii*, "Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete", in *Cement and Concrete research*, vol. 112, 2018, pag. 114.
[141] Asprone, D. *et alii*, "3D printing of reinforced concrete elements: technology and design approach", in *Construction and Building Materials*, vol. 165, 2018.

STAMPA 3D

4A CONTOUR CRAFTING

DESCRIZIONE:
Tecnica di prefabbricazione automatizzata che, mediante una sorta di carroponte mobile, prevede la sovrapposizione di strati di circa 13 mm di spessore depositati contro un elemento metallico a forma di "L" in modo da avere una superficie liscia. Il processo di estrusione realizza solo il contorno esterno dell'elemento che può essere successivamente riempito con calcestruzzo o materiali analoghi

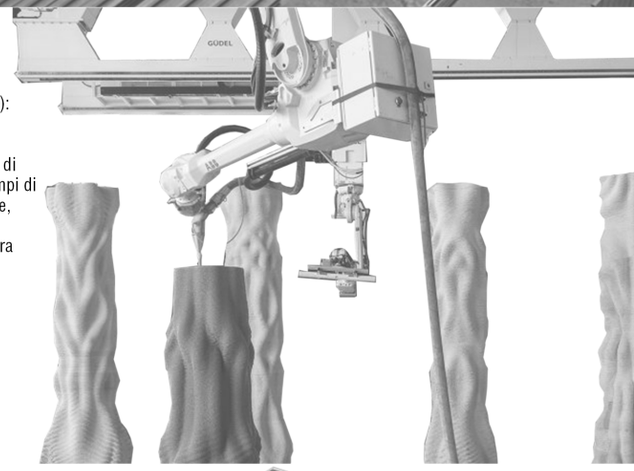
IDEATORE:
Behrokh Khoshnevis, professore di Ingegneria all'University of Southern California e il CEO della Contour Crafting Corporation



4B CONCRETE PRINTING

DESCRIZIONE:
Il *concrete printing* prevede l'estrusione di una malta cementizia strato per strato (dai 4 a 6 mm di spessore): non è previsto, come nel caso precedente, l'utilizzo di contrasto metallico per garantire una superficie liscia. L'assenza del contrasto metallico assieme alla stampa di *layer* aventi lo stesso spessore, aumenta di molto i tempi di realizzazione, soprattutto nel caso di elementi curvi che, inoltre, perdono in risoluzione a causa del cosiddetto "staircase-effect", ovvero l'effetto seghettato che ancora caratterizza gli elementi stampati

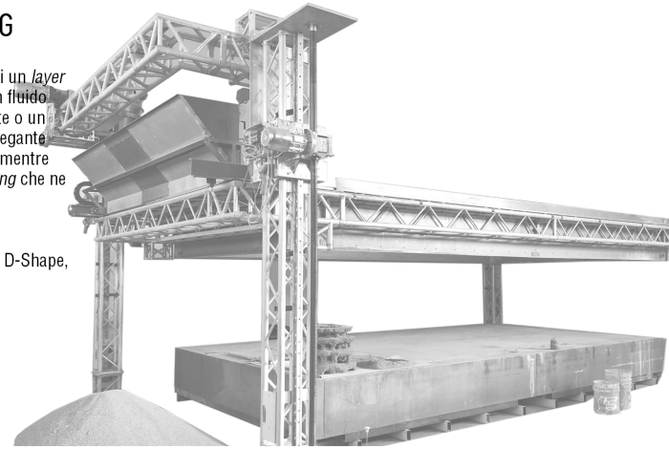
PROGETTO:
Colonne stampate in 3D presso l'ETH di Zurigo



4C PARTICLE-BED PRINTING

DESCRIZIONE:
I processo di stampa consiste nell'applicazione di un *layer* di materiale polveroso seguita dall'iniezione di un fluido, che fa da legante attraverso una testina stampante o un ugello. Alla fine, le particelle non interessate dal legante vengono rimosse ed, eventualmente, riutilizzate, mentre l'oggetto stampato può subire trattamenti di *curing* che ne incrementano le *performance*

IDEATORE:
La più famosa tra le stampanti di questo tipo è la D-Shape, nata nel 2004 da un'idea di Enrico Dini



Mentre la questione dei rinforzi appare quella decisiva nel caso del *contour crafting* e del *concrete printing*, per la tecnica del *particle-bed printing*[142], di cui la più famosa, la *D-Shape*, è stata ideata dall'italiano Enrico Dini[143], il problema principale è di carattere dimensionale.

Infatti, mentre non vi sono restrizioni in termini di forma, dal momento in cui l'utilizzo di un letto di particelle secche fornisce stabilità al processo di stampa, consentendo di realizzare parti a sbalzo, inclinate e voltate con un'elevata risoluzione – fino al decimo di millimetro –, le dimensioni massime del *particle-bed* rimangono un serio limite.

Il processo di stampa consiste nell'applicazione di un *layer* di materiale polveroso seguita dall'iniezione di un fluido che fa da legante attraverso una testina stampante o un ugello. Alla fine, le particelle non interessate dal legante vengono rimosse ed, eventualmente, riutilizzate, mentre l'oggetto stampato può subire trattamenti di *curing* che ne incrementano le *performance*[144]. Per la produzione di componenti in calcestruzzo, vi sono tre tecniche differenti: la *selective binder activation*, che utilizza aggregati molto sottili e cemento come legante, attivato mediante acqua nebulizzata o iniettata; la *selective paste intrusion*, in cui gli aggregati sono generalmente meno sottili e il legante è costituito da un mix di cemento, acqua e additivi applicati con un ugello; la *binder jetting*, utilizzata più che altro per la realizzazione del contorno dell'elemento poi riempito con calcestruzzo. In quest'ultimo caso, infatti, il legante è costituito da una resina polimerica[145].

È chiaro, dunque, che ognuna delle tecniche di stampa fin qui descritte presenta diversi vantaggi, prestandosi, in base a questi, a differenti applicazioni. Se la *contour crafting* è senza dubbio la più idonea alla realizzazione di edifici di grandi dimensioni, la *concrete printing* è invece più adatta alla produzione di componenti, mentre la *particle-bed printing*, grazie all'elevata risoluzione, punta su elementi dalle forme complesse.

Per quanto riguarda la produzione di componenti, che sembra essere la strada più promettente, va specificato che un approccio di questo tipo richiede che vengano affrontate due questioni fondamentali[146]. Mentre, la prima riguarda proprio il progetto dei componenti, che devono essere pensati per essere stampati rispetto a tutte le fasi che portano dall'idea alla realizzazione, quindi modellazione digitale, esportazione, riduzione in strati, connessione, stampa e finitura[147], la seconda riguarda in particolare il progetto dell'assemblaggio. Il contributo, in questo caso, di sistemi quali il *Building Information Modelling* (BIM) è quasi ovvio. Infatti, il BIM da un lato, consente un confronto dinamicamente implementabile tra gli attori coinvolti che garantisce l'ottimizzazione tanto del componente che della sua costruzione, e, dall'altro, permette di individuare, grazie alla sua capacità prefigurativa, eventuali problemi di messa in opera o prestazionali[148].

Per quanto detto, dunque, la stampa 3D sembrerebbe essere il mezzo perfetto per sopperire alla sempre maggiore richiesta di customizzazione, fornendo componenti non-ripetitive a prezzi competitivi e senza sprechi di materiale – posizionato solo dov'è utile – che si aggiungono ai vantaggi ambientali derivanti, ad esempio, da un'alimentazione elettrica dei macchinari. Inoltre, grazie alle prospettive di automazione delle costruzioni *on-site*, questa andrebbe ad aumentare la sicurezza sul luogo di lavoro – conseguenza piuttosto ovvia dovuta alla così prospettata riduzione della presenza umana sul cantiere – nonché a evitare interruzioni della costruzione a causa di avverse condizioni climatiche.

Nonostante sembrino molto allettanti le prospettive applicative, tanto l'automazione che la stampa 3D stentano ad affermarsi, soprattutto nella costruzione *in situ*. Probabilmente i motivi[149] vanno ricercati nella mancata idoneità delle tecnologie disponibili per prodotti di grosse dimensioni, nella scarsa disponibilità di materiali adatti al processo, nella gestione del cantiere e nell'ancora elevato prezzo delle attrezzature necessarie.

La stampa 3D, in particolare, sembra non riuscire a trovare un suo posto nel settore delle costruzioni. Oltre ai motivi tecnici già discussi – composizione adeguata del materiale, risoluzione di stampa, aderenza tra i *layer*, difficoltà nel realizzare geometrie sporgenti, integrazione dei rinforzi – si può aggiungere che, probabilmente si è disatteso l'obiettivo iniziale, ovvero la semplificazione del processo costruttivo e produttivo. Anzi, al contrario, la stampa 3D ha richiesto non solo l'introduzione massiva di tecnologie digitali, ancora costose e richiedenti un enorme bagaglio di conoscenza, ma anche di nuovi requisiti stringenti in termini di tixotropia e aderenza tra gli strati. Sono tuttavia, falsi problemi, in quanto appare evidente come sia solo questione di tempo affinché la tecnologia vada incontro alle esigenze economiche e produttive.

Una questione, invece, più spinosa è indubbiamente il rapporto con la progettazione, che ancora non ha pienamente assimilato le trasformazioni introdotte da tale innovazione tecnologica: generare una forma in calcestruzzo destinata alla manifattura digitale richiede infatti il rispetto di specifici set di requisiti provenienti tanto dai vincoli di processamento – reologia della pasta estrusa, spessore dei *layer* e dimensioni dei prodotti – che dalle proprietà funzionali delle parti prodotte, come ad esempio la resistenza meccanica e la conduttività termica, che vanno considerate sia alla scala del materiale che alla scala dell'intero elemento[150].

Il nostro *excursus* sulle tecniche termina con il *vacuumatics* – abbreviazione di

[142] Si veda Cesaretti, G. *et alii*, "Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology", in *Acta Astronaut*, vol. 93, 2014, pp. 430-450. Il primo a proporre questa tecnica fu Joseph Pegna nel 1995. Gli elementi, con dimensioni massime pari 7,6 x 7,6 x 15,2 cm, venivano realizzati in seguito alla deposizione di un materiale di base, quasi sempre sabbia, poi selettivamente coperto con un reagente (cemento) attivato attraverso l'applicazione di acqua nebulizzata dopo la compressione di ogni singolo layer. Si veda Pegna, J., "Application of cementitious bulk materials to site processed solid freeform construction", in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 1995; Pegna, J., "Exploratory investigation of solid freeform construction", in *Automation in Construction*, vol. 5, 1997, pp. 427-437.

[143] - D-Shpae, *Company*, https://d-shape.com/company/. Si veda anche, Dini, E., *Method for method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor*, brevetto depositato presso United States Patent Office, 2012.

[144] Lowke, D. *et alii*, "Particle-based 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges", in *Cement and Concrete Research*, vol. 112, 2018, pag. 51.

[145] *Ibidem.* Quest'ultima tecnica è stata adoperata all'ETH per la realizzazione di una lastra ottimizzata topologicamente. Dopo aver stampato la cassaforma a perdere con un composito a base di aggregati fini e un legante polimerico, l'elemento così prodotto è stato riempito con UHPFRC. Si veda Meibodi, M. A. *et alii*, "The smart takes from the strong", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate: Rethinking Design and Construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 210-218.

[146] Cfr. Wu, P. *et alii*, "A critical review...", *op. cit.*, 2016, pag. 28

[147] *Ibidem.*

[148] *Ibidem.*

[149] Si vedano Khoshnevis, B. e Hwang, D., "Contour crafting…", *op. cit.*, 2004 e Vinodh, S. *et alii*, "Agility through rapid prototyping technology in a manufacturing environment using a 3D printer", in *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 20, 2009, pp. 1023-1041.

[150] Gosselin, C. *et alii*, "Large-Scale 3D printing of Ultra-High Performance Concrete, a new processing route for architects and builders", in *Materials and Design*, vol. 100, 2016, pp. 102-109.

vacuumatically prestressed strucures – 3D-formwork system[151] che sfrutta il principio del sottovuoto: riempita una membrana del materiale che si desidera plasmare, si applica un certo livello di pressione atmosferica che causa una perfetta adesione dei due componenti. Dopo aver messo il materiale in forma, si porta il sottovuoto al suo valore massimo e si attende l'indurimento. Tra i principali vantaggi vi è sicuramente la reversibilità dell'intero processo, sebbene ci siano dei dubbi rispetto alla messa in forma, rendendolo un processo forse più idoneo alla riproduzione.

In conclusione, lo sviluppo delle tecnologie digitali indubbiamente ha portato nuove possibilità per il non solo per la produzione delle strutture in calcestruzzo, ma anche per un suo ripensamento in termini progettuali. Tuttavia, anche i processi più interessanti sono attualmente utilizzati solo per applicazioni speciali, incontrando serie difficoltà ad affermarsi sul mercato, soprattutto a causa degli alti costi di investimento e all'ancora scarso approfondimento delle caratteristiche del calcestruzzo così prodotto.

Quella delle nuove tecnologie, si configura quindi con una sfida aperta[152] in cui manca soprattutto, un reale confronto con il mondo della produzione.

[151] Huijben, F. et alii, "Vacuumatics 3D-formwork systems: customized free-form solidification", in Oñate, E. e Kröplin, B. (a cura di), *Proceedings of the International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures – Structural Membranes*, Stuttgart, 2009.

[152] Mata-Falcón, J., "Exploiting the Potential of Digital Fabrication for Sustainable and Economic Concrete Structures", in Wangler, T. e Flatt, J. R. (a cura di), *Proceedings of the First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*, Zurigo, 10-12 settembre 2018, pag. 158.



La copertura Smart Slab fa parte del progetto DFAB House (Dübendorf), un'abitazione costruita con cinque diverse tecniche di fabbricazione digitale. Le lastre, ottimizzate in modo da utilizzare il minor quantitativo di materiale possibile, sono state realizzate stampando con *sand 3D printing* una cassaforma a perdere poi spraiata con calcetruzzo fibrorinforzato. L'intero gruppo di ricerca è diretto dall'architetto Benjamin Dillenburger, professore in Digital Building Technologies all'ETH di Zurigo. Immagine da dezeen.com.



L'edificio ha ricevuto 4 stelle dal Green Building Council del Sud Africa.
Mario Cucinella, *One Airport Square*, Accra, 2015. Foto di Fernando Guerra.

3.4 PROSPETTIVE GREEN E SCENARI DEL MERCATO NEL CAMPO DEGLI UHPFRC: APPLICAZIONI NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

Lo scenario prefigurato dimostra come sia complessa la situazione di un produttore o di un progettista che decide di investire sull'UHPFRC. Queste prime difficoltà oggettive, che definiremo con spirito di semplificazione tecniche, sono affiancate da altre derivanti dalla struttura del mercato edilizio in generale e del settore dei calcestruzzi in particolare. Quest'ultimo, infatti, è ancora una volta protagonista di una contraddizione: mentre da un lato il calcestruzzo rimane il materiale sintetico più utilizzato al mondo, dall'altro la sua responsabilità in termini di emissioni di CO_2 richiede un'immediata riforma del suo impiego, della sua produzione e composizione. Dunque, l'individuazione delle prospettive applicative del materiale sul mercato italiano ed europeo non può prescindere da una descrizione del quadro generale di riferimento.

Attualmente sono necessarie circa 4,1 miliardi di tonnellate[153] di calcestruzzo per soddisfare la richiesta di strade, tunnel, dighe, centrali elettriche, porti, aeroporti, bacini, frangiflutti, acquedotti e naturalmente, fondazioni e strutture di edifici di vario genere[154]: la quantità richiesta è tale da renderne impossibile la sostituzione con altri materiali da costruzione. Infatti, nel 2017 l'area europea ha incrementato la produzione di calcestruzzo di 4,7 Mt, per un totale di 159,2 Mt prodotte, coerentemente con una crescita del volume costruito totale pari allo 0,6%[155].

La crescente necessità di calcestruzzo è affiancata dalla sua costante convenienza economica: il suo costo resta infatti ancora basso, basti pensare che negli Stati Uniti non eccede i 150$ alla tonnellata, mentre in Cina sono sufficienti circa 50$[156]. Inoltre, solo in Europa (dato al 2016), l'industria del calcestruzzo ha generato un valore aggiunto di circa 30 miliardi di euro, impiegando circa 500.000 addetti lungo tutta la filiera[157].

[153] CEMBUREAU, *Activity Report 2018. Built in concrete. Made with cement*, Brussel, 2019, disponibile all'indirizzo: https://cembureau.eu/media/1818/actvity-report-2018.pdf.
[154] Scrivener, K. L. *et alii*, "Eco-Efficient Cements: Potential, Economically Viable solutions for a Low-CO2 Cement-Based Materials Industry", in *United Nations Environment Program*, 2017, pag. 4.
[155] Nell'Eurozona il tasso di costruzione ha raggiunto il suo massimo nel 2017 (l'altro picco risale al 2006) e si prevede una crescita più o meno costante fino al 2021, sebbene ci siano alcune differenze tra i paesi membri in quanto, nel 2019, Finlandia, Svezia, Estonia e Turchia hanno avuto un tasso negativo. Cfr. CEMBUREAU, *Activity Report 2018…*, *op. cit.*, 2019, pp. 25-26.
[156] *Ivi*, pag. 2.
[157] Federbeton, *Mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso l'applicazione dei principi di economia circolare*, Confindustria, 2018, pag. 7.

Un ulteriore aspetto di complessità risiede nell'impiego estremamente diverso che se ne fa nel mondo: mentre nei paesi emergenti il fabbisogno di calcestruzzo rimane altissimo a causa dell'elevata richiesta di nuove costruzioni conseguente la crescita demografica, nei paesi a economia avanzata viene utilizzato sempre più per la riqualificazione sia di infrastrutture che di edifici, oramai risalenti in gran parte massimo agli anni '80[158] e quindi carenti da un punto di vista qualitativo.

Tuttavia, nel primo caso la presenza di manodopera non specializzata e le difficoltà derivanti dall'utilizzo di materiali ad alto contenuto tecnologico fanno sì che si guardi ancora al calcestruzzo tradizionale che rimarrà, quindi, responsabile di un'ampia fetta delle emissioni di origine antropica.

Per favorire l'impiego di tecnologie ad alte performance nei paesi in via di sviluppo occorre, però, prima di tutto semplificarne i processi di utilizzo, anche diffondendo linee guida e promuovendone l'applicazione in opere a carattere esemplificativo.

A dispetto di quanto si potrebbe credere, inoltre, la transizione energetica verso le fonti rinnovabili non andrà probabilmente a ridurne il fabbisogno: gli impianti per la produzione di energia pulita, a partire dall'eolico, sono e presumibilmente sempre saranno in calcestruzzo. Inoltre, dal momento in cui il tragico innalzamento dei livelli dell'oceano richiederà la costruzione di dighe o bacini di protezione, ancora una volta toccherà al calcestruzzo porvi rimedio[159].

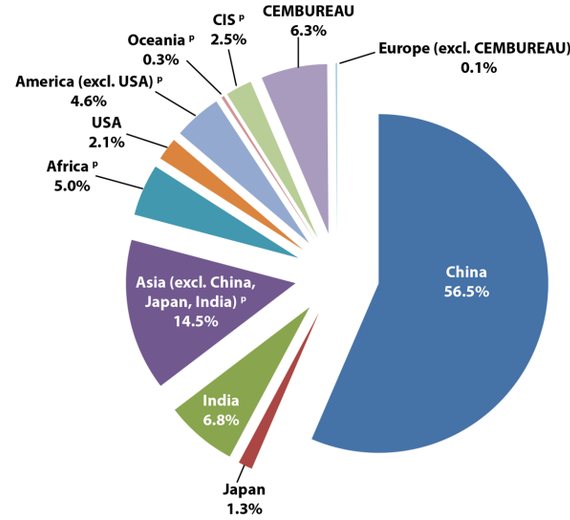
Naturalmente la questione ambientale rimane aperta: al settore dei calcestruzzi è imputabile il consumo del 7% dell'energia utilizzata nell'intero settore industriale e il 27% delle emissioni totali di CO_2 da esso prodotte. Quest'ultime derivano in larga parte dal suo processo produttivo e possono essere solo in una certa misura ridotte efficientandone il sistema energetico: l'anidride carbonica rilasciata in seguito alla calcinazione dei materiali calcarei ($CaCO_3$ — $CaO + CO_2$[160]) copre ben il 63% delle emissioni totali derivanti dall'intero comparto[161].

A partire da questi presupposti, la ricerca sui calcestruzzi[162] è indirizzata verso quanto suggerito dall'International Energy Agency (IEA)[163] che individua tre fondamentali assi strategici per il raggiungimento degli obiettivi ambientali: a) efficientamento prestazionale ed energetico dei materiali, impiegando le *best available technologies* (BAT); b) utilizzo di carburanti e materie prime *green*; c) processi innovativi improntati al *carbon capture and storage* (CCS).

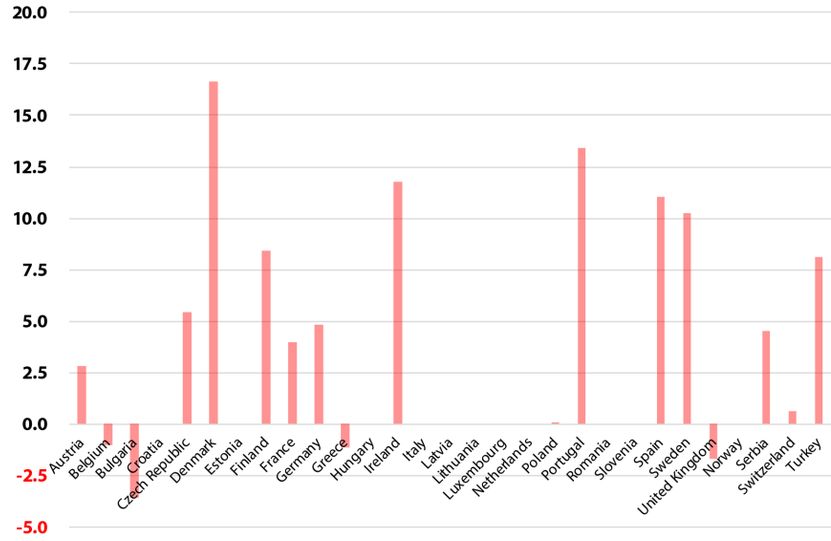
[158] Van Damme, H., "Concrete material science...", *op. cit.*, 2018, pag. 5.
[159] *Ibidem.*
[160] In seguito, l'idratazione degli ossidi di calcio (CaO) del clinker porta alla formazione di idrossido di calcio – $Ca(OH)_2$ – che può reagire con l'anidride carbonica presente in atmosfera – carbonatazione – diventando ancora $CaCO_3$, configurandosi come un processo di tipo CCS. Tuttavia, la carbonatazione, oltre a danneggiare le armature, avviene molto lentamente ed è quindi poco incisiva per strutture di grande spessore. D'altro canto, solo il 25% di calcestruzzo armato ha un reale rischio di corrosione da carbonatazione. Scrivener, K. L. *et alii*, "Eco-Efficient Cements…", *op. cit.*, 2017, pag. 10.
[161] IEA, Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations, OECD/IEA, 2017, pag. 192.
[162] È bene sottolineare che l'industria cementifera ha avviato politiche strategiche di riduzione delle emissioni già a partire dal 1999, lanciando la Cement Sustainability Initiative al World Business Council for Sustainable Development, poi diventata la Global Cement & Concrete Association (GCCA) nel Gennaio del 2019.-
[163] IEA, *Energy Technology Perspectives 2017…*, *op. cit.*, 2017, pag. 165.

CONCRETE
PRODUCTION AND CONSUMPTION WORLDWIDE

PRODUCTION DISTRIBUTION (2017)
TOT: 4,1 MILIARDI DI TONNELLATE



CONSUMPTION PERCENTAGE VARIATION (2016/2017)



Fonte dati: CEMBUREAU

Le politiche dell'IEA sono coerenti con l'approccio delle 5C promosso dal CEMBUREAU[164] – clinker, cemento, calcestruzzo, costruzione, e carbonatazione – che, come vedremo a breve, individuano gli ambiti su cui intervenire per migliorare l'intera catena produttiva del calcestruzzo, dal design alla costruzione[165].

Le strade più percorse – asse a) e 5C – prevedono la sostituzione del Portland – fino al 60% – con substitutive cementitious materials (SCM) o "clinker alternativi" oppure l'incremento delle performance meccaniche del cemento utilizzato nell'impasto che, soprattutto negli ultra-performanti, non reagisce completamente, riducendosi a semplice filler inerte[166].

Tra i minerali aventi un'attività idraulica tale da poter sostituire il calcare presente nel clinker tradizionale, rientrano quelli ricchi di belite (silicato bicalcico), che contenendo meno CaCO3, riescono a garantire una riduzione delle emissioni pari a circa il 10%[167]. I cementi di belite non sono, in realtà, una vera e propria novità, in quanto sono già tenuti in conto da gran parte delle normative vigenti, seppure siano scarsamente diffusi a causa del tardivo sviluppo di resistenza meccanica, che ne limita le applicazioni.

Un'alternativa valida invece sembra essere costituita dai clinker a base di solfo-alluminati di calcio, che richiedono semplicemente un aumento della percentuale di alluminati presenti tra

[164] Il CEMBUREAU, con sede a Bruxelles, è l'organizzazione rappresentativa dell'industrie cementifere in Europa. Attualmente, ne fanno parte le associazioni nazionali di settore di tutti i paesi dell'Unione (Austria, Belgio, Bulgaria, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Olanda, Polonia, Portogallo, Romania, Slovenia, Spagna, Svezia, Regno Unito, con esclusione di Malta e Slovacchia), più Norvegia, Svizzera e Turchia. La Croazia e la Serbia sono invece membri associati, mentre recentemente è stato concluso un accordo con Ucraina e Cipro. Si veda CEMBUREAU, *Activity Report 2018…*, *op. cit.*, 2019, pag. 15 e https://cembureau.eu/.

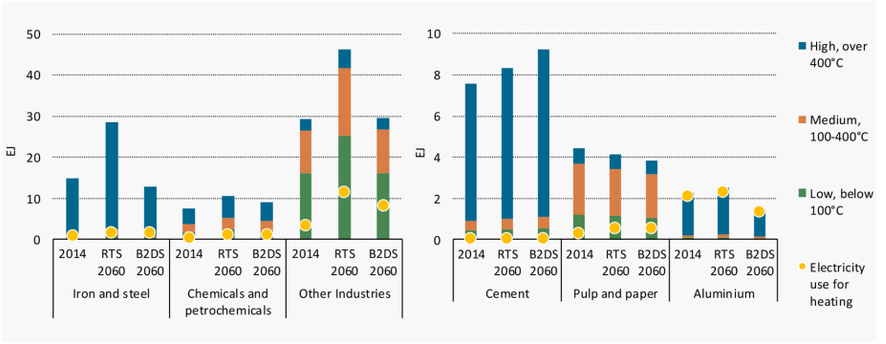
[165] Altrettanto rilevante è la questione relativa all'esaurimento del materiale inerte attualmente utilizzato per la realizzazione del calcestruzzo tradizionale. In un celebre articolo uscito su Science nel 2017, Aurora Torres *et alii* (Torres, A. *et alii*, "A looming tragedy of the sand commons", in *Science*, vol. 357, 2017, pp. 970-971) mettono in evidenza come sabbia e inerti rappresentino la più larga parte di risorse naturali utilizzate nel settore edile e delle infrastrutture. Sorprendentemente, tuttavia, dati affidabili sulla loro estrazione sono disponibili solo a partire dagli anni recenti (Krausmann, F. *et alii*, "Growth in global material use, GDP and population during the 20th century", in *Ecological Economics*, vol. 68, 2009, pp. 2696-2705): ciononostante, facendo riferimento solo a quest'ultimi, una stima conservativa del consumo mondiale di aggregati va oltre le 40 miliardi di tonnellate all'anno, raddoppiando il valore della totalità globale dei sedimenti trasportati dai fiumi (Peduzzi, P., *Sand, rarer than one thing*, UNEP-Global Environmental Alert Service (GEAS), 2014, pp. 1-15). La sabbia in particolare è una risorsa estremamente sfruttata, in quanto è molto costoso e complesso limitarne l'estrazione, con grossi danni all'ambiente: la rimozione di sabbia da fiumi, spiagge e fondali marini altera l'equilibrio degli ecosistemi causandone erosione, alterazione degli *habitat* bentonici nonché modifiche ai percorsi migratori, alle comunità ecologiche e alle catene alimentari naturali. Impatti ambientali di questo tipo hanno inoltre effetti negativi anche sull'uomo: l'estrazione di sabbia è una delle cause più frequenti di destabilizzazione dei litorali fluviali e marini, che a sua volta crea una maggiore vulnerabilità ai rischi ambientali, soprattutto considerando che il livello del mare continua a salire. I danni sono anche economici: nel delta del Mekong (Vietnam) l'erosione dei litorali è responsabile dell'aumento dell'intrusione di acqua salata all'interno delle condotte per la fornitura di acqua dolce, incrementando di conseguenza la salinizzazione della terra coltivata nella parte sud-orientale dell'Asia (Torres, A. *et alii*, "A looming tragedy…", *op. cit.*, 2017, pag. 971). Per approfondire gli impatti dell'estrazione della sabbia sugli ecosistemi fluviali, si vedano: Sreebha, S. e Padmalal, D., "Environmental impact assessment of sand mining from the small catchment rivers in Southwestern Coast of India: a case study", in *Environmental Management*, vol. 47, 2011, pp. 130-140; Saviour, N., "Environmental impact of soil and sand mining: a review", in *International Journal of Science, Environment and Technology*, vol. 1, 2012, pp. 125-134. Invece, per approfondimenti sugli ecosistemi marini, si vedano: Boyd, S. E. *et alii*, "The effects of marine sand and gravel extraction on the macrobenthos at a commercial dredging site", in *ICES Journal of Marine Science*, vol. 62, 2005, pp. 145-162; Desprez, M. *et alii*, "The biological impact of overflowing sands around a marine extraction site: Dieppe", in *ICES Journal of Marine Science*, vol. 67, 2010, pp. 270-277.

[166] Si veda il paragrafo 3.2 per informazioni specifiche sugli UHPFRC.

[167] Cfr. Scrivener, K. L. *et alii*, "Eco-Efficient Cements…", *op. cit.*, 2017, pag. 12.

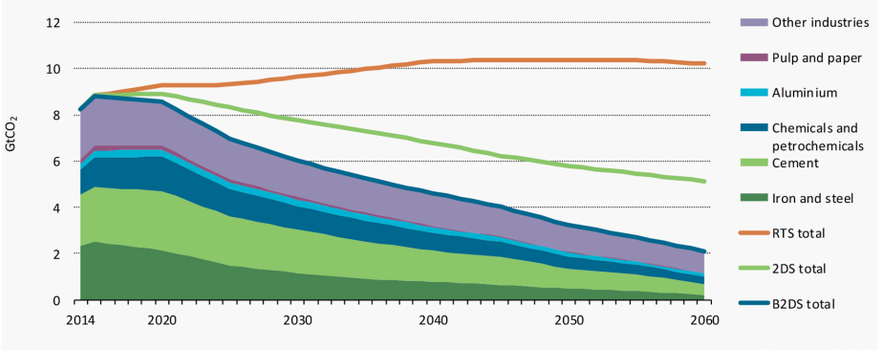
ENERGY CONSUMPTION AND EMISSIONS WORLDWIDE

ELECTRICITY CONSUMPTION FOR HEAT GENERATION AND HEAT DEMAND IN INDUSTRY



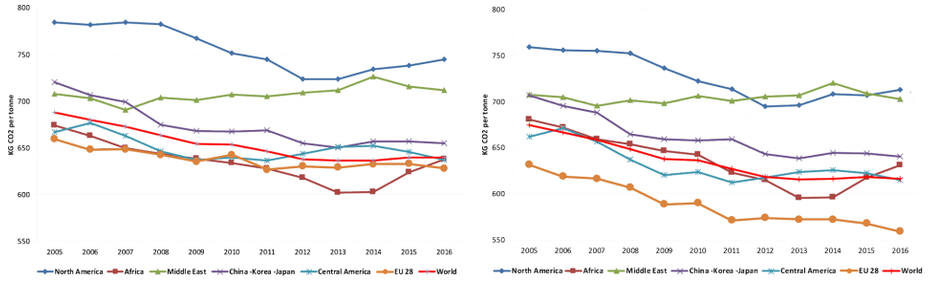
Per **RTS** si intende Reference Technology Scenario, in cui si considera che, al 2060, si manterranno le politiche ambientali attualmente in atto. Nel **B2DS**, ovvero Beyond 2° C Scenario, si considerano invece applicate politiche ambientali più stringenti, coerentemente con quando stabilito negli accordi di Parigi. L'aumento dell'energia impiegata dal settore dei calcestruzzi nel 2060 è compatibile con il previsto aumento dei consumi.

DIRECT CO_2 EMISSIONS BY INDUSTRY SUBSECTOR



Fonte dati: IEA

GROSS AND NET CO2 EMISSIONS OF CEMENTITIOUS PRODUCTS



Fonte dati: CEMBUREAU

le materie prime impiegate nella produzione[168], la quale, in questo caso, risulta caratterizzata da un abbassamento delle emissioni purtroppo negativamente controbilanciato da un aumento dei costi. Ancora, mentre i cementi ottenuti dalla calcinazione di carbonati di magnesio liberano significative quantità di CO^2, quelli sviluppati a partire dall'estrazione di MgO basico da rocce ultramafiche – contenenti silicati di magnesio – hanno addirittura la capacità di catturare CO_2 dall'atmosfera a formare carbonato di magnesio stabile[169].

Tuttavia, nonostante siano ormai molte le alternative al Portland tradizionale, questo risulta ancora il più vantaggioso: i processi di produzione ottimizzati sia dal punto di vista economico che energetico assicurano buone economie di scala, grazie anche all'ampia disponibilità di materie prime.

Per adesso, dunque, la strategia più conveniente è quella che prevede la sostituzione del Portland con altri materiali analoghi (*substitutive cementitious materials* – SCM), impiegati sia come *filler* sottili – quindi inerti – che come reagenti – come per il fumo di silice –, partecipando in quest'ultimo caso alla formazione della struttura resistente del calcestruzzo. Anche l'utilizzo come *filler* genera un significativo vantaggio ambientale, in quanto una migliore distribuzione delle particelle riduce la quantità d'acqua necessaria a ottenere una buona fluidità, come avviene nel caso degli UHPFRC. A discapito della loro efficacia resta comunque difficile, proprio dal punto di vista operativo, intervenire sulla composizione del calcestruzzo utilizzando gli SCM, in quanto ogni Stato ha una sua stringente legislazione che ne regola la produzione e l'utilizzo, richiedendo un notevole investimento per determinarne ogni volta le proprietà e verificarne la rispondenza ai requisiti normativi. Si consideri, ad esempio, che la versione vigente della normativa europea armonizzata EN 197/1 prevede sole 5 classi di cemento, ottenute combinando i vari componenti e variandone le percentuali. Tuttavia, la revisione in atto della norma prevede l'aggiunta di un'ulteriore classe, nonché l'ampliamento delle combinazioni dei costituenti, arrivando a definirne ben 39 tipi di cemento contro i 27 precedenti. Tutti questi nuovi prodotti dovranno essere riconosciuti dal mercato e quindi subire l'iter della normazione tecnica prevista che, naturalmente ne complicherà la diffusione. Inoltre, andrebbero considerati anche i leganti idraulici non strettamente definibili come cementi, ma aventi forti caratteristiche di innovazione[170]. Inoltre, molti SCM, come la loppa d'altoforno o le ceneri volanti[171], andranno riducendosi in futuro: la prima, ad esempio, oltre a essere già adesso disponibile in piccole quantità rispetto alla richiesta – appena 330 Mt annue[172] –, è di fatto una scoria derivante dai processi convenzionali di produzione dell'acciaio, che auspicabilmente saranno rimpiazzati da altri meno impattanti.

[168] Ricordiamo che le materie prime necessarie alla produzione di clinker sono argille silicee, ossidi di alluminio, ossidi di ferro e calcari.

[169] Si veda Cartner, F. *et alii*, "A novel Atmospheric Approach to the Mineral Capture of CO_2 from Industrial Point Sources", in *Proceedings of the CCUS 2014-Carbon Capture, Utilization and Storage Conference*, Pittsburgh, 2014.

[170] Federbeton, *Mitigazione dei cambiamenti climatici…*, *op. cit.*, 2018, pp. 32-33.

[171] Le ceneri volanti sono scorie derivanti dalla combustione del carbone. Sebbene disponibili in maggiori quantità (900 Mt annue), la scarsa qualità del prodotto fa sì che se ne possa impiegare circa un te+rzo. In ogni caso, la cenere volante può essere considerata una risorsa solo a medio-termine, in quanto la produzione di energia tramite carbone va fortunatamente riducendosi.

[172] Dato al 2014. Inoltre, l'impiego della loppa d'altoforno nei calcestruzzi è diminuito del 9% dal 1980 al 2014, anche perché quella attualmente utilizzata è un prodotto industriale vero e proprio, significativamente più costoso del Portland. Cfr. Scrivener, K. L. *et alii*, "Eco-Efficient Cements…", *op. cit.*, 2017, pp. 15-16.

Si considerano SCM anche le pozzolane – ovvero materiali silicei amorfi o cristallini di origine naturale – presenti però solo in poche regioni del mondo, e le argille calcinate – caoliniche in testa – reattive dopo una cottura tra i 700 e gli 850 °C. Quest'ultime, in particolare, si trovano soprattutto in paesi come l'India e la Cina, dove l'industria della ceramica determina la formazione di ingenti riserve di argilla, spesso considerate come materiale di scarto. Recentemente, hanno una buona diffusione anche le cosiddette ceneri vegetali provenienti dalla combustione di biomasse, quantunque vi sia qualche difficoltà dovuta tanto alla stagionalità delle risorse quanto alla complessità derivante dalla produzione contemporanea di ceneri attive e carburante vegetale[173].

A completare le strategie ambientali basate sulla composizione del calcestruzzo, vi è l'impiego di additivi chimici, distinti in quattro tipi aventi ognuno un effetto differente: i fluidificanti o super-fluidificanti, riducendo l'acqua d'impasto, consentono una diminuzione della percentuale di cemento senza scalfirne la resistenza meccanica; gli additivi *air capture* migliorano sia la reologia che la resistenza ai cicli di gelo e disgelo, rivelandosi particolarmente utili nel caso in cui il calcestruzzo venga utilizzato solo come riempimento; gli acceleranti, che aumentando la velocità di idratazione, fanno sì che il materiali sviluppi più rapidamente le proprietà strutturali compensando così l'eventuale presenza di SCM; additivi come anticorrosivi, antiritiro, antigelo etc. etc. ne aumentano invece la durabilità.

Partendo da queste considerazioni, l'IEA ha previsto nel Beyond 2° C Scenario (B2DS) che l'utilizzo di clinker sarà ridotto di circa il 40%, sebbene il potenziale per la sua sostituzione non sia uniforme a scala globale: l'India – il secondo produttore mondiale di cemento con 280 Mt nel 2017 – dovrebbe passare da una riduzione del 30% a una del 50%, mentre la Cina arriverà al 45 % rispetto al 43% del 2014. Considerando che la Cina è il primo produttore mondiale di cemento, avendone realizzato il 60% circa nel 2017[174], anche una riduzione del 2% può modificare lo scenario mondiale.

Molto può essere fatto anche diminuendo l'energia impiegata nel processo produttivo – assi b) e c) –, dal momento che, ad esempio, i forni rotativi a via secca hanno una minore intensità energetica, se paragonati ai forni a via umida, ancora utilizzati in molti paesi del mondo. Se quest'ultimi verranno completamente sostituiti dai primi, il B2DS prevede un impiego di energia termica pari a soli 2,9 GJ per tonnellata di clinker (al 2060) rispetto ai 3,5 GJ/t del 2014[175]. L'utilizzo processi *oxy-fuelling* potrebbe portare a risultati anche migliori: in questo caso il carburante viene bruciato in ambienti di puro ossigeno anziché in aria, evitando così la formazione di gas inquinanti come i NO_x.

L'ossi-combustione verrà implementata in via sperimentale in due cementifici europei di proprietà di HeidelbergCement e LafargeHolcim, che dedicheranno alla verifica di tale tecnologia rispettivamente gli impianti di Colleferro e Retznei. Sulla stessa scia, si inserisce il progetto LEILAC – Low Emissions Intensity Lime and Cement –, parte di Horizon 2020, che riprogetta i flussi di un calcinatore tradizionale riscaldando indirettamente il calcare, separando le emissioni e isolando così la CO_2.

[173] Si vedano le note 86 e 87 del paragrafo 3.2 per alcuni esempi.

[174] IEA, *Energy Technology Perspectives 2017…*, *op. cit.*, 2017, pag. 193.

[175] *Ibidem*.

Il primo impianto sperimentale appartiene alla HeidelbergCement e si trova a Lixhe, in Belgio[176]. L'attivazione di tali tecnologie innovative richiede però spesso una reingegnerizzazione degli impianti produttivi e maggiori costi operativi. Ciononostante, è richiesto un loro utilizzo nel settore pari almeno al 7% per garantire il raggiungimento degli obiettivi prefissati dal B2DS che prevede, inoltre, anche il miglioramento nelle tecnologie di macinazione. Basti pensare che presse a rullo e mulini verticali sono molto più efficienti rispetto ai mulini tradizionali a sfera.

A fianco degli interventi a lunga gittata appena descritti, se ne trovano altri che avrebbero effetti pressoché immediati, ovvero il miglioramento e l'ottimizzazione del processo produttivo. Infatti, nonostante la semplicità di utilizzo sia una delle caratteristiche vincenti del calcestruzzo, molto spesso problemi facilmente risolvibili, come una macinazione approssimativa, una debole energia di *mixing* e pessime condizioni di conservazione, determinano una perdita di potenziale prestazionale. Una delle possibili soluzioni potrebbe essere un totale passaggio alla prefabbricazione, in modo da avere maggiore controllo sul processo produttivo ed evitare sprechi di materiale, molto più frequenti nel caso del gettato in opera. Una delle stime prevede addirittura una riduzione dei rifiuti fino al 30%[177].

C'è quindi, molto spazio per il cambiamento, a patto che gli standard costruttivi e normativi spingano verso l'impiego di cementi innovativi e di processi produttivi a bassa intensità di energia, come già si sta facendo soprattutto in Europa: secondo il report delle attività del 2018 di CEMBUREAU, il settore dei calcestruzzi ha raggiunto una riduzione delle emissioni pari a circa il 14% rispetto al 1990, con sostanziali progressi nell'efficienza termica e nell'utilizzo di carburanti alternativi.

Benché l'obiettivo prefissato per il 2050 – riduzione delle emissioni pari al 30% attraverso il solo utilizzo di tecnologie convenzionali – sia quindi bene in vista, sappiamo che non basta per raggiungere quanto stabilito dal B2DS, che richiede, tra le altre cose, un'immediata diminuzione – almeno il 3% – dei carburanti fossili impiegati per la produzione di energia termica nei prossimi 15 anni. Tuttavia, i progressi fatti nel settore delle tecnologie CCS fanno ben sperare, a patto che esse siano disponibili almeno nel 2030, condizione che richiede a sua volta l'accesso anche a massicci finanziamenti pubblici.

La situazione europea si riflette anche in ambito italiano, dove l'Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (AITEC) – referente di CEMBUREAU in Italia – ha presentato, nel 2018, il suo Rapporto di Sostenibilità, per far conoscere «l'impegno e i risultati raggiunti dal settore in termini di miglioramento delle prestazioni ambientali del proprio ciclo industriale, grazie all'adozione di tecnologie sempre più avanzate e performanti e al suo ruolo di attore protagonista dell'economia circolare»[178].

[176] Un progetto simile, che coinvolge 12 partner europei, uno cinese ed è coordinato da una società consortile operante nel settore energetico e ambientale partecipata dal Politecnico e dall'Università Cattolica di Milano, è CLEANKER, finanziato all'interno di Horizon 2020. Anche qui l'obiettivo è catturare CO_2 in fase di produzione, evitando così il rilascio in atmosfera. Lo stabilimento sperimentale, di BuzziUnicem, si trova a Vernasca, in provincia di Piacenza. Altri progetti si basano invece su un concetto leggermente diverso, ovvero il *carbon reuse*: CO_2Min di HeidelbergCement e della RWTH Aachen University ha l'obiettivo di studiare l'assorbimento di CO_2 da parte di minerali come olivina e basalto. Questi, una volta ri-carbonizzati, potrebbero essere utilizzati come additivi nella produzione di materiali da costruzione. Federbeton, *Mitigazione dei cambiamenti climatici…*, *op. cit.*, 2018, pp. 25-27.

[177] Scrivener, K. L. *et alii*, "Eco-Efficient Cements…", *op. cit.*, 2017, pag. 25.

[178] AITEC, *Rapporto di Sostenibilità. AITEC 2018*, 2018, pag. 1, disponibile all'indirizzo https://www.aitecweb.com.

Rispetto a quest'ultimo punto, Antonio Buzzi, di Federbeton[179], ricorda che produrre il calcestruzzo utilizzando i cosiddetti rifiuti da costruzione e demolizione potrebbe condurre a un risparmio di aggregati naturali e, di conseguenza, di materiale di scarto, pari a circa 15 milioni di tonnellate[180]. Tuttavia, in Italia manca una cultura tecnica che ne favorisca l'uso: basti pensare che le micro-demolizioni, ancora prevalenti, contaminano il calcestruzzo impedendone un suo riutilizzo strutturale e relegandolo alla realizzazione di soli riempimenti e sottofondi. Demolizioni selettive e filiere di differenziazione si configurano come soluzioni necessarie a porre un freno all'enorme quantità di rifiuti provenienti dal settore edile: secondo l'ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – nel 2016 ci si è attestati sulle 53 milioni di tonnellate, ovvero il 41% della totalità dei rifiuti prodotti. Sebbene vi sia un presunto tasso di recupero del 76%, l'ISPRA riconosce l'ampio margine di incertezza del dato raccolto, dovuto principalmente nella non completa tracciabilità dei flussi di rifiuti, cui si può ovviare solo mediante un sistema di monitoraggio della loro produzione e gestione, come già avviene per molti degli altri settori produttivi[181].

Ciononostante, nel triennio 2016-2018 le aziende italiane hanno investito oltre 90 milioni di euro in tecnologie per il reimpiego di materiali di recupero nel ciclo produttivo[182]. Per aumentare ancora gli investimenti, Federbeton suggerisce anche l'introduzione di meccanismi premiali per chi impiega cementi "riciclati" accoppiata a una maggiore sensibilizzazione dei progettisti sul loro utilizzo.

I dati relativi alla produzione sono invece stabili: nel 2018 in Italia sono state prodotte 19,3 milioni di tonnellate di cemento (immagine pag. 222), ovvero circa tre punti percentuali in meno rispetto all'anno precedente, da attribuirsi principalmente alle difficoltà del comparto delle costruzioni dove, solo per le grandi opere, sono ben 21 i miliardi di euro bloccati per cantieri già aperti[183], mentre sono 10 miliardi i fondi stanziati per opere approvate ma mai partite[184].

Per quanto riguarda i consumi, il 19,7% dell'energia impiegata proviene da fonti alternative, con un incremento del tasso di sostituzione calorica pari al 2,4%[185] rispetto al 2017.

[179] Federbeton, parte di Confindustria, è la Federazione di settore delle Associazioni della filiera del cemento, del calcestruzzo, dei materiali di base, dei manufatti, componenti e strutture per le costruzioni, delle applicazioni e delle tecnologie ad essa connesse. Si legge sul sito: «Federbeton si propone di diffondere la cultura dello sviluppo sostenibile promuovendo la realizzazione di una filiera virtuosa nel settore delle costruzioni, orientata alla qualificazione dei processi produttivi, alla sicurezza nei cantieri e nei luoghi di lavoro, alla produzione di innovazione, sviluppando la conoscenza tecnica dei soggetti coinvolti nella filiera e contribuendo a ridurre il consumo di risorse naturali non rinnovabili, nel solco della sostenibilità ambientale e dell'efficienza energetica». Cfr. Federbeton, *La nostra mission*, https://www.federbeton.it/La-Federazione/La-nostra-mission.

[180] Buzzi, A., *Il contributo della filiera del calcestruzzo all'economia circolare*, casaclima.com, 2019.

[181] *Ibidem*.

[182] Federbeton, *Infrastrutture sostenibili: al Saie di Bari la proposta di Federbeton per il rilancio del paese e del comparto*, casaclima.com, 2019.

[183] Ingenio, *ATECAP: crescita possibile solo con rilancio delle infrastrutture e delle costruzioni*, https://www.ingenio-web.it/23419-atecap-crescita-possibile-solo-con-rilancio-delle-infrastrutture-e-delle-costruzioni, 2019..

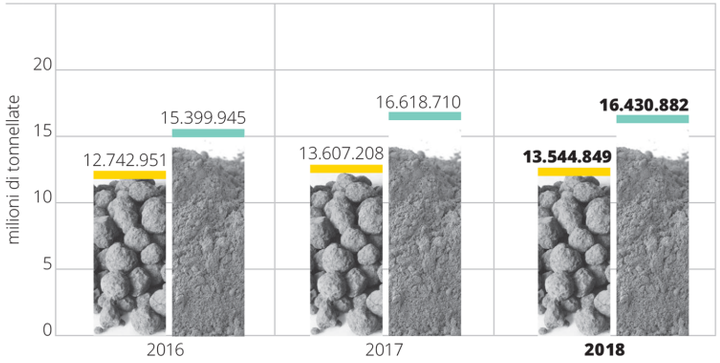
[184] Lerbini, A., *Atecap, innovazione e ricerca per rilanciare il calcestruzzo e le costruzioni, ediliziaeterritorio.ilsole24ore.com*, 2019.

[185] AITEC, *Rapporto di Sostenibilità…*, *op. cit.*, 2018, pp. 4 e 10. Secondo l'ANCE, tra le principali cause delle difficoltà a tradurre le risorse stanziate in opere vi sono la burocrazia e un contesto normativo che, a dispetto dei continui tentativi di semplificazione, resta troppo articolato. A fine 2018, solo il 4% del 140 miliardi di euro messi a disposizione dal 2016 per lo sviluppo infrastrutturale nei prossimi 15 anni è stato attivato. Cfr. Direzione Economica e Centro Studi ANCE, *Nota di sintesi*, EDILSTAMPA Srl, Roma, 2019, pag. 20.

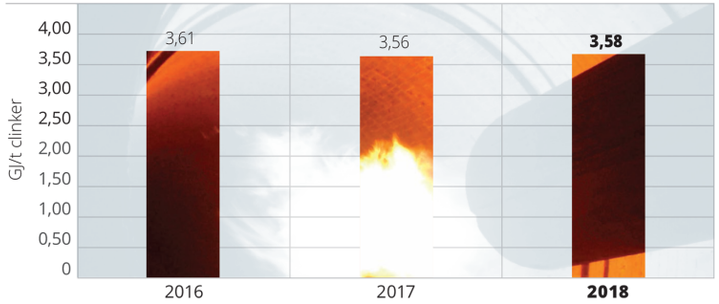
CONCRETE IN ITALY

PRODUCTION AND ENERGY CONSUMPTION

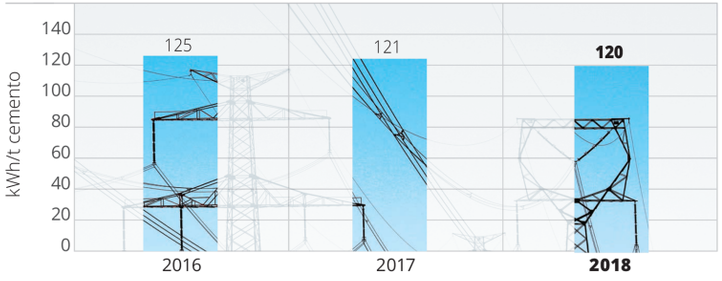
PRODUZIONE DI **CLINKER** E **CEMENTO***



CONSUMO TERMICO SPECIFICO



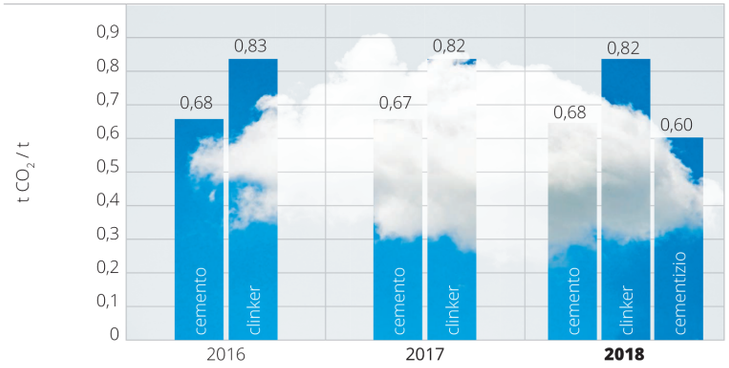
CONSUMO SPECIFICO DI **ENERGIA ELETTRICA**



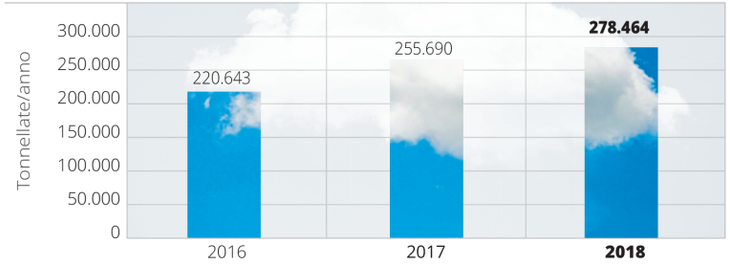
*I dati fanno riferimento all'85% dei produttori nazionali di cemento e al 92% dei produttori di clinker.
Il dato complessivo è di 19,3 milioni di tonnellate di cemento.

EMISSIONS

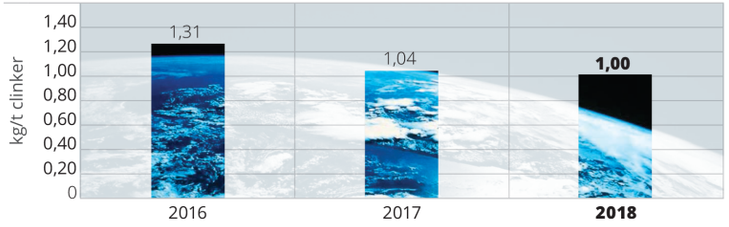
EMISSIONI SPECIFICHE **ANIDRIDE CARBONICA**



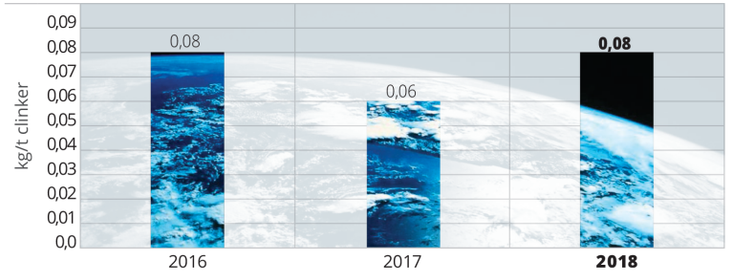
EMISSIONI DI CO_2 EVITATE UTILIZZANDO BIOMASSA



EMISSIONI SPECIFICHE **OSSIDI DI AZOTO NO_x**



EMISSIONI SPECIFICHE **OSSIDI DI ZOLFO SO_2**



Fonte dati: AITEC

Sebbene la situazione sia nettamente migliorata rispetto al 2008, quando solo il 6% dell'energia destinata al settore proveniva fa fonti alternative, l'Italia si attesta in coda rispetto alla media europea, che vede l'Austria in cima alla classifica con un tasso di sostituzione pari al 79%[186]. Tuttavia, va considerato che in Italia meno del 18% del consumo termico complessivo del settore deriva da energia prodotta dalla combustione di biomasse, pur essendo gli impianti produttivi in linea con le migliori tecnologie disponibili. Ciò è dovuto sia alle difficoltà riscontrate a livello locale per l'ottenimento delle autorizzazioni previste, nonché alla generale diffidenza dell'opinione pubblica verso forme di recupero energetico dei rifiuti. Per questo motivo, in Italia sussistono ampi margini di intervento per ridurre le emissioni di CO_2 sostituendo i combustibili tradizionali con quelli derivati da rifiuti, con prospettive di eliminazione delle emissioni dirette pari a circa il 16%[187].

Poco allettante è anche il dato sul consumo totale di materie prime, che nel 2018 è aumentato del 5,7% rispetto al 2016 – sebbene sia stabile rispetto al 2017 – compatibilmente con la diminuzione (0,7%) del tasso di sostituzione delle materie naturali con materiali residuali derivanti da altri processi industriali o da attività di recupero di terzi[188].

Per quanto riguarda le emissioni di CO_2 (immagine pag. 223), queste sono rimaste pressoché costanti nel triennio di riferimento, con la novità che nel rapporto 2018 viene fornito anche il dato relativo al materiale cementizio generico (clinker, gesso e vari materiali miscelati per ottenere leganti). Sono invece in costante calo rispetto al 2017 le emissioni in atmosfera di ossidi di azoto (3,8%) e polveri (15,4%)[189].

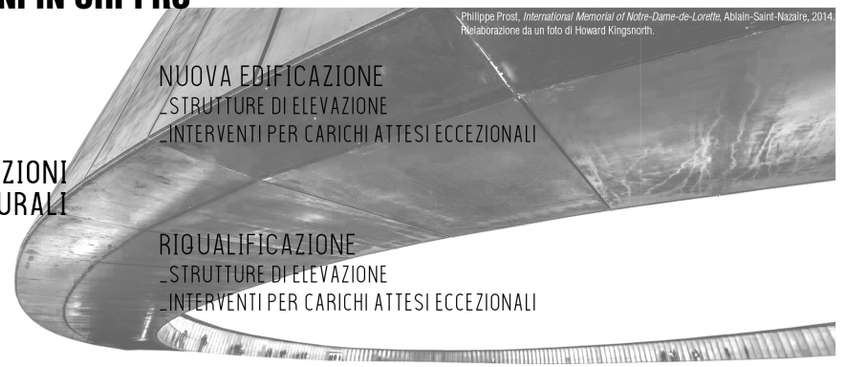
Il quadro così delineato mette in evidenza, da un lato, la tendenza delle politiche ambientali, tanto a livello europeo che nazionale, a puntare sull'impiego di materiali più performanti, più durevoli e generalmente meno impattanti e, dall'altro, il generale ritardo dell'Italia rispetto all'Unione Europea per il raggiungimento degli obiettivi ambientali. Per fortuna, l'ultima finanziaria prevede un fondo di 4,24 miliardi di euro per gli anni 2020-2023 destinati allo sviluppo di un Green New Deal italiano, finalizzato sostanzialmente alla riduzione delle emissioni di gas serra e al sostegno alle imprese per la realizzazione di progetti per la decarbonizzazione e circolarizzazione dell'economia e per la promozione dell'innovazione in chiave *green*.

In un clima di timido cambiamento, è invece piuttosto significativo che molte delle strategie descritte per il calcestruzzo – riduzione del contenuto di clinker, utilizzo di SCM e di additivi chimici per migliorare le prestazioni, aumento dell'intensità prestazionale del cemento, maggiore utilizzo delle tecniche di prefabbricazione, ottimizzazione della distribuzione molecolare delle particelle – si basino proprio sui principi che hanno portato alla nascita degli ultra-performanti, che si configurano quindi come una soluzione particolarmente idonea alla riduzione dell'impatto dell'intero settore.

Naturalmente non si può negare che molti dei materiali utilizzati per la loro produzione siano ancora poco disponibili o estremamente costosi e che l'alto contenuto di cemento li renda particolarmente emissivi.

[186] *Ivi*, pag. 11.
[187] Federbeton, *Mitigazione dei cambiamenti climatici…*, *op. cit.*, 2018, pag. 16.
[188] *Ivi*, pag. 14.
[189] *Ivi*, pp. 16-19.

APPLICAZIONI IN UHPFRC


Philippe Prost, *International Memorial of Notre-Dame-de-Lorette*, Ablain-Saint-Nazaire, 2014.
Rielaborazione da un foto di Howard Kingsnorth.

01 APPLICAZIONI STRUTTURALI

NUOVA EDIFICAZIONE
_STRUTTURE DI ELEVAZIONE
_INTERVENTI PER CARICHI ATTESI ECCEZIONALI

RIQUALIFICAZIONE
_STRUTTURE DI ELEVAZIONE
_INTERVENTI PER CARICHI ATTESI ECCEZIONALI

CHIUSURE
_VERTICALI
_SUPERIORI

02 APPLICAZIONI NON STRUTTURALI

PARTIZIONI
_INTERNE
_ESTERNE


ECDM Architects, *EDF Training Centre in Saclay*, Paris, 2018.
Rielaborazione di un foto di ECDM Architects.

INTERNE

03 ARREDO E ATTREZZATURE


Konstantin Grcic, *La Magliana Table*, Roma, 2017.
Rielaborazione di un foto di Omar Gotti.

ESTERNE

04 APPLICAZIONI NON EDILI

MACCHINARI INDUSTRIALI

OGGETTISTICA


LPWK - Desall - Luca Galbusera per Alessi, *La trama e l'ordito*.

ARTE

Tuttavia, come evidenziato, è proprio questo il centro dell'attuale ricerca sui calcestruzzi, che limiterà indubbiamente il peso ambientale degli ultra-performanti, aggiungendosi alle ottime prestazioni di durabilità che, già adesso, li rendono – in alcune applicazioni e sul lungo periodo – più *green* ed economici rispetto ai tradizionali[190]. Per completezza, aggiungiamo che gli UHPFRC consentono anche di raggiungere alti livelli di sostenibilità a livello progettuale, dal momento in cui l'approccio dematerializzato consente una globale riduzione del materiale impiegato. È chiaro, dunque, che la questione ambientale sarà dominante nei prossimi anni e avrà delle altrettanto importanti ripercussioni economiche nel settore dei calcestruzzi, anche e soprattutto in Italia, aprendo molte possibilità di investimento compatibili con le applicazioni già affermate degli ultra-performanti, di cui a questo punto, vale la pena fare una prima classificazione, che ne individua quattro categorie principali: applicazioni strutturali, non strutturali, di attrezzatura e di arredamento e applicazioni non legate all'edilizia (immagine a pag. 224).

La prima categoria è suddivisa in opere di nuova edificazione e di riqualificazione, per i quali si fa riferimento a interventi sulle strutture di elevazione, sia verticali che orizzontali, oppure a interventi realizzati in virtù di carichi attesi eccezionali. Per le applicazioni non strutturali, si distinguono interventi sui sistemi di chiusura (sia verticali – pareti perimetrali – che orizzontali – manti di copertura) e sulle partizioni interne ed esterne (con particolare riferimento a soluzioni di recinzione e a schermature). Le applicazioni per elementi di arredo o per attrezzature si suddividono in interne ed esterne. Le prime prevedono, fondamentalmente, arredi interni e passerelle di collegamento fra volumi, mentre le seconde comprendono, coperture esterne, sistemi di collegamento (inclinati ed orizzontali) ed elementi di arredo urbano. Le applicazioni non legate all'edilizia, spaziano dall'oggettistica fino ad arrivare a macchinari industriali o di servizio, passando anche per realizzazioni legate al mondo dell'arte.

Quindi, considerate le applicazioni dell'UHPFRC e sulla base dei dati a disposizione, sembra esserci in Italia molto margine di investimento[191], soprattutto nel settore delle riqualificazioni, sia di infrastrutture che di edifici. A questo, si aggiunge il settore dell'arredo, in particolare quello di lusso, che ha saputo ben sfruttare le capacità estetiche dell'UHPFRC, applicandogli rapidamente il marchio di qualità *Made in Italy* e cogliendo le occasioni offerte dal modello Industria 4.0, come evidenziato nell'*excursus* fatto sulle tecniche di prefabbricazione[192].

Per quanto riguarda le infrastrutture, il centro studi di Federbeton ha effettuato un interessante comparazione tra il probabile investimento in infrastrutture e la crescita del prodotto interno lordo. La spesa corrente in tale settore assorbe oggi il 96% dei fondi stanziati dallo Stato, mentre gli investimenti fissi lordi sono scesi di due punti percentuali, attestandosi al di sotto della media europea. Anche solo riportare il dato ai livelli europei consentirebbe di sbloccare circa 16 miliardi di euro da destinare alle grandi opere, cui si aggiungono quelli provenienti dallo sblocca cantieri. Un investimento di tale portata, circa 46 miliardi, consentirebbe un ritorno in termini di PIL di un punto percentuale annuo per i prossimi 10 anni[193]. Ciò significa che l'UHPFRC si potrebbe porre facilmente al centro tra le esigenze di investimento finalizzate allo sviluppo economico del Paese e le istanze di carattere ambientale cui non possiamo più sottrarci. Addirittura, dalle imprese aderenti a Federbeton viene la proposta di puntare alle infrastrutture sostenibili per il Meridione d'Italia, con una stima di investimento che sfiora il mezzo miliardo di euro nell'orizzonte 2020-2030[194].

A tal proposito, sebbene non sia al Sud ma a Desenzano, in provincia di Brescia, a gennaio 2020 sono partiti i lavori per la riqualificazione del primo ponte italiano – un cavalcavia sulla linea ferroviaria Milano-Venezia – con cementi ad alte prestazioni fibro-rinforzati, utilizzando un prodotto di Italcementi, i.power. L'iniziativa rientra nel progetto MOSORE – Mobilità Sostenibile e Resiliente –, finanziato nella categoria Smart Mobility dalla Regione Lombardia, che ha stanziato oltre 10 milioni di euro. A guidare il progetto vi è l'Università di Brescia in collaborazione con diverse aziende italiane – Fasternet Soluzioni di Networking Srl, Ingenera Srl, Genesis Gi Srl, Imbal Carton Srl, Stmicroelectronics Srl, Enea e Italcementi –, anche con l'obiettivo di avviare, dopo i lavori, una fase di monitoraggio dell'intervento di circa 2 anni, in modo da fornire ai gestori i dati sullo stato del ponte in tempo reale[195].

Si spera dunque, che tale prima esperienza possa essere un trampolino di lancio per gli ultra-performanti nella riqualificazione di infrastrutture viarie che, come anticipato, si è già dimostrato un investimento valido negli Stati Uniti, in Canada e in Svizzera. Considerando che solo i chilometri di strada presenti sul territorio italiano sono oltre 600.000, certamente non mancano le possibilità di applicazione dell'UHPFRC, per cui esistono a livello internazionale normative di comprovata efficacia e numerosi esempi di *best practice*.

Le prospettive di crescita per l'UHPFRC nel settore infrastrutturale sono però in contrasto con i dati forniti dall'ANCE[196] a gennaio del 2020 che prevede, in realtà, un aumento totale degli investimenti nel settore delle costruzioni pari solo all'1,7%: l'ANCE stima che la Manovra del 2020 produrrà addirittura un effetto peggiorativo sul livello degli investimenti pubblici, quantificato in 860 milioni di euro in meno rispetto al livello previsto dalle precedenti Leggi di Bilancio[197]. Infatti, le nuove risorse vengono previste solo a partire dai prossimi anni, attuando «scelte di politica economica del tutto incompatibili con l'esigenza di rilanciare la crescita dal punto di vista strutturale e con l'urgenza di intervenire su un patrimonio infrastrutturale inadeguato, obsoleto e in molti casi degradato»[198].

Facendo le opportune specificazioni per il settore edile vero e proprio, è possibile notare che, sebbene gli investimenti in nuove abitazioni private abbiano visto un incremento del 5,4% rispetto al 2018, in continuità con un *trend* positivo avviatosi nel 2016, quelli in manutenzione straordinaria del patrimonio edilizio restano leader del settore, rappresentando

[190] Si veda il paragrafo 3.2 per considerazione basate sulla *life cycle analysis*.
[191] Si veda il paragrafo 3.2 e il 5.3.
[192] Si veda il paragrafo 3.3.
[193] Cfr. Ufficio Comunicazione Fe+derbeton, *Il futuro delle costruzioni è già qui*, www.stradeeautostrade.it, 2019. Si consideri che secondo l'ANCE – Associazione Nazionale Costruttori Edili – il ciclo espansivo del PIL, in atto dal 2015, è destinato a concludersi. Rispetto al 2007, è infatti sceso di ben 4,4 punti percentuali nel 2018. Nel 2019 la crescita è ferma a un modestissimo 0,2%. Cfr. Direzione Economica e Centro Studi ANCE, *Nota di sintesi*, *op. cit.*, 2019, pag. 7.
[194] Federbeton, *Infrastrutture sostenibili…*, *op. cit.*, 2019.
[195] *Italcementi: al via i lavori di adeguamento del primo ponte in Italia con calcestruzzi high-tech*, casaclima.com, 2019.
[196] ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili), *Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni. Nota di sintesi*, gennaio 2020, pag. 13.
[197] *Ivi*, pag. 13.
[198] *Ibidem*.

il 37 % degli investimenti totali in costruzioni. Rispetto al 2018, si stima una crescita al 2020 di circa lo 0,7%, tenendo conto anche della proroga, prevista nell'ultima legge di Bilancio, del potenziamento al 50% delle detrazioni per le ristrutturazioni edilizie e di quelle relative (fino al 65%) agli interventi di riqualificazione energetica degli edifici[199], cui si aggiunge anche il cosiddetto "bonus facciate". Tale misura prevede in particolare, una detraibilità IRPEF del 90% delle spese sostenute per l'anno in corso, includendo addirittura gli interventi di manutenzione ordinaria[200]. Lo stesso vale anche per le opere pubbliche, prevedendo, dal 2020 al 2024, l'assegnazione ai comuni – per un massimo complessivo di 500 milioni annui – di contributi destinati a opere pubbliche per l'efficientamento energetico e di 400 milioni di euro per l'edilizia pubblica, la manutenzione della rete viaria, la copertura del dissesto idrogeologico e la prevenzione del rischio sismico[201]. Per le province e le città metropolitane si stanziano invece 6,1 miliardi di euro per il periodo 2020-2034 per interventi analoghi sulle infrastrutture di loro competenza. Alle regioni invece i fondi si limitano a 2,4 miliardi di euro.

Tali dati, incrociati con le strategie ambientali di *deep requalification* promosse in Europa, aprono a interessanti dinamiche per l'UHPFRC che, com'è noto, vede tra le sue maggiori applicazioni proprio la sostituzione di facciate preesistenti di edifici. L'IEA, infatti, ritiene che sia necessario incrementare con una certa urgenza le performance degli involucri, portando il tasso di riqualificazione dal 2-3% del 2017 al 3-4% nel 2025[202], soprattutto considerando che le emissioni di CO_2 degli edifici sono aumentate dell'1% annuo dal 2010 al 2017 e che l'uso di energia elettrica nello stesso periodo è cresciuta del 2,5%, sfiorando addirittura il 6% nei paesi in via di sviluppo.

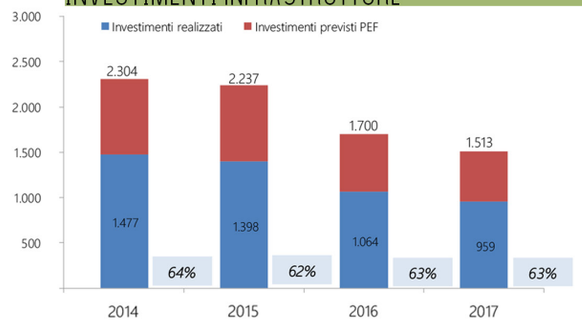
Inserendosi nei binari tracciati dall'IEA, il CEMBUREAU, assieme alla European Cement Research Academy, ha presentato alla Commissione Europea una serie di progetti finalizzati a promuovere l'efficientamento degli edifici in calcestruzzo. Si citano, in particolare, il Level(s) framework, avente l'obiettivo di stabilire un maneggevole set di indicatori per la valutazione ambientale degli edifici con approcci LCA e LCC, e un altro per il calcolo del potenziale di ri-carbonizzazione del calcestruzzo, sviluppando una metodologia testata in ciascun paese dell'Unione, rivelando come fino al 25% delle emissioni del processo produttivo possono essere riassorbite durante la vita dell'edificio[203].

Accanto alle prospettive applicative per la riqualificazione di edifici e infrastrutture, vi è, come anticipato, anche un altro settore in cui l'UHPFRC sta guadagnando sempre più rilievo. Si fa riferimento, naturalmente, al settore del mobile: si pensi che molte aziende italiane hanno lanciato, negli ultimi anni, linee in ultra-performanti per la realizzazione di elementi di arredo *indoor* ed *outdoor*. Tra queste, basti citare B&B Italia che realizza in UHPFRC i tavoli Tobi-Ishi e Fiore, prodotti da il Cantiere su design rispettivamente di Edward Barber e Jay Osgerby e Naoto Fukusawa.

[199] *Ibidem.*
[200] *Ibidem.*
[201] Cfr. *Legge 160/2019, Bilancio di previsione dello stato per l'anno finanziario 2020 e bilancio pluriennale per il triennio 2020-2022.*
[202] IEA, *Energy Technology Perspectives 2017…*, *op. cit.*, 2017, pag. 96.
[203] CEMBUREAU, *Activity Report 2018…*, *op. cit.*, 2019, pp. 25-26.

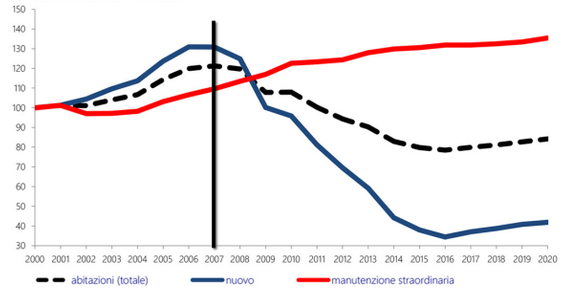
MERCATO UHPFRC

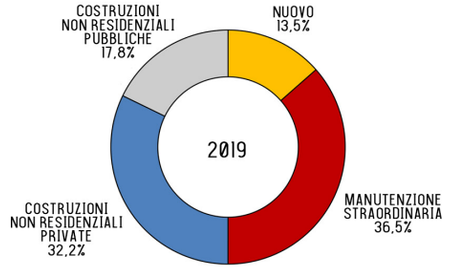
INVESTIMENTI INFRASTRUTTURE



Dati ANCE

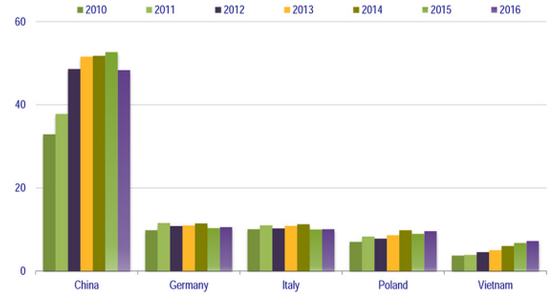
SETTORE EDILE





Dati ANCE

SETTORE DEL MOBILE - MAJOR EXPORTING COUNTRIES



Dati CSIL



01 APPLICAZIONI STRUTTURALI

Riqualificazione strutturale di infrastrutture



01 APPLICAZIONI STRUTTURALI

Riqualificazione strutturale di edifici



02 APPLICAZIONI NON STRUTTURALI

Elementi di facciata per *deep requalification*



03 ARREDO E ATTREZZATURE

Se si considera che il consumo mondiale di mobili è di circa 460 miliardi di dollari statunitensi e che i principali esportatori sono Cina, Germania, Polonia, Italia e Vietnam, appaiono chiare le potenzialità del settore anche per gli ultra-performanti, che giovano anche della reputazione italiana in termine di qualità dei prodotti offerti, avvantaggiati dal timbro *Made in Italy*[204]. Particolarmente redditizio è il mercato cinese, dove la ricerca da parte degli acquirenti di prodotti di alta fascia e il contemporaneo aumento del loro potere d'acquisto hanno contribuito a un sostanziale aumento dell'*export* verso l'Oriente.

Infatti, al termine del 2018, i dati rilasciati dal Centro Studi Industria Leggera, mostrano dal 2012 al 2017 una crescita della filiera dell'arredamento, sia grazie proprio alle esportazioni, che assorbono il 58% della produzione, che al mercato interno, che ha registrato un +0,8% dovuto anche al bonus mobile previsto dalle ultime finanziarie (detrazioni IRPEF fino al 50% per l'acquisto di mobili e grandi elettrodomestici)[205]. Ciò si è tradotto in un aumento dei ricavi pari al 4,4% (21,8 miliardi di euro), spinto anche dallo sviluppo delle vendite online, incrementate del 53% nel 2018, per un valore economico di 1,4 miliardi di euro[206].

In conclusione, si può affermare che, nonostante la congiuntura economica non sia delle più favorevoli, l'UHPFRC troverebbe spazio nel settore delle costruzioni soprattutto nell'ambito delle riqualificazioni, sia di edifici che di infrastrutture, e nel promettente comparto dell'arredo, dove le sue caratteristiche superficiali lo rendono già adesso particolarmente appetibile per designer e architetti.

Nel caso delle riqualificazioni tanto le infrastrutture di collegamento, la cui situazione di degrado è ben nota alla cronaca nazionale, che l'edilizia gioverebbero dell'utilizzo degli ultra-performanti, sia nel caso di interventi di carattere strutturale che di efficientamento energetico, soprattutto rispetto alla sostituzione di elementi di facciata. Proprio in virtù di queste considerazioni sono stati strutturati i casi applicativi presentati nel capitolo 5 della tesi, indirizzati all'ottimizzazione geometrica e produttiva di un elemento di facciata e al pre-dimensionamento di una struttura mista in calcestruzzo armato-UHPFRC.

Ai vantaggi strettamente economici che l'utilizzo del materiale comporterebbe, vanno aggiunte considerazioni relative ai fattori ambientali: appurato, infatti, che a breve periodo non sarà possibile rinunciare al calcestruzzo come sistema costruttivo, diventa a maggior ragione fondamentale avvalersi di materiali di per sé improntati su strategie produttive e progettuali più green ed economiche. Vanno, inoltre, anche citati i vantaggi derivanti dalla proficua relazione tra Industria 4.0 e materiali avanzati, sollecitata anche dalla Manovra 2020 che lancia un nuovo credito d'imposta per le aziende che sosterranno spese a titolo di investimento per nuovi beni strumentali, per la transizione ecologia, per l'innovazione tecnologica 4.0 e per la formazione del personale in tal senso.

[204] Si consideri che la finanziaria del 2020 ha stanziato per l'attrazione degli investimenti stranieri e per la promozione del *Made in Italy* circa 45 milioni di euro per il 2020 e 40 per il 2021. Cfr. *Legge 160/2019, Bilancio di previsione dello stato per l'anno finanziario 2020 e bilancio pluriennale per il triennio 2020-2022*.

[205] InJob, *Design e Arredamento Made in Italy: trend di crescita*, 2019, https://www.injob.com/it/it/storie-di-business/arredamento-e-design-i-numeri-di-un-settore-in-crescita. Si veda anche Russo, D., "La situazione dell'industria del mobile in Italia nel 2019", in *Linkiesta*, 2019, https://www.linkiesta.it/it/blog-post/2019/08/01/la-situazione-dellindustria-del-mobile-in-italia-nel-2019/28244/.

[206] *Ibidem*.

Anche e soprattutto nel settore dei calcestruzzi, automazione e digitalizzazione dei processi, oltre ad aumentarne la produttività, sono anche vettori di una riduzione del suo impatto energetico e materico: un recente studio sviluppato da Garcìa de Soto *et alii*[207] ha analizzato il costo e i tempi richiesti per la costruzione di una parete in calcestruzzo con diversi gradi di complessità formale, realizzata mediante fabbricazione robotizzata. I risultati ottenuti hanno dimostrato che l'additive manufacturing fornisce un alto livello di produttività rispetto ai sistemi convenzionali in calcestruzzo nel caso di strutture complesse, mentre non riesce a essere particolarmente competitiva nel caso della realizzazione di elementi semplici.

Oltre all'*additive manifacturing*, anche il *digital design* è responsabile di un nuovo approccio che, inizialmente indirizzato alla ricerca della "forma perfetta", si è rapidamente convertito a un efficientamento delle risorse e del materiale che va ben oltre l'esplorazione morfologica, concentrandosi sul miglioramento prestazionale dell'intero edificio.

Quello che sta accadendo, dunque, vede la convergenza di istanze di carattere ambientale, produttive, progettuali ed economiche che creano un terreno fertile per la diffusione degli ultra-performanti che si configurano, quindi, come un efficace coronamento di politiche già in atto: sostenibili, durevoli, progettabili e producibili digitalmente, plasmabili, mimetici e ultra-resistenti, gli UHPFRC hanno un unico ostacolo alla loro diffusione, ovvero la difficoltà che caratterizza l'ingresso di qualsiasi innovazione in un settore tradizionalista come quello costruttivo. Ancora una volta è, infatti un problema di conoscenza, tecnica, operativa e progettuale, cui proveremo a porre rimedio nei capitoli successivi.

[207] Cfr. Garcìa de Soto, B. *et alii*, "Productivity of digital fabrication in construction: cost and time analysis of a robotically built wall", in *Automation in Construction*, vol. 92, 2018, pp. 297-311.

04

UHPFRC: il progetto della conoscenza

«Se oggi, estremizzando, si può dire che la tecnica permette di fare tutto, i limiti da porre sono di tipo culturale: va proposto ciò che può essere capito e può costituire un valore».

Ezio Manzini, *Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale*, Domus Academy, Milano, 1990, pag. 96.

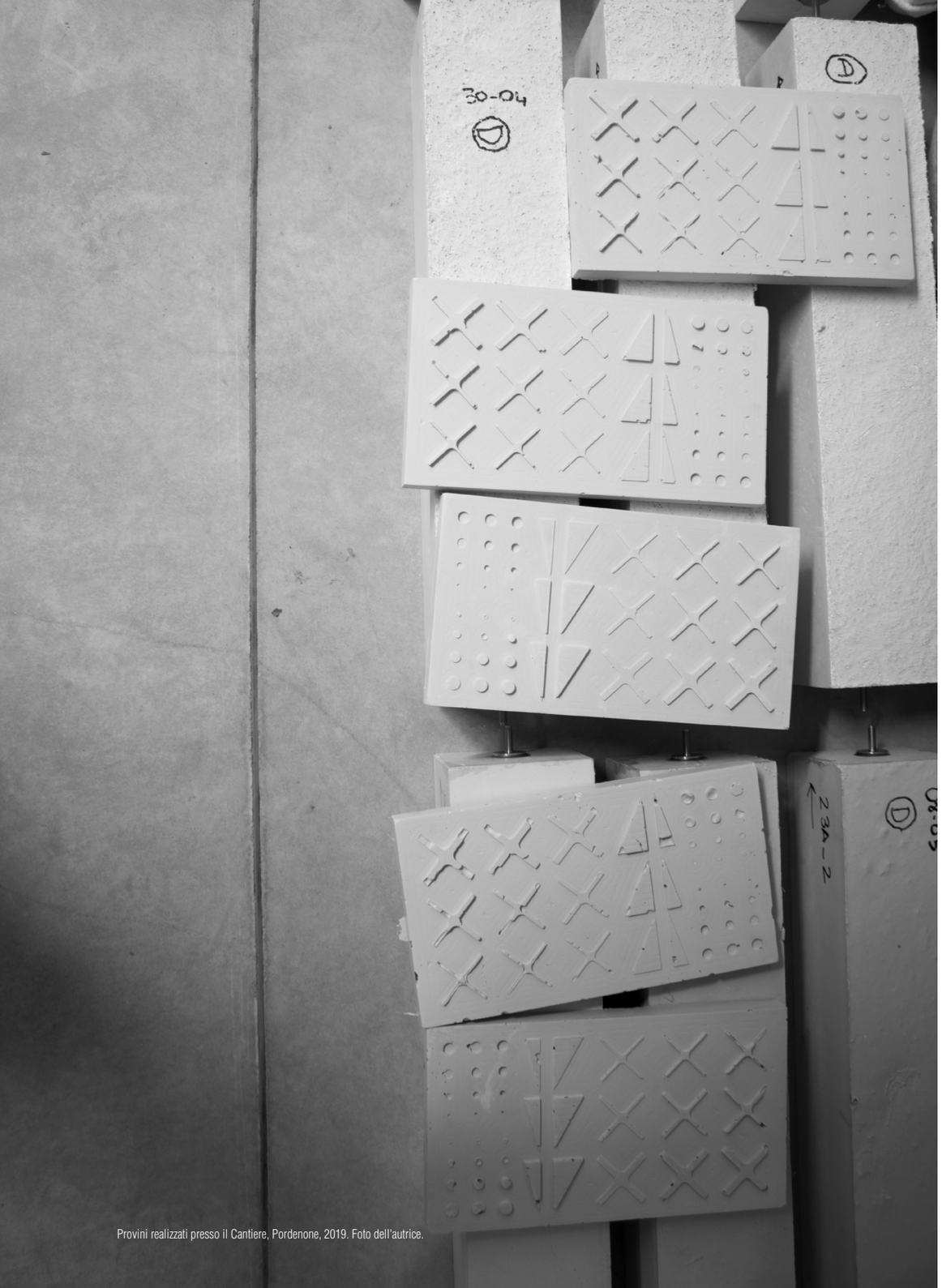
Il quarto capitolo è quello che maggiormente deriva dall'esperienza avuta in azienda. Il confronto con le professionalità lì presenti ha messo in evidenza la necessità di esplorare le caratteristiche del materiale, andando oltre i dati esclusivamente scientifici e, alle volte, difficilmente riconducibili all'interno della pratica costruttiva, cercando di individuare e soddisfare le mancanze presenti nel sistema di conoscenza del materiale.

Tali mancanze si sono rivelate essere vincolate soprattutto alla costruibilità del materiale, ovvero alla sua capacità di restituzione formale che, non essendo adeguatamente esplorata, si risolve spesso in una serie di soluzioni per tentativo, che comportano sprechi e perdite economiche.

Il sistema di prove così sviluppato – che comprende protocolli tradizionali e sperimentali – si pone l'obiettivo di verificare il comportamento al ritiro e alcuni aspetti connessi alla durabilità, alla fluidità del materiale intesa come la sua abilità di restituire forme articolate e all'accuratezza nel riprodurre finiture superficiali. Sono questi, infatti, i campi in cui durante la fase produttiva si riscontrano le maggiori difficoltà, in parte risolvibili con una progettazione consapevole del dettaglio che, però, non può prescindere da una verifica prestazionale del materiale.

È bene chiarire, dunque, che la finalità delle prove non è quella della caratterizzazione delle proprietà, essendo, tra l'altro, stati utilizzati prodotti ben affermati sul mercato per cui esiste una vasta documentazione, bensì di stabilire un metodo per la verifica della costruibilità facilmente riproducibile da addetti anche non specializzati e i cui risultati, opportunamente raccolti e deposti in banche dati, possano costituire una casistica cui fare riferimento per verificare l'influenza delle condizioni ambientali, costruttive e formali sulla riuscita del progetto.

Inoltre, il protocollo elaborato nasce prima di tutto per verificare se stesso, ovvero per appurare la sua efficacia all'esterno di un laboratorio, e quindi di ambienti controllati e di tecnici specializzati. I risultati ottenuti, soprattutto per le prove tradizionali, anche contro le aspettative, hanno dimostrato non solo coerenza con l'ampia letteratura scientifica disponibile, ma anche che è effettivamente possibile creare un protocollo scientifico agile, economico e semplice per testare il comportamento del materiale all'interno delle più disparate condizioni al contorno.



Provini realizzati presso il Cantiere, Pordenone, 2019. Foto dell'autrice.

4.1 La costruzione della conoscenza: prove sperimentali per la verifica prestazionale di UHPFRC per l'architettura

Il calcestruzzo, più degli altri materiali da costruzione, vive con l'Architettura un rapporto preferenziale, indubbiamente dovuto alla sua plasmabilità e alla sua capacità di rispondere, quasi senza remore, a qualsivoglia esigenza di sperimentazione formale, funzionale e costruttiva.

A dispetto delle pressoché illimitate possibilità offerte, che sembrerebbero implicare, quindi, una conoscenza profonda del materiale, «il calcestruzzo, o cemento, è spesso trattato più come una pasta generica di cui solo le proprietà fisiche essenziali sono utili (e note) agli architetti, a scapito di una conoscenza della natura e della composizione esatte delle miscele e delle reazioni chimiche in gioco»[1]. Ne deriva che «innovare nel campo della concezione architettonica e della costruzione significa quindi per un architetto tutt'altra cosa che per un ingegnere strutturale o per uno scienziato dei materiali. Ciò significa innanzitutto mettere in correlazione diversi parametri, possibilità tecniche, dati socioeconomici o addirittura politici, vincoli spaziali o temporali, […] in vista di stabilire un nuovo paradigma»[2].

Si è infatti ben consci che il grado e il tipo di conoscenza richiesto agli architetti è ben differente da quello appartenente ad altre figure professionali, tuttavia l'approccio multidisciplinare costantemente evocato richiede necessari sconfinamenti finalizzati, in questo caso, a riportare all'interno del progetto architettonico alcuni elementi bollati come a esso estranei. Infatti, «se l'artificiale si estende (nel senso che sempre più frequentemente ci capita di vivere in ambienti integralmente artificiali) e se l'artificiale si intensifica (nel senso che i materiali di cui è fatto sono più profondamente manipolati), occorre allargare la progettazione su terreni che tradizionalmente non sono mai stati praticati dalla cultura del progetto»[3].

Ciò è ancor più vero nel caso degli ultra-performanti in particolare e dei materiali avanzati in generale, in cui l'assenza di conoscenza, anche non prettamente architettonica, ne rende se non impossibile, quantomeno errato e antieconomico l'utilizzo. Non solo, in un'epoca in cui lo spreco non è più ammesso, un cattivo impiego dei materiali ha ripercussioni sociali, ambientali e, per certi versi, politiche.

[1] Morel, P., "Un cemento del XXI secolo per un'architettura del XXI secolo", in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futuro*, Skira Editore SpA, Milano, 2016, pag. 29.
[2] *Ivi*, pp. 29-31.
[3] Manzini, E., *Artefatti..., op. cit.*, 1990, pag 96.

Sulla base di questi presupposti e con la consapevolezza delle difficoltà insite nel comprendere il comportamento dei materiali ad alto contenuto tecnologico, è stato sviluppato un metodo di costruzione della conoscenza incentrato su un programma di prove tradizionali e sperimentali avente l'obiettivo, da un lato, di fornire una chiave di lettura architettonica a sistemi e metodologie di analisi tipicamente ingegneristiche e, dall'altro, di indagare aspetti comportamentali legati alla costruibilità e alla resa estetica e formale che, seppur essendo alla base della riuscita di un prodotto innovativo per l'Architettura, sono paradossalmente i meno approfonditi.

Piuttosto che indagare a fondo la chimica che governa il calcestruzzo, ci interessa quindi comprendere le cause macroscopiche che ne determinano le proprietà meccaniche e di durabilità e ne influenzano la costruibilità e l'aspetto, riportando l'attenzione sul calcestruzzo come sistema costruttivo, come materiale plastico a servizio del progetto architettonico.

Tuttavia, ai nostri giorni, vi è rispetto al passato una differenza sostanziale: mentre fino a poche decine di anni fa, conoscere un materiale significava definire un set di relazioni tra le condizioni d'uso e le *performance* che lo caratterizzavano, ovvero descrivere tanto un'entità capace di uno specifico comportamento quanto «un sedimento di valori culturali»[4], oggi non è più possibile operare una classificazione usando nomi dotati di significati riconoscibili, a maggior ragione per il calcestruzzo, il cui ininterrotto processo di trasformazione è l'unico elemento di continuità della sua intera evoluzione[5].

Vi è dunque una difficoltà tecnica, dovuta al fatto che progettisti e produttori si scontrano con un campo di possibilità in continua espansione, dove la selezione tanto dei materiali quanto dei processi di trasformazione si fonde in quella che Manzini ha definito "hyper-selezione"[6].

"Costruire in calcestruzzo", non determina più una scelta materica ovvia e, anche all'interno di essa, sono comunque consistenti le opzioni che si presentano al progettista, il quale non può che decidere in seguito a una profonda e ampia analisi dei requisiti progettuali, dell'intero processo manifatturiero e delle successive vite del prodotto.

Ad esempio, all'interno di una serie di prodotti tutti definibili come ultra-performanti, è facile riscontrare che, a dispetto di una scheda tecnica pressoché identica, non tutti i prodotti si prestano a soddisfare il completo *range* di applicazioni dell'UHPFRC. Molti prodotti infatti, non avendo le stesse *performance* in termini di resistenza meccanica, e distinguendosi anche per modalità di collocazione sul mercato, produttive e di relazione con il cliente, possono agevolmente competere solo sulla fascia di applicazioni non strutturali o di design.

Nel definire il programma di prove, si è cercato, dunque, sia di sviluppare un metodo di costruzione della conoscenza "generale" di un materiale – un calcestruzzo – a supporto del progetto architettonico sia un metodo di conoscenza "particolare" che consentisse, sulla base dei requisiti prestazionali, sia di scegliere il prodotto più idoneo o, meglio, adeguato alle specifiche esigenze di una determinata componente architettonica, sia di verificare le scelte progettuali adottate, soprattutto in termini di compatibilità con le caratteristiche del materiale.

[4] Manzini, E., *The material of invention*, *op. cit.*, 1986, pag. 33.
[5] Si veda il paragrafo 3.1.
[6] Manzini, E., *The material of invention*, *op. cit.*, 1986, pag. 33.

La doppia scala di indagine ha evidenziato la necessità di circoscrivere l'analisi su diversi livelli per poter definire il protocollo di prove vero e proprio. Il primo livello è indubbiamente quello della relazione con le applicazioni: gli UHPFRC hanno infatti un'ampia versatilità, e sono utilizzabili per applicazioni strutturali, non strutturali, di attrezzatura e di arredamento e applicazioni non legate all'edilizia.

Di conseguenza, il protocollo di prove doveva essere indirizzato a indagare *performance* direttamente connesse ad applicazioni architettoniche, escludendo quindi gli interventi di riqualificazione e quelli non legati all'edilizia. Tale scelta è, in realtà, dovuta anche a un'altra considerazione: dal momento in cui il protocollo vuole essere uno strumento a disposizione tanto dei progettisti che dei produttori, anzi dei prefabbricatori, si è deciso di non considerare applicazioni che prevedono prevalentemente un utilizzo *cast-in-side* dell'UHPFRC (riqualificazioni di infrastrutture ed edifici). In sostanza dunque, i test sono specificatamente indirizzati alla verifica del comportamento del materiale, soprattutto in termini di costruibilità, rispetto alla realizzazione di componenti prefabbricate non strutturali e di arredo.

A questo punto, sono stati quindi individuati i principali requisiti richiesti alle componenti architettoniche, riferiti alle classi di esigenza di sicurezza (resistenza meccanica, reazione al fuoco, resistenza al fuoco, resistenza agli urti, resistenza al punzonamento dinamico e statico), di fruibilità e integrabilità (affidabilità, efficienza, integrazione, manutenibilità, riparabilità, sostituibilità, facilità di intervento, attrezzabilità), di benessere (isolamento termo-acustico) e di aspetto (regolarità e stabilità di aspetto e colore).

A ciò si aggiunge l'esigenza trasversale della durabilità (resistenza agli agenti aggressivi, resistenza agli attacchi biologici, resistenza al gelo, stabilità chimico-reattiva, permeabilità, tenuta all'acqua, resistenza superficiale liquidi freddi, resistenza superficiale calore secco e calore umido, resistenza alla corrosione, resistenza all'abrasione e all'usura) e del buon comportamento al ritiro, particolarmente rilevante in quanto conduce alla formazione di fessurazioni.

Sulla base dei requisiti così definiti, sono stati predisposti i test per la loro verifica. Tenendo a mente che il protocollo di prove viene effettuato in fase di produzione, sono esclusi automaticamente i requisiti relativi a fruibilità, integrabilità e benessere. Tra i requisiti relativi alla sicurezza, quello di resistenza meccanica è sicuramente il più significativo, in quanto, qualora fosse verificato, offrirebbe una panoramica sul comportamento strutturale dei materiali. Tuttavia, avendo esaminato prodotti già affermati sul mercato, si è deciso di escludere le prove di resistenza meccanica, che comunque sarebbero state effettuate sulla base della normativa esistente – con particolare riferimento a quella francese – a favore di altre a carattere sperimentale. Esclusa, quindi, la resistenza meccanica, le prove si sono indirizzate verso la verifica dei requisiti di durabilità, di comportamento al ritiro e afferenti alla classe esigenziale dell'aspetto, con ripercussioni, come anticipato, sulla costruibilità dell'elemento.

Per quanto riguarda la verifica dei requisiti di durabilità, la normativa francese[7] punta alla formalizzazione di una metodologia specificata in base a un certo tipo di danno atteso, scegliendo un numero ridotto di indicatori di durabilità – percentuale di *water voids*, permeabilità all'ossigeno, coefficiente di diffusione degli ioni cloruri e contenuto di portlandite –

[7] SETRA-AFGC, *Interim recommendations…*, *op. cit.*, 2013

intesi come parametri chiave per quantificare e predire la durabilità del calcestruzzo. Il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, invece, nell'ultimo aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni[8], rimanda ai protocolli europei di riferimento – *EN 12350: 2019: Testing Fresh Concrete e EN 12390: 2019 – Testing Hardened Concrete* – assimilati dall'Ente Italiano di Normazione (UNI) nei set di norme *UNI EN 12350: 2019: Prove sul calcestruzzo fresco* e *UNI EN 12390: 2019: Prove sul calcestruzzo indurito*, composte rispettivamente di 12 e 17 protocolli riferiti, però, alla totalità dei test effettuabili sui calcestruzzi[9].

La normativa italiana, però, ha in realtà molti altri protocolli cui fare riferimento, naturalmente sempre modellati sulla norma europea. In particolare, la norma europea *EN 206-1*[10], definisce sei categorie di classi di esposizione, differenziate in base al tipo e all'entità del degrado che le condizioni ambientali potrebbero determinare sull'opera in calcestruzzo armato[11].

[8] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *NTC - Norme Tecniche per le Costruzioni*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2018. Le NTC, inoltre, definiscono la durabilità come la «capacità della costruzione di mantenere, nell'arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione». Per durabilità quindi, si intente la conservazione dell'efficienza iniziale per tutta la vita di servizio (pag. 34).

[9] Nello specifico, si fa riferimento a: UNI, *UNI EN 12350-1:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 1: Campionamento e apparecchiatura comune*; UNI, *UNI EN 12350-2:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 2: Prova di abbassamento al cono*; UNI, *UNI EN 12350-3:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 3: Prova Vébé*; UNI, *UNI EN 12350-4:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 4: Indice di compattabilità*; UNI, *UNI EN 12350-5:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 5: Prova di spandimento alla tavola a scosse*; UNI, *UNI EN 12350-6:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 6: Massa volumica*; UNI, *UNI EN 12350-7:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 7: Contenuto d'aria - Metodo per pressione*; UNI, *UNI EN 12350-8:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 8: Calcestruzzo autocompattante - Prova di spandimento e del tempo di spandimento*; UNI, *UNI EN 12350-9:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 9: Calcestruzzo autocompattante - Prova del tempo di efflusso*; UNI, *UNI EN 12350-10:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 10: Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante scatola ad L*; UNI, *UNI EN 12350-11:2010: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 11: Calcestruzzo autocompattante - Prova di segregazione mediante setaccio*; UNI, *UNI EN 12350-12:2010: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 12: Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante anello a J*; UNI, *UNI EN 12390-1:2012: Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 1: Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme*; UNI, *UNI EN 12390-2:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza*; UNI, *UNI EN 12390-3:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini*; UNI, *UNI EN 12390-4:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 4: Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova*; UNI, *UNI EN 12390-5:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 5: Resistenza a flessione dei provini*; UNI, *UNI EN 12390-6:2010: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 6: Resistenza a trazione indiretta dei provini*; UNI, *UNI EN 12390-7:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 7: Massa volumica del calcestruzzo indurito*; UNI, *UNI EN 12390-8:2019 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 8: Profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione*; UNI, *UNI EN 12390-9:2019 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 9: Resistenza al gelo-disgelo con sali disgelanti – Scagliatura*; UNI, *UNI EN 12390-10:2019 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 10: Determinazione della resistenza alla carbonatazione del calcestruzzo a livelli atmosferici di anidride carbonica*; UNI, *UNI EN 12390-11:2015 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 11: Determinazione della resistenza ai cloruri del calcestruzzo, diffusione unidirezionale*; UNI, *UNI EN 12390-13:2013: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 13: Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione*; UNI, *UNI EN 12390-14:2018: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 14: Metodo semi-adiabatico per la determinazione del calore rilasciato dal calcestruzzo durante il suo processo di indurimento*; UNI, *UNI EN 12390-15:2019: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 15: Metodo adiabatico per la determinazione del calore rilasciato dal calcestruzzo durante il suo processo di indurimento*; UNI, *UNI EN 12390-16:2019: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 16: Determinazione del ritiro del calcestruzzo*; UNI, *UNI EN 12390-17:2019: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 17: Determinazione della viscosità (creep) del calcestruzzo in compressione.*

[10] Si veda EN, *EN 206: 2013+A1:2016: Concrete - Specification, performance, production and conformity.*

[11] La prima categoria, formata da una sola classe di esposizione (X0), racchiude fenomeni di degrado derivanti da condizioni ambientali che potremmo definire standard, ovvero non particolarmente avverse. La seconda categoria riguarda gli eventuali effetti di corrosione indotti da carbonatazione e comprende quattro classi (XC1, XC2, XC3, XC4), differenziate sulla base del livello di



Inizio del programma di prove: 26 marzo 2019, il Cantiere, Pordenone.

La norma europea viene recepita anche dalle Norme tecniche per la costruzione, che la usano come riferimento per definire le classi di esposizione. Rispetto alla durabilità quindi, considerando che la riproducibilità del test anche da non addetti ai lavori era uno degli obiettivi imprescindibili della campagna di prove, si è optato per l'esclusione dei test di resistenza alla degradazione per cicli di gelo e disgelo – lunghi, complessi e costosi – nonché di quelli di permeabilità ai gas, che richiedono macchinari appositi[12], preferendo indagare le reazioni all'acqua e alle condizioni ambientali. La determinazione dell'assorbimento d'acqua può avvenire per applicazione del liquido per pressione atmosferica[13] o per pressione applicata[14]. Per semplicità di esecuzione si è optato per il primo caso, anche per avere un riscontro sui risultati delle prove di ritiro. Per avere un'idea rispetto alle condizioni ambientali, è stata altresì determinata la profondità di carbonatazione[15], fondamentale per garantire che le armature o le fibre metalliche eventualmente impiegate non subiscano corrosione. Vedremo in seguito come anche questa prova si è rivelata utile per confermare quanto riscontrato nelle prove di ritiro, indubbiamente le più complesse in termini di interpretazione dei risultati ottenuti. Per quanto riguarda quest'ultime, si è deciso di effettuare una prova tradizionale, con riferimento dunque alle norme UNI relative[16], e una sperimentale, denominata prova di "sensibilità al ritiro", avente lo scopo di indurre le fessurazioni negli elementi, sottoposti, inoltre, a diverse condizioni ambientali. Le fessurazioni da ritiro infatti, seppur nella maggior parte dei casi non abbiano ripercussioni strutturali, oltre a essere antiestetiche, consentono l'accesso ad acqua e sostanze nocive, riducendo anche significativamente la durabilità del materiale. Inoltre, entrambe le prove di ritiro sono dirette anche a cercare di comprendere il fenomeno in condizioni reali di produzione, in quanto la conservazione in ambiente protetto è molto lontana, in termini di costi e di tempi, dalle esigenze aziendali.

umidità cui è sottoposto il calcestruzzo. La terza categoria include tre classi di esposizione (XD1, XD2, XD3) individuate sulla base di fenomeni di corrosione indotti da cloruri, esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare. La corrosione indotta da cloruri presenti in acqua di mare individua invece la quarta categoria, comprendente tre classi di esposizione (XS1, XS2, XS3). La quinta categoria raccoglie i fenomeni di degrado derivanti dall'attacco di cicli di gelo e disgelo, individuando quattro classi di esposizione (XF1, XF2, XF3, XF4), mentre la sesta comprende fenomeni di degrado frutto di attacchi di tipo chimico e è formata da tre classi di esposizione (XA1, XA2, XA3). In accordo con la combinazione di classi di esposizione, si individuano le caratteristiche minime che deve possedere il calcestruzzo per garantire la durabilità dell'opera: il rapporto a/c massimo, il contenuto minimo di cemento e la classe di resistenza minima. Ad esempio, una struttura con classe di esposizione XA3 dovrà avere una classe di resistenza minima C35/45 e un rapporto massimo acqua cemento di 0,45. Cfr. EN, *EN 206:2013+A1:2016*, *op. cit.*, pp. 19-20.

[12] Ad esempio, le modalità di prova descritte dalla norma UNI, *UNI 11164: 2005 - Calcestruzzo. Determinazione della permeabilità all'ossigeno* richiedono l'utilizzo di ossigeno che, non reagendo con il calcestruzzo, consente di valutare la capacità di movimento dei fluidi nella microstruttura del materiale. L'apparecchiatura necessaria a effettuare la prova consiste in una bombola di ossigeno munita di valvola riduttrice e regolatore di precisione di pressione, un manometro con accuratezza minima dello 0,6 %, una cella di permeabilità in grado di garantire la tenuta al gas tra la superficie laterale del provino e la superficie laterale interna della cella stessa. Inoltre, occorrerà munirsi di un flussometro a bolla d'aria costituito da un cilindro di vetro con sezione trasversale e volume noti e di un cronometro con accuratezza pari ad 1/10 di secondo.

[13] La norma di riferimento è la UNI, *UNI 7699:2018 - Prova sul calcestruzzo indurito – Determinazione dell'assorbimento di acqua alla pressione atmosferica.*

[14] UNI, *UNI EN 12390-8:2019…*, *op. cit.*

[15] La procedura utilizzata è descritta nella UNI, *UNI EN 14630:2007 – Determinazione della profondità di carbonatazione di un calcestruzzo indurito con il metodo della fenolftaleina e protezione dell'armatura del calcestruzzo.*

[16] UNI, *UNI 11307: 2008 - Prova sul calcestruzzo indurito. Determinazione del ritiro* e UNI, *UNI EN 12390-16:2019*, *op. cit.*

Infine, per protocollo il di verifica della qualità estetica dei prodotti, inerente quindi alla classe esigenziale dell'aspetto, la normativa non offre molti spunti, quantomeno non per esplorare quella che è stata qui definita la "caratterizzazione estetica dei prodotti", che si traduce in una serie di indicatori in grado di definire la capacità del materiale di riprodurre alcune finiture particolari.

A ciò si aggiunge l'unica prova sperimentale realizzata su calcestruzzo fresco, mirata, anche sul modello della prova di scorrimento confinato mediante scatola ad L[17], a misurare la fluidità del materiale verificandone, come vedremo meglio più avanti, l'abilità di saturare una cassaforma appositamente studiata per porsi come un ostacolo al flusso.

È bene chiarire che le prove sperimentali qui sviluppate – test di sensibilità al ritiro, di caratterizzazione estetica dei prodotti e di fluidità – nascono da un confronto serrato con la realtà produttiva, nascendo e costruendosi sull'esperienza decennale dell'azienda partner, reinterpretata e sintetizzata in modo da astrarne difficoltà tecniche "tipo", poi convogliate all'interno di una protocollo ripetibile che, da un lato, fornisca, per quanto possibile, un modello di comportamento del materiale e, dall'altro, si ponga a monte della sperimentazione tecnica antecedente la realizzazione di un prodotto, evitando così la dispendiosa ricerca empirica delle soluzioni produttive e, indirettamente, progettuali.

Alla definizione del protocollo di prove, è seguita l'individuazione dei prodotti da sottoporre alla campagna sperimentale, prediligendo quelli con una maggiore versatilità e aggiungendone però alcuni utilizzati prevalentemente per applicazioni architettoniche. Va tuttavia specificato che, molto spesso, la possibilità di coprire ampie fasce di mercato è determinata dal fatto che, da un prodotto di partenza, si diramano molti sottoprodotti che, seppur conservando i principi base di comportamento, hanno delle formule diversificate in modo da poter essere utilizzati in più settori. Si è deciso di non considerare questo aspetto nella prima fase di selezione dei prodotti, in quanto le aziende di prefabbricazioni che lavorano con una particolare azienda produttiva, sono solitamente in grado di adoperare senza significative variazioni, se non in fase di impasto, i vari sottoprodotti.

Sulla base di queste considerazioni, per la selezione dei prodotti adoperati, denominati UHPFRC1, UHPFRC2 e UHPFRC3, sono state contattate le aziende produttrici richiedendo un *premix* che fosse compatibile con applicazioni architettoniche e di design e per cui fosse possibile adoperare fibre in alcool polivinilico, più maneggevoli e maggiormente impiegate dall'azienda partner. In tutti e tre i casi, personale specializzato proveniente dalla casa madre ha assistito alla realizzazione del primo getto, onde garantire buone condizioni di impasto e il rispetto delle corrette modalità di produzione. L'UHPFRC1, composto da cemento Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler*, agenti chimici, super-fluidificanti, acceleranti, fibre in alcool polivinilico e acqua, è stato realizzando adoperando una mescolatrice planetaria. Inserito il *premix*, questo è stato mescolato a secco per circa mezzo minuto, per poi aggiungere l'acqua assieme a metà del super-fluidificante previsto. Dopo circa 6 minuti, viene aggiunto il restante super-fluidificante assieme all'accelerante, mescolando per altri 6 minuti. Per ultime vengono aggiunte le fibre, sempre in percentuale pari al 3,00% del volume del composito. L'UHPFRC1 è stato sottoposto al protocollo di prove completo.

[17] UNI, *UNI EN 12350-10: 2019*, *op. cit.*

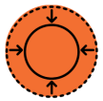
L'UHPFRC2, composto da cemento Portland, polvere di quarzo, micro-silice, sabbia di silice, agenti chimici, super-fluidificanti, acceleranti, fibre in alcool polivinilico e acqua, ha analoghe modalità produttive. Dopo aver versato gli ingredienti secchi all'interno della mescolatrice, si effettua un primo *mixing*, di circa 30 secondi, per poi aggiungere l'acqua e gli additivi contemporaneamente. Dopo circa 8 minuti, si procede ad aggiungere le fibre, questa volta in percentuale pari al 3,5% del volume del composito, mescolando per altri 8 minuti. Anche l'UHPFRC2 è stato sottoposto a tutte le prove prestabilite.

L'UHPFRC3 invece, ha una preparazione differente: il *premix* infatti – cemento Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler* – contiene al suo interno sia il super-fluidificante che l'accelerante deidratati. Dopo aver mescolato a secco il *premix* per circa trenta secondi, si aggiungono 2,75 litri d'acqua per ogni sacco da 25 Kg. Dopo la fluidificazione, è necessario mescolare per altri 2 minuti. Aggiunte le fibre, pari all'1% del peso degli ingredienti secchi, si mescola fino a completa assimilazione. In questo caso l'UHPFRC3 è stato sottoposto alla sole prove di caratterizzazione estetica e fluidità.

Di seguito sono riportati dettagliatamente i protocolli di prove così come sono stati svolti, iniziando dalle prove di ritiro che, come anticipato, si sono rivelate le più complesse, in quanto i meccanismi che lo determinano sono molti e tra loro continuamente interagenti, rendendo di fatto impossibile individuarne una causa univoca. Tale indeterminatezza si ripercuote anche sulle possibili soluzioni atte a impedirlo o ridurlo, soprattutto a causa delle forti dipendenze con i fattori ambientali.

PROTOCOLLO DI PROVE

PROVE DI RITIRO



TEST PER LA VALUTAZIONE DEL RITIRO LINEARE

UNI 11307: 2008



TEST DI SENTIBILITA' AL RITIRO

PROTOCOLLO SPERIMENTALE

PROVE DI DURABILITÀ



DETERMINAZIONE DELL'ASSORBIMENTO D'ACQUA ALLA PRESSIONE ATMOSFERICA

UNI 7699:2018



PROFONDITA' DI CARBONATAZIONE

UNI EN 14630:2007

PROVE DI VERFICA DELLA QUALITÀ ESTETICA



CARATTERIZZAZIONE ESTETICA

PROTOCOLLO SPERIMENTALE



PROVA DI FLUIDITA'

PROTOCOLLO SPERIMENTALE

protocolli normati
protocolli sperimentali



Provino per la valutazione del ritiro assiale, il Cantiere, Pordenone, 2019. Foto dell'autrice.

4.2 Protollo di prove di ritiro

Qualsiasi protocollo di prove di ritiro non può prescindere dalla descrizione, seppur sommaria, dei fenomeni che lo determinano, dipendenti da molteplici fattori tra cui essiccazione, stagionatura e condizionamento, nonché da parametri di carattere ambientale. Dal momento in cui le variazioni dimensionali da ritiro generano tensioni interne che, se superano a livello locale la resistenza a trazione del calcestruzzo generano microfessurazioni, appare evidente l'importanza di tale fenomeno al fine della valutazione della durabilità e dell'estetica del materiale. Il ritiro si divide in due macro-categorie fondamentali, il ritiro iniziale ("*early-age shrinkage*"), che riguarda le prime 24 ore di presa del calcestruzzo, e il ritiro a lungo termine, che avviene dopo le prime 24 ore. È inoltre possibile distinguere il ritiro idraulico, che consiste nell'evaporazione dell'acqua verso l'ambiente esterno ed è dovuto principalmente a fattori ambientali, e il ritiro chimico, causato dal processo di idratazione della pasta cementizia. Infatti, durante l'idratazione le reazioni chimiche che avvengono all'interno del calcestruzzo generano prodotti, denominati C-A-H, C-S-H, C-H e C-F-H[18], il cui volume specifico è più basso del volume iniziale dei reagenti (acqua e clinker), causando una modifica irreversibile della struttura del materiale e impedendone il recupero del volume iniziale anche durante un'eventuale successiva umidificazione. Tale fenomeno prende il nome di ritiro chimico, che consiste, quindi, in una riduzione di volume che solo parzialmente si manifesta all'esterno, in quanto parte dello spazio guadagnato durante la reazione viene occupato dai pori. Il ritiro autogeno si riferisce, invece, alla sola riduzione di volume apparente ed è molto elevato nei calcestruzzi con rapporto acqua-cemento inferiore a 0,4, dove costituisce una delle cause principali di fessurazione durante le prime 24 ore[19] (fig. 4.2.1).

[18] I principali reagenti sono il silicato bicalcico, il silicato tricalcico, l'alluminato tricalcico e l'alluminato ferrico tetracalcico che portano alla formazione di idrossido di calcio detto anche portlandite (CH), silicati di calcio (C-S-H), alluminati idrati di calcio (C-A-H) e ferriti idrati di calcio (C-F-H). Le reazioni di idratazione hanno velocità differente e dipendono anche dalla superficie di contatto delle particelle con l'acqua, che aumenta con il diminuire della dimensione di quest'ultime. L'alluminato tricalcico è il primo a reagire, determinando perdita della lavorabilità e presa rapida. Per tale motivo, si aggiunge il gesso che, a contatto con l'acqua, forma ettringite primaria che precipitando sull'alluminato tricalcico ostacola la penetrazione dell'acqua rallentandone l'idratazione. Segue il silicato tricalcico che è responsabile della resistenza meccanica nella fase iniziale. Segue l'alluminato ferrico e infine il silicato bicalcico, che determina la resistenza meccanica sulla lunga durata.

[19] È opportuno chiarire la relazione tra ritiro chimico e ritiro autogeno. Dopo la formazione della struttura iniziale dell'impasto, un'ulteriore idratazione porta alla formazione di vuoti all'interno della matrice cementizia. In questa fase, il ritiro autogeno è

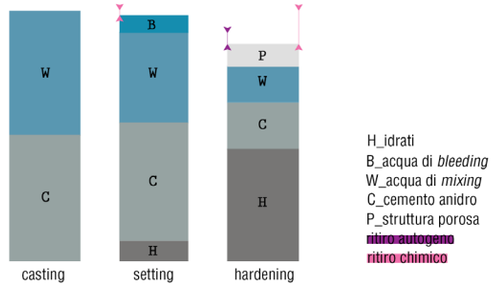


Fig. 4.2.1 Ritiro chimico e ritiro autogeno a confronto. Immagine tratta Soliman, A.M., *Early-Age Shrinkage of Ultra High-Performance Concrete: Mitigation and Compensating Mechanisms*, Electronic Thesis and Dissertation Repository, 2011.

Infatti, durante questo periodo la resistenza a trazione del calcestruzzo è troppo bassa per resistere alla propagazione di fessurazioni causate da tensioni da ritiro. Nel caso dei calcestruzzi ad alte prestazioni, l'addizione di materiali come il fumo di silice contribuisce ad aumentare ulteriormente il ritiro autogeno in quanto il consumo di acqua durante le prime fasi[20] di presa risulta incrementato.

La struttura porosa formatasi in seguito all'idratazione, drena l'acqua dai capillari più grandi verso il sistema di pori fini creatosi (auto-essiccamento). Nei calcestruzzi ordinari con rapporto acqua cemento superiore a 0,5, l'acqua contenuta nell'impasto è molta di più di quella necessaria all'idratazione e rimane all'interno di capillari grandi e ben connessi, dove si generano, di conseguenza, tensioni di trazione molto basse. In questi casi, il ritiro idraulico è molto alto. Se l'acqua presente è in eccesso rispetto a quella necessaria per garantire il processo di essiccazione, si generano fenomeni di *bleeding* – quando la velocità di essudazione è maggiore di quella di evaporazione – e non vi è ritiro idraulico. Non appena il tasso di evaporazione dell'acqua eccede quello di *bleeding*, l'acqua necessaria viene estratta dai pori interni e, soprattutto nei calcestruzzi con rapporti acqua-cemento molto bassi, si genera una forte tensione capillare[21] negativa che causa un assemblaggio dei grani di cemento idrati. La tensione capillare è riconosciuta in letteratura come la causa principale del ritiro autogeno[22].

Infatti, la continua evaporazione dell'acqua fa sì che, tra le particelle in superficie, inizino a formarsi dei menischi[23], la cui curvatura determina una pressione negativa nell'acqua capillare, che aumenta con la diminuzione del raggio principale dei menischi stessi. Tale pressione agisce sulle particelle solide causandone una contrazione. Raggiunto un certo valore soglia

inferiore al ritiro chimico, così come indicato dalle misure delle variazioni apparenti di volume. Il volume di vuoti accumulato può essere considerato una misura del ritiro chimico. Nel caso di campioni con rapporto acqua-cemento inferiore a 0,3, l'addizione di super-fluidificanti può incrementare il ritiro chimico e autogeno a diverse velocità. Inoltre, in presenza di rapporti acqua-cemento pari a 0,45, non vi è ritiro autogeno mentre il ritiro chimico è significativo. Per ulteriori approfondimenti si veda Wu, L. *et alii*, "Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review", in *Construction and Building Materials*, vol. 149, 2017, pp. 62-75.

[20] *Ibidem*.

[21] La tensione capillare altro non è che il gradiente di pressione tra l'acqua presente nei pori e la pressione atmosferica.

[22] Wu, L. *et alii*, "Autogenous…", *op. cit.*, pp. 62-75.

[23] Il menisco concavo, come quello dell'acqua, si forma quando la forza di adesione del liquido al contenitore è superiore a quella di coesione del liquido.

della pressione, i menischi non riescono più a colmare lo spazio tra le particelle e l'aria penetra localmente nel sistema poroso, causando un crollo della pressione. Una volta che l'aria entra all'interno del sistema capillare, il rischio di fessurazione è molto elevato. Infatti, le forze di contrazione tra le particelle nelle regioni penetrate dall'aria sono considerevolmente minori di quelle nelle regioni penetrate dell'acqua, determinando una localizzazione delle deformazioni, causa potenziale di fessure[24] (fig. 4.2.2).

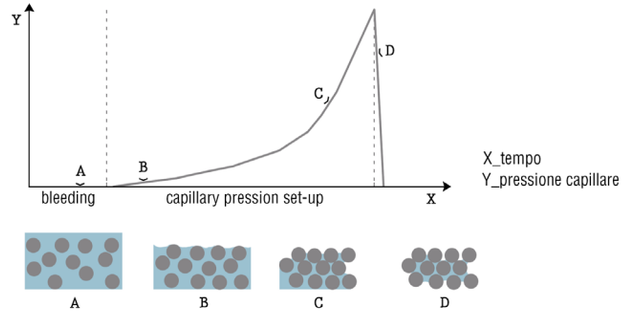


Fig. 4.2.2 Immagine tratta da Rahmani, T. *et alii*, "Application of different fibers to reduce plastic shrinkage cracking of concrete", in Scarpas, A. *et alii* (a cura di), *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, Springer, Berlino, pp. 635-642.

Inoltre, indipendentemente dal contenuto d'acqua, se la pressione di quest'ultima resta inferiore al valore soglia per cui avviene la cavitazione[25], si genera all'interno del materiale un gradiente di pressione idraulica causato dalla migrazione dell'acqua. Nei calcestruzzi, la pressione dell'acqua è bilanciata da una contrazione della matrice solida, in particolare dei *layer* di C-S-H. Secondo Acker più che di contrazione, si dovrebbe parlare di compattazione[26], in quanto l'acqua, spinta fuori dalla matrice solida e dal gel, anche senza alcun menisco liquido gas, è in tensione, mentre lo scheletro solido risulta compattato.

Per quanto riguarda il ritiro idraulico, influenzato non poco dalle variazioni di umidità dell'ambiente, è frutto di quattro fenomeni interagenti quali tensione superficiale, pressione disgiungente, tensione capillare e movimenti dell'acqua all'interno degli strati molecolari del calcestruzzo. Per spiegare tali fenomeni si fa ricorso a due teorie, di cui la prima è dovuta a Powers[27] e spiega i primi tre fenomeni, mentre la seconda a Feldman e Sereda[28].

[24] Rahmani, T. *et alii*, "Application of different fibers to reduce plastic shrinkage cracking of concrete", a cura di Scarpas, A. *et alii*, *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, Springer, Berlino, 2012, pp. 635-642.

[25] A causa di un abbassamento locale di pressione, che raggiunge la tensione di vapore del liquido, quest'ultimo subisce un passaggio alla fase gassosa, formando bolle, ovvero cavità, contenenti vapore.

[26] «*In concrete, the water pressure is balanced by a contraction of the solid matrix, with compressed contacts, particularly on C-S-H layers. According to the terminology of Soil Mechanics, the word "compaction" here would be preferred to "contraction", for the reason that water is driven out from the solid matrix and from the gel, as in compacted soil*». Si veda Acker, P., "Swelling, shrinkage and creep: a mechanical approach to cement hydration", in *Materials and Structures/Concrete Science and Engineering*, vol. 37, 2004, p. 238.

[27] Cfr. Powers, T.C. e Brownyard, T.L., "Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste", in *Research Laboratories of the PCA*, Bulletin 22, 1948.

[28] Cfr. Feldman, R.F. e Sereda, P.J. "A new model for hydrated portland cement and its practical implications", in *Engineering Journal*, vol. 53, n. 819, pp. 53-59, 1970.

Secondo Powers, una diminuzione dell'umidità relativa, infatti, causerebbe una diminuzione dell'acqua evaporabile del solido provocando, così, un aumento della tensione superficiale che, in termini meccanici, si traduce in una pressione applicata sul solido stesso. Tale pressione influenza la densità del materiale, causando una contrazione volumetrica.

I fenomeni connessi alla pressione disgiungente sono invece più complessi e legati alla struttura fisica del calcestruzzo. Infatti, la principale caratteristica del gel di cemento è il grande sviluppo superficiale rispetto alle ridotte dimensioni dei pori, che non possono essere occupati dall'acqua evaporabile. Le distanza tra le superfici dei pori è tale da far sì che esse risentano delle forze di attrazione di Van der Waals[29]. Quindi, all'interno di un gel di cemento essiccato, esistono notevoli forze di attrazione provocate dalla presenza dei pori che tendono a comprimere le particelle.

Nel caso di calcestruzzo immerso in acqua o in ambiente saturo, le forze di attrazione provocano un assorbimento delle molecole d'acqua che formano, nei pori di maggiori dimensioni, una sorta di film. Powers ha calcolato che il film d'acqua così assorbito può arrivare fino a 5 strati molecolari d'acqua, ovvero fino a 1,5 nm (il diametro di una molecola d'acqua è di circa 0,325 nm). Tuttavia, considerando che la distanza minima tra due superfici opposte affinché possa esserci un completo assorbimento d'acqua è pari a 3 nm, all'interno della struttura del gel di cemento risulta impedito l'assorbimento d'acqua in tutti i pori aventi diametro inferiore pari a 3 nm. Powers ha dimostrato che minore è il film di acqua assorbita, maggiore risulta la pressione locale cui è sottoposto il film stesso e quindi la struttura del gel di cemento. Tale pressione è proprio la pressione disgiungente e tende a separare le particelle del gel. A tale fenomeno si oppone la forza coesiva tra le particelle, che ne impedisce disgregazione ma non un rigonfiamento. Nel caso in cui il calcestruzzo venga sottoposto a progressivo essiccamento, si instaura una pressione disgiungente negativa che determina una contrazione del gel, cui si oppone la struttura rigida del calcestruzzo, che si trova, dunque in tensione.

Feldman e Sereda invece, sostengono che le variazioni volumetriche siano anche funzione dell'ingresso o dell'uscita di molecole d'acqua negli strati molecolari di cui si compone il gel C-S-H del cemento, ipotesi non considerata da Powers.

Mentre la fuoriuscita dell'acqua durante l'essiccamento provoca un avvicinamento degli strati e, dunque, una contrazione, l'entrata dell'acqua, come nel caso di ambienti a elevata umidità relativa, causa un rigonfiamento.

Per gli UHPFRC, a causa del basso rapporto acqua cemento, vi sono scarsi fenomeni di *bleeding* e quindi, l'essiccazione utilizza acqua capillare, causando perdita di umidità e formazione di menischi che, avvicinando le superfici dei pori, causano contrazioni volumetriche. Man mano che l'idratazione prosegue, il raggio dei menischi diminuisce, conducendo alla formazione di un elevato gradiente tra la pressione dei pori e quella atmosferica, inducendo tensione capillare e, conseguentemente, ritiro, in perfetto accordo con quanto descritto da Powers. Il ritiro autogeno è pari a circa 550 μm/m, mentre il ritiro idraulico varia attorno ai 150 μm/m. Per le applicazioni in UHPFRC che prevedono la realizzazione di elementi sottili a grande sviluppo superficiale, le condizioni di essiccamento e la perdita di umidità sono fattori particolarmente delicati, in quanto vi è un'elevata area esposta per unità di volume, favorendo così lo scambio con l'ambiente esterno.

Tali caratteristiche hanno delle conseguenze sulla progettazione delle casseforme che devono consentire la retrazione del materiale, onde evitare la formazione di microfessurazioni o tensioni interne, che si manifestano particolarmente nel caso di pannelli forati.

Per compensare o ridurre il ritiro iniziale, sebbene non sia possibile impedire il ritiro autogeno, si può intervenire o attraverso l'ottimizzazione della composizione del legante, per ottenere migliori *performance* nel primo periodo di presa, o attraverso additivi espansivi, in grado di aumentare il volume e regolare le reazioni di idratazione nei primi periodi generando ettringite[30], o mediante agenti di riduzione del ritiro, che diminuiscono la tensione superficiale e incrementano la viscosità dell'acqua capillare nella pasta cementizia idratata[31].

Fondamentale è anche il ruolo svolto dalle fibre che, proporzionalmente alla frazione volumetrica presente nel mix, alle dimensioni ed al modulo di elasticità, inibiscono sensibilmente il ritiro. In particolare, l'utilizzo di fibre miste (sia per dimensioni che per tipologia) contribuisce a ridurre tanto il ritiro totale quanto la formazione di fessurazioni migliorando, inoltre, la struttura porosa e l'impermeabilità del materiale[32].

Alla luce di tali considerazioni, appare evidente che il ritiro autogeno e quello idraulico sono fenomeni interconnessi, in quando la riduzione del contenuto d'acqua durante l'essiccamento causa un effetto negativo sul processo di idratazione, favorendo dunque lo sviluppo del ritiro autogeno.

Delle due prove svolte, la prima restituisce le variazioni dimensionali relative assiali di provini in corso di indurimento e conservati, contrariamente a quanto suggerito dalla norma, in ambiente non condizionato, mentre la seconda è strutturata in maniera tale da bloccare il ritiro idraulico il prima possibile mediante indurimento in acqua, provando a fornire variazioni relative al ritiro autogeno.

[29] L'interazione di van der Waals, scoperta dal fisico Johannes Diderik van der Waals nel 1873, si verifica tra atomi di una stessa molecola o di molecole differenti senza che vi sia un legame chimico. Per due superfici solide poste a distanza di 0,6 nm si parla di una forza di attrazione di circa 280 MPa. Tali forze diminuiscono con l'aumentare della distanza tra le particelle, diventando trascurabili oltre i 10 nm.

[30] L'aggiunta di gesso al clinker ha l'obiettivo di ritardare, mediante la voluta formazione di ettringite, l'idratazione degli alluminati e della fase ferrica che altrimenti andrebbero a causare un notevole abbassamento della lavorabilità della pasta cementizia.

[31] Sungwook, K. *et alii*, "Shrinkage Behavior of Ultra High Performance Concrete at the Manufacturing Stage", in Schmidt, M., Fehling, E., Glotzbach, C., Fröhlich, S. e Piotrowski, S. (a cura di), *Proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel, 7-9 Marzo 2012, pp. 317-324.

[32] Un aumento di impermeabilità del materiale comporta minori scambi di umidità con l'ambiente esterno, nonché una migliore ritenzione idrica a sua volta responsabile di una riduzione della tensione capillare e quindi del ritiro autogeno. Si veda Sun, W.*et alii*, "The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete", in *Cement and Concrete Research*, vol.31, 2001, pp. 595-601.

Valutazione del ritiro lineare

Le modalità di prova sono descritte dalla norma *UNI 11307: 2008*[33], per la determinazione del ritiro lineare. I provini utilizzati, con base quadrata di lato 100 mm e lunghezza pari a 500 mm, sono tre per ciascun *premix* utilizzato. I campioni, non ancora disarmati, sono stati conservati a temperatura ambiente per 24 ore. Partendo dal presupposto che l'obiettivo è valutare il comportamento dei diversi materiali in condizioni reali di conservazione, talvolta anche non ottimali, i provini non sono stati coperti durante le prime 24 ore per avere, inoltre, anche un riscontro con i campioni utilizzati nel test di sensibilità al ritiro, dove si è cercato di indurre fessurazioni ponendo i campioni in situazioni quanto più possibile sfavorevoli.

La norma descrive due procedure, rispettivamente utilizzate per il calcolo del ritiro assiale e del ritiro superficiale. La prima procedura, qui adottata, è indicata dalla norma come procedura di riferimento. Per il calcolo delle variazioni dimensionali occorre, prima di tutto, definire la distanza di $L_{a,0}$, data dalla distanza tra le intersezioni dell'asse del provino con le sue basi, e il ritiro assiale alla generica scadenza j-esima $\varepsilon_{a,j}$, definito come il rapporto tra $\Delta L_{a,j}$ (variazione dimensionale tra la misurazione effettuata all'istante j e la lunghezza iniziale) e $L_{a,0}$.

Dopo aver effettuato il disarmo, in corrispondenza delle intersezioni dell'asse longitudinale del provino con le sue basi (nel centro della circonferenza inscritta nel quadrato di base), sono state incollate due spine di riscontro per il calcolo della distanza longitudinale, aventi diametro pari a 24 mm. Entro un'ora dalla strumentazione i provini sono stati posti nell'ambiente di conservazione. Le misure di variazione dimensionale, realizzate per mezzo di un comparatore dimensionale analogico con limite di tolleranza pari a 3 µm, sono state effettuate pressoché quotidianamente nell'ambiente di stagionatura fino a un massimo di 28 giorni dalla data di getto. Per ciascun *premix* sono stati realizzati tre provini, di cui si riportano, nella tabella seguente, temperatura subito dopo il *mixing*, contenuto di fibre e granulometria.

Va ricordato che l'obiettivo generale della campagna di test è fornire a produttori e progettisti strumenti per la verifica delle caratteristiche prestazionali dei materiali in maniera semplice e adoperando attrezzature di facile reperibilità e utilizzo (il prezzo dei comparatori analogici, supporto compreso, è inferiore ai 50 euro). Anche la base di misurazione per i provini è stata realizzata in azienda, mentre il misuratore dell'umidità relativa e di temperatura, in grado di registrare dati a intervalli regolabili fino a pochi minuti, è facilmente acquistabile sul web (prezzo inferiore ai 70 euro). Secondo lo stesso principio, i dati utilizzati per l'analisi dei risultati si basano sulle informazioni comunemente reperibili in rete e, quindi, ad esempio, la composizione non entra nello specifico delle percentuali dei componenti presenti nel *premix*.

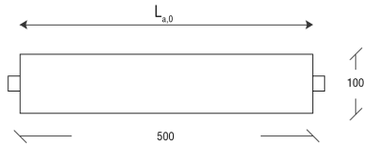
La validità delle procedure adoperate è garantita dalla coerenza dei risultati sperimentali con l'ampia casistica presente in letteratura[34].

Dopo la realizzazione dell'impasto, prima di aggiungere le fibre, è stato effettuato uno *slump-test*, come da consuetudine nel luogo di produzione e coerentemente con l'*expertise* aziendale e con pratiche già in atto di comprovata efficacia.

[33] UNI, *UNI 11307: 2008, op. cit.*

[34] Si veda in particolare: Wu, L. *et alii*, "Autogenous…", *op. cit.*, pp. 62-75; Kaufmann, J. *et alii*, "Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes", in *Cement and Concrete Composites*, vol.26, 2004, pp 541-549.

PROVINO

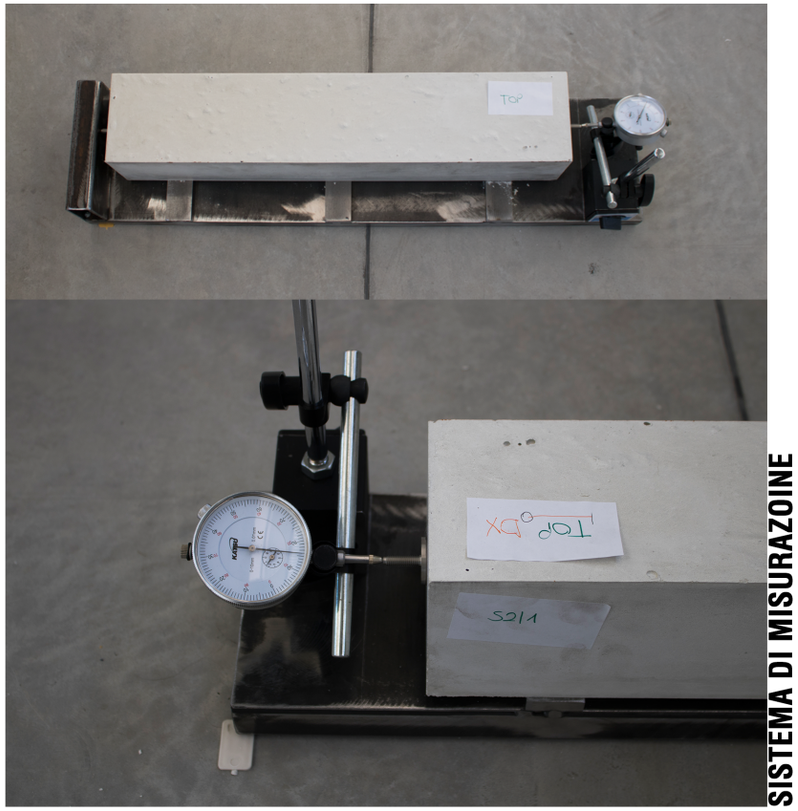


Schema dei provini. Immagine rielaborata da *UNI EN 11307:2008.*

COMPOSIZIONE

	COMPONENTI	A/C	TEMP. CLS	% FIBRE	GRANULOMETRIA
UHPFRC 1 S_1	Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua	0,17	20,7° C	3,00	0,5 mm (media)
UHPFRC 2 S_2	Portland, polvere di quarzo, microsilice, sabbia di silice, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua	0,15	24,5° C	3,50	max 1,25 min 0,125 mm

SISTEMA DI MISURAZOINE



Il comparatore analogico, montato su supporto magnetico, è fissato su una base in acciaio.

Le misurazioni effettuate iniziano a partire dalle 48 ore dalla data di getto, in quanto la misura "zero" è stata presa allo scadere delle 24 ore. Mentre per i provini S1_1 e S2_1 è stato possibile procedere alle misurazioni fino al giorno 28, per S3_1, esse sono state interrotte al giorno 16, oltre a presentare qualche discrepanza compatibile con probabili errori di misurazione.

È interessante notare come le curve di S1_1 e S2_1, a dispetto della forte differenza presentata nel comportamento tra il 2° e il 3° giorno, presentino dei discreti aumenti di pendenza tra il 7° e l'8° giorno e tra il 22° e il 23°, mentre tra l'8° e il 22° si riscontra una crescita pressoché costante (primo grafico in alto a pagina seguente). Confrontando i dati relativi al ritiro con l'andamento della temperatura e dell'umidità relativa, si può notare che tra il 7° e l'8° giorno ad un aumento della temperatura (picco di 29,8 °C) corrispondono bassi valori di umidità relativa (min. 26,1%), dati compatibili con un incremento del ritiro (ultimo grafico in basso a pagina seguente). Fino al 20° giorno la temperatura rimane costante, con valori di umidità relativa intono al 50%, che iniziano a diminuire intorno al 20° giorno con un corrispondente aumento di temperatura finché, tra il 22° e il 23° giorno, si registra una temperatura di 27 °C e un'umidità relativa al 29%, ancora compatibile con un incremento del ritiro. Allo scadere dei 28 giorni, come mostra il grafico a pagina seguente, il ritiro medio dei tre campioni è pari a 0,78 mm/m, dato leggermente maggiore rispetto ai dati nominali dichiarati (0,5 mm/m dopo 90 giorni). Ciò in realtà non è sorprendente, dal momento in cui le prove di ritiro sono solitamente effettuate in ambiente controllato.

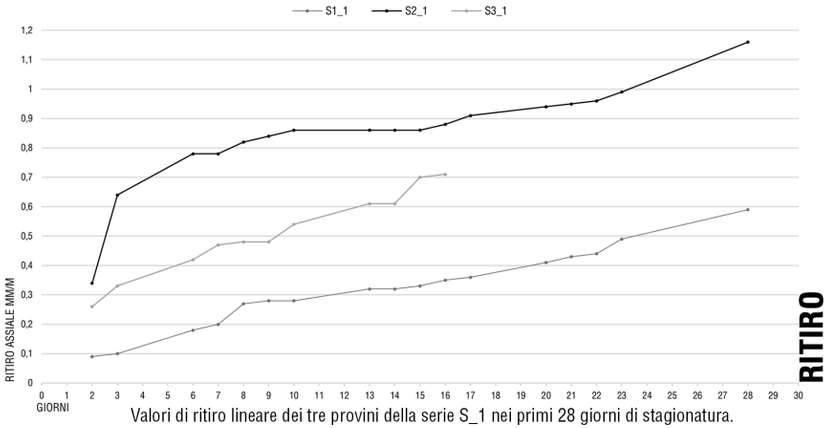
Anche per l'UHPFRC2, solo per due dei provini analizzati, S2_2 e S3_2, è stato possibile effettuare le misurazioni fino al 28° giorno, mentre quelle relative al provino S1_2 si interrompono al 9° (primo grafico in alto, pag. 257). La prima cosa che si nota osservando i dati relativi all'UHPFRC2 è che i valori relativi ai primi 7 giorni sono generalmente più bassi rispetto all'UHPFRC1 (il ritiro medio della serie S_1 è pari a 0,48 mm/m, mentre quello della serie S_2 è pari a 0,22). Naturalmente, un confronto vero è proprio tra le due serie non è possibile, in quanto le condizioni ambientali sono differenti. Tuttavia, si può indubbiamente affermare che tale scarto sia imputabile, da un lato, alla presenza nell'UHPFRC2 di un maggior quantitativo di fibre[35] (3,00% nell'1 e 3,50% nel 2), che contribuiscono ad aumentarne la resistenza a trazione e quindi a contrastarne il ritiro e, dall'altro, alle condizioni ambientali più favorevoli nei primi giorni di stagionatura (si veda tabella seguente).

	24H		48H		72H		96H	
	°C	%UR	°C	%UR	°C	%UR	°C	%UR
S_1	16,6 19,0	29,5 37,4	17,0 24,6	23,2 31,4	21,6 26,2	23,2 36,1	22,1 27,0	25,4 32,0
S_2	20,6 24,3	32,0 40,0	20,2 23,9	36,5 51,0	20,1 20,8	50,6 52,8	19,9 21,3	48,9 53,7

Tab. 4.2.1 Valori massimi e minimi di temperatura (°C) e umidità relativa (%UR)

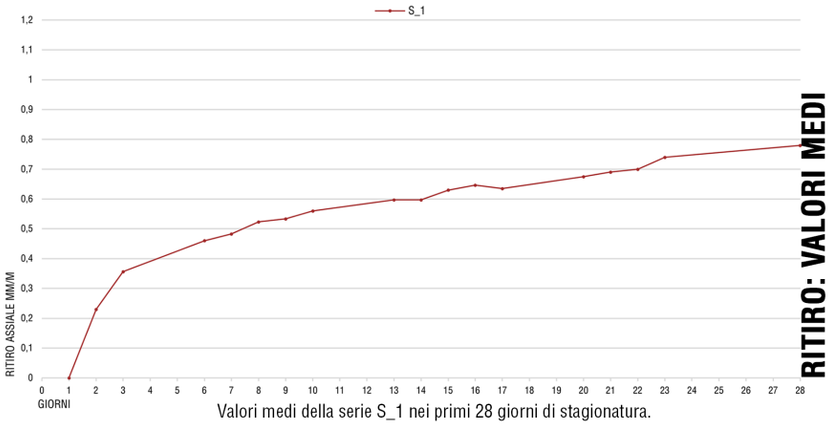
[35] Rahmani, T. *et alii*, "Application of different fibers...", *op. cit.*, 2012.

RISULTATI SERIE S_1



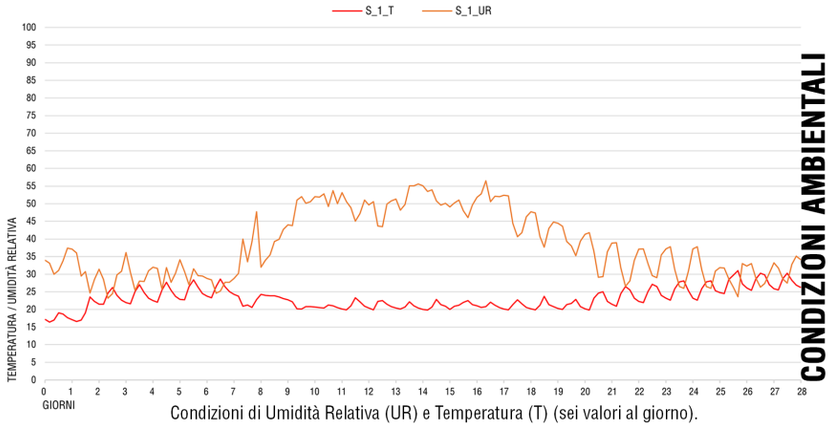
RITIRO

Valori di ritiro lineare dei tre provini della serie S_1 nei primi 28 giorni di stagionatura.



RITIRO: VALORI MEDI

Valori medi della serie S_1 nei primi 28 giorni di stagionatura.



CONDIZIONI AMBIENTALI

Condizioni di Umidità Relativa (UR) e Temperatura (T) (sei valori al giorno).

Infatti, nei primi 7 gg, è fondamentale il gradiente tra umidità relativa interna e ambientale: maggiore sarà il gradiente, maggiore sarà il ritiro. Il valore dell'umidità relativa interna è dovuto principalmente al rapporto acqua-cemento (a/c), da cui dipende il numero di pori saturi presenti all'interno della matrice. Nell'UHPFRC2 – con a/c pari a 0,15 –, il valore dell'umidità relativa interna dovrebbe essere inferiore rispetto all'UHPFRC1, con rapporto a/c pari a 0,17 e quindi, da questo punto di vista, il 2 avrebbe dovuto avere ritiro maggiore rispetto all'uno a parità di condizioni ambientali. Tuttavia, non bisogna dimenticare che nei calcestruzzi ultra-performanti, dal momento in cui il rapporto a/c è generalmente molto basso, il ritiro è prevalentemente di tipo autogeno e sono, dunque, i meccanismi che governano questo fenomeno a influenzare il comportamento globale del materiale[36]. Solitamente il ritiro autogeno si fa risalire principalmente alla formazione di tensione capillare: quest'ultima fornisce, infatti, la spiegazione più esaustiva del ritiro nella sua totalità ed è a sua volta funzione della struttura dei pori, dell'umidità relativa interna del materiale, del grado di idratazione e della struttura dell'interfaccia tra i diversi componenti del calcestruzzo. In particolare, la struttura dei pori, ovvero la loro distribuzione dimensionale e morfologica, a sua volta funzione della granulometria e della morfologia dei componenti, ha un ruolo importantissimo nello sviluppo del ritiro autogeno. Chiaramente la finezza dei pori determina una maggiore compattezza della struttura che, sulla base dalla maggiore resistenza a compressione[37] del 2 rispetto all'1 (tabella seguente), risulterebbe maggiore nel 2 che avrebbe, dunque, pori di raggio minore. Pori di raggio minore implicano una maggiore tensione capillare e quindi, da questo punto di vista, il 2 avrebbe dovuto avere maggior ritiro di 1.

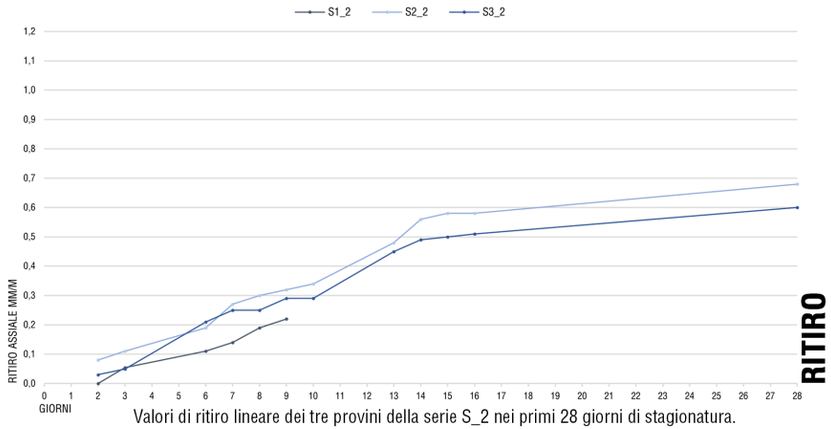
	1G MPA	7GG MPA	28GG MPA
UHPFRC1	63,5	97,6	113,4
UHPFRC2	71,5	113,2	128,7

Tab. 4.2.2 Valori di resistenza a compressione.

Inoltre, va anche detto che l'UHPFRC2 contiene fumo di silice che, definendo meglio la struttura dei micro-pori riducendone dimensioni e diametro, dovrebbe incrementare ancora il ritiro autogeno[38]. Si pensi che, per rapporti acqua cemento pari a 0,23, il ritiro autogeno della pasta di cemento può aumentare fino al 20%. Ciò si spiega, da un lato, attraverso l'azione che il fumo di silice svolge sulla morfologia dei pori, rifinendone la struttura e favorendo la formazione di pori di piccole dimensioni[39] e, dall'altro, a causa del fatto che il fumo di

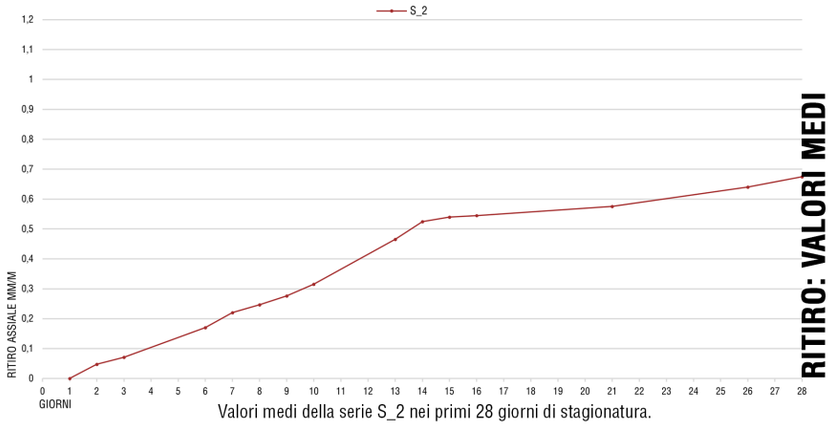
[36] Wu, L. *et alii*, "Autogenous…", *op. cit.*, pp. 62-75.
[37] La resistenza a compressione è stata indicativamente misurata in azienda.
[38] Wu, L. *et alii*, "Autogenous…", *op. cit.*, pp. 62-75.
[39] La presenza di pori piccoli aumenta il ritiro fisiologico della pasta di cemento, in quanto la riduzione di volume dovuta alle minori dimensioni dei prodotti dell'idratazione rispetto a quello dei reagenti non è ben compensata dalla formazione dei vuoti. Inoltre, pori di piccole dimensioni causano un aumento della tensione capillare che a sua volta determina maggiore ritiro autogeno.

RISULTATI SERIE S_2



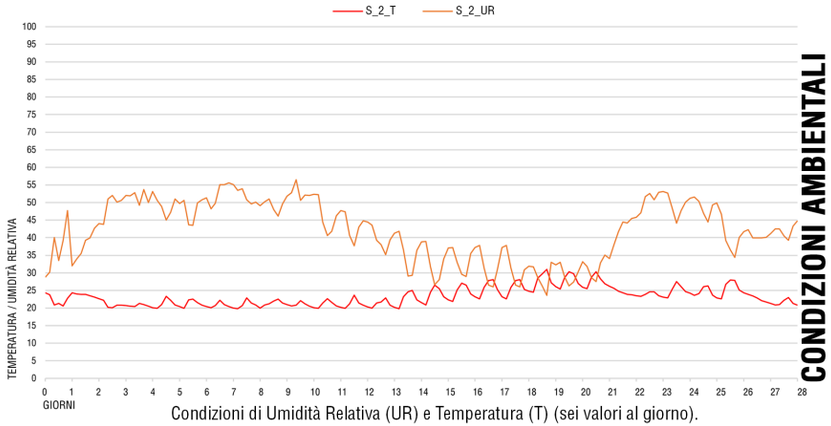
RITIRO

Valori di ritiro lineare dei tre provini della serie S_2 nei primi 28 giorni di stagionatura.



RITIRO: VALORI MEDI

Valori medi della serie S_2 nei primi 28 giorni di stagionatura.



CONDIZIONI AMBIENTALI

Condizioni di Umidità Relativa (UR) e Temperatura (T) (sei valori al giorno).

silice agisce come un additivo attivo superfine, accelerando le reazioni di idratazione del cemento. Infatti, l'ampio sviluppo superficiale del fumo ne aumenta la reattività con l'acqua che si consuma più rapidamente riducendo, di conseguenza, l'umidità interna del cemento e aumentandone i processi di auto-essiccamento.

Tutto ciò implica, di conseguenza, che i minori valori di ritiro della serie 2 rispetto alla 1 sono imputabili quasi certamente alle migliori condizioni ambientali e alla maggiore presenza di fibre che sono, come già ribadito, responsabili della resistenza a trazione del composito, maggiore contrasto alle deformazioni da ritiro. Infatti, come mostrato dalla tabella seguente, quando le condizioni ambientali sono pressoché analoghe (seconda settimana) i valori di ritiro sono molto simili (0,6 mm/m per l'UHPFRC1 e 0,53 mm/m per l'UHPFRC2). Per concludere, il valore medio di ritiro della serie S_2 risulta pari a 0,64 mm/m, mentre quello della serie S_1 risulta pari a 0,78 mm/m.

	7GG			14GG			21GG			28GG		
	MM/M	°C	%UR	MM/M	°C	%UR	MM/M	°C	%UR	MM/M	°C	%UR
S_1	0,48	16,4 28,6	23,2 37,4	0,60	19,9 24,3	28,8 55,6	0,69	19,8 25,0	29,1 56,5	0,78	20,9 31,0	23,6 38,9
S_2	0,22	19,9 24,3	28,8 55,6	0,53	19,8 25,0	29,1 56,5	0,59	20,9 31,0	23,6 38,9	0,64	20,8 28,0	34,1 53,0

Tab. 4.2.3 Valori di ritiro medi delle serie S_1 e S_2.



Provini da ritiro in attesa di essere strumentati. il Cantiere, Pordenone, 2019. Foto dell'autrice.

SENSIBILITA' AL RITIRO

Valutazione della sensibilità al ritiro

L'obiettivo generale della prova è valutare la sensibilità dei diversi mix al ritiro idraulico e autogeno, sia in termini di deformazioni assiali che di formazione di fessurazioni. Per valutare le implicazioni delle diverse modalità di stagionatura dei provini, considerando che nelle reali condizioni di produzione raramente si ricorre a trattamenti di *curing*, si è deciso di testare contemporaneamente due provini analoghi (denominati genericamente BS, *bone shape*), stagionando il primo a temperatura ambiente, monitorando costantemente temperatura e umidità, e il secondo in acqua (mai inferiore a circa 20° C per tutta la durata del test), impedendo così il ritiro da essicamento.

Anche in questo caso, tra gli obiettivi vi era la riproducibilità del test anche da addetti non specializzati e, di conseguenza, tutta la strumentazione di prova è facilmente reperibile. Oltre al comparatore analogico e alla base di supporto del provino realizzata in acciaio (prodotta in azienda), per tenere l'acqua alla temperatura stabilita ci si è avvalsi di un regolatore di temperatura con sensore di rilevamento che, ogni qualvolta la temperatura scendeva sotto i 20° C, attivava un riscaldatore a immersione (per una spesa di circa 50 euro).

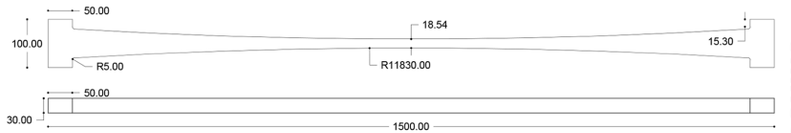
Inizialmente la stagionatura in acqua era finalizzata a valutare il ritiro autogeno, tuttavia, a dispetto di quanto ci si aspettava, alcuni dei campioni hanno mostrato espansione per tutta la durata dell'immersione, per poi contrarsi una volta messi all'aria.

L'impostazione della prova deriva da quanto dimostrato da Soliman[40], ovvero che per temperature relativamente basse (intorno ai 20 °C), il ritiro autogeno complessivo si sviluppa molto più lentamente che a temperature maggiori (40 °C) ed è quindi possibile valutarlo, anche se solo in parte, anche dopo le 24 ore dal getto. Invece, per temperature inferiori (10° C) la deformazione mostra un *plateau* costante dopo poche ore, dopodiché inizia addirittura a espandersi leggermente, generalmente a causa della formazione di ettringite, per poi contrarsi.

Quindi mentre il provino stagionato in acqua dopo le 24 ore dal getto, avrebbe dovuto fornire una misura del ritiro autogeno sviluppato dopo tale periodo, quello stagionato a temperatura ambiente avrebbe dovuto fornire una combinazione di ritiro autogeno e idraulico, nonché un interessante metro di paragone. Tuttavia, come vedremo a breve, composizione e permeabilità della matrice cementizia hanno determinato per i diversi *premix* comportamenti all'acqua estremamente differenti.

Nel tentativo di indurre fessurazioni, i provini, di lunghezza pari a 1500 mm, presentano una sezione decrescente fino a un minimo di 18,5 mm, con due ingrossamenti alle estremità, per far sì che l'accumulo di massa induca tensioni nella parte sottile in seguito al ritiro. Anche la cassaforma in acciaio, non ammortizzata, contrastando eventuali dilatazioni o contrazioni, contribuisce a generare tensioni interne. La curvatura, invece, è finalizzata a fornire uno spessore decrescente e ad agevolare il disarmo, rivelatosi infatti piuttosto ostico, proprio a causa della mancanza di ammortizzamenti (si veda immagine a fianco). Una volta effettuata la scasseratura, in corrispondenza delle intersezioni dell'asse longitudinale del provino con le sue basi, sono state incollate due spine di riscontro per il calcolo della distanza longitudinale e aventi diametro pari a 24 mm.

[40] Soliman, A.M., *Early-Age Shrinkage of Ultra High-Performance Concrete: Mitigation and Compensating Mechanisms*, Electronic Thesis and Dissertation Repository, 2011.



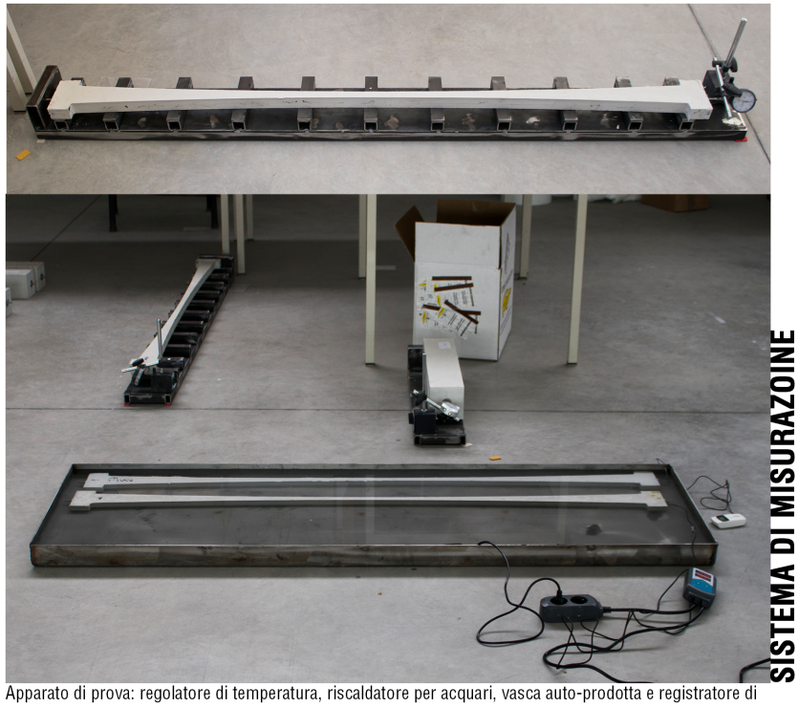
Pianta e vista dei provini delle serie BS.

PROVINO

COMPOSIZIONE

	COMPONENTI	A/C	TEMP. CLS	% FIBRE	GRANULOMETRIA
UHPFRC 1 BS_1	Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua	BSA_0,17 BSB_0,16 BSC_0,16	BSA_20,7° C BSB_23,8° C BSC_32,4° C	3,00	0,5 mm (media)
UHPFRC 2 BS_2	Portland, polvere di quarzo, microsilice, sabbia di silice, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua	BSA_0,15 BSB_0,17 BSC_0,18	BSA_24,5° C BSB_21,8° C BSC_30,9° C	3,50	max 1,25 min 0,125 mm

SISTEMA DI MISURAZOINE



Apparato di prova: regolatore di temperatura, riscaldatore per acquari, vasca auto-prodotta e registratore di temperatura.

Al fine di valutare le variazioni assiali, sono definiti $L_{a,0}$, ovvero la distanza tra le intersezioni dell'asse del provino con le sue basi, e il ritiro assiale alla generica scadenza j-esima $\varepsilon_{a,j}$, definito come il rapporto tra $\Delta L_{a,j}$ (variazione dimensionale tra la misurazione effettuata all'istante j e la lunghezza iniziale) e $L_{a,0}$.

Entro un'ora dalla scasseratura, è stata misurata per tutte le coppie di provini sottoposte a test, la distanza $L_{a,0}$ e la prima misurazione $\Delta L_{a,1}$, a mezzo di comparatore millesimale analogico.

Per ciascuno provino sono state riportate eventuali fessurazioni formatesi durante le prime 24 ore e successivamente. Queste, sempre lineari, sono distinte in passanti e non passanti, valutandone estensione e numero adoperando il *software* di elaborazione delle immagini ImageJ[41].

Tali valori, assieme al ritiro assiale, costituiscono i parametri utilizzati per valutare la sensibilità dell'elemento al ritiro. Sia per l'UHPFRC1 che per l'UHPFRC2 sono state gettate tre coppie di provini, in tre periodi differenti.

	I COPPIA	II COPPIA	III COPPIA
UHPFRC1	26/03: BSA1_1; BSA2_1_W	09/04: BSB1_1_W; BSB2_1	09/07: BSC1_1_W; BSC2_1
UHPFRC2	02/04: BSA1_2_W; BSA2_2	08/05: BSB1_2; BSB2_2_W	10/07: BSC1_2_W; BSC2_2

Tab. 4.2.4 Data di getto e nomenclatura delle coppie di provini analizzate.

Analizziamo, dunque, prima i risultati relativi all'UHPFRC1, per cui si riportano i dati relativi alle tre coppie seguiti dai dati ambientali e dalle temperature dell'acqua (grafici a fianco).

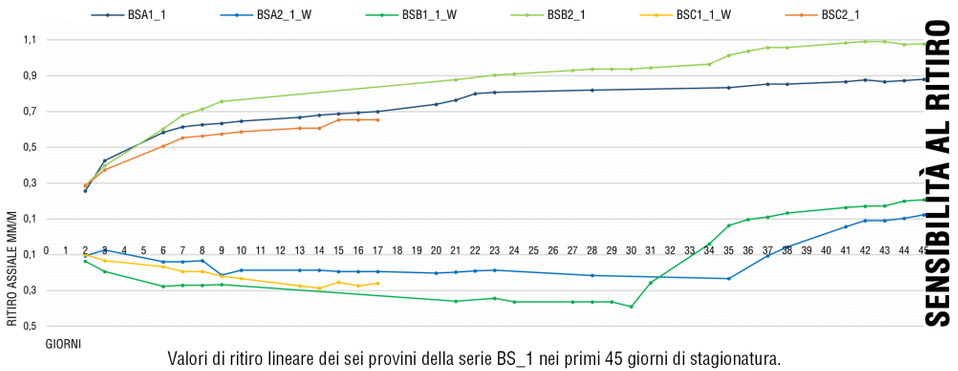
Nella parte superiore del grafico sono riportati i dati relativi al ritiro, mentre nella parte inferiore quelli relativi all'espansione dei provini. Per l'ultima serie (BSC_1), i dati fanno riferimento solo ai primi 17 giorni di stagionatura. Osservando prima i provini stagionati a secco, il provino BSB2_1 è quello che presenta ritiro maggiore a 45 giorni – 1,08 mm/m –, seguito dal BSA1_1 – 0,88 mm/m – e, infine, da BSC1_1 con 0,65 mm/m. Tenendo a mente i valori relativi alla temperatura e all'umidità relativa dell'aria nelle prime 96 ore di stagionatura (si veda la tabella 4.2.5), appare piuttosto strano che il provino sottoposto alle peggiori condizioni ambientali presenti il ritiro inferiore. Ciò può essere spiegato ricordando che il ritiro autogeno sviluppa molto più rapidamente all'aumentare della temperatura e al diminuire dell'UR, concentrandosi nelle prime 24 ore di presa, non registrate dalla presente sperimentazione[42]. Le prime 96 ore di stagionatura del provino BSC2_1 hanno infatti visto picchi fino ai 35 °C, con una media saldamente oltre i trenta, con un'UR invece quasi sempre inferiore al 40%.

[41] ImageJ è un *software* di elaborazione digitale delle immagini, basato su Sun-Java e sviluppato da Wayne Rasband del National Institutes of Health degli Stati Uniti. Utilizza il sistema operativo GNU/Linux. Per maggiori informazioni si consulti il sito web NIH, *ImageJ*, https://imagej.nih.gov/ij/.

[42] Soliman, A. M., *Early-Age Shrinkage…*, *op. cit.*, 2011.

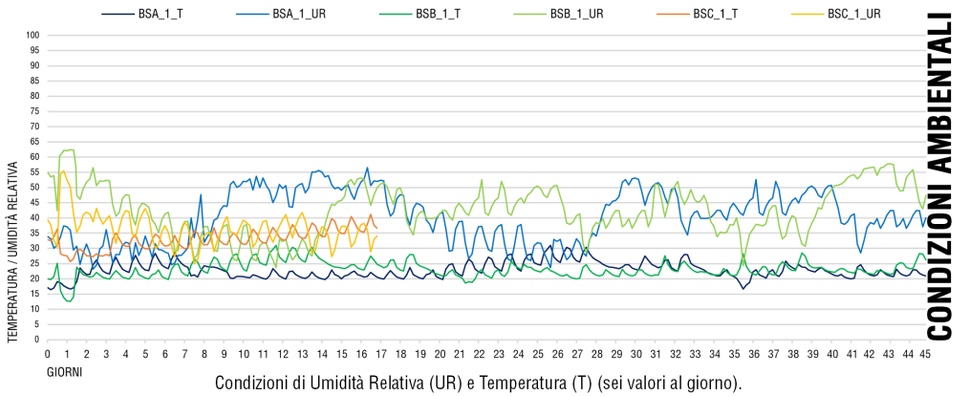
RISULTATI SERIE BS_1

SENSIBILITÀ AL RITIRO



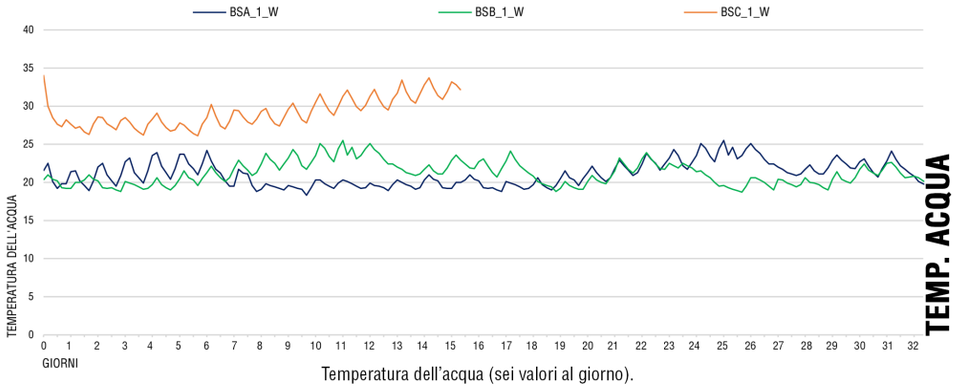
Valori di ritiro lineare dei sei provini della serie BS_1 nei primi 45 giorni di stagionatura.
Il provino BSB1_1 è stato tolto dall'acqua il 30° giorno, mentre il BSA2_1 il 35°.

CONDIZIONI AMBIENTALI



Condizioni di Umidità Relativa (UR) e Temperatura (T) (sei valori al giorno).

TEMP. ACQUA



Temperatura dell'acqua (sei valori al giorno).

	24H			48H			72H			96H		
	°C	%UR	°C_W	°C	%UR	°C_W	°C	%UR	°C_W	°C	%UR	°C_W
BSA1_1	16,6 19,0	29,5 37,4	/	17,0 24,6	23,2 31,4	/	21,6 26,2	23,2 36,1	/	22,1 27,0	25,5 32,0	/
BSA2_1_W	16,6 19,0	29,5 37,4	/	/	/	19,2 22,5	/	/	18,9 22,0	/	/	19,5 22,7
BSB1_1	12,7 20,7	42,4 63,6	/	21,0 23,8	47,4 56,5	/	19,2 22,7	40,6 52,4	/	23,7 19,9	37,4 47,7	/
BSB2_1_W	12,7 20,7	42,4 63,6	/	/	/	19,2 20,4	/	/	19,2 21,0	/	/	18,8 20,2
BSC2_1	25,7 29,2	40,4 55,5	/	27,5 29,7	37,4 43,2	/	27,5 35,0	31,6 40,7	/	34,5 30,6	33,5 42,4	/
BSC1_1_W	25,7 29,2	40,4 55,5	/	/	/	27,6 34,1	/	/	26,3 28,6	/	/	28,6 26,9

Tab. 4.2.5 Temperatura dell'aria (°C), umidità relativa (%UR) e temperatura dell'acqua (°C_W) per i provini della serie BS_1.

Il provino BSA1_1, invece, è stato gettato lo stesso giorno della serie S_1, ed è stato conservato con modalità analoghe. Il ritiro medio dei tre campioni S_1 a 28 giorni è pari a 0,78 mm/m, mentre quello di BSA1_1, nello stesso periodo, è pari a 0,82 mm/m. Il ritiro dell'elemento a forma di osso è, come ci si aspettava, superiore rispetto a quello del provino prismatico a causa, da un lato, alla maggiore superficie di scambio con l'ambiente esterno durante le prime 24 ore (0,056 m^2 contro 0,005 m^2) che favorisce l'evaporazione dell'acqua e, dall'altro, a causa del maggiore spessore del secondo, che tende a conservare più acqua all'interno dell'elemento, riducendo la tensione capillare, maggiore responsabile del ritiro autogeno. Si riportano i i dati relativi al ritiro dei provini stagionati all'aria a intervalli di 7 giorni fino al giorno 28:

	7GG	14GG	21GG	28GG
BSA1_1	0,61 mm/m	0,68 mm/m	0,76 mm/m	0,82 mm/m
BSB1_1	0,68 mm/m	0,77 mm/m	0,87 mm/m	0,94 mm/m
BSC2_1	0,55 mm/m	0,61 mm/m	/	/

Tab. 4.2.6 Valori di ritiro della serie BS_1, provini stagionati all'aria.

Il dato sorprendente invece, è stato quello dell'espansione dei provini conservati in acqua (tabella 4.2.7). Naturalmente, esattamente come per il ritiro, anche per l'espansione le cause in gioco sono molteplici e si può dunque sono provare a dare una spiegazione di massima al fenomeno. I provini hanno infatti assorbito nel tempo una certa quantità d'acqua – rivelando quindi anche una discreta permeabilità – che potrebbe aver provocato l'idratazione ritardata di una parte di cemento anidro, tipicamente presente in calcestruzzi con bassi rapporti a/c, che idratandosi all'interno della struttura porosa già formatasi potrebbe aver determinato una pressione interna e quindi un'espansione della matrice cementizia. Inoltre, la presenza di acqua potrebbe aver determinato un "rilascio" di tensione capillare fino a indurne un "cambio di segno", manifestatosi a livello macroscopico come un rigonfiamento[43]. L'espansione è comunque ridottissima, anche perché, come dimostrato da Miyazawa e Teramoto[44], la profondità di penetrazione dell'acqua è limitata a un paio di millimetri, sebbene sia maggiore per i provini di spessore minore. I dati della prova per la determinazione dell'assorbimento d'acqua[45] confermano, per quanto possibile, tali supposizioni: il provino BSA2_1_W in seguito all'immersione in acqua presenta una massa di acqua di saturazione pari allo 0,53%, BSB2_1_W pari allo 0,45%, mentre BSC1_1_W ha avuto un incremento pari allo 0,55%. Un'espansione è stata riscontrata anche J. Kaufmann *et alii*[46] proprio in calcestruzzi di cemento Portland contenenti *filler* calcarei, come in questo caso. Gli autori hanno altresì dimostrato una reversibilità del fenomeno una volta che i campioni vengono esposti all'aria, dato ancora una volta compatibile con quanto qui rilevato: BSB1_1_W, negli ultimi 15 giorni di stagionatura all'aria, ha recuperato l'espansione accumulata, arrivando a un ritiro di 0,207 mm/m, mentre BSA2_1_W è ritirato di 0,123 mm/m.

	7GG	14GG	21GG	28GG
BSA2_1_W	0,14 mm/m	0,19 mm/m	0,20 mm/m	0,22 mm/m
BSB2_1_W	0,27 mm/m	0,30 mm/m	0,36 mm/m	0,36 mm/m
BSC2_1_W	0,19 mm/m	0,29 mm/m	/	/

Tab. 4.2.7 Valori di espansione della serie BS_1, provini stagionati in acqua.

Analizziamo adesso i dati relativi all'UHPFRC2 (si veda pag. 267), iniziando dai provini stagionati all'aria. Purtroppo le misurazioni per il provino BSA2_2, ovvero quello gettato in contemporanea alla serie S_2, sono state interrotte al 6° giorno, rendendo impossibile un confronto efficace tra i diversi provini. Per l'ultima coppia (BSC_2), invece, i dati fanno riferimento ai primi 16 giorni di stagionatura: a tale data, il provino che presenta ritiro maggiore è il BSB1_2, ovvero 0,84 mm/m, seguito dal BSC2_2 con un ritiro di 0,74 mm/m. Considerando i valori della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria durante le prime 96 ore di stagionatura (si veda la tabella 4.2.8), come già accaduto per l'UHPFRC1, il provino sottoposto alle peggiori condizioni ambientali presenta il ritiro inferiore. Tale discrepanza può essere ancora una volta attribuita al fatto che il ritiro autogeno sviluppa molto più rapidamente all'aumentare della temperatura e al diminuire dell'UR, concentrandosi nelle prime 24 ore di presa, qui non registrate[47]. Infatti, durante tale periodo, si è avuta una temperatura massima di 30,4° C e un'umidità relativa non più elevata del 45,3%.

[43] Soprattutto negli elementi di grandi dimensioni, dal momento in cui tutte le reazioni coinvolte nel processo di idratazione sono esotermiche, ovvero generano energia sotto forma di calore, un'inadeguata dissipazione di quest'ultimo può causare dilatazioni termiche e quindi espansioni volumetriche. Ancora, la differenza di velocità di dissipazione tra l'interno e l'esterno dell'elemento può produrre un gradiente termico che genera deformazioni e, di conseguenza, fessurazioni.

[44] Cfr. Maruyama, I. e Teramoto, A., "Temperature dependence of autogenous shrinkage of silica-fume cement pastes with a very low water-binder ratio", in *Cement and Concrete Research*, vol. 50, 2013, pp. 41-50.

[45] Si veda il paragrafo 4.3.

[46] Kaufmann, J. *et alii*, "Effect of the addition of ultrafine cement...", *op. cit.*, 2004, pp 541-549.

[47] Soliman, A.M., *Early-Age Shrinkage…*, *op. cit.*, 2011.

	24H			48H			72H			96H		
	°C	%UR	°C_W	°C	%UR	°C_W	°C	%UR	°C_W	°C	%UR	°C_W
BSA1_2_W	13,5 24,4	32,2 63	/	/	/	19,1 21,1	/	/	19,0 19,6	/	/	18,3 20,3
BSA2_2	13,5 24,4	32,2 63	/	20,1 24,4	37,7 52	/	20,1 21,3	49,2 53,7	/	19,9 23,3	52,8 49,2	/
BSB1_2	12,7 16,8	60,3 55	/	16,8 27,6	40,3 69,9	/	22,4 25,8	40,3 51,9	/	28,1 24,5	44,5 49,3	/
BSB2_2_W	12,7 16,8	60,3 55	/	/	/	20,9 22,5	/	/	20,6 22,6	/	/	19,5 20,8
BSC1_2_W	25,6 30,4	35,3 45,3	/	/	/	26,6 28,6	/	/	26,9 28,6	/	/	28,5 26,2
BSC2_2	25,6 30,4	35,3 45,3	/	24,2 35,0	45,2 59,0	/	30,7 34,5	31,6 42,4	/	29,8 34,6	29,8 43,1	/

Tab. 4.2.8 Valori di temperatura (°C), umidità relativa (%UR) e temperatura dell'acqua (°C_W) nelle prime 96 ore di stagionatura della serie BS_2.

Infine, si riportano i dati di ritiro relativi ai provini stagionati all'aria[48]:

	6GG	14GG	21GG	28GG
BSA2_2	0,46 mm/m	/	/	/
BSB1_2	0,68 mm/m	0,83 mm/m	0,88 mm/m	0,96 mm/m
BSC2_2	0,55 mm/m	0,69 mm/m	/	/

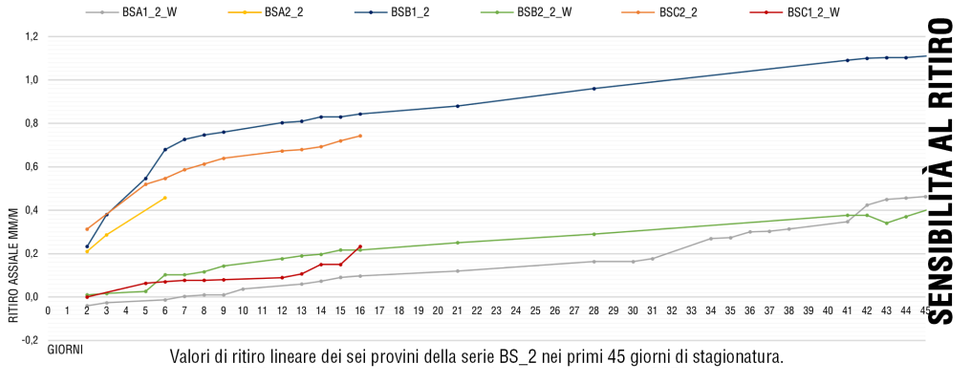
Tab. 4.2.9 Valori di ritiro dei provini della serie BS_2 stagionati all'aria.

Questa volta, invece, i provini stagionati in acqua, tranne che nei primi giorni e comunque per valori millesimali, non hanno presentato fenomeni di espansione, ritirando piuttosto regolarmente, anche se molto meno rispetto ai loro omologhi stagionati all'aria. Ciò significa che non c'è stata penetrazione d'acqua all'interno dei provini che, come ci si aspettava, hanno dunque permeabilità più bassa rispetto a quelli realizzati con l'UHPFRC1. Tuttavia, le supposizioni relative al fatto che la stagionatura in acqua potesse fornire una misura del ritiro autogeno si sono rivelate errate, in quanto, essendo il provino stagionato in ambiente umido, avrà conservato più a lungo la sua acqua interna, riducendo così la tensione capillare.

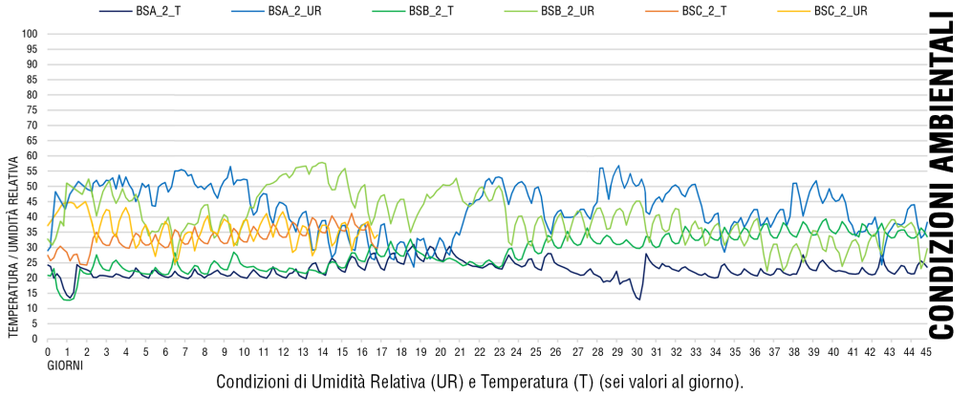
Questo dato è inoltre confermato dai risultati della prova per la determinazione dell'assorbimento d'acqua[49]: il provino BSA1_2_W e BSB2_2_W in seguito all'immersione presentano una percentuale in massa di acqua di saturazione pari circa allo 0,25%, mentre BSC1_2_W ha avuto un incremento pari allo 0,29% della sua massa. Si consideri che tali valori sono praticamente dimezzati rispetto a quelli della serie BS_1. Oltre alle differenze di comportamento in termini di ritiro/espansione (tabella 4.2.10), alcuni dei provini stagionati

[48] Si riportano i dati relativi al sesto giorno, in quanto comuni a tutti e tre i provini.
[49] Si veda il paragrafo 4.3.

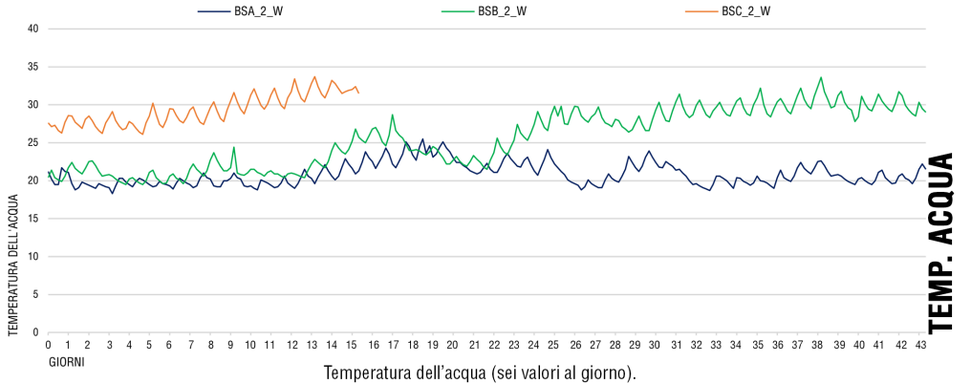
RISULTATI SERIE BS_2



Valori di ritiro lineare dei sei provini della serie BS_2 nei primi 45 giorni di stagionatura.
I provini BSA1_2_W è stato tolto dall'acqua il 30° giorno, mentre il BSB2_2_W il 40°.



Condizioni di Umidità Relativa (UR) e Temperatura (T) (sei valori al giorno).



Temperatura dell'acqua (sei valori al giorno).

in acqua hanno in realtà mostrato anche alterazioni superficiali: in particolare, su tutti e tre i provini della serie BS_1 è stata rilevata la presenza di carbonato di calcio[50] che potrebbe essere anche responsabile dell'espansione registrata. Tuttavia, la prova effettuata per determinare la profondità di carbonatazione[51] ha riscontrato l'assenza del fenomeno nelle parti interne della sezione che, quindi, risulta carbonatata solo superficialmente.

	7GG		14GG		21GG		28GG	
	MM/M	°C_W	MM/M	°C_W	MM/M	°C_W	MM/M	°C_W
BSA2_1_W	-0,14	23,9 18,3	-0,18	24,2 18,3	-0,20	21,0 18,8	-0,216	23,9 20,1
BSB2_1_W	-0,27	21,1 18,7	-0,32	25,5 19,6	-0,36	24,3 18,8	-0,36	23,9 18,7
BSC1_1_W	-0,19	29,1 26,1	-0,28	32,1 26,1	/	/	/	/
BSA1_2_W	0,003	21,7 18,3	0,07	21,0 18,8	0,12	25,4 19,0	0,16	24,1 18,8
BSB2_2_W	0,10	22,6 19,5	0,20	24,4 19,6	0,25	28,7 20,4	0,29	29,8 21,5
BSC1_2_W	0,08	29,1 26,1	0,15	32,2 27,7	/	/	/	/

Tab. 4.2.10 Valori di ritiro (positivi) e di espansione (negativi) dei provini della serie BS_1 e BS_2 stagionati in acqua.

Per i provini stagionati all'aria, come per le serie S_1 e S_2, a fare la differenza sono la struttura porosa della matrice cementizia, il contenuto di fibre e, soprattutto le condizioni ambientali (tabella 4.2.11). Infatti se si guarda ai provini BSC2_1 e BSC2_2, gettati a un solo giorno di distanza e stagionati in condizioni praticamente identiche, si può notare che i valori di ritiro nei primi 14 giorni sono assolutamente confrontabili: 0,61 mm/m per il primo e 0,69 per il secondo. Anche nel caso di BSB1_1 e BSB1_2, che presentano condizioni ambientali molto simili tranne che nella terza settimana, si raggiungono gli stessi valori di ritiro alla fine del periodo stabilito, attestandosi a 0,94 mm/m per l'UHPFRC1 e a 0,96 mm/m per l'UHPFRC2.

Oltre a raccogliere dati relativi alle variazioni lineari, la prova di sensibilità al ritiro si pone l'obiettivo anche di misurare eventuali fessurazioni degli elementi. Tra i provini realizzati della serie BS_1, solo il BSA1_1 presenta fessurazioni. La prima fessura, passante e denominata A, è stata rilevata poco prima di procedere alla scasseratura dell'elemento, a 24 ore dal getto. Una seconda fessura passante – B – è stata rilevata al 7° giorno di stagionatura, mentre all'ottavo ne è stata rilevata un'altra non passante (C). A pagina 271 è possibile trovare una rielaborazione delle immagini digitali delle fessure all'ultimo giorno di stagionatura (45°).

Per la serie BS_2, è stata rilevata alle 24h di stagionatura una sola fessura non passante nel provino BSA2_2, di cui si riporta a pag. 271 la rielaborazione fotografica.

La formazione di fessurazioni si è rivelata, in realtà, poco soddisfacente. Ci si aspettava infatti, soprattutto per i provini realizzati durante il periodo estivo, che le elevate temperature causassero un'accelerazione del ritiro idraulico inducendo così fessurazioni.

[50] La presenza di carbonato di calcio è stata riscontrata in seguito ad analisi a raggi X di parte dei campioni sottoposti ai test.
[51] Si veda il paragrafo 4.3.

	6GG			14GG			21GG			28GG		
	MM/M	°C	%UR	MM/M	°C	%UR	MM/M	°C	%UR	MM/M	°C	%UR
BSA1_1	0,58	28,6 16,6	37,4 29,2	0,68	28,6 19,9	55,1 25,2	0,76	24,6 19,8	56,5 29,1	0,82	31,0 20,9	38,9 23,6
BSB1_1	0,60	21,5 12,6	63,6 29,1	0,77	31,0 20,9	38,9 23,6	0,87	30,3 20,9	53,1 27,5	0,94	25,8 18,6	52,6 28,9
BSC2_1	0,55	36,4 25,7	55,5 27,1	0,61	38,3 28,9	41,7 25,1	/	/	/	/	/	/
BSA2_2	0,46	24,4 13,5	63,0 33,2	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BSB1_2	0,68	28,2 12,7	55,0 24,3	0,84	28,5 21,2	56,7 24,3	0,88	32,8 21,5	57,9 34,9	0,96	36,4 23,4	52,7 30,5
BSC2_2	0,55	35,8 24,2	59,0 25,1	0,69	39,8 31,1	41,7 25,1	/	/	/	/	/	/

Tab. 4.2.11 Valori di ritiro dei provini della serie BS_1 e BS_2 stagionati all'aria

In azienda, infatti, proprio nello stesso periodo, venivano realizzati pezzi di grandi dimensioni (oltre la tonnellata) che, in alcuni casi, hanno presentato microfessurazioni da ritiro nei primi tre giorni di stagionatura. In quel caso, però, le temperature cui erano sottoposti gli elementi erano decisamente più proibitive (60-80 °C) a causa del calore di idratazione sprigionato dal calcestruzzo. Quindi per avere un dato efficace e per far sì che il provino fornisca reali informazioni sulla stagionatura, ne andrebbe ridotto lo spessore, portandolo almeno a 250 mm.

In conclusione, appare evidente come i test di ritiro siano piuttosto complessi, tanto da richiedere una conoscenza approfondita dei meccanismi che governano i processi di idratazione del calcestruzzo per determinarne le cause, anche solo per sommi capi.

Ciononostante si è fermamente convinti che il protocollo elaborato, soprattutto quello sperimentale, fornisca in realtà delle informazioni molto semplici da comprendere, a partire proprio dalla formazione di eventuali fessurazioni, che costituiscono un immediato riscontro del comportamento del materiale rispetto alle condizioni ambientali.

Inoltre, dal momento in cui l'unica proprietà degli ultra-performanti su cui è possibile intervenire, sebbene entro *range* fissi, è il rapporto acqua-cemento, condurre in contemporanea diversi test variando solo tale dato consente quindi di verificarne l'impatto rispetto a temperatura e umidità relative, magari provando ad agire su quest'ultime per quanto possibile.

Infatti, è molto comune, soprattutto nel periodo estivo, provare a raffreddare gli ambienti di stagionatura creando così un clima secco e aumentando, di conseguenza, il gradiente di umidità tra l'ambiente esterno e l'elemento in calcestruzzo, che quindi tende a rilasciare più rapidamente l'acqua interna e, dunque, a ritirare di più.

Non è detto, inoltre, che ridurre il contenuto d'acqua per limitare la percentuale, comunque presente, di ritiro idraulico sia d'aiuto: si potrebbe infatti generare una maggiore tensione capillare interna, a sua volta responsabile di ritiri maggiori.

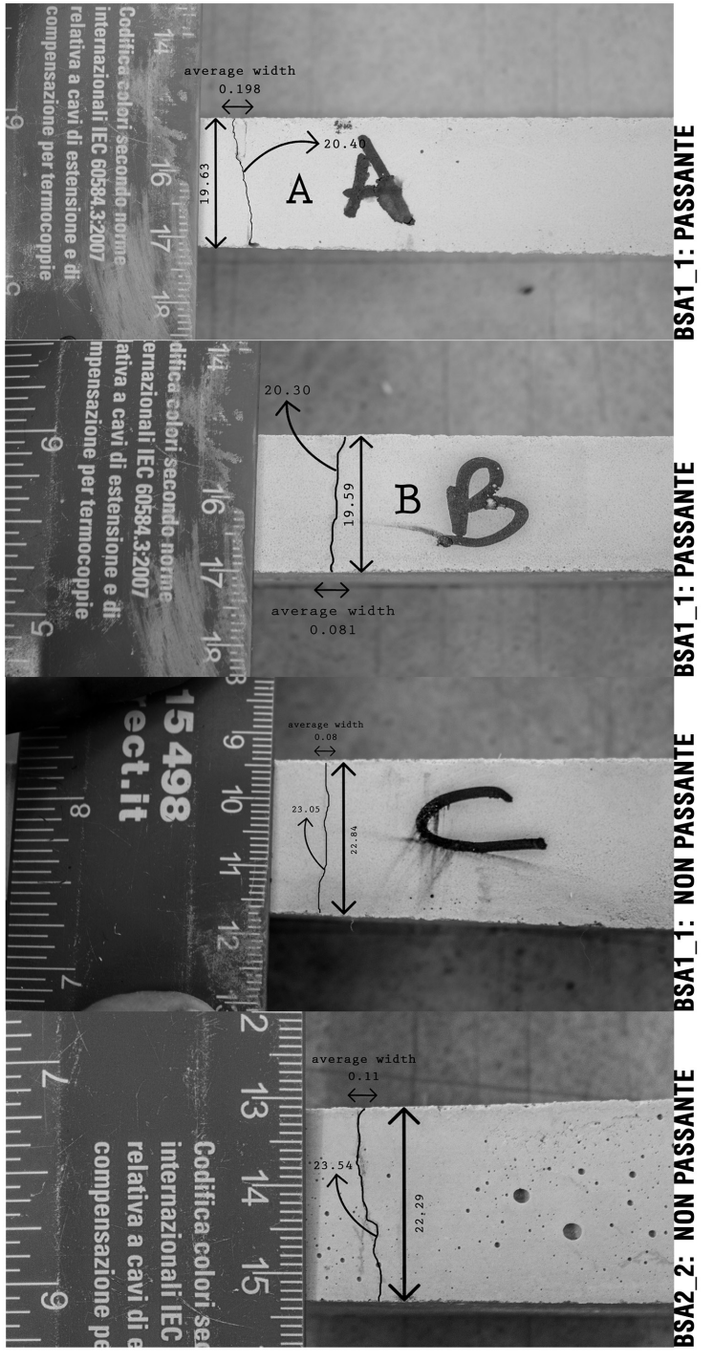
Dunque, se persino per i calcestruzzi tradizionali l'equilibrio tra proprietà dell'impasto e condizioni al contorno è difficile da raggiungere, per gli ultra-performanti è quasi impossibile se, anziché studiarne il comportamento, si procede per tentativi.

Quello che qui si propone è, in realtà, un approccio per "tentativi normato", dove la coerenza del dato è garantita dalla ripetibilità delle procedure, consentendo di comprendere dove e come intervenire per cercare di controllare il comportamento del materiale.

Quindi, una volta fatte le opportune modifiche al protocollo, la realizzazione del test di sensibilità potrebbe costruire un'utilissima banca dati sul comportamento al ritiro rispetto alle varie condizioni ambientali, ricalibrando la produzione in questo senso ed evitando sprechi di materiale[52].

[52] Si veda a tal proposito il paragrafo 4.5.

FESSURAZIONI





Pink power. Provini in calcestruzzo ultra-performante e fenolftaleine. Foto dell'autrice.

4.3 Protollo di prove di durabilita'

Per valutare la durabilità dei calcestruzzi ultra-performanti è prima di tutto necessario comprenderne le principali manifestazioni di degrado, imputabili prevalentemente a fattori chimici (come l'azione di solfati, solfuri, cloruri alcali e fenomeni come la decalcificazione), fisici (lesioni da ritiro, effetti dei cicli di gelo/disgelo) e meccanici (erosione, abrasione, esplosione, urto ed effetti da scorrimento viscoso) e ad aggressioni biologiche, che comportano la formazione di muschi, funghi e alghe. L'influenza di tali fattori sulla durabilità del calcestruzzo è proporzionale alla porosità del conglomerato cementizio, in quanto maggiore sarà la porosità, minore sarà la sua resistenza e, di conseguenza, la durabilità.

Per i calcestruzzi con bassa porosità capillare come gli UHPFRC, tra i vari fattori di rischio vi sono i fenomeni di re-idratazione su tempi lunghi, strettamente connessi alla presenza di clinker residuo, tipica, in realtà, anche dei calcestruzzi ordinari, in quanto una loro idratazione completa avviene raramente perfino con elevati rapporti acqua/cemento. Le conseguenze di una re-idratazione delle particelle potrebbero essere individuate in eventuali rigonfiamenti o microfessurazioni del calcestruzzo, soprattutto considerando che l'idratazione di 1 cm^3 di clinker produce circa 2,18 cm^3 di idrati.

In realtà, quando l'acqua che determina la formazione degli idrati è interna al calcestruzzo (acqua capillare), la reazione determina una riduzione del volume assoluto pari a circa il 10%.

Invece, nel caso in cui l'acqua necessaria alla reazione fosse esterna al calcestruzzo, dovrebbe verificarsi un aumento di volume, soprattutto per calcestruzzi a scarsa porosità capillare. Tuttavia, ciò non avviene in quanto l'idratazione comporta la dissoluzione di materiali anidri[53], la diffusione degli ioni così prodotti nella fase acquosa e la formazione di una soluzione soprasatura rispetto agli idrati che quindi precipitano, non necessariamente in prossimità del luogo della loro formazione. Per questo motivo, durante l'idratazione di 1 cm^3 di clinker, lo stesso volume di idrati precipita nel luogo della reazione, mentre 1,18 cm^3 precipita nei pori capillari circostanti, spesso a una distanza di una dozzina di micrometri dalle molecole di clinker, non generando rigonfiamenti. Quindi, in presenza di microfessurazioni dovute a ritiro o a dissoluzioni causate da attacchi chimici, nel caso in cui si verifichi penetrazione di acqua in calcestruzzi a bassa porosità capillare, gli ioni derivanti dall'idratazione dal clinker residuo

[53] Le scarse reazioni di idratazione dovute al basso contenuto d'acqua causano la formazione materiali anidri residui e gessi.

potranno diffondersi lungo lo stesso percorso effettuato dall'acqua in ingresso, determinando così o la chiusura delle microfessurazioni (grazie proprio alla dissoluzione del clinker) oppure determinando fenomeni di lisciviazione[54] dovuti ad un'aggressione chimica di sostanze eventualmente contenute nell'acqua.

Inoltre, la chiusura delle microfessurazioni grazie alla dissoluzione di ioni idrati nonché l'elevata resistenza dell'UHPFRC alla carbonatazione e alla polarizzazione, sono elementi in grado di garantire la durabilità degli elementi metallici, la cui corrosione costituisce un fattore di rischio ulteriore. Solo nel caso di ambienti particolarmente aggressivi, come ad esempio con presenza di concentrazioni di nitrato di ammonio o cloruri, sono stati registrati casi di corrosione di fibre di acciaio. In particolare, elevate quantità di cloruri nell'ambiente circostante possono causare la corrosione dell'acciaio in seguito a una reazione elettrochimica, che ne determina un'espansione fino al 600 %[55]. La corrosione così generatasi può essere suddivisa in due categorie, di tipo uniforme o di tipo *pitting* (una sorta di effetto "bucherellato"). Quest'ultima è in generale fino a otto volte più profonda rispetto alla prima, determinando significative perdite di resistenza. Tuttavia, con gli UHPFRC si ricorre solitamente, piuttosto che ai rinforzi tradizionali, al pretensionamento che, com'è noto, si effettua utilizzando cavi intrecciati, in linea di massima più resistenti a fenomeni di questo tipo[56].

Anche l'esposizione a ripetuti cicli di gelo e disgelo ha dimostrato come[57] la bassa porosità capillare, lo scarso contenuto d'acqua e l'elevata resistenza meccanica contribuiscono ad aumentare la resistenza del conglomerato a condizioni particolarmente avverse.

Un altro aspetto riguarda la possibile instabilità degli additivi presenti nel mix con particolare riferimento ai super-fluidificanti, generalmente presenti in dosaggi che oscillano dallo 0,5 al 2% del contenuto in chilogrammi di cemento. I super-fluidificanti incrementano la fluidità del calcestruzzo riducendo le interazioni tra le particelle.

Durante il tempo di presa, le molecole di super-fluidificante sono imprigionate negli idrati, causando in parte la formazione di complessi insolubili in grado di contenere fino al 70% di materiale organico. I composti così formatisi rimangono stabili in ambienti basici mentre, in caso di attacco chimico, possono essere rilasciati nei pori capillari del calcestruzzo, causando danni alla struttura interna del materiale. Per gli ultra-performanti, tali fenomeni risultano ridotti a causa della scarsa porosità capillare che, da un lato, ostacola le connessioni interne tra le particelle e, dall'altro, impedisce l'ingresso di sostanze dannose.

La formazione di ettringite[58] secondaria è un ulteriore rischio di degrado di elementi in UHPFRC. Tale fenomeno si verifica quando i materiali cementizi sono soggetti, nelle fasi iniziali della presa, ad alte temperature per un tempo significativo. Ciò può causare una destabilizzazione dell'ettringite primaria che determina la formazione e la mobilitazione dei solfati e, dunque, dell'ettringite secondaria. La genesi dell'ettringite produce pressioni considerevoli all'interno del materiale solidificato, provocando fessurazioni ed espansioni volumetriche. Tuttavia, l'alto grado di compattezza dell'UHPFRC riduce significativamente il rischio di formazione di ettringite secondaria.

Appare perciò evidente che la maggior parte dei fenomeni di degrado si verificano come conseguenza della penetrazione d'acqua e dell'esposizione a condizioni atmosferiche più o meno estreme, ridotti o accentuati dalle cosiddette proprietà di trasferimento del materiale (porosità, permeabilità, diffusività). Dunque, tenendo conto delle applicazioni che si intende approfondire, si è deciso di optare per un protocollo di prove di durabilità in grado di restituire il comportamento all'acqua e alle condizioni atmosferiche determinando la profondità di carbonatazione, in modo da ricostruire sinteticamente le prestazioni del materiale sulla base dei principali fenomeni di degrado.

[54] Separazione di componenti solubili da una massa solida in seguito all'utilizzo di un solvente.
[55] Dong, Y., "Performance assessment and design …", *op. cit.*, 2018, pag. 418.
[56] *Ibidem.*
[57] Cfr. Braam, C.R, *INNOCONCRETE report. Eureka project, freexe-thaw resistance*, 2006.
[58] L'ettringite o sale di Candlot è un trisolfo-alluminato di calcio idrato. L'ettringite si forma quando l'alluminato tricalcico, tra i componenti principali del clinker, entra in contatto con i solfati di calcio, costituenti del gesso. Si distingue in primaria o non distruttiva e secondaria o distruttiva.

Determinazione dell'assorbimento d'acqua alla pressione atmosferica

Le modalità di prova fanno riferimento alla norma *UNI 7699:2018*[59], finalizzata alla determinazione dell'assorbimento di acqua alla pressione atmosferica.

La prova consiste nel misurare la variazione di massa dei provini di calcestruzzo indurito a seguito della loro immersione in acqua. In questo caso sono stati adoperati i provini già utilizzati per le prove di ritiro, sia quelli della serie S che quelli della serie BS, per accertare, in quest'ultimo caso, che vi fosse un assorbimento d'acqua tale da giustificare l'espansione riscontrata.

I provini S1_1 e S3_1 sono stati suddivisi in tre elementi ognuno, denominati rispettivamente S1_1A, S1_1B, S1_1C e S3_2A, S3_2B e S3_2C. I provini della serie BS invece sono stati ridotti in elementi di dimensioni minori in modo da renderli più maneggevoli.

Prima di essere sottoposti alla prova, i provini sono stati conservati in un ambiente condizionato a 20°C e con umidità relativa pari al 50 % fino al raggiungimento di massa costante[60]. Sebbene tali test siano stati effettuati presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, anche in questo caso le condizioni richieste dalla prova sono facilmente riproducibili.

Dopo il primo condizionamento, i provini sono stati pesati, indicandone la massa M_0, per poi essere immersi in acqua alla temperatura di 20 °C, avendo cura che le facce superiori emergessero dal filo dell'acqua di circa 5 mm.

Dopo 24 ore, i provini sono stati completamente ricoperti d'acqua, considerando un battente di circa 20 mm. Dopo 7 giorni dall'inizio dell'immersione, ovvero 6 giorni dopo l'immersione totale, è stata rilevata la prima massa M_7. Le successive pesate sono state effettuate a intervalli di 24 ore fino a raggiungimento di massa costante M_j, ottenuta già al nono giorno di immersione. La quantità percentuale in massa di acqua di saturazione[61] w_a è data da $100*(M_j - M_0)/M_0$ ed è riportata, per ciascun provino, nella tabella riportata a pagina seguente.

Per il provino S1_1, il valore medio di w è pari a 0,69%, mentre per S3_2 è 0,23%.

Entrambi gli UHPFRC analizzati presentano, dunque, valori bassissimi di w_a, soprattutto se si pensa che un calcestruzzo convenzionale è considerato poco permeabile per valori inferiori al 12%. In ogni caso, i dati relativi all'UHPFRC2 mostrano generalmente una permeabilità inferiore, compatibilmente con il comportamento a ritiro riscontrato nonché con l'assenza di espansione dei provini conservati in acqua, anche in seguito a immersione prolungata.

[59] UNI, *UNI 7699:2018…*, *op. cit.*

[60] La massa è considerata costante quando fra due pesate successive, effettuate ad un intervallo di tempo di 24 h, la variazione tra i valori rilevati è minore dello 0,1 % rispetto alla prima delle due pesate.

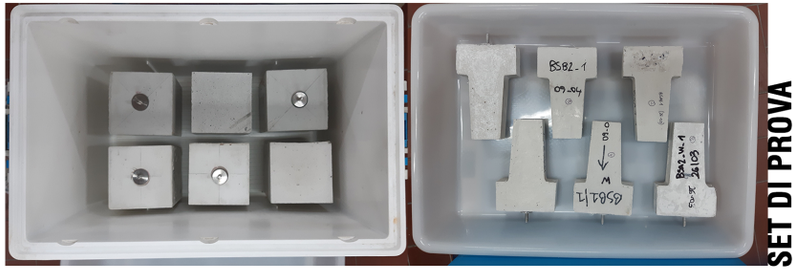
[61] Per acqua di saturazione si intende la quantità percentuale in massa d'acqua necessaria a portare a completa saturazione un provino in equilibrio in un ambiente condizionato a 20 °C e 50% di UR.

ASSORBIMENTO D'ACQUA ALLA PRESSIONE ATMOSFERICA

COMPOSIZIONE

	COMPONENTI	A/C	TEMP. CLS	% FIBRE	GRANULOMETRIA
UHPFRC 1 S1_1, BS_1	Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua	S1, BSA_0,17 BSB_0,16 BSC_0,16	S1, BSA_20,7° C BSB_23,8° C BSC_32,4° C	3,00	0,5 mm (media)
UHPFRC 2 S3_2, BS_2	Portland, polvere di quarzo, microsilice, sabbia di silice, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua	BSA_0,15 BSB_0,17 S3, BSC_0,18	BSA_24,5° C BSB_21,8° C S3, BSC_30,9° C	3,50	max 1,25 min 0,125 mm

SET DI PROVA



Provini delle serie S1_1, S3_2, BS_1 e BS_2 poco prima di essere immersi.

RISULTATI

CAMPIONI	$M_ø$	$M_{(7GIORNI)}$	$M_{(8GIORNI)}$	M_9	ΔM	$W=100*(M_I-M_ø)/M_ø$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
S1_1_A	3720,3	3744	3744,4	3744,5	0,0027	**0,6505**
S1_1_B	3767,1	3793,1	3793,5	3793,7	0,0053	**0,7061**
S1_1_C	3956,3	3983,7	3984,1	3984,4	0,0075	**0,7103**
S3_2_A	3539,8	3547,9	3548,1	3548,3	0,0056	**0,2401**
S3_2_B	3511,7	3518,9	3519	3519,3	0,0085	**0,2164**
S3_2_C	3812	3820,6	3820,6	3820,9	0,0079	**0,2335**
BSA1_1	769,9	782	782,2	782,1	-0,0128	**1,5846**
BSA2_1_W	813,1	817,2	817,3	817,4	0,0122	**0,5288**
BSB1_1_W	814,2	817,6	817,7	817,9	0,0245	**0,4544**
BSB2_1	763,1	772,7	772,8	772,9	0,0129	**1,2842**
BSC1_1_W	801	805,1	805,3	805,4	0,0124	**0,5493**
BSC2_1	819,8	828,5	828,7	828,8	0,0121	**1,0978**
BSA1_W_2	787,7	789,6	789,6	789,7	0,0127	**0,2539**
BSA2_2	776,4	780,8	780,6	780,7	0,0128	**0,5538**
BSB1_2	740	744,4	744,5	744,6	0,0134	**0,6216**
BSB2_2_W	730,2	731,8	731,7	732	0,0410	**0,2465**
BSC1_2_W	784,9	787,3	787,3	787,2	-0,0127	**0,2930**
BSC2_2	762,2	766,2	766,2	766,6	0,0522	**0,5773**

Profondità di carbonatazione

Le modalità di prova fanno riferimento alla norma *UNI EN 14630:2007*[62], che descrive le modalità di determinazione della profondità di carbonatazione del calcestruzzo indurito con il metodo delle fenolftaleine.

Come anticipato, la carbonatazione è un processo chimico, naturale o artificiale, per cui una sostanza, in presenza di anidride carbonica, dà luogo alla formazione di carbonati, ovvero quando, a partire dalla reazione di idrossidi di calcio con la CO_2, si formano carbonati di calcio.

Solitamente effettuata su carotaggi o frammenti provenienti da strutture esistenti, tale prova è intesa a misurare lo spessore dello strato carbonato del calcestruzzo indurito e ha come obiettivo quello di indagare le cause di un fenomeno di corrosione già in atto.

La prova è stata effettuata sui provini della serie BS già adoperati per la prova d'assorbimento d'acqua alla pressione atmosferica. Una volta riportati a massa costante, i provini sono stati spaccati a metà lungo un piano normale alla superficie esposta all'aria. Le aeree così ottenute sono state poi pulite e immediatamente spruzzate con una soluzione di fenolftaleina[63] in quantità appena sufficiente a inumidire la superficie. La fenolftaleina determina una colorazione rosso-violacea al contatto con materiali il cui pH è maggiore di 9,2 e rimane incolore per valori minori. Se la colorazione è debole, bisogna ripetere il trattamento. La parte di materiale che non cambia colore a contatto con la soluzione, non reagendo con la fenolftaleina, risulta quindi carbonatata. Teoricamente la prova avrebbe dovuto restituire una certa profondità di carbonatazione (indicata come d_k dalla norma), tuttavia in tutti i provini testati il campione ha assunto immediatamente la tipica colorazione violacea, dimostrando l'assenza di carbonati. Ciò dimostra ancora una volta la scarsa permeabilità del materiale ai gas, in quanto l'anidride carbonica non è penetrata se non per spessori inferiori al millimetro.

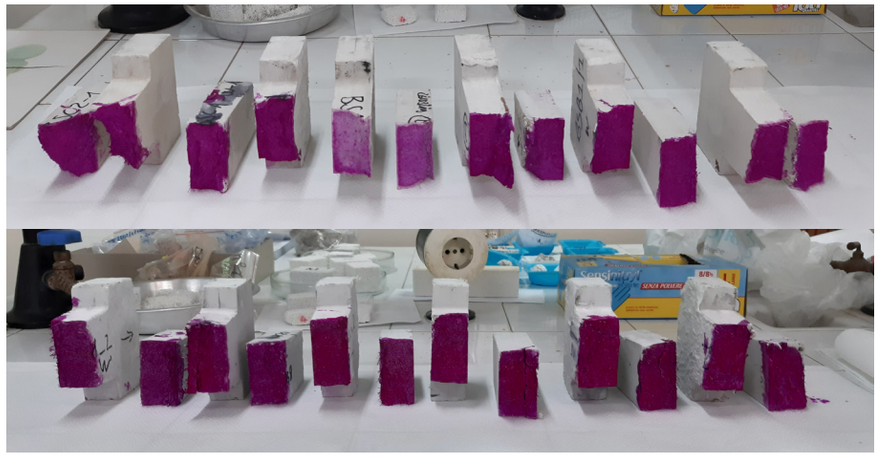


Fig. 4.3.1 In alto, provini della serie BS_1 e, in basso, provini della serie BS_2.

[62] UNI, *UNI EN 14630:2007*, *op. cit.*

[63] La soluzione è ottenuta disciogliendo un grammo di fenolftaleina in 70 ml di alcool etilico e diluita a 100 ml con acqua distillata o deionizzata. È possibile utilizzare anche alcool isopropilico.



Superfici in calcestruzzo ultra-performante. In primo piano, alterazione superficiale da carbonatazione. il Cantiere, Pordenone, 2019. Foto dell'autrice.



Vista frontale di un provino per la determinazione della fluidità, il Cantiere, Pordenone, 2019. Foto dell'autrice.

4.4 PROTOCOLLO DI VERIFICA DELLA QUALITA' ESTETICA DEI PRODOTTI

Sebbene la matrice estremamente densa e compatta dell'UHPFRC sia nata originariamente con l'obiettivo di incrementarne la resistenza a compressione, ben presto tale proprietà si è rivelata una delle ragioni del successo del materiale nelle applicazioni architettoniche e di design. Mentre, l'elevata resistenza meccanica consente di utilizzare spessori estremamente ridotti, la densità, determinando un'elevata durabilità, fa sì che il materiale conservi a lungo le sue proprietà estetiche, presentando, anche negli ambienti più ostili, pochissime alterazioni superficiali. Inoltre, essa è responsabile, assieme alla fluidità, della capacità dell'UHPFRC di leggere facilmente qualsiasi finitura e *texture*, a partire da complessi *pattern* geometrici e organici, fino ad arrivare a riproduzioni di disegni e fotografie mediante la tecnica del *graphic concrete*.

A ciò si aggiunge la presenza delle fibre che consente, in moltissimi casi, l'eliminazione dei rinforzi in acciaio, rendendo così possibile il getto di elementi forati e snelli.

Il fascino degli UHPFRC risiede proprio nell'opportunità di realizzare elementi che seppur conservando nell'aspetto la potenza materica del calcestruzzo, ne introducono di fatto un nuovo abaco formale.

Le potenzialità formali ed estetiche degli ultra-performanti hanno dunque indotto continue innovazioni incrementali, risultate in tentativi di ottimizzazione della ricetta, provando a intervenire sia sul quantitativo di additivi che sul rapporto acqua/cemento, principale responsabile, assieme ai super-fluidificanti, della fluidità del materiale.

La ricerca continua di un compromesso tra *performance* strutturali, di durabilità e quelle che si potrebbero definire, proprietà di resa estetica, ha determinato lo spostamento dei diversi prodotti verso certe tipologie di applicazioni. Tuttavia, prima di oggi, non esisteva un protocollo di prove in grado di caratterizzare i prodotti sulla base delle loro *performance* estetiche. Dunque, sulla base dell'esperienza sviluppata da diversi prefabbricatori, sono state elaborate due prove sperimentali finalizzate alla caratterizzazione estetica del materiale, valutandone la capacità di lettura delle finiture e la fluidità.

CARATTERIZZAZIONE DEI PRODOTTI

Caratterizzazione estetica dei prodotti

L'obiettivo del test è valutare la capacità del materiale di restituire *texture* in rilievo o in bassorilievo presenti all'interno del cassero.

Mentre, in generale, il bassorilievo risulta più semplice da riprodurre, per le finiture in rilievo, soprattutto su elementi di spessori e ampiezze ridotti, si riscontra spesso una cattiva tenuta degli spigoli, che tendono a "sfarinarsi" a causa dell'impossibilità del materiale e delle fibre di ben posizionarsi all'interno dell'alloggio che andrà a costituire la finitura. Ugualmente l'aria imprigionata su fondo cassero si traduce, al *demoulding*, in fori anche di dimensioni notevoli, cui si aggiungono ulteriori imperfezioni dovute ai diversi flussi di materiale che si incrociano durante il getto, causando accumuli di fibre. Inoltre, soprattutto in presenza di *pattern* geometrici, risulta fondamentale sia riprodurre angoli molto stretti che garantire la tenuta delle geometrie in rilievo, anche se queste presentano aree di aderenza alla base molto ridotte.

L'individuazione di tali problematiche frequenti ha consentito di elaborare un protocollo di prova, genericamente descritto di seguito, che, attraverso una lastra rettangolare di 250*140 mm, ne tenta una prima sintesi e categorizzazione.

Il provino, come mostrato nella pagina a fianco, è suddiviso in quattro sezioni, per ognuna delle quali il soddisfacimento di particolari parametri consentirà di descrivere il comportamento globale del materiale. Per le finiture in rilievo e in relazione allo spessore, la sezione 1 descrive l'ampiezza minima restituita dalla finitura, la sezione 2 indica l'angolo minimo e la sezione 3 indica l'area minima necessaria a garantire l'aderenza delle finiture sulla base. La sezione 4, invece, indica l'area minima degli elementi in bassorilievo.

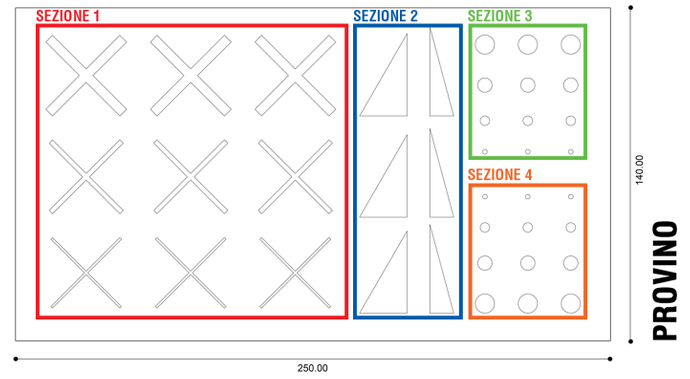
La prima sezione è formata da 9 elementi, organizzati in righe e colonne. Ogni colonna emerge dal filo della base rispettivamente di 3, 2 e 1 millimetro, facendo sì che ogni riga presenti elementi cruciformi di ampiezza costante ma di spessore decrescente. Ogni colonna rappresenta una categoria di spessore, C3, C2 e C1, ognuna delle quali si articola in accordo all'ampiezza dell'asta dell'elemento cruciforme (4, 2 e 1 mm).

Affinché la categoria risulti soddisfatta, almeno il 50% dell'area dell'elemento cruciforme di riferimento dovrà essere riprodotto dal materiale. Il parametro adoperato è stato definito A_r, ovvero la percentuale di area riempita, da cui saranno escluse eventuali bolle. Sulla base del valore di A_r per ciascuna categoria e per ciascuna ampiezza, sarà dato un giudizio qualitativo sintetico sulla base dei seguenti *range* percentuali: $A_r \leq 50\%$, pessimo; per $50\% < A_r \leq 65\%$, scarso; per $65\% < A_r \leq 80\%$, buono; $A_r > 80$, ottimo. In tal modo, per ogni spessore di riferimento, si avrà l'ampiezza minima di finitura che il prodotto esaminato riesce a restituire con sufficiente precisione.

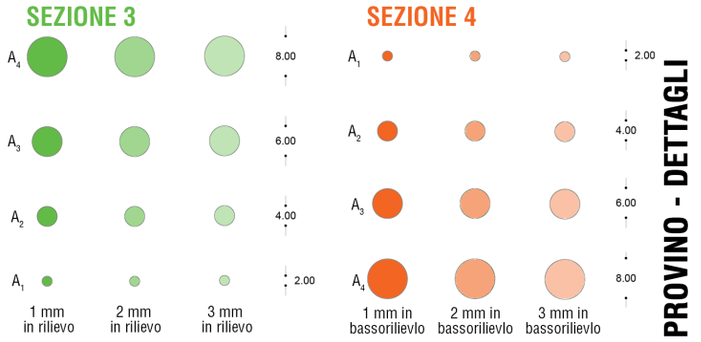
Procedura analoga si applica alla sezione 2, formata da 3 coppie di triangoli, di cui il primo ha angoli di 30° - 60° - 90° e il secondo ha angoli di 15° - 75° - 90°.

Le coppie emergono dal filo della base rispettivamente di 3, 2 e 1 mm, come mostrato in figura. Anche in questo caso, ogni coppia rappresenta una categoria di spessore, C3, C2 e C1, ognuna delle quali è organizzata sulla base dell'angolo minimo riprodotto dal materiale (15° - 30° - 60° - 75° - 90°).

Per ogni categoria di spessore, si verificherà solo se è stato riprodotto l'angolo rappresentato dal corrispettivo vertice del triangolo.







La sezione 3 è formata da 3 colonne, ognuna delle quali stabilisce, ancora una volta, una categoria di spessore, e da 4 righe, ospitanti rispettivamente circonferenze di area 50,24 (A_1), 28,26 (A_2), 12,56 (A_3) e 3,14 (A_4) mm^2. Tali aree rappresentano l'area di aderenza A_A, atta a garantire l'adesione della finitura alla base. Come per la sezione precedente, si verificherà solo che l'area A_A sia riprodotto per almeno il 50% della sua superficie di base. La sezione 4 è simile alla precedente, sebbene questa volta le finiture siano in bassorilievo. Formata da 3 colonne, ognuna delle quali stabilisce una categoria di incisione, C1, C2 e C3 e da 4 righe, ospitanti rispettivamente circonferenze di area 50,24 (A_{B1}), 28,26 (A_{B2}), 12,56 (A_{B3}) e 3,14 (A_{B4}) mm^2. L'area A_B si considera riprodotta se è libero almeno il 50% della sua superficie di base. Fatto ciò per ciascuna categoria di ciascuna sezione sarà dato un giudizio qualitativo sintetico: per la prima sezione sarà basato sulla media dei giudizi precedentemente espressi; per la seconda sezione, saranno applicati i seguenti criteri: se l'angolo di 90° non è riprodotto, si considera un comportamento pessimo, per angoli fino 60°, scarso; fino a 30°, buono; per 15°, ottimo[64]; per la terza e quarta sezione, si procederà come segue: se non risultano riprodotte nemmeno A_4 e A_{B4}, il comportamento è considerato pessimo; solo A_4 e A_{B4} scarso; fino a A_2 e A_{B2} buono; A_1 e A_{B1} ottimo.

Per meglio comprendere il meccanismo di prova, procediamo direttamente con la descrizione dei test effettuati. I provini sono stati gettati in una cassaforma in gomma realizzata a partire da una matrice stampata in 3D adoperando, in questo caso, tre UHPFRC differenti. Per l'UHPFRC1 e per l'UHPFRC2 sono stati gettati complessivamente 6 provini, denominati FR1_1, FR2_1 e FR3_1 e FR1_2, FR2_2 e FR3_2, mentre per l'UHPFRC3 solo due: FR1_3 e FR2_3. Si riportano nella tabella di pagina seguente le date di realizzazione, il rapporto acqua cemento e il contenuto di fibre. FR1_1 e FR3_1 (risultati a pp. 286-287) sono stati gettati applicando una certa pressione sul conglomerato e presentano entrambi un grado di precisione piuttosto sorprendente, sebbene il secondo abbia un rapporto a/c inferiore. Il campione FR2_1, con analoghe caratteristiche ma gettato per sola gravità, mostra imprecisioni in tutte e tre le sezioni.

Anche per l'UHPFRC2 sono stati fatti tre campioni (risultati a pp. 288-289). FR1_2, gettato per sola gravità, mostra molte imperfezioni, sicuramente dovute al rapporto a/c basso (0,15) nonché al maggiore contenuto di fibre che, oltre a ostacolare la capacità del materiale di inserirsi all'interno di piccole cavità, è anche responsabile di un elevato incameramento di aria all'interno dell'impasto, che si traduce nella formazione di bolle. FR2_2, con rapporto acqua cemento superiore e gettato applicando pressione, è migliore del precedente sebbene presenti ancora un certo numero di imperfezioni. FR3_2, con un maggiore rapporto a/c e gettato per pressione, presenta la sezione 1 migliore della serie. Va detto che le temperature del 10 luglio, oltre i 30 °C, hanno sicuramente inficiato lavorabilità e tempo aperto del materiale.

Per due provini dell'UHPFRC3, FR1_3 e FR2_3 (risultati a pp. 290-291), di cui il primo gettato per pressione e il secondo per gravità, il ridotto quantitativo di fibre (1%) e l'elevato rapporto acqua cemento (0,27) hanno contribuito alla buona riuscita del test soprattutto per il primo provino.

[64] Non è detto che il materiale riproduca gli angoli in ordine crescente: capita spesso,ad esempio, che l'angolo di 30° dà meno problemi di quello di 60°. In questi casi il giudizio va ricalibrato rispetto alla resa complessiva del triangolo. Inoltre, la restituzione si considera ottimale quando sono restituiti tutti gli angoli.

CARATTERIZZAZIONE DEI PRODOTTI

PROPRIETÀ DEL MIX

	UHPFRC	A/C	% FIBRE*	DATA DI GETTO	MOD. DI GETTO
FR1_1	1	0,17	1,82	26 marzo	per pressione
FR2_1	1	0,17	1,82	1° aprile	per gravità
FR3_1	1	0,16	2,18	9 luglio	per pressione
FR1_2	2	0,15	2,18	2 aprile	per gravità
FR2_2	2	0,17	2,18	8 maggio	per pressione
FR3_2	2	0,18	1,00	10 luglio	per pressione
FR1_3	3	0,27	1,00	30 aprile	per pressione
FR2_3	3	0,27	1,00	5 maggio	per gravità

Gli UHPFRC sono così composti:
1_Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua;
2_Portland, polvere di quarzo, microsilice, sabbia di silice, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua;
3_Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler*, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico, acqua.
*la percentuale di fibre è calcolata sul peso del premix.

CASSAFORMA IN GOMMA

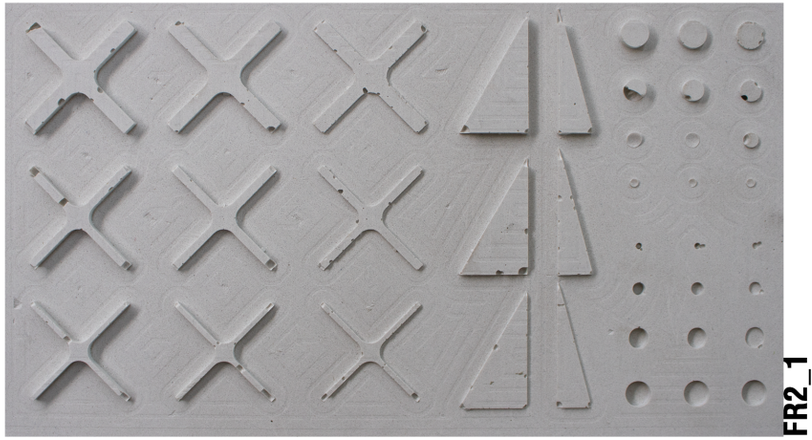


QUALITA' ESTETICA

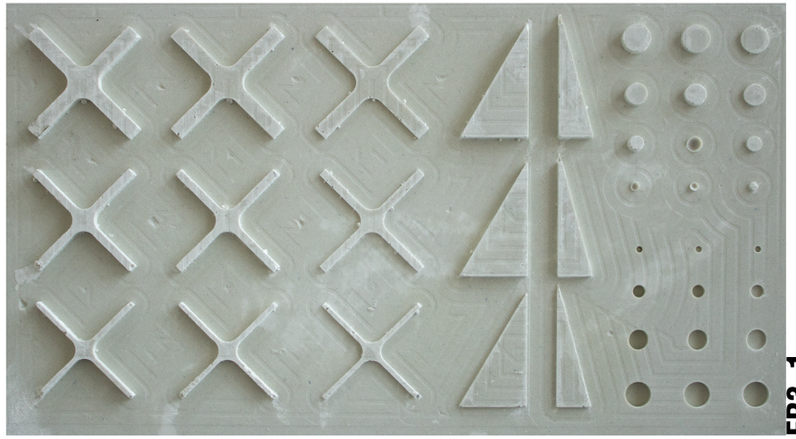
CARATTERIZZAZIONE DEI PRODOTTI



FR1_1



FR2_1



FR3_1



FR1_1 - RISULTATI



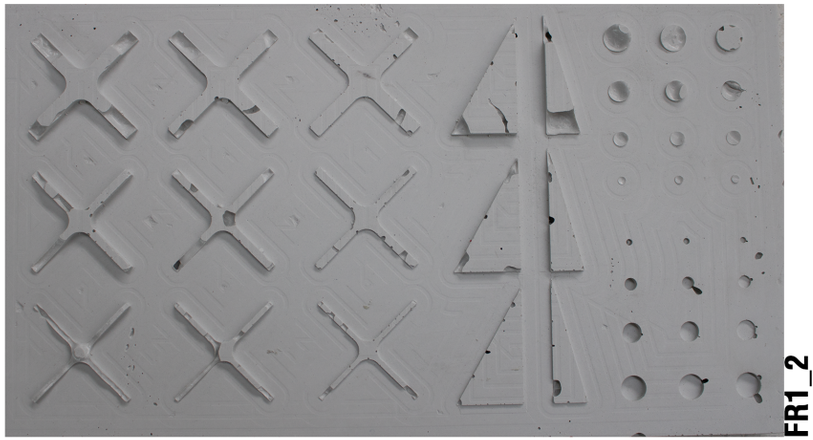
FR2_1 - RISULTATI



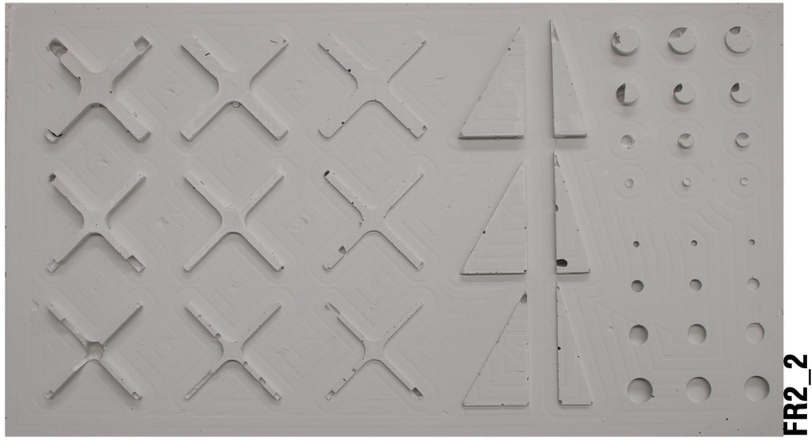
FR3_1 - RISULTATI

QUALITA' ESTETICA

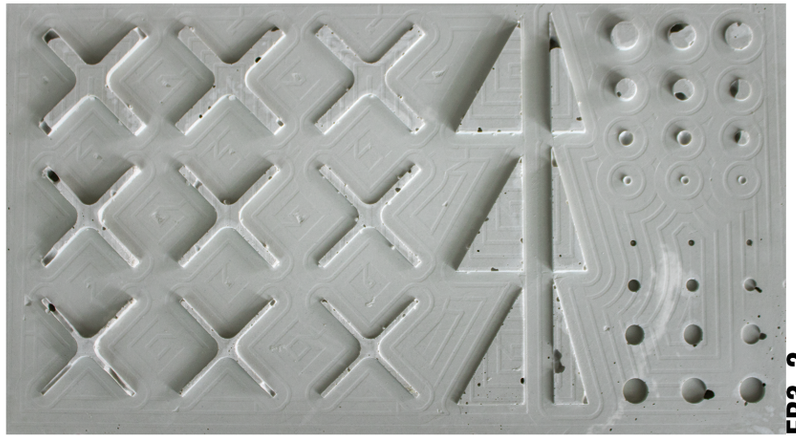
CARATTERIZZAZIONE DEI PRODOTTI



FR1_2



FR2_2



FR3_2

FR1_2 - RISULTATI

SEZIONE 1

	C3	C2	C1
4			
2			
1			

SEZIONE 2

	90°	75°	60°	30°	15°
C3	✗	✗	✗	✗	✗
C2	✓	✓	✗	✗	✗
C1	✓	✓	✗	✗	✓

SEZIONE 3

	A_4	A_3	A_2	A_1
C3	✗	✗	✗	✗
C2	✗	✗	✗	✗
C1	✓	✗	✗	✗

SEZIONE 4

	A_{B4}	A_{B3}	A_{B2}	A_{B1}
C3	✓	✓	✓	✗
C2	✓	✓	✓	✗
C1	✓	✓	✓	✓

SEZIONI

	1	2	3	4
C3				
C2				
C1				

GIUDIZIO SINTETICO

PESSIMO
SCARSO
BUONO
OTTIMO

FR2_2 - RISULTATI

SEZIONE 1

	C3	C2	C1
4			
2			
1			

SEZIONE 2

	90°	75°	60°	30°	15°
C3	✓	✓	✓	✗	✗
C2	✓	✓	✗	✓	✗
C1	✓	✓	✗	✓	✗

SEZIONE 3

	A_4	A_3	A_2	A_1
C3	✓	✗	✗	✗
C2	✓	✓	✗	✗
C1	✓	✓	✗	✗

SEZIONE 4

	A_{B4}	A_{B3}	A_{B2}	A_{B1}
C3	✓	✓	✓	✗
C2	✓	✓	✓	✗
C1	✓	✓	✓	✓

SEZIONI

	1	2	3	4
C3				
C2				
C1				

GIUDIZIO SINTETICO

PESSIMO
SCARSO
BUONO
OTTIMO

FR3_2 - RISULTATI

SEZIONE 1

	C3	C2	C1
4			
2			
1			

SEZIONE 2

	90°	75°	60°	30°	15°
C3	✓	✓	✓	✗	✗
C2	✓	✓	✓	✗	✗
C1	✓	✗	✓	✓	✓

SEZIONE 3

	A_4	A_3	A_2	A_1
C3	✓	✓	✗	✗
C2	✓	✓	✗	✗
C1	✓	✓	✓	✗

SEZIONE 4

	A_{B4}	A_{B3}	A_{B2}	A_{B1}
C3	✓	✓	✓	✗
C2	✓	✓	✓	✗
C1	✓	✓	✓	✓

SEZIONI

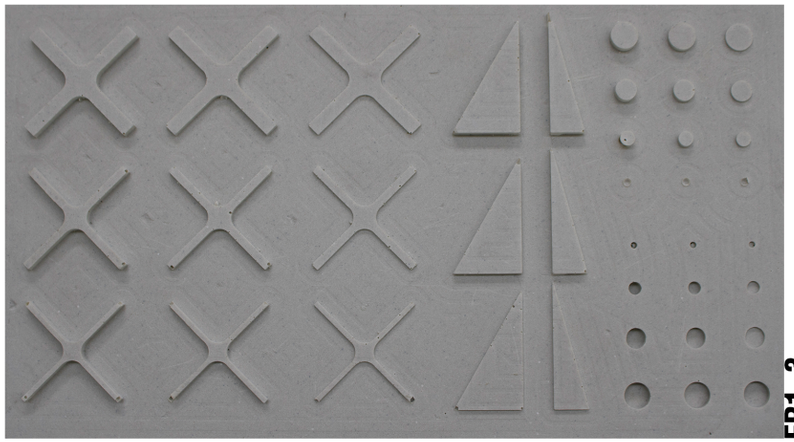
	1	2	3	4
C3				
C2				
C1				

GIUDIZIO SINTETICO

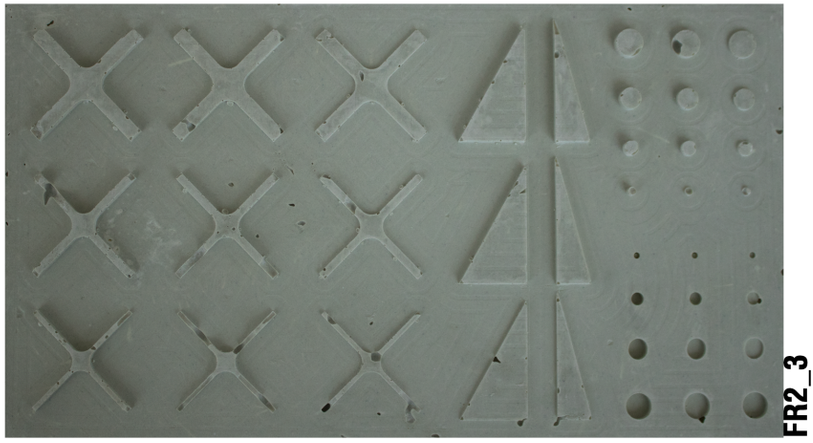
PESSIMO
SCARSO
BUONO
OTTIMO

QUALITA' ESTETICA

CARATTERIZZAZIONE DEI PRODOTTI



FR1_3



FR2_3



FR1_3 - RISULTATI



FR2_3 - RISULTATI

FLUIDITÀ

Prova di fluidità

Il test per valutare la fluidità si pone l'obiettivo di fornire ai produttori uno strumento rapido e di immediata comprensione per stabilire tanto la lavorabilità del materiale, quanto la sua capacità di restituire forme complesse o elementi molto sottili.

Nel caso infatti di produzione per colatura, ancora la più diffusa in ambito architettonico e di design grazie all'ottima qualità delle superfici così realizzate, molto spesso è necessario gettare in casseforme chiuse attraverso aperture molto ridotte, onde massimizzare il contatto con le pareti dello stampo e, di conseguenza, ridurre le imperfezioni. In tali occasioni la fluidità del materiale, che dipende in larga parte dal rapporto acqua/cemento e dal quantitativo di super-fluidificante utilizzato, risulta un fattore determinante. Anche le fibre giocano un ruolo significativo sulla fluidità del materiale.

È stato dimostrato[65] che maggiore è la lunghezza delle fibre, minore sarà la distanza di flusso del materiale che, inoltre, risulta influenzata anche dalle caratteristiche del percorso. Infatti, in prossimità di cambi di direzione, l'aumento del raggio di curvatura della "svolta" impatta positivamente sulla distanza di flusso.

A partire da questi presupposti, il protocollo elaborato consiste nel verificare la capacità del materiale di fluire all'interno di un elemento molto sottile a forma di "L", avente angoli retti proprio per aumentare la difficoltà di scorrimento[66]. La prova consiste nel gettare l'UHPFRC all'interno dell'elemento verticale fino a completa saturazione di quest'ultimo, inizialmente separato da quello orizzontale per mezzo di uno *slider* in acciaio (si veda immagine a fianco).

Eliminato lo *slider*, inizialmente la prova prevedeva la misurazione del tempo di saturazione T_{sa}, ovvero il tempo che il composito impiega a percorrere il tratto prestabilito – l'elemento orizzontale della cassaforma – saturandolo completamente, il tempo di scorrimento T_{sc}, ovvero il tempo impiegato dal calcestruzzo per raggiungere (si intende il primo contatto) l'estremo della cassaforma opposto rispetto a quello di entrata, e il tempo di interruzione del flusso T_i, ovvero il tempo impiegato dal calcestruzzo per fermarsi completamente .

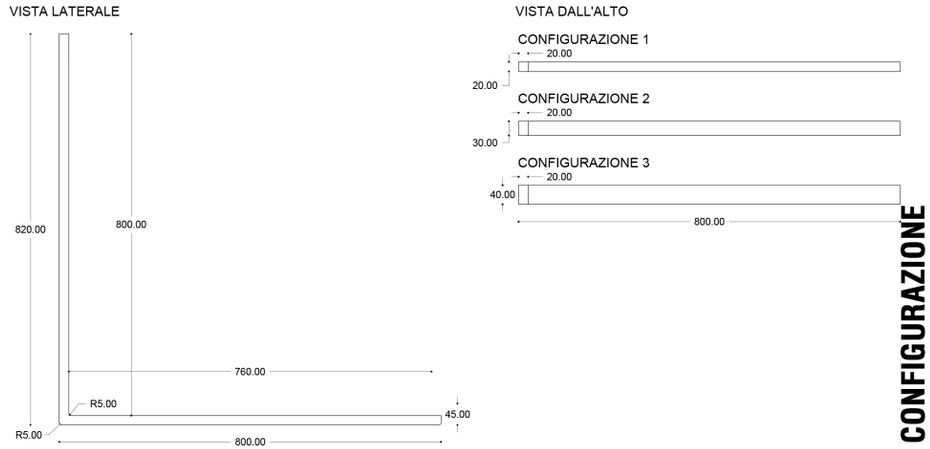
Tuttavia il tempo di saturazione T_{sa} si è rivelato impossibile da misurare, in quanto l'ultima sezione della L non è mai satura, perché una parte di materiale inevitabilmente rimane attaccato alle pareti dello stampo. È stato quindi definito il fattore di dispersione D_L, ovvero la percentuale di materiale "mancante" ottenuta sottraendo al volume di progetto del provino, il volume dell'elemento effettivamente scasserato. Quest'ultimo sarà dato da $(A_s^{67} * d_s) * (H_v - 2cm)$, dove d_s è la distanza massima di scorrimento, coincidente con la parte orizzontale del provino dopo lo scassero, e H_v è l'altezza della parte verticale del provino, cui vanno sottratti i due centimetri dello spessore tenuto costante. Si è deciso, quindi, di considerare per la prova i soli T_{sc} e T_i,

[65] Ruffray N. *et alii*, "Complex architectural elements from HPFRC and 3D printed sandstone", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, UHPFRC 2017, Montpellier, 2-4 ottobre 2017.

[66] La prova tra spunto anche dalla norma *UNI EN 12350-10:2010: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 10: Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante scatola ad L* finalizzata a valutare la capacità degli auto-compattanti di fluire attraverso aperture ridotte o altre ostruzioni, senza che si verifichino blocchi o fenomeni di segregazione. Il test consiste nel riempire l'elemento verticale della "L", inizialmente separato dal quello orizzontale per mezzo di un elemento scorrevole. Tra le due parti della cassaforma sono posizionata delle barre in acciaio, per verificare la capacità del composito di fluire attraverso i rinforzi. La parte orizzontale della "L", più lunga di 100 mm rispetto alla verticale, è aperta superiormente.

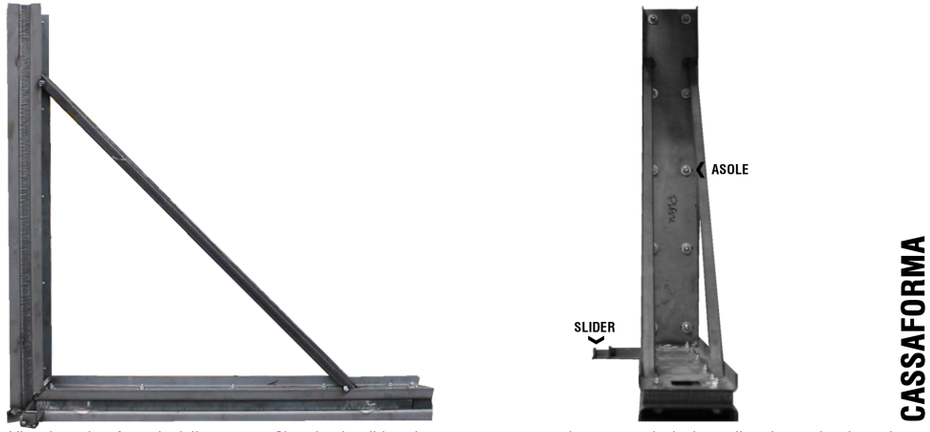
[67] Per A_s si intende l'area della sezione del provino.

CONFIGURAZIONE



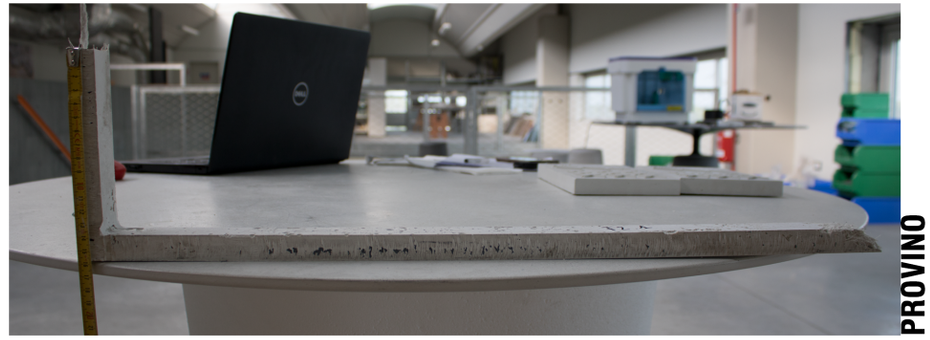
Vista laterale del provino e viste dall'alto delle tre configurazioni ottenibili facendo variare la sezione dello stampo.

CASSAFORMA



Vista laterale e frontale dello stampo. Si notino lo *slider* adoperato per separare la parte verticale da quella orizzontale e le asole che consentono lo scorrimento di un'asta interna che definisce la sezione del provino.

PROVINO



cui si aggiungono D_L e d_s. È bene chiarire che, nel caso in cui si misuri il tempo T_{sc} significa che il calcestruzzo è arrivato a toccare l'estremo finale della cassaforma e, quindi T_i, risulta nullo. Se invece il flusso si interrompe prima di percorrere la distanza prestabilita, allora T_{sc} risulterà nullo. Dal momento in cui il test si pone anche l'obiettivo di verificare la capacità del materiale di saturare completamente un elemento sottile e chiuso, la cassaforma ha una sezione variabile, inizialmente quadrata di 20*20 mm, poi modificabile in una rettangolare di 20*30 mm e 20*40 mm. Il test inizierà nella prima configurazione e, qualora il calcestruzzo non riuscisse a percorrere l'intero elemento orizzontale, si passerà alla seconda e infine alla terza.

In generale, la prova di fluidità si è rivelata tra le più complesse a livello di gestione. Qualora infatti passi troppo tempo dal *mixing* al getto (in estate si sono rivelati dannosi tempi inferiori ai 3 minuti) dell'elemento verticale, risulta alle volte infattibile far scorrere lo *slider*, in quanto la formazione della prima patina di presa del calcestruzzo ne impedisce l'apertura.

Anche il tempo di interruzione del flusso T_i è stato difficile da misurare, in quanto spesso e volentieri il calcestruzzo ha continuato a scorrere molto lentamente, ben oltre la fine della prova.

Per ovviare a tale problema, in futuro si dovrebbe realizzare la parte superiore dell'elemento orizzontale della "L" in materiale trasparente (*plexiglass* rigido ad esempio), quotandone anche la lunghezza in maniera tale che, riprendendo il test, si possa calcolare con precisione il tempo T_i. Tenere, invece, aperta la cassaforma non è mai stato nelle intenzioni della prova che prevede, inoltre, di verificare la buona riuscita dell'elemento allo scassero. Il primo getto effettuato aveva la cassaforma impostata su sezione 2*2 cm, che si è rivelata troppo ambiziosa. Si è deciso, dunque, di procedere a partire dalla sezione 2*3 cm.

Per l'UHPFRC1 sono stati svolti un totale di 4 test di cui, solo il primo, ovvero F31_1 è andato a buon fine: l'ultra-performante, prima di interrompersi, ha percorso 62,5 degli 80 cm previsti in 3 minuti e un secondo, con un fattore di dispersione D_L pari al 4,38%. Nonostante i tentativi svolti il 1° e il 9 aprile e, in seguito, il 9 luglio, non è stato possibile ottenere alcun risultato dal provino con sezione 2*4 cm. In tutti i casi, infatti, si è formato un grumo di fibre in prossimità dello *slider* che ha impedito il passaggio del materiale.

Per l'UHPFRC2, sono stati svolti due test con sezione 2*3 cm e uno con sezione 2*4 cm.

Dei test con sezione 2*3 solo uno si è rivelato utilizzabile, denominato F31_2: il calcestruzzo ha percorso una distanza di 59,9 cm in 4 minuti e 3 secondi, con un fattore di dispersione del 6,13%. In questo caso la superficie del provino, la meglio riuscita, presentava delle bolle allungate, come se il *degassing* si fosse interrotto prima della fine dello scorrimento del materiale, che ha, quindi, successivamente trascinato parte delle bolle formatesi. Il provino con sezione F41_2, presenta invece una superficie differente, con evidenti disgregazioni. Di contro l'UHPFRC2 ha percorso 70 cm in 4:30 minuti, con un fattore di dispersione del 4,75 %.

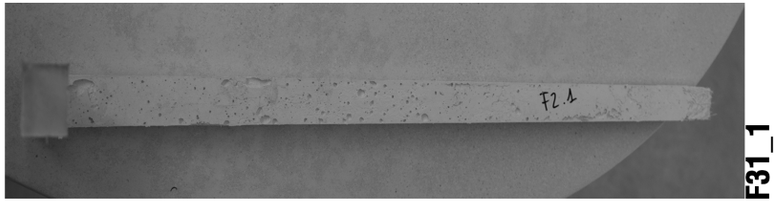
L'UHPFRC3 (F31_3) è stato l'unico in grado di percorrere una distanza di 78,5 cm, toccando il fondo del cassero con un tempo di scorrimento pari a 1 minuto e 40 secondi, con un fattore di dispersione dell'1,8%. In questo caso la superficie al *demoulding* era ricca di bolle, compatibilmente con il comportamento in fase di *mixing*, con il materiale che a tratti sembrava ribollire.

FLUIDITÀ

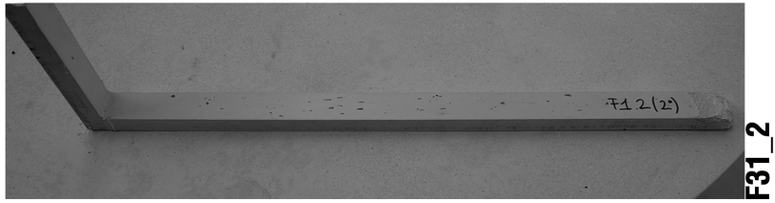
RISULTATI

	UHPFRC	A/C	% FIBRE*	SEZIONE	°C CLS	°C	T_{SC}	T_I	D_S	D_L
F3I_1	1	0,17	1,82	2*3 cm	20,7	28,1	/	3'01''	62,5 cm	4,38%
F3I_2	2	0,15	2,18	2*3 cm	25,2	20,9	/	4'03''	59,9 cm	6,13%
F4I_2	2	0,17	2,18	2*4 cm	21,8	16,2	/	4'30''	70,0 cm	4,75%
F3I_3	3	0,15	1,00	2*3 cm	22,9	14,9	1'40''	/	78,5 cm	1,88%

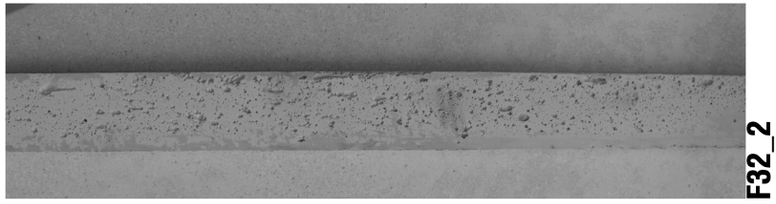
Gli UHPFRC sono così composti:
1_Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua;
2_Portland, polvere di quarzo, microsilice, sabbia di silice, *filler*, agenti chimici, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico e acqua;
3_Portland, polvere di quarzo, carbonato di calcio, *filler*, super-fluidificante, accelerante, fibre in alcool polivinilico, acqua.
*la percentuale di fibre è calcolata sul peso del premix.

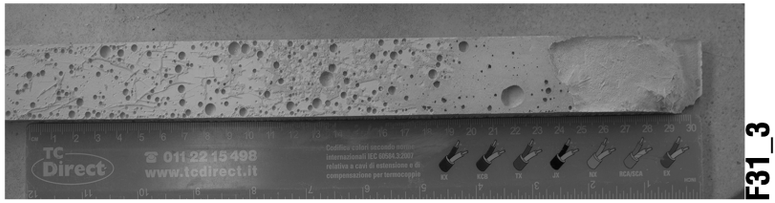


F31_1



F31_2


F32_2



F31_3



4.5 La misura della conoscenza

Il protocollo di prove sviluppato, che contiene tre prove tradizionali – test per la valutazione del ritiro assiale, determinazione dell'assorbimento d'acqua alla pressione atmosferica e della profondità di carbonatazione – e tre sperimentali – test di sensibilità al ritiro, test di caratterizzazione estetica e test di fluidità –, si è configurato, sin da subito, come una sperimentazione esso stesso.

Il primo obiettivo consisteva, infatti, nel verificarne l'efficacia all'interno di un contesto non specialistico, creando procedure snelle e semplici da riprodurre che, tuttavia, garantissero anche la coerenza dei dati ottenuti con risultati già presenti in letteratura. Allo stesso tempo però, vi era la volontà di fornire uno strumento finalizzato sia alla conoscenza del materiale in senso stretto, quindi in termini prestazionali, sia alla verifica delle soluzioni progettuali adoperate e del loro impatto sulla produzione: il protocollo, dunque, doveva essere in grado di porsi tanto a valle della progettazione, intervenendo nella costruzione del sistema di conoscenza del materiale, sia a monte di essa, verificandone la validità in relazione alle tecniche produttive.

In questo senso, l'intento di intervenire sulla progettazione con ultra-performanti ha portato a indagare aspetti comportamentali legati alla costruibilità e alla resa estetica e formale, mettendo da parte l'indagine di proprietà del materiale ampiamente conosciute a favore di altre meno note, ma altrettanto importanti.

I risultati più significativi vengono proprio dai test sperimentali che si basano, come anticipato, sull'analisi di problematiche ricorrenti in fase di produzione, risolte o attraverso modifiche dell'elemento in sede progettuale oppure in seguito a una prima prototipazione in sede produttiva.

L'astrazione di tali problematiche “ripetute” ne ha consentito la traduzione in procedure normate che, mentre stabiliscono rapidamente e senza costi eccessivi la capacità del materiale di rispondere adeguatamente alle prime, vanno gradualmente a costituire un *database* organizzato in base tanto alle proprietà degli ultra-performanti, quanto ai fattori esterni che ne inficiano la costruibilità.

Tuttavia, partendo sempre dal presupposto che il protocollo di prove vuole essere sia uno strumento di conoscenza che di intervento attivo nella progettazione e nella produzione, l'individuazione delle principali proprietà del materiale e dei fattori esterni che ne influenzano il comportamento è stata indirizzata a identificare dei parametri su cui si potesse agire

concretamente: ad esempio, appare chiaro che una modifica della composizione del materiale in base alle condizioni ambientali ne può incrementare il comportamento al ritiro, tuttavia ciò non rientra nelle soluzioni fattibili da attuare durante la produzione.

Quindi, se i test di ritiro e di fluidità hanno individuato nel rapporto a/c e nelle condizioni ambientali i maggiori parametri di influenza del comportamento del materiale, la prova per la caratterizzazione estetica è particolarmente condizionata dalle modalità di getto. Guardando ai dati sintetici presentati nelle prossime pagine, è possibile dedurre i limiti prestazionali dei tre UHPFRC testati in base ad alcuni parametri significativi che, di conseguenza, sono sia in grado di indirizzare la progettazione degli elementi, sia di fornire indicazioni sulle eventuali azioni correttive da applicare durante la produzione.

È opportuno, a questo punto, entrare di più nel dettaglio, esaminando i tre materiali singolarmente. Per l'UHPFRC1 (risultati a pp. 302-303) sono state realizzate tre coppie di provini per la sensibilità al ritiro di cui l'ultima, ovvero quella gettata nel mese di luglio del 2019, è stata esclusa dall'analisi sintetica, in quanto le particolarmente avverse condizioni ambientali hanno fatto sì che il ritiro si concentrasse nelle prime 24H di stagionatura, escluse dalle misurazioni. In futuro tali dati potranno essere reinseriti nell'analisi applicando opportuni fattori di correzione.

Dal momento che i parametri che maggiormente impattano sul ritiro del materiale sono il rapporto a/c e le condizione ambientali, per ogni a/c si è realizzato un grafico avente sulle ascisse le prime 96 ore di stagionatura, le più rilevanti in termini di formazione delle fessurazioni, e sulle ordinate la deformazione assiale in mm/m. I dati di ritiro rappresentano la variazione dimensionale giornaliera e forniscono, dunque, un dato parziale.

A ciascuna variazione è stato attribuito un colore facente riferimento a particolari condizioni di temperatura e umidità relativa. Sebbene siano purtroppo pochi i dati relativi a ciascun valore di a/c, procedendo con i test si avranno per ciascun intervallo temporale le variazioni dimensionali in relazione alle condizioni ambientali. In tal modo apparirà chiara l'influenza di quest'ultime sul comportamento del materiale, consentendo di intervenire su di esse durante la stagionatura.

I dati relativi alla caratterizzazione estetica sono stati invece riportati all'interno di uno *spider diagram*, organizzato sulla base del giudizio sintetico espresso per ciascuna categoria di spessore alla fine del resoconto di prova e suddiviso in accordo alle sezioni definite nel test. In questo caso, sono fondamentali le modalità di getto, oltre naturalmente alla granulometria e alla dimensione delle fibre che, tuttavia non possono essere modificate. Si noti che quando nessuna pressione è applicata, la sezione 2 è la più difficile da riprodurre, seguita immediatamente dalla 3. Ciò significa che nel caso in cui si debba necessariamente gettare sfruttando la sola gravità, è opportuno rinunciare a geometrie particolarmente piccole e spigolose. Meno problemi invece sulle geometrie in bassorilievo, le più semplici da riprodurre.

Purtroppo, nel caso della fluidità, non si hanno molti dati a disposizione. In ogni caso è evidente, grazie anche ai numerosi tentativi non andati a buon fine, che il rapporto a/c e la temperatura dell'ambiente in fase di getto sono fondamentali. Quest'ultima impatta sul tempo aperto del materiale, influenzandone la lavorabilità e la fluidità. Quindi, in questo caso, è stato fatto uno *spider diagram* per ogni significativo *range* di temperatura e in base alla sezione dello stampo adoperato, riportando per ogni a/c il comportamento del materiale. Questa volta le

sezioni del diagramma sono organizzate sulla base del fattore di dispersione D_L, sulla distanza di scorrimento d_s, sul tempo di scorrimento T_{sc} e sull'aspetto del campione allo scassero, cui si è dato un giudizio qualitativo (pessimo, scarso, buono, ottimo). Anche i primi tre valori sono stati convertiti in giudizi qualitativi adoperando i seguenti criteri: se $D_L \leq 2\%$, $d_s \geq 75$ cm e $T_{sc} \leq 1'30''$, si considera un comportamento ottimo; per $2\% < D_L \leq 4\%$, $65 \leq d_s < 75$ cm, $1'30'' < T_{sc} < 3'00''$, buono; per $4\% < D_L \leq 6\%$, $50 \leq d_s < 65$ cm, $3'30'' < T_{sc} \leq 4'30''$, scarso; per $6\% < D_L \leq 8\%$, $d_s < 50$ cm, $T_{sc} > 4'30''$ o non rilevato, pessimo.

Anche in questo caso, la catalogazione delle informazioni raccolte dai vari test come indicato, fornirebbe sia un utile indirizzo alla progettazione che suggerimenti correttivi alla produzione. Si consideri inoltre, che il calcestruzzo richiesto è pochissimo – nella sezione maggiore circa 4,2 Kg – rendendo di fatto poco dispendioso realizzare una serie di test per adattare il rapporto a/c all'elemento che si andrà a realizzare.

Per l'UHPFRC2 (risultati a pp. 304-305) valgono considerazioni analoghe per quanto riguarda la prova di ritiro[68], mentre si nota per la prova di caratterizzazione estetica generalmente un comportamento peggiore rispetto all'UHPFRC1, probabilmente a causa del maggiore contenuto di fibre e alla più scarsa lavorabilità osservata in fase di getto. La prova di fluidità è stata invece piuttosto sorprendente, sebbene anche in questo caso la sezione dell'elemento orizzontale non è mai stata saturata. L'UHPFRC3 (risultati a pag.301), testato solo per la caratterizzazione estetica e per la fluidità, è quello che ha dato i risultati migliori, sicuramente a causa per il ridotto contenuto di fibre e l'elevato rapporto a/c.

Si può dire quindi che il protocollo di prove rappresenta a tutti gli effetti un avanzamento nel panorama conoscitivo del materiale, soprattutto per il taglio progettuale e produttivo che dà alla strutturazione della conoscenza.

La possibilità di conoscere *a priori* i limiti costruttivi del materiale, nonché gli ostacoli cui può andare incontro nel corso della produzione, consentono un approccio alla progettazione ottimizzato in partenza, particolarmente significativo in un'ottica progettuale impostata sulla riduzione di materiale ed energia impiegati.

In questo senso, è infatti strategica sia l'introduzione dell'innovazione tecnologica nella forma degli ultra-performanti, che per le loro proprietà intrinseche di resistenza e durabilità rappresentano di per sé una scelta *green*, sia l'applicazione di innovazioni processuali, identificate, da un lato, nell'integrazione del sistema di prove all'interno della pratica industriale e, dall'altro, nella collaborazione sinergica con l'azienda partner che ne ha decretato la nascita.

Inoltre, dal momento che l'utilizzo dell'UHPFRC al posto del convenzionale calcestruzzo armato consente un risparmio, sul lungo periodo, di circa il 30%[69] delle emissioni di anidride carbonica, appare quantomai fondamentale garantire un corretto utilizzo del materiale in maniera tale che possa durare il più a lungo possibile.

In conclusione, la complessità che caratterizza la progettazione con ultra-performanti va dalla produzione dal materiale alla sua progettazione, dalla conoscenza delle sue *performance* a un suo impiego ottimizzato in virtù di esse. A ciò si aggiunge il particolare rilievo che ha, in generale, la progettazione con calcestruzzi nel panorama internazionale che vede, come

[68] Anche in questo caso sono stati esclusi i provini gettati nel mese di luglio.
[69] Dong, Y., "Performance assessment and design …", *op. cit.*, 2018, pag. 423.

discusso a fine del capitolo 3, da un lato il crescente fabbisogno di materiale e, dall'altro, l'urgenza di ridurne gli impatti ambientali, ancora troppo elevati.

Favorire l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni, più durevoli e performanti, meno inquinanti e più efficienti, è quindi necessario, ma richiede tanto una continua relazione con le industrie di prefabbricazione, quanto una profonda conoscenza di tecniche, processi e modalità produttive.

CARATTERIZZAZIONE ESTETICA

getto per pressione

C3

C2

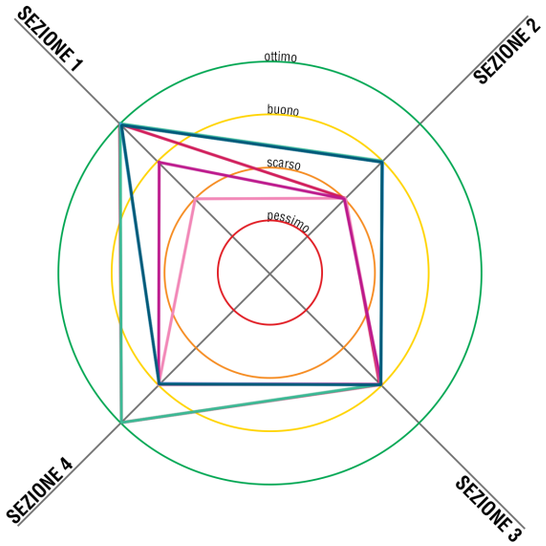
C1

getto per gravità

C3

C2

C1

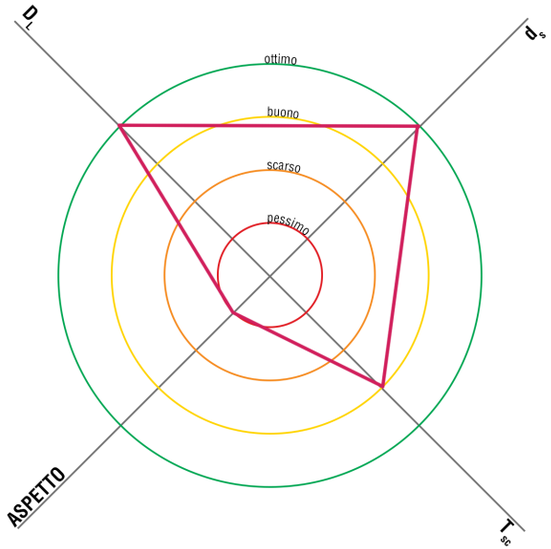


FLUIDITÀ

SEZIONE 2*3 - °C(20/25)

a/c

0,27



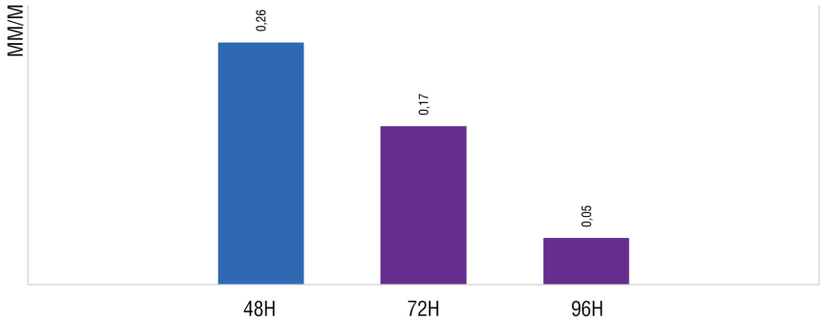
UHPERC1 - RISULTATI

SENSIBILITÀ AL RITIRO*

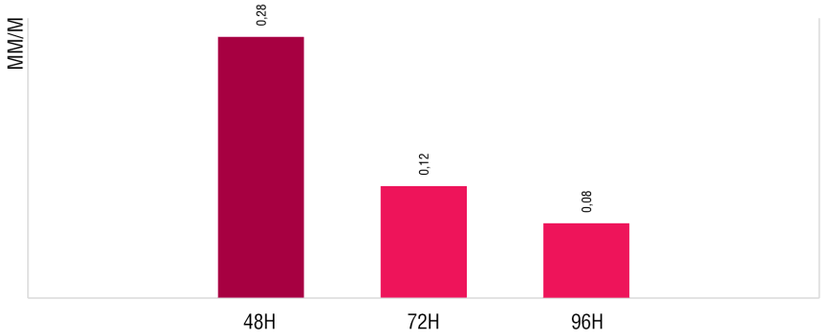
condizioni ambientali

°C(20/25)_%UR(20/30)
°C(20/25)_%UR(25/35)
°C(20/25)_%UR(40/50)
°C(20/25)_%UR(45/55)

RAPPORTO A/C_0,17



RAPPORTO A/C_0,16



*I dati riportati fanno riferimento alle variazioni dimensionali giornaliere dei campioni. Il ritiro al quarto giorno è dunque dato dalla somma dei singoli valori.

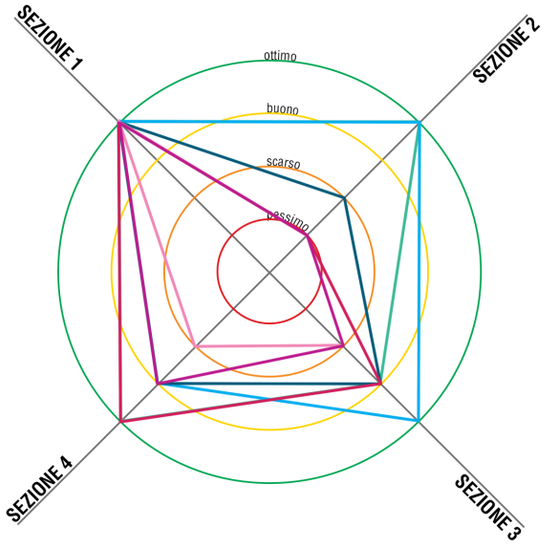
CARATTERIZZAZIONE ESTETICA

getto per pressione

C3
C2
C1

getto per gravità

C3
C2
C1

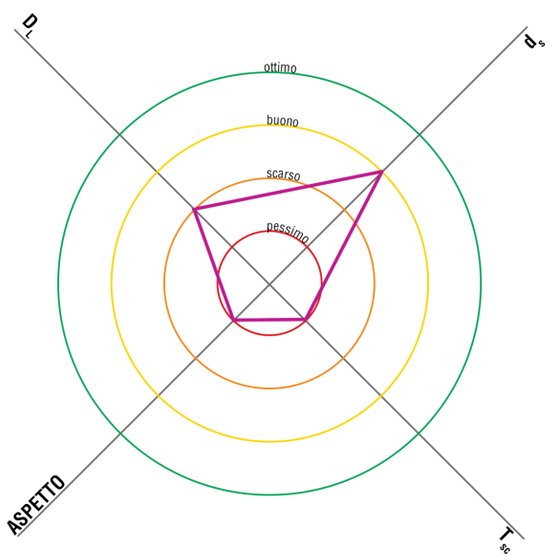


FLUIDITÀ

SEZIONE 2*3 - °C(25/30)

a/c

0,17



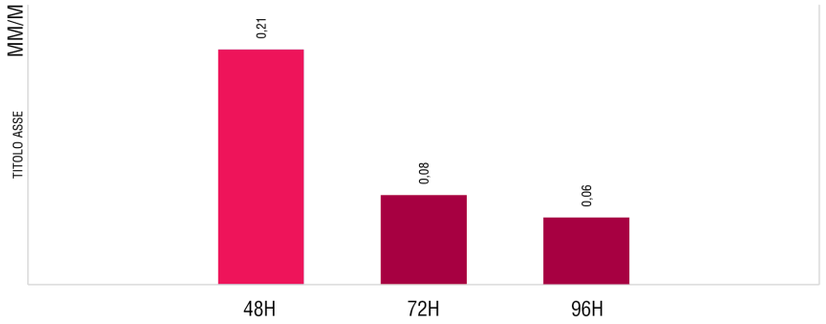
UHPFRC2 - RISULTATI

SENSIBILITÀ AL RITIRO*

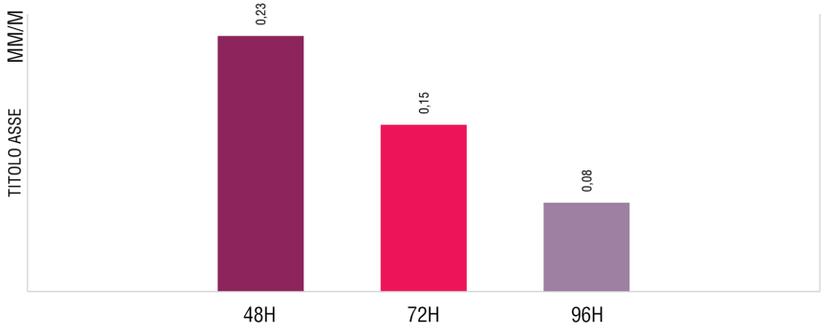
condizioni ambientali

°C(20/25)_%UR(40/50)
°C(20/25)_%UR(45/55)
°C(20/25)_%UR(50/60)
°C(25/30)_%UR(40/50)

RAPPORTO A/C_0,15



RAPPORTO A/C_0,17



*I dati riportati fanno riferimento alle variazioni dimensionali giornaliere dei campioni. Il ritiro al quarto giorno è dunque dato dalla somma dei singoli valori.

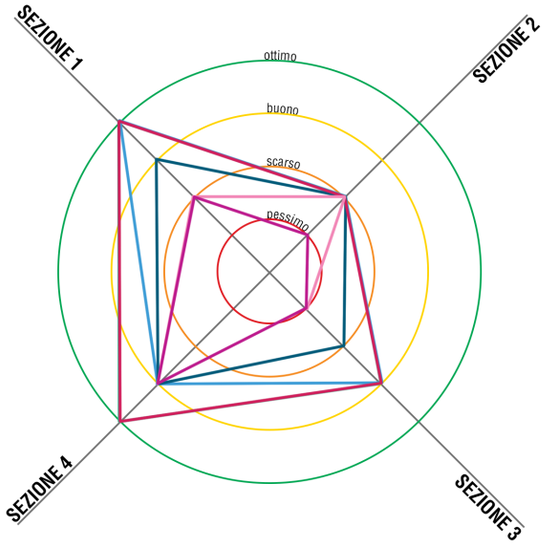
CARATTERIZZAZIONE ESTETICA

getto per pressione

C3
C2
C1

getto per gravità

C3
C2
C1



FLUIDITÀ

SEZIONE 2*3 - °C(20/25)

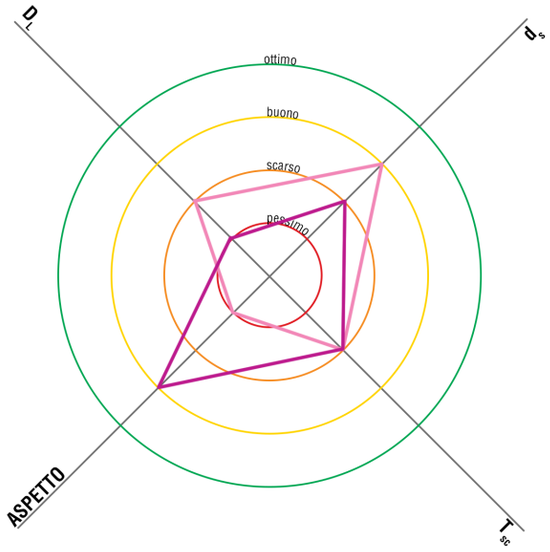
a/c

0,15

SEZIONE 2*4 - °C(20/25)

a/c

0,17



«*Designers solve problems; total designers generate questions*».

Ortega, L., *The Total Designer. Authorship in architecture in the postdigital age*, Actar Publishers, New York-Barcellona, 2017, pag. 71.

L'obiettivo del seguente capitolo è offrire, mediante alcune riflessioni e casi operativi, un contributo all'evoluzione del progetto tecnologico in modo che possa essere un effettivo ponte tra mondo della produzione e mondo della progettazione.

Il lavoro parte dall'analisi relativa alle prospettive di applicazione dell'UHPFRC per il mercato italiano delle costruzioni per poi proporre, nell'ambito dello scenario così individuato, soluzioni progettuali atte a fornirne metodi per un corretto utilizzo della tecnologia.

Sono dunque presentate due proposte, una indirizzata specificatamente all'industria di prefabbricazione per la progettazione e produzione di componenti non strutturali, mentre l'altra è finalizzata a fornire un rapido e comprensibile metodo di predimensionamento per la riqualificazione di strutture esistenti in calcestruzzo armato, mediante l'applicazione di un sottile strato di ultra-performante all'estradosso degli elementi portanti. È bene chiarire che il contributo qui offerto al settore dei calcestruzzi, si confronta con l'attuale scenario produttivo che, a dispetto dei promettenti progressi offerti dalla *digital fabrication*, è ancora a metà strada tra Terza e Quarta Rivoluzione Industriale.

Di conseguenza, il confronto avviene con la tecnica della colatura che, come anticipato nei capitoli precedenti, rimane ancora *leader* nel suo ambito grazie alle insuperate *performance* di resa estetica.

Dunque, «in uno scenario futuribile in cui il "progetto" possa realmente assumere la dimensione per esprimere e rappresentare la sintesi di decisioni multiple, concertate, consapevoli e condivise su tutti gli aspetti di natura prestazionale, economica e sociale nonché produttiva»[1], si è ben consapevoli del ruolo strategico che nuove e evolute modalità operative assumono nell'ambito di tale integrazione «dei saperi e dei voleri»[2].

[1] Del Nord, R., "Quale ricerca per quale domanda", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 1, 2011, pag. 75.
[2] *Ibidem.*



Elementi di copertura in Ductal® realizzati da Bonna Sabla.
Progetto di Marc Mimram Architecture Ingénierie, *Stazione TGV*, Montpellier, 2018. Foto di Erieta Attali.

5.1 Il progetto tecnologico con calcestruzzi ultra-performanti nell'era digitale

L'uso della modellazione digitale ha introdotto nuovi territori di esplorazione formale in architettura: processi generativi basati sullo spazio topologico, sulle superfici isomorfe, sui sistemi dinamici e sul design parametrico e algoritmico hanno determinato l'insorgere di nuovi linguaggi e nuove correnti architettoniche. Tuttavia, la trasformazione più significativa è di natura processuale: progettazione, rappresentazione, produzione e assemblaggio si dipanano tutti all'interno dello stesso processo, in una sorta di *digital continuum*[3] reso possibile dall'evoluzione delle tecnologie che consentono, paradossalmente, un maggiore controllo gestionale dell'opera, a dispetto di un notevole aumento di complessità.

È proprio quest'ultima, figlia dello stesso progresso che ci consente oggi di controllarne gli effetti nel progetto, a richiedere un potenziamento delle capacità cognitive del designer, mediante strumenti in grado prima di costruire e poi di coordinare le richieste provenienti dal quadro esigenziale-prestazionale di riferimento. Infatti, «l'impiego della mediazione digitale sottende una serie di potenzialità che, sin dalla fase meta progettuale, permettono una linea di progetto fortemente legata alle specifiche locali e alle *performance* richieste»[4].

L'incremento di complessità fa sì che la sequenza lineare formata da pensiero-rappresentazione-produzione, si trasformi in un sistema ciclico circolare, in cui le diverse fasi si influenzano reciprocamente per tutta la durata del processo progettuale che, a questo punto, non è solo la messa in sequenza di un meccanismo mentale, ma è pensiero esso stesso[5].

La convergenza tra rappresentazione e produzione determina una riduzione dello spazio in cui si svolgeva gran parte del lavoro inventivo dell'architetto, che si colloca adesso tra modellazione e produzione, con una differenza significativa: mentre con i mezzi analogici lo spazio architettonico era reso mediante una serie finita di rappresentazioni parziali – in genere le proiezioni ortogonali – relazionate in modo da consentire la figurazione di un oggetto, nella rappresentazione digitale l'oggetto tridimensionale può produrre infinite rappresentazioni di sé stesso. Ciò significa che l'architetto deve prima di tutto imparare a rapportarsi con un nuovo tipo di astrazione, che diventa ancora differente se dalla modellizzazione digitale si passa al

[3] Cfr. Kolarevic, B., "Introduction", in Kolarevic, B. (a cura di), *Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing*, Spon Press, New York-Londra, 2003, pag. 10.
[4] Chiesa, G., *Paradigmi, tecnologie ed ere digitali…*, *op. cit.*, 2015, pag. 17.
[5] Ortega, L., *The Total Designer…*, *op. cit.*, 2017, pag. 17.

design parametrico[6]. In quest'ultimo caso l'astrazione si avvale di un'unità minima binaria, nient'altro che una serie numerica, in grado di consentire, attraverso la codificazione digitale, il trasferimento di informazioni, che nelle loro infinite configurazioni sono in grado di produrre variazioni attorno a quella che può essere definita una struttura comune – un genotipo – che Gilles Deleuze ha definito *objectile*[7].

L'*objectile* viene fuori dal concetto di deleuziano di molteplicità che, tuttavia, «non definisce una combinazione del molteplice e del singolo, ma un'organizzazione appartenente al primo, che non ha bisogno di una qualsivoglia unità per formare un sistema»[8].

Ciò è, ancora un volta, in netto contrasto con il concetto di tipo – intrinsecamente statico –, in quanto una specie di oggetti non è definita dai suoi tratti essenziali, ma dal processo morfogenetico – fondamentalmente dinamico – che ne segna la nascita. Inoltre, mentre il tipo è riconoscibile in ogni membro della specie, la molteplicità si basa sugli effetti prodotti dall'accumulazione dei singoli membri nelle loro relazioni reciproche[9].

«Il pensiero tipologico, quindi, definisce la sua genesi dall'essenza trascendente che classifica la specie in base alle sue caratteristiche morfologiche. Al contrario, i popolazionisti definiscono l'identità della specie attraverso il suo processo morfogenetico. [...] Il pensiero popolazionista non solo ha sostituito quello tipologico, ma ne ha cancellato le radici»[10].

Per comprendere ancora meglio il concetto il *population thinking*, è utile guardare alle relazioni che si creano tra l'oggetto e la sua specie di appartenenza: ogni oggetto è differente da un altro ma, allo stesso tempo, tali differenze tra i singoli li definiscono in quanto specie. È infatti necessaria una massa critica di individui differenti – fenotipi – per diversificare il patrimonio genetico di una specie. A questo punto è necessario dare una definizione di genotipo e fenotipo, per comprendere a pieno le implicazioni del *population thinking* in Architettura: «il materiale genetico è un genotipo, che controlla la produzione di un organismo e di tutti i suoi attributi, il fenotipo. Il fenotipo è il risultato dell'interazione del genotipo con l'ambiente durante il suo sviluppo»[11].

È dunque il fenotipo a essere esposto alla selezione naturale, non il genotipo, che rimane «un trasmettitore immortale di istruzioni ereditarie»[12]. Il processo di differenziazione che conduce ai diversi fenotipi, non è diverso da ciò che accade all'oggetto architettonico quando i suoi vincoli interni – ad esempio quelli materici – incontrano quelli esterni, dando vita al processo morfogenetico che ne determina la forma.

Ciò significa che l'approccio computazionale va ben oltre l'automazione e l'ottimizzazione dei processi, implicando invece una trasformazione nel pensiero progettuale verso un *computational design thinking*.

Il nuovo pensiero computazionale è articolato, quindi, attorno a due pilastri fondamentali, di cui il primo comprende una nozione dinamica del design, inteso con un sistema aperto ed

[6] Ortega, L., *The Total Designer…*, *op. cit.*, 2017, pag. 24.
[7] Si veda Deleuze, G., *The Fold. Leibniz and the Baroque*, The Athlone Press, Londra, 1993.
[8] Cfr. Deleuze, G., *Difference and Repetition*, The Athlone Press, Londra, 1997, pag. 182.
[9] Trummer, P., "Associative Design...", *op. cit.*, 2011, pag. 186.
[10] *Ivi*, pag. 187. Traduzione a cura dell'autrice.
[11] Mayr, R., *What Evolution is*, Phoenix, Londra, 2002, pag. 83. Traduzione a cura dell'autrice.
[12] Trummer, P., "Associative Design...", *op. cit.*, 2011, pag. 190. Traduzione a cura dell'autrice.

evolutivo che ingloba l'*objectile* di Deleuze, mentre il secondo, derivante al primo, si esprime nella contrapposizione alla tradizionale visione positivistica dell'architetto, ben lontano del demiurgo lecorbusierano[13].

Questa doppia struttura binaria ci consente di comprendere il reale valore delle tecnologie digitali: dal momento che per sistema aperto si intende la possibilità di scambiare materia e informazioni con l'ambiente esterno, l'apertura è definita mediante una serie di protocolli organizzativi atti a comprendere e risolvere tanto le relazioni interne al sistema che quelle a esso esterne. Proprio la capacità di gestire tali relazioni dispiega le potenzialità del digitale: attraverso la definizione dei confini del sistema, multidisciplinari e complessi, gli architetti sono costretti a confrontarsi con il proprio posizionamento politico e culturale all'interno della disciplina. «*The continuous feedback between the procedural specification and the disciplinary effect is a first-rate setting for political activation. In that sense, the digital turn is a lever for cultural activation*»[14].

In sostanza, quindi, l'approccio al design computazionale si focalizza sull'esecuzione di metodi di variazione per la risoluzione della complessità, frutto delle interrelazioni e delle interdipendenze delle strutture materiali con l'ambiente dinamico.

Quindi, sebbene la computazione abbia tutte le caratteristiche per la definizione di procedure con caratteri di universalità, in realtà l'intero meccanismo funziona solo nel processamento di condizioni specifiche, non simboliche, di relazione con la materialità, la spazialità e il contesto: «mentre le procedure definiscono un vasto spazio di potenzialità, il risultato contiene una descrizione specifica di un sistema complessivo»[15]. I processi computazionali, infatti, lavorano accrescendo e specificando le informazioni che descrivono la forma attraverso metodi ricorsivi, richiamando continuamente diversi parametri.

Sulla base di questi presupposti, in questa sede si è tentato, mediante una serie di *tool* digitali, di intervenire nello spazio assottigliato tra modellazione e produzione, sviluppando una metodologia, come vedremo a breve, finalizzata a mediarne la relazione tenendo a mente, come specificato sopra, che l'aspirazione all'universalità dei processi computazionali si consuma nel metodo utilizzato, in quanto le soluzioni adoperate non possono che agire nel campo dello specifico. Sebbene sia stato qui applicato solo in parte un approccio evolutivo vero e proprio, il *population thinking* ha rappresentato la base concettuale di organizzazione del lavoro svolto.

Riprendendo, quindi, il concetto di serie digitale, fatta ovvero da elementi similari generati dallo stesso algoritmo, è possibile individuare all'interno dei pezzi unici, tipici del customizzato mercato architettonico, un genoma comune: l'oggetto diventa quindi *objectile*, individuando non solo il nucleo centrale del prodotto ma anche le sue regole, o meglio i suoi parametri, di variazione che, una volta fissati in accordo ai vincoli di produzione, ne consentono una rapida ottimizzazione.

Quindi, tenendo a mente i maggiori campi di applicazione della tecnologia nel mercato italiano delle costruzioni, ovvero elementi di arredo e componenti di facciata per la *deep riqualification* e elementi strutturali per la riqualificazione di edifici e infrastrutture, mentre nel secondo caso si è

[13] Ortega, L., *The Total Designer…*, *op. cit.*, 2017, pag. 17.
[14] *Ivi*, pag. 18.
[15] Menges, A. e Ahlquist, S., "Introduction", *op. cit.*, 2011, pag. 26. Traduzione a cura dell'autrice.

applicato un approccio relativamente più tradizionale, in quanto la rispondenza alle prescrizioni normative era prerequisito vincolante e stringente dal punto di vista operativo, nel primo è stato possibile mettere a frutto le ampie riflessioni fatte sulle prospettive offerte tanto dal modello Industria 4.0 quanto dalla progettazione computazionale. A ciò si aggiunge l'applicazione di strategie di *product family architecture* (PFA) revisitate e intersecate con le nozioni ben note di sistema edilizio.



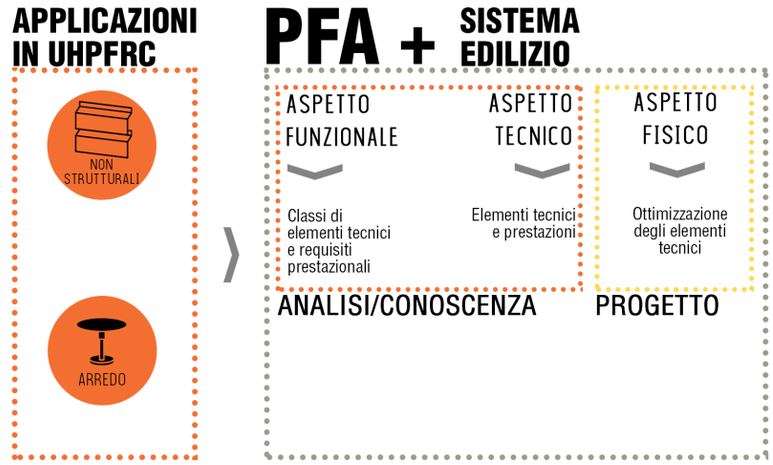
Progetto realizzato con il metodo della Sensitive Analysis, per l'ottimizzazione e la generazione *free-curved shells*.
Progetto di Toyo Ito e Mutsuro Sasaki, *Kakamigahare Crematorium*, Kawaguchi, 2018. Immagine da view.publitas.com.



Schermature solari fisse in BSI® realizzati da Eiffage.
Progetto di Daquin & Ferrière Architecture, *Ecole maternelle Eva Salmon*, Vitry-sur-Seine, 2015. Foto di Inui.

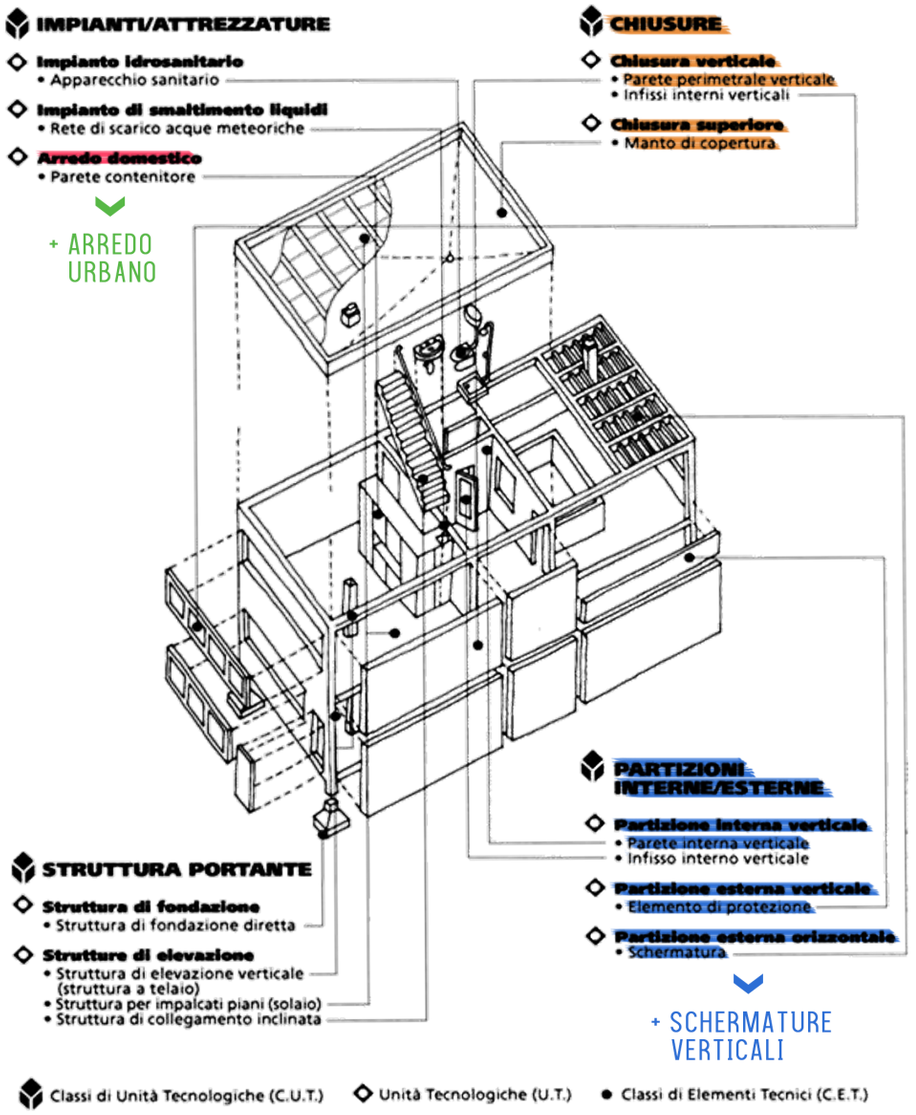
5.2 La progettazione di un sistema prefabbricato in UHPFRC: interoperabilita' tra progettisti e produttori

Nel mercato italiano delle costruzioni le prospettive di diffusione di elementi prefabbricati in UHPFRC sono nella maggior parte dei casi affidate al settore dell'arredo o alla realizzazione di applicazioni non strutturali. Immaginiamo dunque di utilizzare la *product family architecture* (PFA)[16] in questi due casi specifici. La PFA si articola attorno a tre diversi aspetti, funzionale, tecnico e fisico. Il primo aspetto racchiude l'analisi del prodotto, individuando i requisiti funzionali che lo definiscono. Il secondo, invece, rivela l'applicazione della tecnologia adoperata per la soluzione progettuale, esplicitando la relazione tra i parametri di progetto e l'apparato esigenziale, ovvero tra requisiti e prestazioni. L'aspetto fisico rappresenta la realizzazione vera e propria del prodotto ed è strettamente correlata al sistema produttivo aziendale, che pone dei vincoli di produzione per garantire che manifattura e assemblaggio non compromettano costi e quantità dei beni realizzati. Dal momento in cui ci si pone l'obiettivo di intervenire sempre al livello della progettazione, che non può prescindere da una visione sistemica dell'edificio, anziché applicare la PFA al singolo prodotto, sarà qui applicata a classi di unità tecnologiche, progressivamente decomposte nei loro singoli elementi tecnici.



[16] Per ulteriori approfondimenti si veda il paragrafo 2.3.

PFA - ASPETTO FUNZIONALE



Classificazione delle applicazioni in UHPFRC in accordo al sistema edilizio. PFA - Aspetto funzionale.
Cfr. AA. VV., *Manuale di Progettazione Edilizia. Fondamenti, strumenti, norme*, vol. 4, Hoepli, Milano, pag. 67.

APPLICAZIONI NON STRUTTURALI

CHIUSURE

_VERTICALI

_PARETE PERIMETRALE VERTICALE › REQUISITI:
resistenza meccanica, resistenza agli urti, resistenza alle intrusioni, resistenza agli agenti atmosferici, affidabilità, permeabilità all'aria, tenuta all'acqua, isolamento termo-acustico, regolarità di aspetto, durabilità, manutenibilità, attrezzabilità, integrabilità

_SUPERIORI

_MANTO DI COPERTURA › REQUISITI:
resistenza meccanica, resistenza agli urti, resistenza alle intrusioni, resistenza agli agenti atmosferici, affidabilità, permeabilità all'aria, tenuta all'acqua, isolamento termo-acustico, regolarità di aspetto, durabilità, manutenibilità, attrezzabilità, integrabilità

PARTIZIONI

_INTERNE

_PARETE INTERNA VERTICALE › REQUISITI:
resistenza meccanica, resistenza agli urti, affidabilità, assorbimento suoni interni, isolamento termo-acustico, regolarità di aspetto, benessere visivo, pulibilità, durabilità, manutenibilità, attrezzabilità, integrabilità

_ESTERNE

_ELEMENTO DI PROTEZIONE › REQUISITI:
resistenza meccanica, resistenza agli urti, resistenza alle intrusioni, resistenza agli agenti atmosferici, affidabilità, regolarità di aspetto, durabilità, manutenibilità, attrezzabilità, integrabilità

_SCHERMATURE VERT./ORIZ. › REQUISITI:
resistenza meccanica, resistenza agli urti, resistenza agli agenti atmosferici, affidabilità, regolarità di aspetto, durabilità, manutenibilità, attrezzabilità, integrabilità

ARREDO E ATTREZZATURE

INTERNE

_ARREDO DOMESTICO › REQUISITI:
resistenza meccanica, resistenza agli urti, resistenza ai liquidi freddi, al calore secco e umido, pulibilità, resistenza a graffiature, resistenza ad abrasione e usura, affidabilità, regolarità di aspetto, durabilità, manutenibilità, attrezzabilità, integrabilità

ESTERNE

_ARREDO URBANO › REQUISITI:
resistenza agli agenti atmosferici, resistenza meccanica, resistenza agli urti, resistenza ai liquidi freddi, al calore secco e umido, pulibilità, resistenza a graffiature, resistenza ad abrasione e usura, affidabilità, regolarità di aspetto, durabilità, manutenibilità, attrezzabilità, integrabilità

L'aspetto funzionale sarà quindi indirizzato a individuare, per le due applicazioni di riferimento, le principali classi di elementi tecnici, nonché i loro requisiti, interessate dalla presenza di UHPFRC.

Per ragioni di semplificazione le applicazioni non strutturali, in una prima classificazione generale (schema a pp. 318-319), sono state successivamente suddivise in due classi di unità tecnologiche, ovvero le chiusure e le partizioni. A loro volta, le chiusure si distinguono in verticali e superiori, considerando per le prime le pareti perimetrali e per le seconde il manto di copertura. Le partizioni sono ancora catalogate in partizioni verticali interne ed esterne, costituite da elementi di protezione e schermature verticali, e partizioni esterne orizzontali (schermature). Le applicazioni per elementi di arredo e attrezzature, per cui si considereranno solo i primi, si suddividono in interne ed esterne, tenendo conto, quindi, dell'arredo domestico e di quello urbano.

Una volta attribuiti a ciascuna classe di elementi tecnici e unità tecnologiche i requisiti prestazionali fondamentali (schema a pp. 318-319), l'aspetto funzionale può ritenersi definito ed è possibile procedere alla definizione dell'aspetto tecnico: ciascuna classe o unità viene ridotta in moduli, ovvero piccole unità logiche assimilabili o ai singoli elementi tecnici o a loro componenti minori, in grado di esprimere le prestazioni atte a rispondere ai requisiti precedentemente definiti (schema a pag. 321).

Si suppone, infatti, che i singoli elementi tecnici o le loro componenti siano già rispondenti ai requisiti di progetto, sebbene la metodologia qui elaborata consenta di implementare all'interno del processo progettuale caratteristiche prestazionali specifiche.

Si interverrà, dunque, solo sull'aspetto fisico, ovvero la realizzazione vera e propria della modularizzazione tecnica già effettuata precedentemente.

In pratica, ogni elemento tecnico avrà degli attributi materici, geometrici e di relazione tali da influenzarne le modalità di produzione. Di conseguenza, la definizione di tali attributi, nonché dei loro limiti di variabilità dettati dai requisiti di progetto e dai vincoli produttivi stessi, consente di individuare il "nucleo centrale" – il genoma – di ciascun elemento tecnico, necessario a inserirlo all'interno di una serie digitale costituita da elementi analoghi. Alla serie digitale saranno poi applicati algoritmi finalizzati tanto all'ottimizzazione geometrica dei singoli elementi tecnici quanto all'ottimizzazione del sistema produttivo.

L'inclusione dei diversi elementi tecnici all'intero di un ridotto numero di serie digitali si configura quindi, come una sorta di catalogazione, basata sull'astrazione di caratteristiche che, con le dovute differenziazioni dovute al caso specifico, sono sempre presenti all'interno degli elementi in esame. Man mano che si aggiungo elementi all'interno delle serie digitali, si andrà quindi a creare un *database* di soluzioni tecniche riutilizzabili, con possibilità anche di reimpiego di attrezzature di produzione, ad esempio stampi o parti di essi.

A questo punto il problema si sposta sulla definizione delle serie digitali, facendo in modo che queste riescano a coprire il più vasto numero di casi possibile. Chiaramente per ciascuna tipologia di elemento tecnico, ad esempio "pannelli per facciate" vi saranno più serie digitali e, quindi, più algoritmi di ottimizzazione, in quanto le innumerevoli tipologie di pannelli in UHPFRC non sono realisticamente ottimizzabili in maniera universale.

APPLICAZIONI NON STRUTTURALI		ELEMENTI TECNICI
› CHIUSURE		
_VERTICALI		
_PARETE PERIMETRALE VERTICALE	› REQUISITI	ORDITURA DI SUPPORTO FISSAGGI PANNELLO IN UHPFRC ISOLANTE TERMO-ACUSTICO ELEMENTI DI TENUTA
_SUPERIORI		
_MANTO DI COPERTURA	› REQUISITI	ORDITURA DI SUPPORTO FISSAGGI PANNELLO IN UHPFRC ISOLANTE TERMICO ELEMENTI DI TENUTA
› PARTIZIONI		
_INTERNE		
_PARETE INTERNA VERTICALE	› REQUISITI	ORDITURA DI SUPPORTO FISSAGGI PANNELLO IN UHPFRC ISOLANTE ACUSTICO
_ESTERNE		
_ELEMENTO DI PROTEZIONE	› REQUISITI	ORDITURA DI SUPPORTO FISSAGGI PANNELLO IN UHPFRC
_SCHERMATURE VERT./ORIZ.	› REQUISITI	ORDITURA DI SUPPORTO FISSAGGI PANNELLO IN UHPFRC
ARREDO E ATTREZZATURE		
› INTERNE		
_ARREDO DOMESTICO	› REQUISITI	INTELAIATURA METALLICA FISSAGGI ELEMENTI IN UHPFRC
› ESTERNE		
_ARREDO URBANO	› REQUISITI	INTELAIATURA METALLICA FISSAGGI ELEMENTI IN UHPFRC

Ciò è dovuto al fatto che, mentre le strategie di PFA convenzionali vengono applicate a monte del processo produttivo, in quanto è proprio una loro maggiore o minore pervasività nel sistema di produzione a determinare la variabilità dell'offerta e, quindi, a definire le serie digitali, qui quest'ultime non possono che essere stabilite *a posteriori*, in quanto non è l'azienda a definire il design del prodotto che andrà a realizzare, soprattutto nel caso dei progetti "speciali" d'architettura.

A questo punto, si faccia riferimento al *design workflow* presentato in forma schematica a pag. 322. Si vedrà che sia l'analisi degli attributi materici che dei vincoli di produzione, si considerano afferenti a una fase di strutturazione della conoscenza antecedente alla progettazione vera e propria, sebbene sia chiaro che non è possibile, né corretto, effettuare alcuna separazione netta.

In particolare, l'analisi degli attributi materici, relativi quindi alle proprietà specifiche del materiale, è frutto del programma di prove sperimentali delineate nel capitolo precedente che, essendo costruito su un'astrazione di situazioni reali, non può che far riferimento alle caratteristiche di massima del materiale. Tuttavia, sia le prove di fluidità che quelle di caratterizzazione estetica sono costruite sulla base di una relazione diretta con la produzione, in quanto i loro risultati possono richiedere una modifica dello stampo o dell'impasto.

Le prove di ritiro, invece, si rapportano con la produzione solo indirettamente, in quanto, salvo alcuni accorgimenti per la cassaforma, ad esempio l'inserimento di ammortizzamenti, si può intervenire o chimicamente, mediante additivi anti-ritiro, o agendo, per quanto possibile, sulle condizioni ambientali.

Tuttavia, ciò non toglie che l'intero protocolla possa e debba costituire un utile strumento di verifica per attestare l'efficacia delle caratteristiche reologiche dell'impasto utilizzato, la compatibilità dello spessore dell'elemento con lo stampo, la capacità del materiale di riprodurre le finiture desiderate e il suo comportamento in particolari condizioni ambientali (il ruolo del protocollo di prove nel processo progettuale sarò meglio specificato nell'ambito del caso studio analizzato).

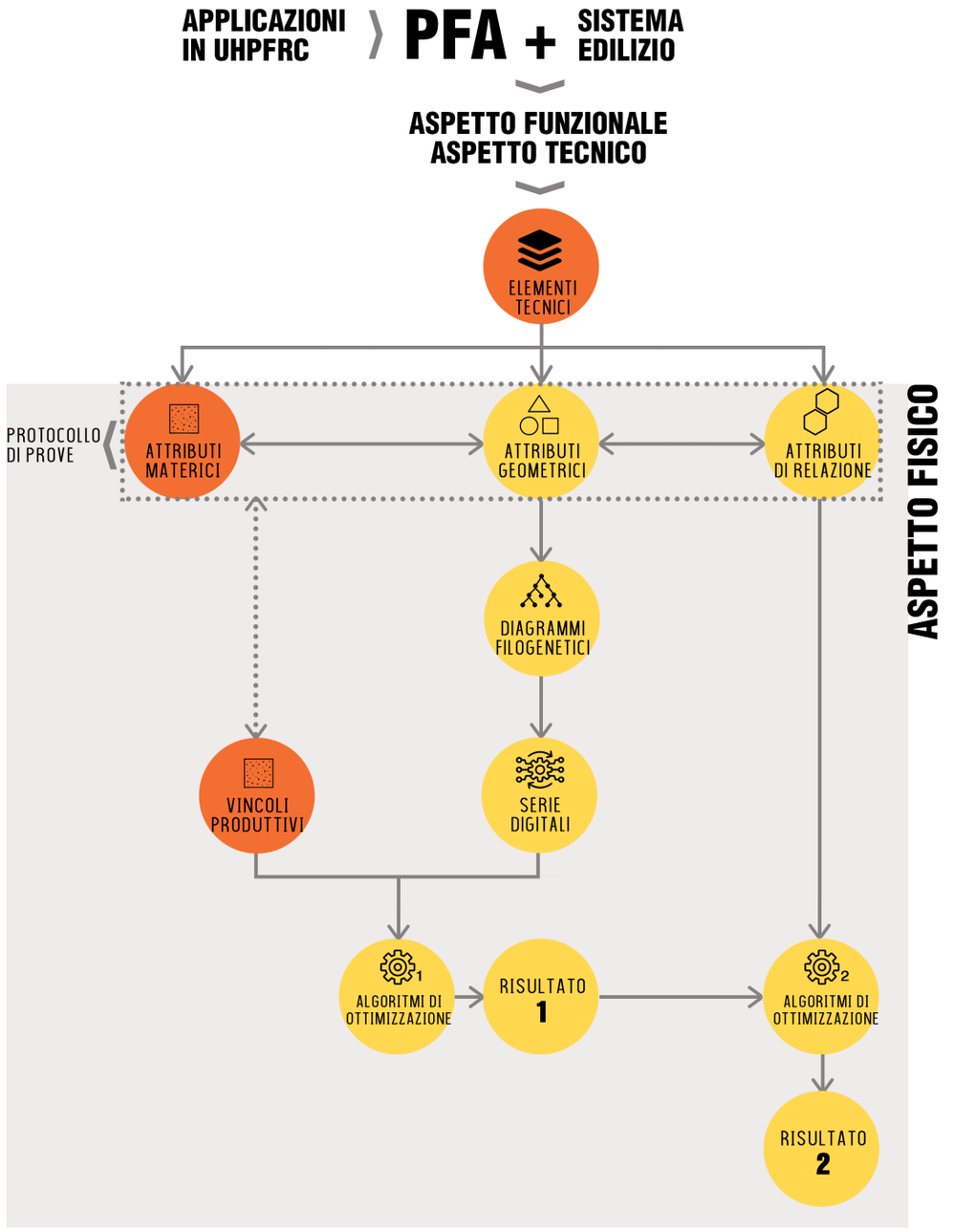
La definizione dei vincoli produttivi parte, invece, dall'analisi del sistema di produzione, idealmente suddivisibile in cinque momenti differenti: la realizzazione dello stampo, il getto, lo scassero, la finitura e la stagionatura. Va specificato che mentre la realizzazione dello stampo è antecedente alla produzione vera e propria e, di conseguenza, può essere considerata fuori "linea", tutte le altre operazioni sono cicliche e si ripetono per tutto il tempo necessario al completamento della commessa[17].

Una volta preparato lo stampo, si passa alle operazioni di getto. Tra le maggiori difficoltà gestionali, vi sono sicuramente i tempi lunghi del materiale che, una volta gettato, ha bisogno delle canoniche 24 ore di presa (riducibili a 16/18 in qualche caso), che implicano, a loro volta, spazi di stoccaggio all'interno della produzione, in attesa di effettuare poi lo scassero.

Questo, oltre all'estrazione del pezzo, comprende anche la preparazione dello stampo per la lavorazione successiva, che può comprendere sia solo una pulitura e ingrassatura, che una

[17] Proprio la commessa, assieme alla richiesta da parte del cliente di tempi di produzione più o meno lunghi, determina il numero di stampi da realizzare nel caso di produzioni modulari. Ben diverso è invece il caso dei progetti architettonici "speciali", in cui il numero di stampi è funzione solo ed esclusivamente della complessità del progetto.

DESIGN WORKFLOW



analisi/conoscenza

progetto/ottimizzazione

modifica finalizzata a compensare differenze non significative tra i vari elementi (posizionamento degli inserti, pezzi con sezioni analoghe ma dimensioni differenti, pezzi uguali ma con diverse finiture, etc. etc.). Tali operazioni, seppur meno impattanti dal punto di vista economico rispetto alla realizzazione di un ulteriore cassero, sono comunque dispendiose oltre a essere, di fatto, operazioni uniche e quindi prive del vantaggio della ciclicità.

La finitura può avvenire sia dopo che durante la stagionatura, a seconda del tipo di lavorazione richiesta. Alcuni protettivi, ad esempio, non possono essere applicati prima delle tre settimane dal getto, mentre alcune delle operazioni meccaniche – forature in post-produzione – richiedono che il materiale sviluppi una certa resistenza strutturale per essere effettuate.

Ciascuna delle fasi richiede durante progettazione alcuni accorgimenti fondamentali che determinano, la maggior parte delle volte, una modifica dell'elemento prodotto (shema a pag. 324).

Ad esempio, l'utilizzo di casseforme in acciaio rende impossibile realizzare spigoli vivi e richiede l'introduzione di limiti dimensionali per garantire la movimentazione dei pezzi, la riduzione al minimo delle giunzioni per evitare che vengano riprodotte sull'elemento, l'aggiunta di ispessimenti localizzati in presenza degli inserti per il fissaggio. Allo stesso modo, anche il getto implica alcune variazioni fondamentali dell'elemento, soprattutto di carattere formale: nonostante si possa intervenire sulla fluidità del materiale infatti, nonché verificarne l'efficacia con il protocollo di prove appositamente sviluppato, è necessario impedire che vi siano ostacoli al flusso di calcestruzzo che, oltre a determinare la formazione antiestetici difetti superficiali, causano anche una cattiva disposizione delle fibre, riducendo la resistenza meccanica del componente. A ciò si aggiunge la distanza minima dai bordi degli inserti per far sì che le fibre riescano a posizionarti anche negli interstizi più piccoli.

Anche lo scassero ha la sua parte di conseguenze: sono necessari uno spessore minimo per far sì che l'elemento non si danneggi, inserti per la movimentazione e dimensioni compatibili con le operazioni di *demoulding*.

A queste considerazioni di carattere generale, se ne aggiungono altre specifiche determinate dalla morfologia dell'elemento: ad esempio, la curvatura degli elementi non può superare le dimensioni massime per consentire la realizzazione dello stampo. La morfologia, inoltre, impatta anche sulla finitura, in quanto forme troppo articolate potrebbero ostacolarne le lavorazioni e, quindi, l'omogeneità del risultato.

L'individuazione dei vincoli produttivi è presentata nello schema a pag. 324.

A questo punto, tenendo sempre a mente il *design workflow* a pag. 323, è possibile passare alla fase di progettazione/ottimizzazione vera e propria che, necessita, come anticipato, di una classificazione degli elementi tecnici, effettuata sulla base dei loro attributi geometrici e con l'ausilio dei diagrammi filogenetici.

I diagrammi o alberi filogenetici sono generalmente usati in biologia per mostrare i rapporti evolutivi tra le diverse specie[18]: ciascun ramo del diagramma è basato sulle differenze tra le caratteristiche fisiche o genetiche dei membri della specie analizzata. Ad esempio, tutti gli esseri viventi presenti sulla Terra sono in realtà parte dello stesso albero filogenetico, detto *Tree of Life*, mostrando, quindi, una comune ascendenza. Gli alberi filogenetici sono oggi adoperati

[18]Fabbri, R. *et alii*, "UHPFRC Folded Pavillion", in *Journal of Civil Engeneering and Architecture*, vol. 14, 2020, pp. 10-19.

PROCESSO PRODUTTIVO



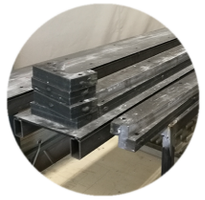
1
REALIZZAZIONE STAMPO

a - assenza di spigoli vivi
b - limiti dimensionali
c - ispessimenti localizzati per l'introduzione degli inserti
d - vincoli dettati dalla morfologia del'elemento



2
GETTO

a - angoli di scorrimento
b - distanza minima degli inserti dai bordi del cassero
c - vincoli dettati dalla morfologia del'elemento



3
SCASSERATURA

a - spessore minimo
b - limiti dimensionali
c - inserti per la movimentazione
d - vincoli dettati dalla morfologia del'elemento



4
STAGIONATURA

a - vincoli dettati dalla morfologia del'elemento



5
FINITURA

a - vincoli dettati dalla morfologia del'elemento

IMPATTI SUL DESIGN DELL'ELEMENTO/VINCOLI PRODUTTIVI

nel campo della logica e della tassonomia, nonché dell'architettura: lo studio FOA, fondato da Farshid Moussavi e Alejandro Zaero Polo[19], li usa frequentemente per la classificazione dei propri progetti sulla base del principio di *form-defining* che ne ha determinato l'aspetto. Oltre a essere un validissimo strumento di analisi del lavoro svolto, gli alberi filogenetici si sono rivelati anche efficaci strumenti di generazione formale, in quanto consentono una sistematizzazione del pensiero progettuale utile a una sua successiva esplicitazione per l'impiego dei *tool* digitali.

In questa sede, si è deciso di adoperare gli alberi filogenetici proprio per sfruttarne il potenziale di razionalizzazione: per ciascun elemento tecnico in UHPFRC è stato quindi redatto un diagramma costruito sulla base dei suoi attributi geometrici di cui, infine, l'ultima ramificazione definisce la serie digitale ricercata e il relativo algoritmo di riferimento (schemi da pag. 328 a pag. 331). Ciascun ramo contiene caratteristiche via via più specifiche dell'elemento che va a definire: si prenda, ad esempio, il caso di un pannello in UHPFRC per facciate. L'albero filogenetico è costitutito da tre ramificazioni, rappresentanti, rispettivamente, l'andamento della facciata dell'edificio da realizzare, che può essere lineare, curvilineo o svilupparsi in più direzioni (tridimensionale), per poi scendere di scala per descrivere la superficie del pannello, che può essere planare o non planare per un andamento lineare, e a curvatura costante o non costante nel caso di una facciata curvilinea o tridimensionale. Infine, l'ultima ramificazione – discontinuità superficiale – indica la presenza o meno di aperture sul pannello, a loro volta distinte in regolari o irregolari. Lo schema a pp. 328-329 mostra come l'albero così definito sia in realtà applicabile *in toto* anche per i pannelli di copertura e in parte per i rivestimenti delle pareti interne verticali e per gli elementi di protezione. Includendo infine anche gli elementi schermanti, sia verticali che orizzontali, il cui albero differisce solo nell'ultima parte, è stato possibile in definitiva ridurre le serie digitali a 5.

È diverso, invece, l'albero degli arredi, suddivisi in elementi a faccia singola, doppia e multipla.

Le serie così definite vanno a questo punto intersecate con i vincoli produttivi per costruire un primo algoritmo di ottimizzazione, che terrà conto sia delle caratteristiche geometriche dell'elemento oggetto di studio che delle limitazioni imposte dalla produzione. Dal momento in cui la tecnica produttiva di riferimento è la colatura, l'ottimizzazione dell'elemento tecnico è interamente finalizzata alla semplificazione dello stampo – ovvero della geometria dell'elemento – e alla riduzione del numero di casseforme da impiegare, ovvero del numero di elementi diversi presenti nel progetto.

Terminata, quindi, la prima ottimizzazione, l'elemento così ottenuto viene analizzato sulla base degli attributi di relazione, inerenti, fondamentalmente, al posizionamento dei fissaggi che sono, di solito, di due tipi, ovvero gli inserti necessari alla movimentazione e quelli necessari al fissaggio alla struttura di supporto. Fatto ciò, si può procedere alla seconda ottimizzazione.

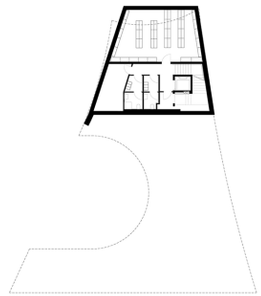
Per meglio comprendere il *design workflow* così strutturato, si prenda a titolo esemplificativo il Treehugger – un punto informativo per turisti – dello studio Modus Architects[20], realizzato a Bressanone nel 2019. L'edificio si caratterizza per una sinuosa facciata curva in calcestruzzo armato, gettata in sezioni successive a formare un guscio alto circa nove metri.

[19] Si veda Zaera, A. e Moussavi, F., *Phylogenesis: FOA's Ark*, Barcellona, Actar, 2003.
[20] Si veda Modus Architects, *Treehugger*, https://www.modusarchitects.com/en/work/projects/offices-commercial/treehugger.

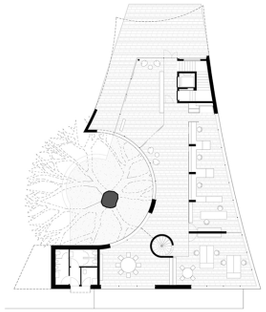
TREEHUGGER MODUS ARCHITECTS

BRESSANONE (BOLZANO)
2019

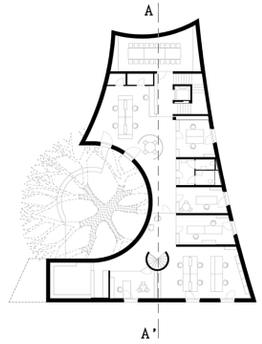
Pianta piano interrato



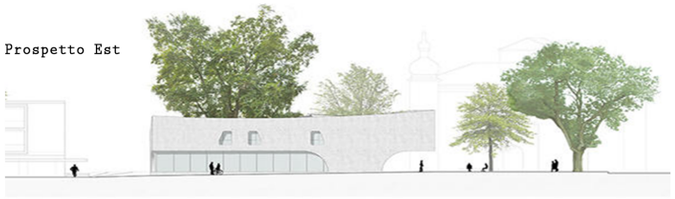
Pianta piano terra



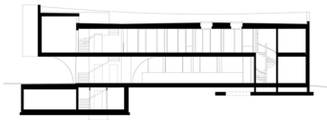
Pianta primo piano



Prospetto Est



Sezione AA'



Prospetto Nord

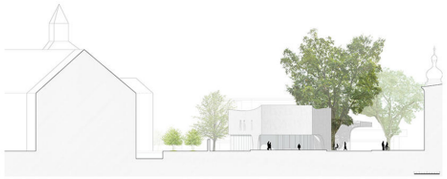


Foto di Oskar da Riz.

APPLICAZIONI NON STRUTTURALI

ELEMENTI TECNICI

ATTRIBUTI GEOMETRICI/ DIAGRAMMA FILOGENETICO

CHIUSURE

_VERTICALI

_PARETE PERIMETRALE VERTICALE

_SUPERIORI

_MANTO DI COPERTURA

PARTIZIONI

_INTERNE

_PARETE INTERNA VERTICALE

_ESTERNE

_ELEMENTO DI PROTEZIONE

_SCHERMATURE VERT./ORIZ.

REQUISITI

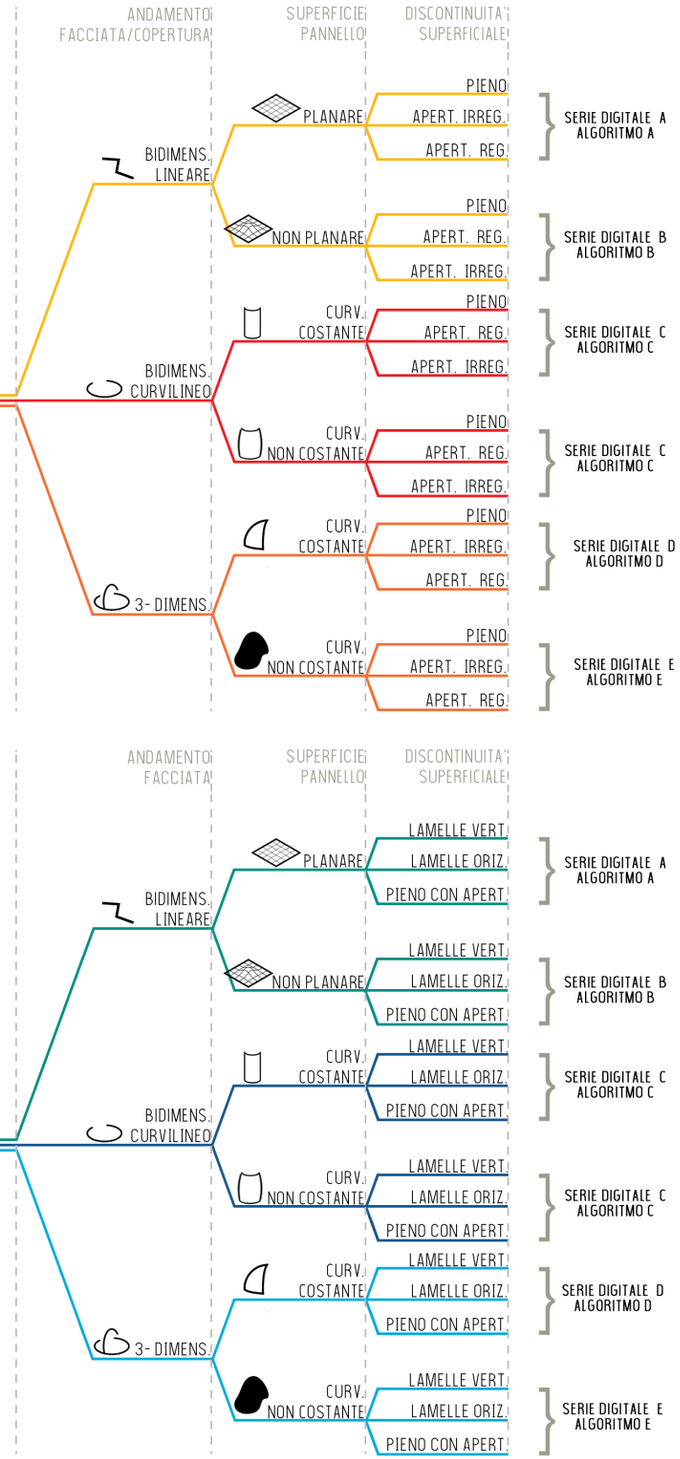
ORDITURA DI SUPPORTO
FISSAGGI
PANNELLO IN UHPFRC
ISOLANTE TERMO-ACUSTICO
ELEMENTI DI TENUTA

ORDITURA DI SUPPORTO
FISSAGGI
PANNELLO IN UHPFRC
ISOLANTE TERMICO
ELEMENTI DI TENUTA

ORDITURA DI SUPPORTO
FISSAGGI
PANNELLO IN UHPFRC
ISOLANTE ACUSTICO

ORDITURA DI SUPPORTO
FISSAGGI
PANNELLO IN UHPFRC

ORDITURA DI SUPPORTO
FISSAGGI
PANNELLO IN UHPFRC



PFA_FUNZIONALE | TECNICO | FISICO

ARREDO
E ATTREZZATURE

ELEMENTI
TECNICI

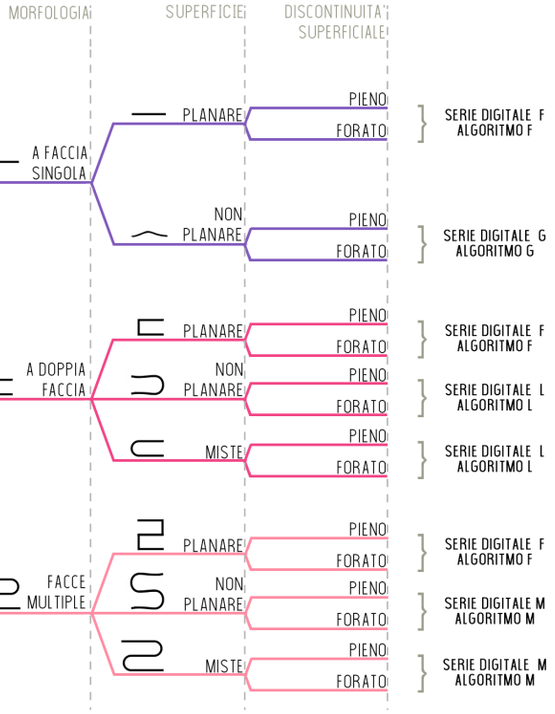
ATTRIBUTI GEOMETRICI/
DIAGRAMMA FILOGENETICO

INTERNE
_ARREDO DOMESTICO

ESTERNE
_ARREDO URBANO

REQUISITI

INTELAIATURA METALLICA
FISSAGGI
ELEMENTI IN UHPFRC



PFA_FUNZIONALE | TECNICO | FISICO

Dall'analisi degli attributi geometrici dell'elemento è stato possibile collocarlo in quella che è stata definita la serie digitale C (schema pp. 328-329). Si è immaginato dunque, per fini di ricerca, di poter realizzare l'edificio con pannelli in UHPFRC pieni, procedendo all'ottimizzazione adoperando la piattaforma di *visual programming language* (VPL) Grasshopper, legata all'ambiente di modellizzazione della McNeel Rhinoceros. L'algoritmo sviluppato parte dalla definizione del primo parametro, ovvero la larghezza del pannello, fissata a 1,20 metri.

Ciascun pannello è stato testato per la linearità, rivelando che dei 79 elementi necessari a discretizzare le pareti curve nessuno di questi era propriamente assimilabile a una retta, seppure molti di essi presentavano raggi di curvatura elevati. È bene chiarire che nei sistemi di produzione per colatura a raggi di curvatura differenti corrispondono diversi stampi, la cui realizzazione incide significativamente sul costo dell'elemento.

Sebbene ciascuno dei pannelli avesse curvatura variabile, si è deciso di operare una prima semplificazione, considerandone il solo valore misurato nel punto medio dell'"arco" esaminato.

In questa prima fase sono stati adoperati due parametri di ottimizzazione, di cui il primo afferente a vincoli di carattere produttivo e l'altro di tipo geometrico. Si è deciso di partire da quest'ultimo stabilendo che ciascun pannello curvo la cui freccia[21] fosse inferiore a un centimetro, valore comunemente adoperato nella pratica aziendale, sarebbe stato approssimato a una retta.

I 34 pannelli curvilinei rimasti presentavano ancora ben 26 curvature differenti, corrispondenti, quindi, ad altrettanti stampi.

A questo punto è stato possibile applicare il secondo parametro di ottimizzazione, questa volta di carattere produttivo: tutti i pannelli con raggio di curvatura superiore a 12 metri, sono stati trasformati in rette. Per raggi maggiori infatti, la produzione dello stampo risulta molto più complessa. Il numero di pannelli curvi è stato dunque ridotto a 21 pannelli curvi, tutti con curvature differenti. È stato quindi applicato un ulteriore parametro di ottimizzazione, confrontando la curvatura dei singoli pannelli e raggruppandoli in maniera tale che i lori raggi di curvatura non differissero di più di 80 centimetri. Dopo aver individuato cinque gruppi di pannelli, questi sono stati ridisegnati sostituendo a ciascun gruppo un solo pannello con raggio di curvatura corrispondente al raggio medio degli elementi appartenenti al gruppo di riferimento.

Ne deriva che, alla fine del processo, i pannelli curvi sono realizzabili adoperando solo cinque stampi, con un significativo risparmio in termini di costi e tempi di produzione[22].

I pannelli così ottenuti subiscono un'ulteriore processo di ottimizzazione in seguito all'analisi degli attributi di relazione, per il posizionamento degli inserti di fissaggio e di movimentazione. In questo caso, spessore del pannello, posizionamento e numero degli inserti sono finalizzati a minimizzare la deformazione. L'algoritmo è stato scritto utilizzando il risolutore evolutivo Galapagos[23], sviluppato da David Rutten con McNeel&Associati, e il *plug-in* di Grasshopper Karamba[24], per l'analisi strutturale mediante il metodo degli elementi finiti.

[21] La freccia è la distanza ortogonale che intercorre dal punto medio dell'arco alla corda a esso sottesa.

[22] Si consideri che uno stampo per pannelli di questo tipo costa in media 2500 euro.

[23] Si veda Rutten, D., *Evolutionary Principles applied to Problem Solving using Galapagos*, 2010, https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles.

[24] Il *plug-in* Karamba, sviluppato da Clemens Presinger in collaborazione con Bollinger-Grohmann-Schneider ZT GmbH, è

Karamba consente l'utilizzo di alcuni materiali già presettati al suo interno che, tuttavia, non includono l'UHPFRC. É stato quindi necessario implementarne le proprietà (modulo elastico, moduli di taglio, peso specifico, coefficiente di dilatazione termica, resistenza a compressione), inserendo la possibilità di scegliere tra tre tipologie di UHPFRC con fibre organiche.

Indicato lo spessore del pannello come primo parametro di variazione, sono stati poi settati quelli relativi al posizionamento e al numero (da un minimo di tre a un massimo di 8) degli inserti, ovvero i vincoli del nostro sistema strutturale.

Rispetto al primo parametro, era necessario che ciascun inserto si trovasse in corrispondenza di un nodo della *mesh*[25] rappresentante il pannello, che è stata quindi ridisegnata con la possibilità di ampliarne o ridurne la maglia e facendo sì che i vincoli "saltino" da un nodo all'altro. Tuttavia, come anticipato in precedenza, gli inserti devono essere posizionati a una distanza dai bordi tale da garantire un corretto posizionamento delle fibre in ogni parte del pannello. Dunque, si è un inserito un ulteriore parametro che esclude tutti i nodi della *mesh* posti a una distanza dai bordi inferiore a quella minima.

A questo punto andavano inseriti i soli carichi che, per una mera questione di semplificazione, sono stati limitati al solo peso proprio, considerando che tale calcolo è sufficiente a determinare il posizionamento degli inserti per la movimentazione del pannello. In ogni caso, l'algoritmo è perfettamente valido anche per il calcolo strutturale completo.

Costruito quindi il modello, si è deciso di ottimizzare adoperando Galapagos la sola posizione degli inserti di movimentazione, stabilendone il numero a 4 e optando per la minimizzazione dello spostamento verticale del pannello. Quindi in questo caso le variabili di ottimizzazione, che nella computazione evolutiva prendono il nome di geni, sono quattro. Ciascuna combinazione dei quattro geni determina un particolare *fitness*: la somma dei *fitness* costruisce la popolazione delle soluzioni, ordinate in base alla migliore corrispondenza con il *task* richiesto.

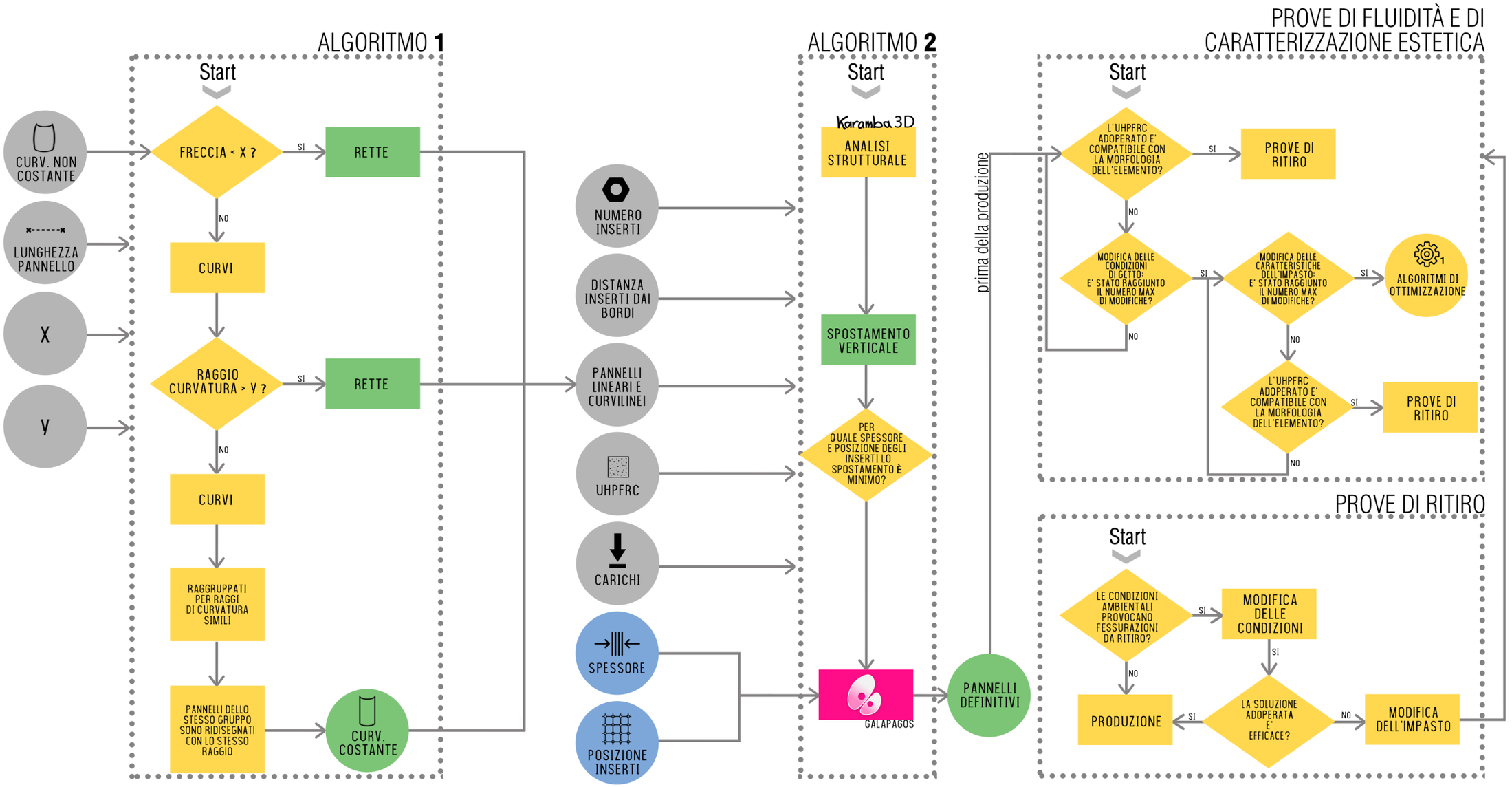
Mentre il *fitness*, ovvero l'obiettivo dell'ottimizzazione, può essere solo uno, i geni non hanno limiti, se non quelli dettati dalla capacità di calcolo del computer che si utilizza. L'algoritmo qui definito consentirebbe di lavorare contemporaneamente su spessore, numero e posizione degli inserti, tuttavia si è optato per mostrare i risultati relativi solo all'ultimo caso. A pp. 334-335 è sinteticamente riportato il funzionamento di entrambi gli algoritmi, indicando anche l'apporto delle protocollo di prove nel processo progettuale. Infatti, come già detto, oltre a configurarsi come un metodo pratico per la conoscenza del materiale, i test elaborati sono anche un ottimo strumento per la verifica dei risultati raggiunti. Infatti, molto spesso nella prassi aziendale, la realizzazione di elementi molto complessi richiede una lunga "sperimentazione" empirica, in cui si adatta l'impasto alla morfologia dell'elemento, si testano le condizioni di getto, si procede alla campionatura delle finiture senza, tuttavia, avere garanzia del risultato raggiunto, proprio perché tale fase, che potremmo definire di prototipazione, avviene senza che via sia né una sistematizzazione delle informazioni raccolte né una razionalizzazione delle procedure, fondamentale per una corretta interpretazione del dato ottenuto.

utilizzato per l'analisi di strutture spaziali, telai o *shell*. Per ulteriori informazioni si vedano Karamba 3D, www.karamba3d.com; Tedeschi, A., *AAD_Algorithms-Aided Design*, Le Penseur, Brienza, 2014.

[25] «Una *mesh* poligonale, in computer grafica, è un reticolo che definisce un oggetto nello spazio, composto da vertici, spigoli e facce. Il termine mesh in inglese significa letteralmente "maglia", "rete"». Wikipedia, *Mesh poligonale*, https://it.wikipedia.org/wiki/Mesh_poligonale.

ALGORITMI DI OTTIMIZZAZIONE

VERIFICA DEI RISULTATI



input

processo

output

variabili

Il protocollo di prove elaborato si pone proprio l'obiettivo di colmare tali lacune, da un lato mediante la realizzazione vera e propria dei test e, dall'altro, creando un *database* coerente di informazioni: infatti, la complessità di fattori che influenza il comportamento dell'UHPFRC, a partire dal ritiro, rende impossibile una conoscenza del fenomeno costruita al di fuori di una rigorosa procedura di raccolta e messa a sistema delle informazioni. Confrontando i dati così ottenuti con quelli ambientali, sarà facile comprendere quando le condizioni al contorno rendono ostica la produzione, che può essere ricalibrata in funzione di esse.

Ad esempio, la prova di fluidità, fornisce, impiegando al massimo circa 5 chilogrammi di materiale, una reale anteprima del suo comportamento in fase di getto, rivelandosi un utile strumento da anteporre alla realizzazione dell'elemento vero e proprio, consentendo anche di saggiare rapidamente la validità del rapporto acqua-cemento ma anche della tipologia di UHPFRC adoperato, in quanto si è dimostrato che anche la composizione, la granulometria e il contenuto di fibre ne influenzano la capacità di scorrimento[26].

In conclusione, l'approccio progettuale e di verifica dei risultati qui applicato, si mostra particolarmente vantaggioso per le piccole e medie aziende che, rientranti nella definizione di *almost-thin industries*, lavorano principalmente su commesse customizzate e, di conseguenza, su richieste molto differenziate e variabili. L'elevato e variegato quantitativo di dati che ne deriva rende, spesso e volentieri, i vecchi sistemi di gestione dell'informazione inadatti a una loro corretta interpretazione e rielaborazione.

Ne deriva che i sistemi analitici di gestione dell'informazione si rivelano impraticabili rendendo, di conseguenza, particolarmente efficaci processi come il *knowledge discovery in database* (KDD) e il *data mining* (DM). Il DM è una fase del KDD, che implica il coinvolgimento di algoritmi specifici per estrarre *pattern* di comportamento dai dati analizzati.

L'intero processo di KDD applicato alla produzione presuppone prima di tutto, una comprensione generale del sistema produttivo nonché la definizione degli obiettivi di riferimento che, a loro volta, determinano i set di *data* da estrarre per condurre prima una sorta di pre-processamento, che individua le informazioni manchevoli o inconsistenti integrandole o eliminandole, per poi arrivare al *data mining* vero e proprio, ovvero la ricerca dei *pattern* ricorrenti[27]. Ciò non differisce da quanto è fatto in questa sede che, a partire dall'analisi svolta nei capitoli precedenti sulle maggiori applicazioni in UHPFRC, ovvero il pre-processamento di cui sopra, ha consentito di poter poi estrarre, attraverso la PFA e l'utilizzo degli alberi filogenetici, dei *pattern* ripetuti che sono la chiave fondamentale per avviare processi di ottimizzazione di un progetto indirizzato alla produzione industriale. Se si considera poi, che tali processi potrebbero essere applicati in futuro su sistemi diretti *design-to-fabrication*, l'utilizzo di algoritmi già testati nonché la costruzione di *database* riutilizzabili, andrebbe a ridurre non solo l'errore umano, ma significativamente i costi di produzione: dal momento in cui, ad esempio, l'*additive manufacturing* non fa alcuna differenza rispetto alla complessità della forma, ne deriva che le maggiori spese saranno imputabili alla fase di progettazione, che diventerà quindi il fulcro di tutti i processi di efficientamento dei sistemi produttivi.

[26] Si veda il capitolo 4.

[27] Cfr. Choudhary, A. K., Harding, J. A. e Tiwari, M.K., "Data mining in manufacturing: a review based on the kind of knowledge", in *J. Intell. Manuf.*, vol. 20, 2009, pp. 501-521.

Tuttavia, tutto ciò non ha ripercussioni solo sulla gestione del processo produttivo nella sua totalità, in quanto recupera e reimpiega informazioni, materiali e procedure, ma determina anche un trasformazione del pensiero progettuale. Oltre a dover mettere in campo un pensiero esplicito, che obbliga a interrogarsi sulle modalità di generazione della forma, nonché di una sua produzione rapportata al sistema produttivo di riferimento, tale approccio si basa anche una continua relazione con il materiale che interviene da subito nello sviluppo del percorso progettuale. Ancora, la struttura ricorsiva che mette continuamente in relazione aspetti produttivi, progettuali e concernenti la conoscenza del materiale è in grado di adattarsi alle trasformazioni delle condizioni al contorno, che possono riguardare tanto l'introduzione di un prodotto che di un processo innovativo.

In particolare, il *focus* sulle fasi iniziali del processo è dettato anche dalla volontà di abbandonare le vecchie politiche basate su un approccio *end-of-the-pipe*, sfruttando *in primis* la sinergia tra i vari attori coinvolti.

In conclusione, che venga applicato *a posteriori* in una recuperata fase intermedia tra progettazione e produzione o che sia contemporanea alla prima, guidando e indirizzando il progetto in virtù della sua costruzione, risulta oggi più che mai fondamentale cercare di votarsi a una sistematizzazione del processo progettuale che, tuttavia non significhi una riduzione della spinta alla personalizzazione, ma una sua razionalizzazione in virtù delle attuali tecnologie di produzione, delle *performance* del materiale, della ricerca di una soluzione ottimizzata.

È infatti nostro dovere di progettisti adoperare gli strumenti che ci mette a disposizione la Rivoluzione Digitale non solo per indagare nuovi domini formali, ma anche per garantire un utilizzo efficace dei materiali e dei processi produttivi, garantendo un ridotto utilizzo di materia ed energia.



Cantiere per la produzione di UHPFRC da gettare in opera. Immagine scattata nei pressi di Albany (USA). Foto dell'autrice.

5.3 RIQUALIFICARE LE STRUTTURE PORTANTI CON UHPFRC

Nel 2007 il settore delle costruzioni era diviso in quattro comparti con un peso più o meno omogeneo: del totale degli investimenti, il 24,2% era destinato alle costruzioni non residenziali pubbliche, il 28,0% a quelle private, il 29,7% alla nuova edificazione residenziale e il 19,9% alla manutenzione straordinaria[28]. Nel giro di 12 anni la situazione si è radicalmente trasformata, con la manutenzione straordinaria che guadagna il primo posto con il 36,5% degli investimenti.

Sebbene le previsioni per il 2020 prevedano una crescita di investimenti nelle nuove costruzioni residenziali del 2,5%, il *trend* degli ultimi anni, complice probabilmente anche la crisi economica, la scarsa crescita demografica e lo spopolamento delle periferie[29], segna una decisiva crescita delle riqualificazioni. Si consideri inoltre, che mentre dal 2010 al 2019 i prezzi delle nuove abitazioni sono cresciute del 3%, il costo dell'usato ha avuto un crollo del 22%[30].

Ciò significa che il mercato delle riqualificazioni è indubbiamente il più redditizio, soprattutto se si considerano i fondi stanziati anche per le riqualificazioni energetiche e strutturali di edifici e infrastrutture, sebbene quest'ultime, soprattutto le autostradali, siano caratterizzate da un grave ritardo sul programma degli investimenti: si pensi che nel 2019 è stato speso solo il 39% dei fondi previsti[31]. Altrettanto preoccupante è lo stato di avanzamento del programma di ricostruzione delle zone terremotate del centro Italia, per cui sono stati spesi solo 49 milioni di euro, sebbene ne siano previsti per i prossimi anni ben 2,16 miliardi[32].

Nonostante ciò, è chiaramente quello della riqualificazione il settore cui fare riferimento e, se si considera che la maggior parte del patrimonio edile e infrastrutturale italiano è notoriamente in calcestruzzo armato, appare ancora più evidente come quest'ultimo il sistema costruttivo da considerare se si vuole intervenire sull'esistente.

A tal proposito, il contributo dell'UHPFRC si è già dimostrato fondamentale negli Stati Uniti e in Svizzera[33], dove da diversi anni viene utilizzato sia per la sostituzione dei manti stradali che per il rinforzo degli elementi strutturali. Negli ultimi anni, infatti, la ricerca nel campo

[28] Monosilio, F. (ANCE), *Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni*, presentazione tenutasi a Roma il 15 gennaio 2020.
[29] *Ibidem*.
[30] *Ibidem*.
[31] ANCE, *La crescita che non si sente*, scheda stampa, 15 gennaio 2020.
[32] *Ibidem*.
[33] Si veda il paragrafo 3.2.

degli ultra-performanti ha esplorato le opportunità derivanti dalle applicazioni *cast-in-site* che si sono rivelate efficaci per la forte compatibilità con il calcestruzzo armato sia in termini di comportamento strutturale – i moduli elastici non differiscono di molto – che di adesione tra i due materiali.

A partire da tali considerazioni, è stato sviluppato[34] un *tool* di predimensionamento strutturale in grado di valutare l'aumento della capacità portante – sia allo Stato Limite di Esercizio (SLE) che allo Stato Limite Ultimo (SLU) – di una lastra o una trave rinforzata con un sottile strato di UHPFRC gettato in opera. L'obiettivo è dimostrare la validità degli ultra-performanti in questo tipo di applicazioni fornendo, al contempo, uno strumento per favorire la penetrazione della tecnologia innovativa nel settore delle riqualificazioni. Infatti, l'assenza di una normativa italiana[35] per il calcolo delle strutture miste in calcestruzzo armato-UHPFRC, potrebbe scoraggiarne l'utilizzo, sebbene, come vedremo, i vantaggi dal punto di vista economico e ambientale sono notevoli. La capacità portante è calcolata rispetto al momento flettente positivo, più significativo nel caso di riqualificazioni per il settore edile, cui è specificatamente indirizzato il *tool*. Tuttavia, viene calcolato anche il guadagno prestazionale in termini di resistenza al momento flettente negativo (tipico dei supporti), sui cui tra l'altro è improntata gran parte della letteratura scientifica relativa alle applicazioni infrastrutturali[36].

L'impostazione generale del *tool* è tale da garantire la massima flessibilità progettuale, con la possibilità di scegliere tra diverse tipologie di calcestruzzo, acciaio e UHPFRC, di settare i parametri geometrici della sezione, di definire le condizioni di vincolo e di stabilire il contenuto percentuale dell'armatura della sezione in calcestruzzo armato pre-esistente.

È dunque possibile selezionare classi di calcestruzzo comprese tra la C12/15 e la C55/67, utilizzando per descrivere il comportamento allo SLU il diagramma parabola-rettangolo e per quello allo SLE il diagramma elastico lineare. In entrambi i casi, si è considerato il materiale non reagente a trazione. Nel calcolo allo SLE della sezione esistente in calcestruzzo armato (ERC), è stato utilizzato il modulo di Young istantaneo (E_{cm}), escludendo dunque dalla valutazione un eventuale scorrimento viscoso. Tuttavia, dal momento che il rinforzo mediante la sovrapposizione di un *layer* in UHPFRC avverrà per ipotesi dopo un lungo periodo di servizio della struttura esistente, il *creep* andrà inevitabilmente considerato nella nuova sezione mista (U-RC). Per tale motivo, nella sezione U-RC è stato considerato per il calcestruzzo il modulo di elasticità effettivo ($E_{c,eff}= E_{cm}/(1+f_{\infty,t})$), con $f_{\infty,t}$ pari al coefficiente di *creep*.

[34] Il lavoro svolto è stato elaborato in collaborazione con LafargeHolcim e Atelier Masse (Parigi) e presentato al Secondo Simposio Internazionale sull'UHPC tenutosi ad Albany, nel giugno del 2019. Si veda Fabbri, R., Principe, J., Derimay, J. e Bernardi, S., "Key Parameters for Building Reinforcement with an UHPFRC Overlay", in *Proceedings of the Second International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2IIS-UHPC)*, 2-5 giugno 2019, Albany, New York.

[35] In realtà manca completamente in Italia un riferimento normativo per il calcolo di strutture in UHPFRC. A tal proposito si veda il capitolo 4.

[36] Si veda in particolare Brühwiler, E., e Denarié, E., "Rehabilitation of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete", in Fehling, E., Schmidt, M., e Stürwald, S. (a cura di), *Proceedings of The Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel University Press, Kassel, 2008, pp. 895–902. Il calcolo del momento negativo è stato implementato inizialmente per verificarne la validità in rapporto a risultati sperimentali presenti in letteratura, molto più abbondanti rispetto a quelli sul momento positivo. La verifica è stata fatta sulla base del lavoro di Noshiravani e Brühwiler (Noshiravani, T. e Brühwiler, E., "Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear", in *ACI Structural Journal*, vol. 110, 2013, pp. 251-262).

Inoltre, dal momento in cui si fa riferimento a uno strumento finalizzato solo al predimensionamento delle strutture, la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo può essere definita non superiore a $0{,}45*f_{ck}$[37], fissando il coefficiente di *creep* a 2, valore comunemente utilizzato nella pratica progettuale. Ne deriva che $E_{c,eff}$ risulta pari a $E_{c,eff}=E_{cm}/3$[38].

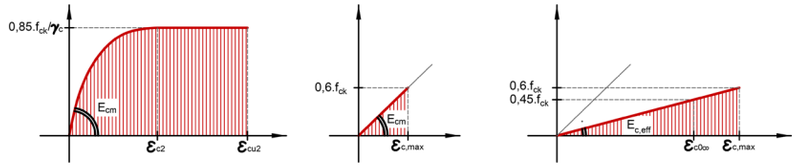


Fig. 5.3.1 Leggi di comportamento del calcestruzzo: da sinistra a destra, diagramma parabola-rettangolo (ERC/U-RC,SLU), diagramma elastico lineare (ERC, SLE) e diaframma elastico lineare allo SLE nel caso della sezione mista (U-RC, SLE).

L'acciaio può essere dei tipi B500A, B500B, B450B e B450C, utilizzando come legge di comportamento allo SLU il diagramma elastico perfettamente plastico, con limite di elasticità pari a f_{yd}, limitato a trazione in corrispondenza della deformazione ε_{su} (limite di allungamento a rottura usato per il calcolo).

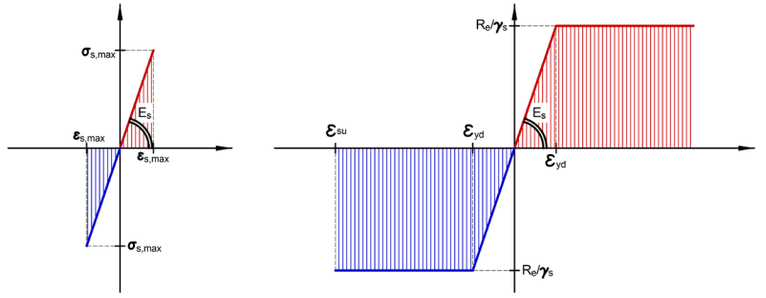


Fig. 5.3.2 Leggi di comportamento dell'acciaio: da sinistra a destra, diagramma elastico lineare (ERC/U-RC,SLE) e diagramma elastico perfettamente plastico (ERC/U-RC, SLU).

L'UHPFRC può essere di quattro tipi, a seconda della percentuale e della tipologia di fibre metalliche presenti nel mix. È bene sottolineare che il modulo di elasticità dell'UHPFRC non è mai superiore ai 56 GPa, valore non significativamente superiore a quello del calcestruzzo. Ciò è particolarmente vantaggioso per le sezioni composite U-RC, in quanto implica coerenza di comportamento in caso di deformazioni termiche. In ogni caso, si è deciso di utilizzare l'UHPFRC solo a compressione, dato che il *tool* è indirizzato al calcolo del momento flettente positivo. Invece, nel caso in cui si voglia calcolare il momento negativo è ovviamente necessario valutarne anche il comportamento a trazione.

[37] Massimo valore dato dall'Eurocodice per i carichi permanenti. Cfr. UNI, *UNI EN 1992-1-1:2015 Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici.*

[38] Tutte le formule adoperate fanno riferimento UNI, *UNI EN 1992-1-1:2015...*, *op. cit.*

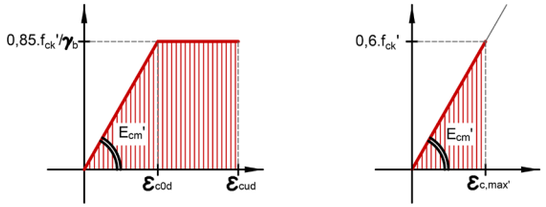


Fig. 5.3.3 Leggi di comportamento dell'UHPFRC: da sinistra a destra, diagramma allo SLU (ERC/U-RC) e diagramma elastico lineare (ERC/U-RC, SLE).

Una volta stabilite le leggi di comportamento dei materiali, si è passati alla definizione delle sezioni trasversali, optando per travi rettangolari o a "T" che, in sede di calcolo, sono state suddivise in 100 strati orizzontali per ognuno dei quali sono state individuate le forze risultanti degli sforzi a compressione e trazione, sulla base delle quali è stato calcolato il momento flettente rispetto all'asse neutro.

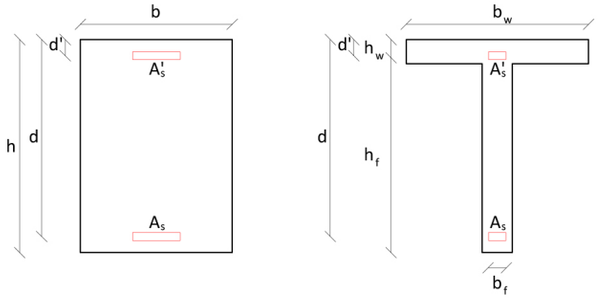


Fig. 5.3.4 Rappresentazione schematica della sezione rettangolare e della sezione a "I". Ciascuno dei valori indicati in figura è un parametro modificabile.

Fatto ciò, sono stati fissati i seguenti assunti di partenza: si considerano valide le ipotesi di Navier-Bernoulli per cui, durante la deformazione della trave, le sezioni rimangono piane e perpendicolare alla direzione delle fibre longitudinali deformate, *creep* escluso; si considera che vi sia una perfetta aderenza tra i diversi materiali coinvolti; i supporti non saranno verificati a taglio; non sono state considerate le tensioni dovute al ritiro nell'UHPFRC, in quanto, inducendo sollecitazioni di trazione, potrebbero produrre un effetto positivo nell'aumento di resistenza al momento flettente. Di seguito è riportata la procedura per il calcolo allo SLU[39] .

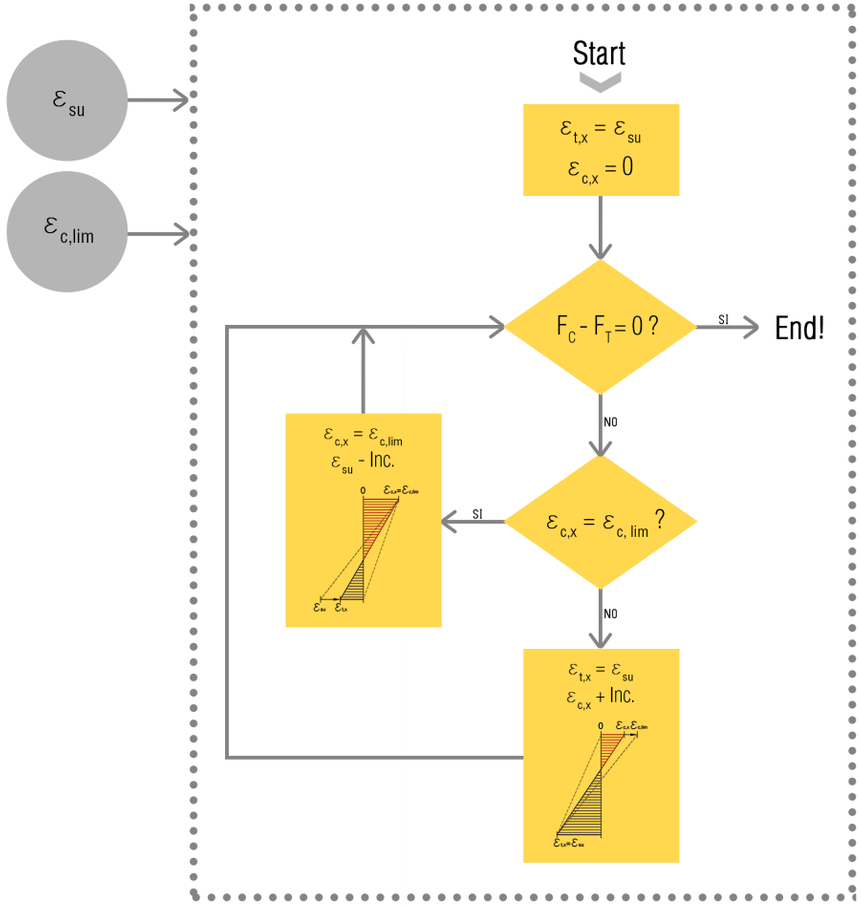
L'analisi strutturale allo SLU inizia a partire dalla definizione della deformazione a compressione nella sezione U-RC adoperando il calcolo iterativo: inizialmente la deformazione è fissata a zero, ma aumenta gradualmente fino ad arrivare al limite fissato di deformazione ($\varepsilon_{c,lim}$), con l'obiettivo di portare la sezione in equilibrio. Se la deformazione è pari al limite massimo $\varepsilon_{c,lim}$ e l'equilibrio non è ancora stato ancora raggiunto, la deformazione a trazione, inizialmente fissata a ε_{su}, ovvero la deformazione di rottura dell'acciaio, inizia a diminuire utilizzando sempre lo stesso "passo incrementale" (Inc.).

Il processo continua fino a quando la sezione non risulta in equilibrio (si veda il diagramma di flusso nella pagina a fianco).

Per poter stabilire correttamente i limiti di deformazione, occore tenere in conto i vari step che portano alla realizzazione della sezione composita U-RC.

[39] Allo SLE la procedura è analoga, cambiano solo i limiti di deformazione.

CALCULATION FLOW CHART



input

processo

Infatti, la sezione di partenza ERC, se sottoposta a un carico istantaneo quasi-permanente, subisce una deformazione pari a $0,45*f_{ck}/E_{cm}$ mentre, sotto un carico quasi-permanente a lungo termine, la deformazione è data $0,45*f_{ck}/E_{c,eff}$, come mostrato nella figura sottostante.

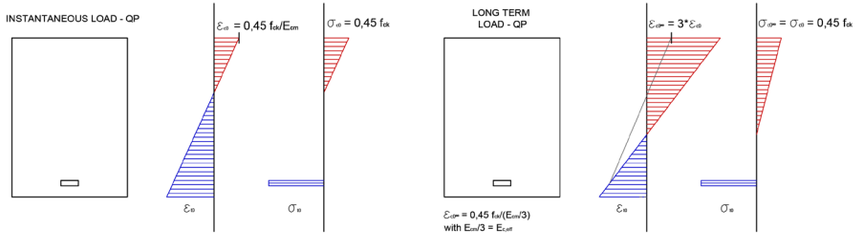


Fig. 5.3.5 Valori di deformazione della sezione esistente in calcestruzzo armato (ERC) sotto carichi quasi-permanenti istantanei e a lungo termine.

Immediatamente dopo aver gettato l'UHPFRC, questo avrà deformazione nulla, a differenza della sezione in calcestruzzo che avrà sviluppato già una certa deformazione viscosa ($\varepsilon_{c0\infty}$) (fig. 5.3.6, schema a sinistra). Tuttavia, dopo aver applicato il carico, la massima possibile deformazione di compressione dell'intera sezione non potrà essere maggiore di $\varepsilon_{c0\infty} + \varepsilon_{cud}$, con quest'ultima pari al valore massimo della deformazione dell'UHPFRC. Considerando, adesso $\varepsilon_{c0\infty} + \varepsilon_{cud}$ e un generico valore di deformazione a trazione, la deformazione complessiva così ottenuta rappresenta un comportamento "virtuale" della sezione U-RC, ovvero il comportamento che la sezione avrebbe avuto se fosse stata realizzata pressoché nello stesso momento[40], facendo sì che il *creep* risulti applicato anche all'UHPFRC che, tuttavia, non ha potuto ancora sviluppare deformazioni di tale tipo.

Di conseguenza, onde evitare di sovrastimare il comportamento dell'UHPFRC in termini di risposta al carico, in ciascun punto del *layer* aggiunto (eventuali rinforzi inclusi), la tensione è calcolata sottraendo alla deformazione ottenuta quella viscosa $\varepsilon_{c0\infty}$ (fig. 5.3.6, schema a destra).

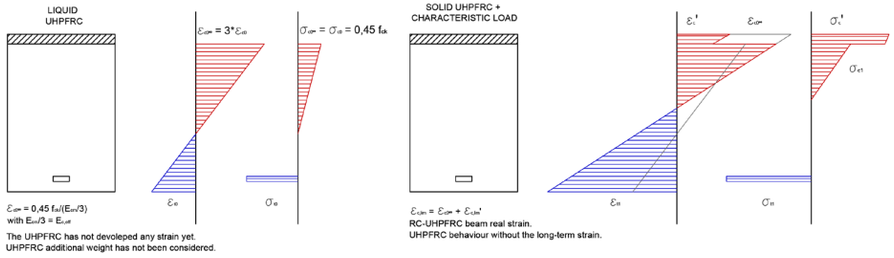


Fig. 5.3.6 Valori di deformazione della sezione composita (U-RC) subito dopo il getto e sotto l'effetto di carichi caratteristici.

Sulla base di tali considerazioni, fondamentali affinché il lavoro svolto risultasse coerente sia con l'ipotesi di perfetta aderenza che con i risultati sperimentali, la legge di comportamento virtuale dell'UHPFRC risulta traslata lungo l'asse delle deformazioni proprio di $\varepsilon_{c0\infty}$ (fig. 5.3.7).

[40] A questo punto si sarebbe dovuta considerare anche la deformazione dovuta al ritiro che, come anticipato, non è stata considerata in quanto favorevole.

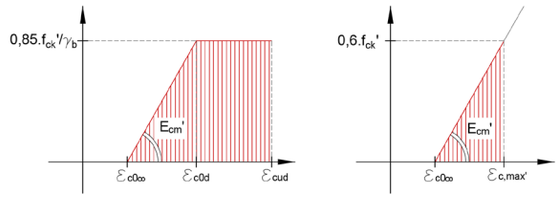


Fig. 5.3.7 Traslazione della legge di comportamento dell'UHPFRC.

Una volta settato il *solver*, sono stati effettuati più di 1200 test per stabilirne l'efficacia, per comprendere le relazioni tra i vari parametri considerati e, soprattutto, per comprenderne l'impatto sul guadagno in termini di resistenza al momento flettente. Le principali variabili testate sono il tipo di UHPFRC (ovvero quattro formulazioni di Ductal® – Lafarge Holcim – con fibre metalliche), lo spessore dello strato aggiunto – 25, 30, 35 e 40 mm – e la percentuale di armatura presente (da 0,5 % al 5,00 % dell'area totale). I dati ottenuti[41] mostrano che due delle tipologie di Ductal® adoperate (G2 FM 200 STT e G2 FM AF STT) presentano esattamente gli stessi risultati, avendo modulo di Young, resistenza caratteristica e media a compressione e valore medio di resistenza post-fessurazione identici.

Inoltre, il guadagno di resistenza per il G2 FM 200 STT, il G2 FM AF STT e il G2 FM 325 STT è lo stesso per basse percentuali di armatura, in quanto, in questo caso, l'UHPFRC non viene utilizzato al massimo della sua capacità (fig. 5.3.8). Si deduce, quindi, che per basse percentuali di rinforzo, il contenuto di fibre, l'unico parametro a differenziare l'FM 200, l'FM AF e l'FM 325, non influenza l'aumento di resistenza al momento flettente.

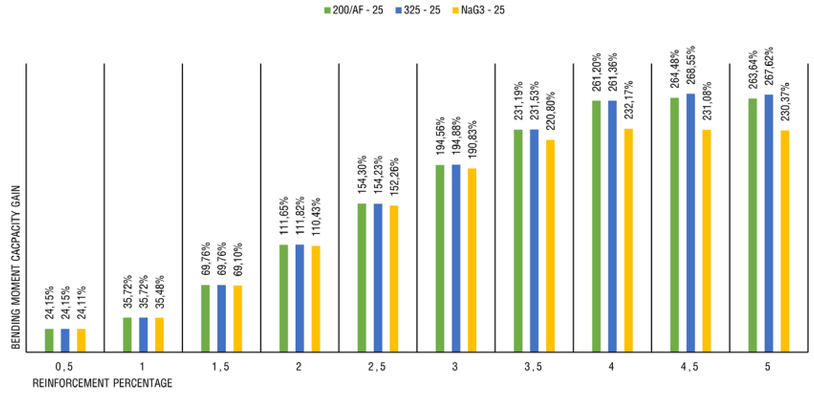


Fig. 5.3.8 Guadagno di resistenza al momento flettente di diverse tipologie di UHPFRC rispetto al contenuto percentuale di armatura. Lo spessore di UHPFRC è pari a 25 mm.

[41] I dati ottenuti, seppur relativi a una lastra lunga un metro e alta 150 mm e con armatura posizionata a 110 mm dal lembo superiore della sezione, sono perfettamente generalizzabili.

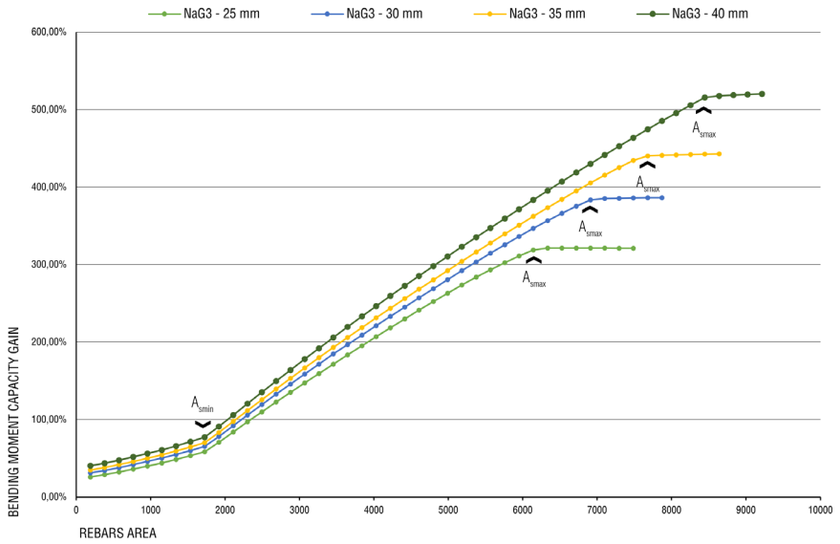


Fig. 5.3.9 Aumento della capacità di resistenza al momento flettente allo SLU rispetto all'area del rinforzo per ciascuno spessore considerato. L'UHPFRC considerato è il Nag3.

Dall'analisi dei risultati, è emerso che il parametro che maggiormente influenza l'aumento di resistenza al momento flettente è la percentuale di rinforzo presente nella sezione. La relazione tra l'aumento di capacità e il contenuto di armatura è pressoché lineare e può essere approssimata a una spezzata, suddivisa in tre settori principali da due punti significativi, denominati A_{smin} e A_{smax}. Il limite inferiore rappresenta l'ultimo valore di armatura per cui il calcestruzzo ha un comportamento lineare, dimostrando che per un basso contenuto di rinforzo (inferiore all'1,5% dell'area della sezione), sia il calcestruzzo che l'UHPFRC non hanno raggiunto la massima resistenza a compressione, facendo sì che i momenti di ERC e U-RC siano piuttosto simili rendendo, di conseguenza, il guadagno minimo. Ne deriva che se il rinforzo preesistente è minimo, è sufficiente utilizzare un ridotto spessore di UHPFRC per ottenere buoni risultati. La seguente formula fornisce il valore massimo dell'area di armatura per cui il calcestruzzo ha ancora un comportamento lineare:

$$A_{smin} = \frac{0{,}8.\alpha.d.b.f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$\text{with } \alpha = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{yd}+\varepsilon_{cu2}}$$

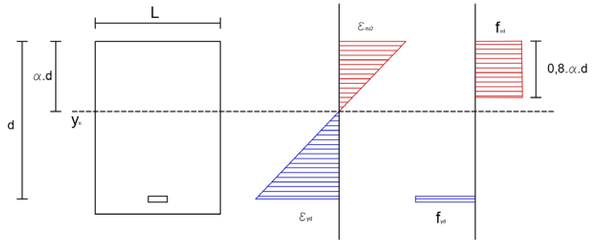


Fig. 5.3.10 Deformazioni e tensioni della sezione ERC per il valore A_{smin}.

Nella parte superiore del grafico, vi è un "*plateau*" dove l'aumento di resistenza al momento flettente rimane praticamente costante, anche incrementando l'area dell'armatura inferiore:

maggiore sarà lo spessore, maggiore è il punto di inizio del *plateau*. Ciò accade perché man mano che si aumenta la percentuale di rinforzo, per bilanciare le tensioni di trazione, l'UHPFRC tende alla sua massima capacità di resistenza a compressione e, una volta raggiunta, l'aumento di capacità non può che rimanere costante. Inoltre, l'aumento dell'armatura fa sì che l'acciaio risulti sottoutilizzato: non a caso, il punto di inizio del *plateau*, ovvero $A_{s,max}$ rappresenta l'ultimo valore di armatura per cui l'acciaio lavora utilizzando la sua massima resistenza a trazione. Prima di indicare come calcolare $A_{s,max}$, occorre definire l'altezza plastica H'_{pl} dell'UHPFRC, ovvero lo spessore plasticizzato del materiale, in quanto può accade che, per elevati spessori, una parte di UHPFRC abbia ancora comportamento lineare:

In conclusione, per utilizzare al massimo dell'efficienza l'UHPFRC per la riqualificazione di strutture esistenti in calcestruzzo armato, è fondamentale conoscere la quantità di rinforzo

$$H'_{Pl} = (e + \alpha.d).\left(1 - \frac{\varepsilon_{c0\infty}+\varepsilon_{c0d}}{\varepsilon_{c0\infty}+\varepsilon_{cud}}\right) \qquad \text{con} \qquad \alpha = \left(1+\frac{e}{d}\right)\frac{\varepsilon_{c0\infty}+\varepsilon_{cud}}{\varepsilon_{yd}+\varepsilon_{c0\infty}+\varepsilon_{cud}} - \frac{e}{d}$$

Se H'_{pl} è maggiore o uguale allo spessore dell'UHPFRC si avrà che:

$$A_{smax} = \frac{b}{f_{yd}} \times (e.f'_{cd} + 0{,}8.\alpha.d.f_{cd}) \quad [5]$$

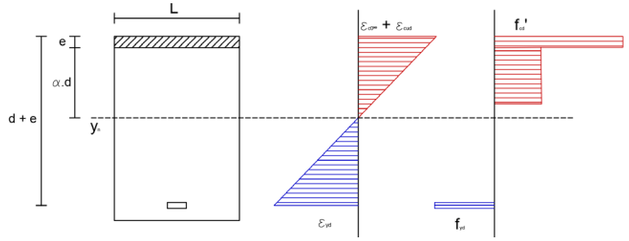


Fig. 5.3.11 Deformazioni e tensioni della sezione U-RC per il valore A_{smax}, con $H'_{pl} \geq e$.

Se H'_{pl} è minore o uguale allo spessore dell'UHPFRC si avrà che:

$$A_{smax} = \frac{b}{f_{yd}} \times \left(\left(H'_{Pl} + \frac{\varepsilon_{c1}+\varepsilon_{c0d}}{2.\varepsilon_{c0d}}.(e - H'_{Pl})\right).f'_{cd} + 0{,}8.\alpha.d.f_{cd}\right) \qquad \text{con} \qquad \varepsilon_{c1} = \frac{(\varepsilon_{c0} + \varepsilon_{cud}).\alpha.d}{e+\alpha.d} - \varepsilon_{c0\infty}$$

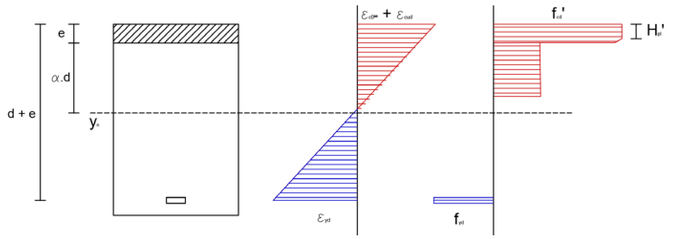


Fig. 5.3.12 Deformazioni e tensioni della sezione U-RC per il valore A_{smax}, con $H'_{pl} < e$.

preesistente, in quanto l'aumento di capacità di carico dipende sostanzialmente da quest'ultimo. Se $A_s<A_{smin}$, si può adoperare uno spessore minimo di UHPFRC (25 mm), in quanto è stato dimostrato che per valori ridotti di rinforzo il materiale non è comunque in grado di sfruttare a pieno le sue *performance* strutturali, rendendone così vano un utilizzo eccessivo. Al contrario, se $A_s>A_{smax}$, è consigliabile utilizzare spessori elevati di UHPFRC (40 mm). È comunque possibile calcolarne lo spessore ottimale interpolando il guadagno tra A_s e A_{smin}.

Altrettanto importanti sono le considerazioni riguardo al tipo di UHPFRC da utilizzare, non essendoci differenze significative (si veda fig. 5.3.8) tra UHPFRC contenente il 3,25% e il 2,00% di fibre metalliche. Dal momento che quest'ultime sono estremamente costose ed energivore dal punto di vista produttivo, è sempre conveniente utilizzarne quantitativi minimi, non essendoci, a questo punto, nemmeno un ritorno dal punto di vista del comportamento strutturale. Inoltre, per tutti i valori intermedi di armatura tra A_{smin} e A_{smax} (dal 2,00 al 5,00 %) conviene sempre utilizzare spessori minimi di UHPFRC, in quanto, anche in questo caso, non vi sono significativi vantaggi in termini di resistenza aumentando lo spessore del materiale (si veda fig. 5.3.9).

Seppur indirizzato al solo predimensionamento delle strutture miste in calcestruzzo armato e UHPFRC, tale *tool* si configura di particolare rilievo per diverse ragioni. Come anticipato, il settore di punta del mercato delle costruzioni è quello delle riqualificazioni, che è sempre alla ricerca di soluzioni efficaci per il recupero del considerevole patrimonio edilizio esistente in Italia, tra l'altro in larga parte realizzato in calcestruzzo armato. A ciò si aggiunge che, date le elevate prestazioni di resistenza meccanica e di durabilità, l'UHPFRC non è nemmeno particolarmente impattante dal punto di vista economico, oltre a non richiedere l'impiego di armature di alcun genere per tali applicazioni. Avendo inoltre dimostrato che, nella maggior parte dei casi, ovvero quelli in cui la percentuale di armatura esistente è compresa tra A_{smin} e A_{smax}, sono sufficienti spessori e contenuto minimo di fibre, vi sono risparmi certi in termini di materiale, dato che un intervento analogo in calcestruzzo armato richiederebbe almeno 4 centimetri di spessore oltre che, naturalmente, le armature.

Un altro vantaggio riguarda invece una questione più ampia e legata alla penetrazione dell'innovazione tecnologica nel settore delle costruzioni. Come più volte ribadito all'interno della trattazione, l'UHPFRC è a tutti gli effetti un materiale avanzato, che richiede particolare accortezza nella realizzazione dell'impasto e, in generale, nella gestione dell'intera catena produttiva. Tuttavia, nel caso delle applicazione gettate in opera, dov'è non è necessario ottenere una superficie particolarmente curata, nè impedire che si formino microfessurazioni da ritiro, né, tantomeno, realizzare sezioni sottili e ben definite, l'UHPFRC si riavvicina rapidamente al suo predecessore riacquistando, a fin di bene, un po' di quell'atteggiamento empirico che ne ha spesso e volentieri decretato il successo. Come dimostrato dalla campagna di recupero delle infrastrutture viarie negli Stati Uniti, l'UHPFRC, aggiustato nella formulazione e realizzato con materie prime di minor pregio, si è rivelato idoneo anche all'utilizzo fuori dall'aziende di prefabbricazione, avvalendosi addirittura di una manodopera non specializzata. Naturalmente negli Stati Uniti e in Svizzera diverse aziende si sono dotate di macchinari in grado di gettare contemporaneamente su tutto il manto stradale[42] – l'elevata densità e il basso contenuto d'acqua lo rendono in ogni caso difficile da stendere – tuttavia, si tratta sempre di procedure tipiche della normale prassi costruttiva.

Oltre ai vantaggi dettati dall'aumento delle *performance* strutturali e dall'utilizzo di tecniche tradizionali e ben conosciute dalla manodopera, subentrano anche considerazioni di carattere ambientale: si pensi che l'utilizzo dell'UHPFRC al posto del convenzionale calcestruzzo armato determina una riduzione delle emissione di anidride carbonica fino al 30%[43], percentuale che diventa ancora più favorevole se si interviene su strutture esistenti.

Inoltre se è vero che il fabbisogno di calcestruzzo non è destinato a scendere[44], si dovrebbe guardare alle tecnologie più avanzate per garantire quantomeno un utilizzo efficiente, anzi ultra-performante, delle risorse sempre più scarse che abbiamo a disposizione. Appaiono dunque evidenti i vantaggi delle applicazioni dell'UHPFRC *cast-in-site*, su cui inoltre, si fa in questa sede particolare affidamento per favorire la penetrazione del materiale sul mercato italiano, magari con un processo simile a quanto è avvenuto negli Stati Uniti, dove adesso si fa strada anche nelle applicazioni più strettamente architettoniche.

In questo caso, in sostanza, mentre da un lato l'accettazione dell'innovazione tecnologica è facilitata da una ritrovata familiarità delle tecniche, i cui caratteri di permanenza derivati dalla tradizione costruttiva si incontrano in un felice sodalizio con i materiali avanzati, dall'altro le difficoltà connesse al calcolo delle strutture composite sembrerebbero ostacolare il successo di un'applicazione che ha tutti i presupposti per diventare *disruptive*.

Il *tool* di calcolo è finalizzato proprio a evitare che questo accada, intervenendo sui processi progettuali e colmando un *gap* di conoscenza per dimostrare, ancora una volta, come un'innovazione immateriale *knowledge-based* possa influenzare il mondo materiale delle tecniche e dei processi.

[42] Si veda walo.com, con particolare riferimento al progetto del viadotto di Chillon, in Svizzera (https://walo.com/case-studies/chillon-viaducts-switzerland/).

[43] Dong, Y., "Performance assessment and design …", *op. cit.*, 2018, pag. 423.

[44] Si veda il paragrafo 3.4.

Conclusioni



il Cantiere, Pordenone, 2019. Foto dell'autrice.

Conclusioni

I dottorati di ricerca a caratterizzazione industriale si pongono l'obiettivo di ricostruire la relazione tra Università e mondo della produzione, avviando un dialogo basato sullo scambio reciproco di conoscenze, ma anche sulla condivisione di metodi e approcci che, come riscontrato, si rivelano spesso tra di loro molto lontani e – enfatizzando – specchio della dialettica non sempre risolta tra teoria e prassi, cui si faceva riferimento alla fine del primo capitolo.

Tale contrapposizione si accentua nel caso dei materiali avanzati, dove la collaborazione tra progettazione e produzione dovrebbe essere molto più serrata. Invece, si trovano schierati, da un lato, i progettisti che, in molti casi, non riescono ad avviare operazioni di assimilazione culturale delle innovazioni tecnologiche, finendo o per squalificarle o per consacrarle a un tecnicismo estetizzante, storicamente già visto nella corrente *high-tech* o in alcune espressioni del più recente "parametricismo" mentre, da quello opposto, si trovano tecnici e produttori che spesso privano la prassi del suo valore culturale.

In tale contesto e in una prospettiva di riconciliazione tra cultura e prassi, si è tentato di riportare tanto la tecnica alla teoria, quanto la teoria alla tecnica, provando la strada di una doppia legittimazione per restituire unità ed efficacia alla progettazione e, soprattutto, alla figura del progettista. Il primo obiettivo era, quindi, implicito e, in un certo qual modo, trasversale rispetto ai temi trattati all'interno della tesi, ovvero comprendere i meccanismi del settore industriale per riportarli, mediati e assimilati, all'intero del progetto, ampliandoli e integrandoli con le questioni che gli sono proprie: il progetto, sostenendo l'inscindibilità tra pensiero teorico e pratico, diventa luogo d'incontro tra i diversi ambiti culturali e le tecniche, guardando alle implicazioni che gli aspetti realizzativi e gestionali, nonché processuali, determinano sia nell'azione progettuale che nei suoi fondamenti teorici[1]. Quindi, «all'interno della contraddizione di una tecnica vista come sinonimo di "possibilità libera e illimitata di disporre dei mezzi" e il permanere di una dimensione ancora "artigianale" del ruolo dell'architetto, l'azione propositiva della ricerca sembra preferire una convivenza democratica tra innovazione e consolidamento del sapere, alimentando una relazione, quella tra *theorica et pratica*, fondata su un sistema articolato di scelte possibili nell'attività tecnica, artistica e critica dell'architetto»[2].

[1] Losasso, M., "Tra teorie e prassi: cultura, tecnologia, progetto", *op. cit.*, 2017, pag. 11.
[2] Faroldi, E., "L'opera di architettura come esperienza intellettuale", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and*

Alle spalle di questo primo processo di integrazione, si inserisce l'innovazione tecnologica, in questo caso nella forma degli ultra-performanti, che ha rivelato da subito il ruolo fondamentale del fattore conoscenza: gli UHPFRC, all'apparenza molto vicini ai calcestruzzi, si discostano da questi non solo dal punto di vista progettuale, ma anche per modalità di collocazione sul mercato e relazione con il cliente. Dunque la possibilità di verificare sul campo le conoscenze sviluppate sul materiale, le considerazioni maturate sul rapporto innovazione/progetto e, soprattutto, su modelli di *business* improntati, se possibile, su approcci di *open* e *collaborative design* e *innovation*, ha costituito sia un'enorme occasione di crescita professionale sia una base solida su cui impostare tutto il lavoro di ricerca.

Su queste premesse, vale la pena riportare i tre quesiti di indagine presentati a inizio trattazione, per poi rispondere sinteticamente a ognuno di essi:

1) con questi presupposti, quali sono – se ci sono – le prospettive di applicazione dell'UHPFRC all'interno del settore italiano delle costruzioni, tradizionalmente restio ad accogliere l'innovazione tecnologica e attualmente attraversato da una profonda crisi?

2) in un contesto di materiali progettati e modificati alla scala molecolare, con caratteristiche e prestazioni customizzabili, quali sono i confini, in quanto architetti, della nostra conoscenza? È possibile "costruire" la conoscenza di materiali in continua evoluzione dinamica?

3) all'interno del settore dei calcestruzzi, a metà strada tra un mondo della produzione ancora vincolato alle tecniche del passato e una ricerca che punta alla completa robotizzazione dei processi, può la progettazione tecnologica fornire degli strumenti operativi e culturali all'attuale realtà produttiva?

Le risposte a tali quesiti sono profondamente legate e si diramano a partire dalla prima questione: infatti, se l'UHPFRC è a tutti gli effetti un'innovazione tecnologica, non si può prescindere dall'analisi delle dinamiche del mercato in cui si colloca.

Se gli ostacoli all'applicabilità dell'innovazione sono riconducibili, in sintesi, a un attaccamento alle tecniche della tradizione e nel mancato allineamento tra i tempi lunghi della sedimentazione culturale e quelli brevissimi dell'innovazione tecnologica, questi vanno abbattuti indubbiamente a partire dallo sviluppo di una «conoscenza ed esperienza scientifica delle caratteristiche dei materiali»[3], ma anche «dall'adeguamento del mercato [e] dalla rispondenza delle innovazioni proposte alle esigenze e ai bisogni espressi»[4].

Rivolgendo lo sguardo al settore delle costruzioni, alla fine del capitolo 3, è emerso che, nonostante le difficoltà in cui versa il mercato, l'UHPFRC troverebbe spazio nell'ambito delle riqualificazioni di edifici e infrastrutture e nel promettente comparto dell'arredo grazie, in particolare, alla sua mutevolezza superficiale che lo rende competitivo anche con materiali di

Environment, vol. 13, 2017, pag. 16.
3 Nardi, G., "Innovaz*ione…",* op. cit., 2000, pp. 2*0-24.*
4 Ibidem.

grande pregio, marmi *in primis*. Tuttavia, al di là di considerazioni strettamente economiche, che pure sono state fatte, le prospettive più promettenti sono in realtà altre e più a medio termine: l'applicazione di politiche economiche in chiave *green*, assieme al continuo aumento della richiesta di calcestruzzo soprattutto dai paesi in via di sviluppo, ha visto diversi enti internazionali – l'International Energy Agency, il CEMBUREAU e la nazionale Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento – raccogliere le diverse strategie in atto e da attuare per aumentare l'efficienza di uno dei settori più inquinanti dell'intero sistema produttivo.

È piuttosto significativo che tali strategie – riduzione del contenuto di clinker, utilizzo di SCM e di additivi chimici per migliorare le prestazioni, aumento dell'intensità prestazionale del cemento, maggiore utilizzo delle tecniche di prefabbricazione, ottimizzazione della distribuzione molecolare delle particelle – si basino proprio sui molti dei principi che hanno portato alla nascita degli ultra-performanti, che si configurano, quindi, come l'elemento di congiunzione tra la crescente richiesta del materiale ed esigenze di carattere ambientale.

È chiaro che non potendo intervenire sulla distribuzione molecolare delle particelle, occorre agire sul e con il progetto, a partire «dall'adozione di criteri corretti con cui orientare la scelta dei materiali e delle soluzioni tecnologiche da adottare»[5], per poi interrogarsi anche «sulla struttura stessa del progetto: come pensare, per esempio, a un prodotto che possa non solo essere facilmente smontato nelle sue parti elementari, riutilizzabili o efficacemente riciclabili? Come conferire qualità tecniche e culturali ai prodotti di riciclo? Come contribuire a produrre una nuova cultura imperniata sulla circolarità dei processi di produzione e consumo?»[6].

Ciò si traduce, per gli UHPFRC, soprattutto nell'adozione di approcci che puntino alla dematerializzazione degli elementi, in cui istanze di carattere ambientale – meno materia e più *performance* – si sposano con altre più tipicamente progettuali che, inizialmente indirizzate alla ricerca della "forma perfetta", si sono rapidamente convertite a una riduzione delle risorse e dei materiali impiegati che va ben oltre l'esplorazione morfologica. Si inserisce perfettamente in tale contesto la proficua relazione tra Industria 4.0 e materiali avanzati, in grado di fornire gli strumenti tecnici e operativi per attuare i dettami imposti dalla presa di coscienza derivante dalla questione ambientale.

In sostanza quindi, l'individuazione dei più significativi settori di investimento nel mercato delle costruzioni è stata mediata da una chiave di lettura sostenibile che, oltre a manifestarsi nella scelta dei casi operativi, ha guidato tanto la strutturazione del sistema di conoscenza del materiale che la definizione delle metodologie di progetto applicate.

Ciò ci conduce alla seconda domanda di ricerca, relativa alla conoscenza di quelli che abbiamo definito materiali in continua evoluzione dinamica. Infatti, anche il quadro appena delineato, che apre a prospettive progettuali *green*, descrive sistemi ad alta complessità, che vanno dall'ottimizzazione della materia, a quella formale, strutturale, ambientale e produttiva.

Tale ottimizzazione, nel campo degli UHPFRC, non può prescindere dalla comprensione delle proprietà intrinseche della materia, che ne se segnano la distanza dal calcestruzzo tradizionale, caratterizzato spesso da un approccio empirico al progetto, figlio della familiarità che si è costruita con il materiale nel corso della sua storia. Proprio questa familiarità è, tuttavia, nemica

5 Manzi*ni, E., Artefatti...,* op. cit., 1990, p*a*g. 92.
6 *Ibidem.*

degli ultra-performanti che, come più volte ribadito, sono bel altra cosa. Nel capitolo 4, quindi, si è ripartiti ancora una volta dalla definizione di un sistema di conoscenza. Ne è conseguito, però, immediatamente un problema di confinamento: «innovare nel campo della concezione architettonica e della costruzione significa [...] per un architetto tutt'altra cosa che per un ingegnere strutturale o per uno scienziato dei materiali»[7].

Tuttavia, con le parole di Manzini, se si estendono i confini dell'artificiale, «occorre allargare la progettazione su terreni che tradizionalmente non sono mai stati praticati dalla cultura del progetto»[8], appropriandosi di una conoscenza storicamente e culturalmente appartenente al campo dell'ingegneria per restituirla, rielaborata, a quello dell'architettura. Così facendo, «noi architetti potremo renderci indispensabili all'interno di un sistema che non sarà mai privo di specialisti, bensì necessiterà sempre più di luoghi di sincronizzazione e coordinamento tra le parti»[9].

È stato così messo a punto un protocollo di prove, sperimentali e già normate, avente un triplice obiettivo: verificare, prima di tutto, l'effettiva possibilità di creare un programma di test facilmente riproducibile, comprensibile anche a non addetti ai lavori e che avesse un comprovato riscontro scientifico; fornire uno strumento finalizzato tanto alla conoscenza del materiale in senso stretto, ovvero in termini prestazionali, quanto alla verifica delle soluzioni progettuali adottate; indagare aspetti comportamentali legati alla costruibilità e alla resa estetica e formale che, paradossalmente, seppur fondamentali per garantire l'affermazione di un'innovazione del settore delle costruzioni, sono costantemente messi da parte a favore di proprietà più facilmente inquadrabili dal punto di vista tecnico.

Più che puntare a una catalogazione delle proprietà, ci si è focalizzati sulla comprensione, da un lato, delle cause macroscopiche che le determinano e, dall'altro, sull'influenza che esse hanno sul calcestruzzo ri-concepito però come sistema costruttivo, come processo, e non solo come semplice materiale.

Come già affermato, se "costruire in calcestruzzo" non determina più una scelta materica ovvia, vanno forniti al progettista gli strumenti per operare tale scelta in maniera consapevole, tenendo conto anche di questioni che, seppur apparentemente esterne alla disciplina, impattano su di essa quando si passa alla sua costruzione.

L'intero protocollo, ampiamente descritto nel capitolo 4, ha inoltre il merito di essere frutto di un'intensa collaborazione con l'azienda partner che ha messo a disposizione la sua esperienza decennale per evidenziare le problematiche che più frequentemente si presentano nella fase intermedia tra progettazione e produzione che, al contrario di quello che si potrebbe credere, sono nella maggior parte dei casi risolvibili in fase progettuale, a patto che si conosca tanto la tecnologica che le sue tecniche produttive.

Ciò ci conduce alla terza e ultima domanda, incentrata sulla progettazione tecnologica. Ancora una volta, quindi, si è ripartiti dallo scenario costruito dall'analisi del settore delle costruzioni, intersecandolo con il sistema di conoscenza precedentemente delineato e, arrivando, in

[7] Morel, P., "Un cemento del XXI secolo per un'architettura del XXI secolo", in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futuro,* Skira Editore SpA, Milano, 2016, pag. 29.
[8] Manzini, E., *Artefatti...*, *op. cit.*, 1990, pag 96.
[9] Faroldi, E., "L'opera di architettura come esperienza intellettuale", *op. cit.*, 2017, pag. 14.

conclusione, all'elaborazione di due applicazioni progettuali con ultra-performanti. La prima, indirizzata nello specifico alla mediazione tra progettazione e produzione industriale, sviluppa una metodologia per un'integrazione sistemica di esigenze progettuali e produttive, sfruttando le opportunità offerte dal *digital design* per la gestione della complessità e verificandone l'efficacia nel caso della progettazione di un componente di facciata in UHPFRC.

Nel secondo caso viene fornito un metodo di predimensionamento per il calcolo di strutture miste in CA-UHPFRC che, questa volta, si considera gettato in opera in un *layer* sottilissimo posto all'intradosso o all'estradosso della struttura da riqualificare. Entrambe le sperimentazioni puntano a favorire la penetrazione dell'innovazione tecnologica nel settore delle costruzioni, fornendo metodi e tecniche per un utilizzo corretto degli ultra-performanti, sebbene la prima sia quella che più rappresenta un completamento del percorso fatto durante tutta la tesi, che si basa appunto sulla ricostruzione della triade innovazione-industria-progetto, dalla definizione dei temi fino all'elaborazione finale delle metodologie. Tuttavia l'applicazione *cast-in-side* ha, soprattutto per il mercato italiano, delle implicazioni fortissime, che non possono essere ignorate: la crescita del comparto delle riqualificazioni, gli investimenti nel sistema infrastrutturale, gli sgravi fiscali per gli interventi di adeguamento sismico vanno di pari passo con i vantaggi dell'utilizzo di una tecnica costruttiva che, in questo caso, non si discosta di molto dal tradizionale calcestruzzo armato.

Le difficoltà, quindi, nella seconda applicazione sono tutte progettuali e connesse alla mancanza, a livello nazionale, di una normativa che guidi il calcolo delle strutture miste così realizzate. Il *tool* di predimensionamento pone rimedio a questa mancanza, dimostrando agli attori in gioco che l'UHPFRC è un'alternativa valida che ha, tra le altre cose, impatti positivi dal punto di vista ambientale: bastano 2,5 centimetri di ultra-performante per intervenire su una struttura in calcestruzzo, con garanzia di un incremento della capacità portante anche tre volte superiore rispetto alla struttura di partenza[10].

In conclusione, va specificato che tutta la tesi è impostata, per una precisa scelta di campo, sul confronto con tecniche produttive e costruttive attualmente in uso, in maniera tale da fornire prospettive evolutive concretamente attuabili, anche con l'intento di mettere a frutto il più possibile la collaborazione con l'azienda di riferimento.

Tuttavia, non si può negare che il settore dei calcestruzzi sia destinato a cambiare radicalmente nel prossimo futuro, integrando quelle tecniche che stanno già trasformando il vecchio modo di fare le casseforme: la stampa 3D e la sua deviazione nel campo del *concrete* sono innegabilmente foriere di cambiamento, soprattutto per le implicazioni connesse alla democratizzazione della produzione e al conseguente ribaltamento del ruolo dell'architetto, di cui si è trattato alla fine del capitolo 2.

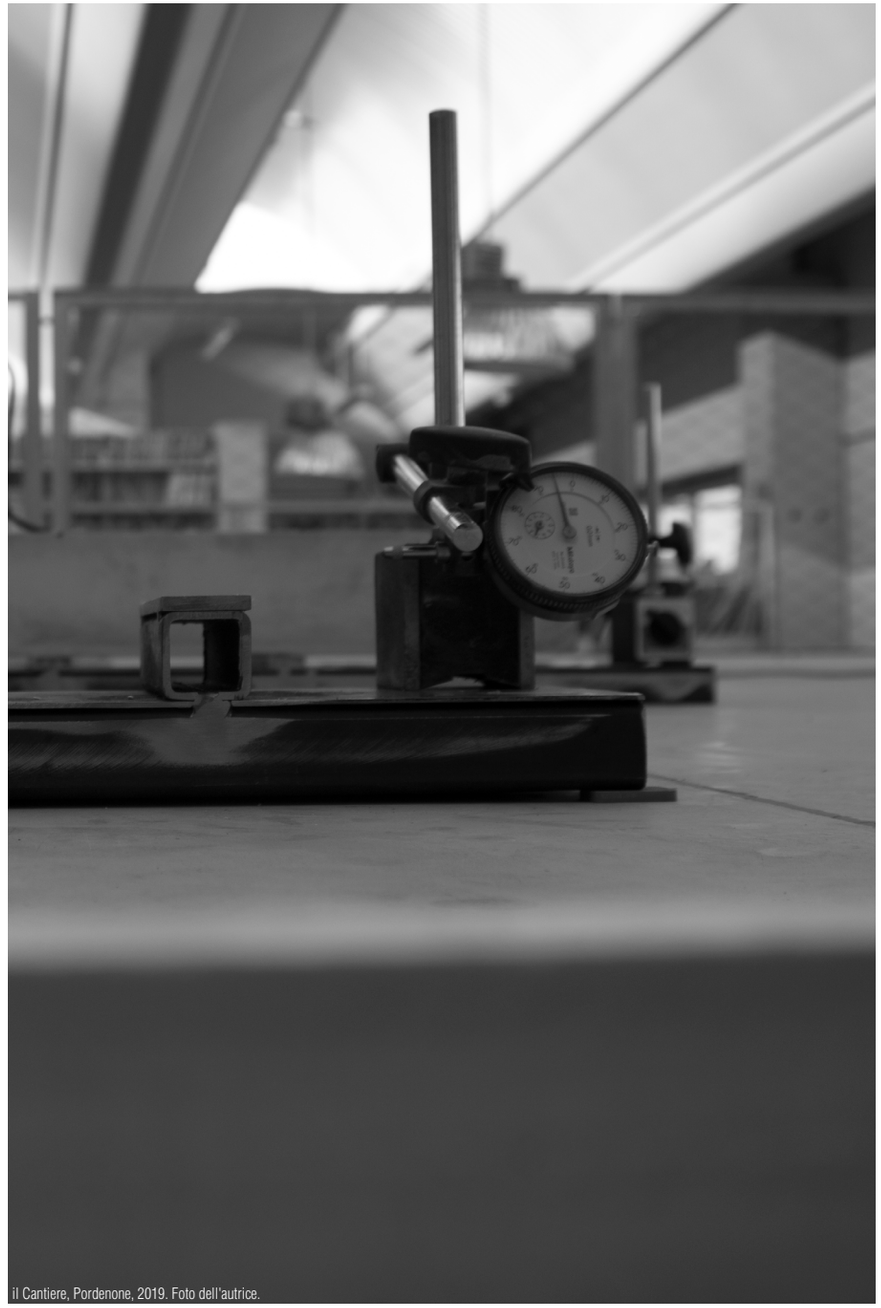
Se le previsioni visionarie di Behrokh Khoshnevis, presidente della Contour Crafting Corporation, si rivelassero veritiere, basterà scaricare da un portale di condivisione *online* il *file* contenente la casa che più si preferisce, per poi stamparla con ultra-performanti ovunque si desideri. Una prospettiva sicuramente lontana che, si ritiene, non determini, come molti credono, necessariamente una scomparsa del progettista, sebbene ne comporti una trasformazione: la progettazione sarà più condivisa e aperta, finalizzata alla diversificazione

[10] Si veda il paragrafo 5.3.

anziché alla permanenza, coerentemente con i nuovi modi di vivere. Al contrario, molto vicine, anzi già in atto, sono le implicazioni, sempre a opera della stampa 3D, della quasi completa mass-customizzazione della produzione, favorita anche dalla facilità con cui è possibile oggi progettare serie diversificate, grazie soprattutto alla progettazione parametrica. In questo senso, la metodologia progettuale elaborata nell'ultimo capitolo presenta interessanti prospettive di riconversione se, anziché considerare come sistema produttivo la colatura, si mette al centro proprio la stampa 3D.

Sebbene il *concrete printing* rappresenti il futuro, è purtroppo ancora distante dalla realtà produttiva odierna, che non può ancora rinunciare alla colatura come tecnica produttiva per eccellenza, in quanto sono ad adesso inarrivabili i suoi livelli di qualità estetica, formale e prestazionale.

In definitiva, sono questi i motivi per cui è ad essa che si è rivolto il presente lavoro di ricerca, con l'obiettivo di spingere, anche se di poco, il settore dei calcestruzzi verso la Quarta Rivoluzione Industriale intervenendo, da un lato, su sistemi *knowledge-based* per i materiali avanzati e, dall'altro, su metodologie progettuali che ne favorissero la diffusione nel mercato italiano, guardando però sempre alla produzione industriale attraverso il filtro del progetto.



il Cantiere, Pordenone, 2019. Foto dell'autrice.

BIBLIOGRAFIA

Acker, P., “Swelling, shrinkage and creep: a mechanical approach to cement hydration”, in *Materials and Structures/Concrete Science and Engineering*, vol. 37, 2004.

AITEC, *Rapporto di Sostenibilità. AITEC 2018, 2018*, disponibile all’indirizzo https://www.aitecweb.com.

Alani, A. *et alii*, “Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC)”, in *Construction and Buildings Materials*, vol. 209, 2019, pp. 395-405.

Aldahdooh, M. *et alii*, “Influence of palmo il ash on ultimate flexural and uniaxial tensil strenght of green ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites”, in *Materials and Design*, vol. 54, 2014, pp. 694-701.

Al-Hadithi, A., e Hilal, N., “The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers”, in *The Journal of Building Engineering*, vol. 8, 2016, pp. 20–28.

Ambrosini, L., *Data, Digital&Design*, Tesi di dottorato, Università Federico II, Napoli, 2018.

ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili), *La crescita che non si sente*, scheda stampa, 15 gennaio 2020.

–, *Osservatorio congiunturale sull’industria delle costruzioni. Nota di sintesi*, gennaio 2019.

–, *Osservatorio congiunturale sull’industria delle costruzioni. Nota di sintesi*, gennaio 2020.

Anderson, C., *Makers. Il ritorno dei produttori. Per una nuova rivoluzione industriale*, trad. it Carozzi, M., Merlini, R. e Ubbiali, G., Rizzoli Etas, 2013 (ed. orig. *Makers: the New Industrial Revolution*, Random House Business Books, New York, 2012).

Anderson, D., *Agile Product Development For Mass Customization*, IRWIN Professional Publishing, Chicago-London-Singapore, 1997.

Andriani, C., “Introduzione”, in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futuro*, Skira Editore, Milano, 2016, pp. 14-23.

– (a cura di), *Le Forme del Cemento*, vol. 1, 2, 3, 4, AITEC e Gangemi Editori, Roma, 2006-12.

Antonelli, P., “States of Design 03: Thinkering”, in *DOMUS*, vol. 948, 2011.

Antonini, E., “La sostenibilità”, in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell’innovazione. Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2001, pp. 137.

Aravena, A. e Iacobelli, A., *Elemental Chile. A handbook on progressive housing*, Actarbirkhauser, Basilea, 2008.

Arrow, K. J., *The Economic Implications of Learning By Doing*, Technical Report n. 101, Institute For Mathematical Studies In The Social Sciences, Stanford, 1961.

–, "Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention", in Nelson, R. (a cura di), *The Rate and Direction of Economic Activities: Economic and Social Factors*, Princeton University Press, Princeton, 1962, pp. 609-626.

Arthur, B., *La natura della tecnologia. Cos'è e come evolve,* trad. it Fassio, D., Codice edizioni, Torino, 2011 (ed. orig. *The Nature of Technology: What it is and How it Evolves*, The Free Press and Penguin Books, London, 2009).

Arvind Kumar, C., *Welcome to the "Free" World: A Free Software Initiative*, Indian University Press, Chennai, 2011.

Asprone, D. *et alii*, "Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete", in C*ement and Concrete research*, vol. 112, 2018, pp. 111-121.

Asprone, D. *et alii*, "3D printing of reinforced concrete elements: technology and design approach", in *Construction and Building Materials*, vol. 165, 2018.

Association Française de Normalisation, *NF P 18-470: Bétons - Bétons fibrés à ultra hautes performances - Spécification, performance, production et conformité*, AFNOR Editions, 2016.

–, *NF EN 196-1: Méthodes d'essais des ciments - Partie 1: Détermination des résistances*, AFNOR Editions, 2016.

Audretsch, D. e Thurik, R, "The Model of the Entrepreneurial Economy", in International Journal of Entrepreneurship Education, vol. 2, pp. 143-166.

Agustì-Juan, I. e Habert, G., "Environmental design guidelines for digital fabrication", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, 2017, pp. 2780-2791.

Agustì-Juan, I. *et alii*, "Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 154, 2017, pp. 330-340.

Bache, H. H., "Densified cement/ultra-fine particle based materials", in *Proceedings of the Second International Conference on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, 10-12 giugno 1981, pp. 1-35.

–, *Compact Reinforced Concrete*, brevetto depositato presso United States Patent Office, 1987.

Baker, J.B., "Beyond Schumpeter vs. Arrow: How Antitrust Fosters Innovation", in *Antitrust Law Journal*, vol. 74, 2007, pp. 575-602.

Baldwin, J., *Bucky Works*, John Wiley&Sons, New York, 1996.

Banham, R., *Architettura della Seconda Età della Macchina. Scritti 1955-1988*, in Biraghi, M. (a cura di), Mondadori Electa SpA, 2004.

Baricco, A., *The Game*, Giulio Einaudi Editore, Torino, 2018.

Baumers, M. *et alii*, "The cost of additive manufacturing: machine productivity economies of scale and technology push", in *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 102, 2016, pp. 193-201.

Benedikt, M. (a cura di), *Cyberspace: Firts Steps*, The Mit Press, Cambridge, 1991.

Benevolo, L., *Storia dell'architettura moderna*, Laterza, Bari, 2008 (ed. orig. 1960).

Benjamin, W., *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica. Arte e società di massa*, trad. it. Filippini, E., Einaudi editore, Torino, 1955 (ed. orig. *Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbakeit*, Suhrkamp Verlag, Francoforte, 1955).

Benkler, Y., "Coase's Penguin, or, Linux and the Nature of the Firm", in *The Yale Law Journal*, vol. 112, 2002, pp. 369-446.

Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution, Technical Leaflet SIA 2052, 2016.

Bernardi, S. e Trucy, L., "Sprayed UHPC with glass fibers for 3D panels", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 ottobre 2017, pp. 145-152.

Bettiol, M., *Raccontare il Made in Italy. Un nuovo legame tra cultura e manifattura*, Marsilio Editori, Venezia, 2015.

Birchall, J. *et alii*, "Flexural strength and porosity of cements", in *Nature*, vol. 289, pp. 388-390, 1981.

Blecker, T. *et alii*, *Mass Customization vs. Complexity: A Gordian Knot?*, MPRA Paper n. 5290, 2004, pp. 894-898.

Block, M., "Principi insediativi, cultura materiale, resilienza urbana", in Losasso, M. (a cura di), *Principi insediativi e progetto ambientale. Conoscenza e indirizzi per la valorizzazione del sistema dei vuoti del Centro Antico di Napoli*, CLEAN, Napoli, 2018, pp. 51-67.

Boeri, R. e Vignolo, L.A., "L'emozione dell'inventiva", in Boeri, R. *et alii* (a cura di), *Il pensiero inventivo*, Edizioni Unicopli, Milano, 1988, pp. 152-171.

Boyd, S. E. *et alii*, "The effects of marine sand and gravel extraction on the macrobenthos at a commercial dredging site", in *ICES Journal of Marine Science*, vol. 62, 2005, pp. 145-162.

Bos, F. *et alii*, "Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D printing", in *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, 2016, pp. 209-225.

Bos, F. *et alii*, "Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete", in *Materials*, vol. 10, 2017.

Braam, C.R, *INNOCONCRETE report. Eureka project, freexe-thaw resistance*, 2006.

Brühwiler, E., e Denarié, E., "Rehabilitation of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete", in Fehling, E. et alii (a cura di), *Proceedings of The Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel University Press, Kassel, 2008, pp. 895–902.

Bueno, O., "The Drexler-Smalley Debate on Nanotechnology. Incommensurability at Work?", in *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 10, 2004, pp. 83-98.

Buitelaar, P., "Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications during 25 years", in M. Schmidt *et alii* (a cura di), *Proceedings of the International Symposium on UHPC*, Kassel University Press, Kassel, 13-15 settembre 2004.

Buswell, R. A. *et alii*, "Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction",

in *Automation in Construction*, vol. 16, 2007, pp. 224-231.

Calvo, F., “Progetto”, in *Enciclopedia*, vol. 11, Einaudi, Torino, 1980, pag. 26.

Campioli, A., “Idea, progetto, dettaglio”, in Losasso, M. (a cura di), *Progetto e innovazione. Nuovi scenari per la costruzione e la sostenibilità del progetto architettonico*, CLEAN, Napoli, 2005, pp. 78-91.

–, “Qualità dell’architettura: innovazione, ricerca tecnologica e progetto”, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 1, 2011, pp. 62-69.

Campioli, A. e Lavagna, M., “Innovazione ambientale dei processi di trasformazione del costruito e ciclo di vita”, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 5, 2013, pp. 66-73.

Campioli, A., “Il carattere della cultura tecnologica e la responsabilità del progetto”, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, 2017, pp. 27-32.

–, “Enzo Frateili e l’industrializzazione dell’edilizia”, in AIS/Design Storia e Ricerche, vol. 9, 2017.

Campioli, A., Torricelli, M. e Mannino, I., “Approccio Life Cycle per la sostenibilità nel settore delle costruzioni e nelle trasformazioni del territorio”, in Antonini, E. e Tucci, F. (a cura di), *Architettura, città e territorio verso la Green Economy*, Edizioni Ambiente, Milano, 2017, pp. 135-151.

Cangelli, E. e Conteduca, M., “Architettura on demand. Nuovi scenari per il progetto e l’industria delle costruzioni”, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, 2018, pp. 96-104).

Carpo, M., “Introduction”, in Carpo, M. (a cura di), *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*, John Wiley and Sons Publication, Chichester, 2013, pp. 8-13.

Carr, N., “Is Google Making Us Stupid?”, in *Atlantic*, luglio/agosto, 2008.

–, *The Shallows: What the Internet Is Doing to Our Brains*, W. W. Norton & Company, New York, 2010.

–, *The Glass Cage: Where Automation is Taking Us*, W. W. Norton & Company, New York, 2015.

Cartner, F. *et alii*, “A novel Atmospheric Approach to the Mineral Capture of CO_2 from Industrial Point Sources”, in *Proceedings of the CCUS 2014-Carbon Capture, Utilization and Storage Conference*, Pittsburgh, 2014.

Casoni, G. e Fanzini, D., *I luoghi dell’innovazione. Complessità management progetto*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011.

CEMBUREAU, *Activity Report 2018. Built in concrete, Made with cement*, Brussel, 2019, disponibile all’indirizzo: https://cembureau.eu/media/1818/actvity-report-2018.pdf.

Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici e Ministero dell’Ambiente, *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici PNACC*, Supporto tecnico-scientifico per il MATTM, prima stesura per la consultazione pubblica, Roma, 2017.

Cesaretti, G. *et alii*, “Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology”, in *Acta Astronaut*, vol. 93, 2014, pp. 430-450.

Cetica, P. A., “Il sistema di decisioni architettoniche: sua unità e sua collocazione nel processo edilizio industrializzato”, in Spadolini, L. (a cura di), *Design e tecnologia, un approccio progettuale all’edilizia industrializzata*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1974.

Chesbrough, H., *Open Innovation: The New Imperative for Creating And Profiting from Technology*, Harvard Business School Press, Boston, 2006.

Chesbrough, H. *et alii*, *New Frontiers in Open Innovation*, OUP Oxford, Oxford, 2017.

Chiesa, G., *Paradigmi, tecnologie ed ere digitali. Il dato come parametron di innovazione in architettura e urbanistica*, Accademia University Press, Torino, 2015.

–, “La prassi progettuale esplicito digitale e l’approccio prestazionale”, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, 2017, pp. 236-242.

Choudhary, A. K., Harding, J. A. e Tiwari, M.K., “Data mining in manufacturing: a review based on the kind of knowledge”, in *J. Intell. Manuf.*, vol. 20, 2009, pp. 501-521.

Cianciullo, A. e Silvestrini, G., *La corsa della Green Economy. Come la rivoluzione verde sta cambiando il mondo*, Edizioni Ambiente, Milano.

Ciribini, G., “Dal concetto di industria alla produzione industrializzata di beni edilizi”, in Fuzio, G. (a cura di), *Industrializzazione dell’edilizia*, Dedalo libri, Bari, 1965, pp.17-25.

–, “Il processo dell’industrializzazione edilizia: problemi e sviluppi”, in Fuzio, G. (a cura di), *Industrializzazione dell’edilizia*, Dedalo libri, Bari, 1965, pp. 122-123.

–, “La normativa tecnica di fronte alle problematiche attuali”, in *Edilizia scolastica e culturale*, vol. 4, 1987.

–, “Industria e progetto, domani”, in Gangemi, V. e Ranzo, P. (a cura di), I*l governo del progetto. La tecnologia per la formazione dell'architetto*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1987

Clark, J. e Flemings, M., “Advanced Materials and the Economy”, in *Scientific American*, 1986.

Claudi de Saint Mihiel, C., *Innovazione tecnologica e architettura. Logiche e metodologie dell'atelier Dubosc&Landowski*, Edizioni del Grifo, Lecce, 1999.

CNR, *Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per l’impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni*, Roma, 2012, disponibili all’indirizzo http://www.ateservizi.it/News/3settembre2012/IstruzioniCNR_DT209_2012.pdf.

Cohen, J. e Moeller, M., “Introduction”, in Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete*, Birkhäuser – Publisher for Architecture, Basel-Berlin-Boston, 2006, pp. 6-7.

Cohen, J., “Le Corbusier’s Modulor and the Debate on Proportion in France”, in *Architectural Histories*, vol. 23, pp. 1-14.

–, *Le Corbusier. Tout l’oeuvre construit*, trad. fr. Hubert, C., Flammarion, Parigi, 2018 (ed. orig. *Le Corbusier. The built work*, The Monacelli Press, New York, 2018.

Coleman, J., “Social Capital in the Creation of Human Capital”, in *American Journal of Sociology*, vol. 94, 1988, pp. 95-120.

Commissione Europea, *Horizon 2020 in breve. Il programma quadro dell’UE per la ricerca e l’innovazione*, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, 2014.

Commissione Permanente per le Attività produttive, commercio e turismo, I*ndagine conoscitiva su “Industria 4.0”: quale modello applicare al tessuto industriale italiano. Strumenti per favorire la digitalizzazione delle filiere industriali nazionali*, 2016.

Commoner, B., *The closing circle*, Random House, New York, 1971.

–, “A Bulletin Dialogue on ‘The Closing Circle. Response”, in *Bull. At. Sci.*, vol. 28, pp. 42-56, 1972.

Consiglio Nazionale per la Green Economy, *Programma di transizione alla Green Economy in Italia*, Stati Generali della Green Economy, Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero per lo Sviluppo Economico, Ecomondo Pubblicazioni, Rimini, 2017.

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Servizio Tecnico Centrale, *Linea guida per l’identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)*, 2019.

Constanza, R. e Daly, H., “National capital and sustainable development”, in *Conservation Biology*, vol. 6, pp. 37-46, 1992.

Costantini, M. e Secco, L., “Avanzamenti nell’industria e realtà produttive”, in Ciribini, G. (a cura di), *Tecnologie della costruzione*, La nuova Italia Scientifica, Roma, 1992.

Craipeau, T. *et alii*, “Evolution of Concrete/Formwork Interface in Slipforming Process”, in Wangler, T. e Flatt, J. R. (a cura di), *Proceedings of the First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*, Zurigo, 10-12 settembre 2018, pp. 12-23.

Cui, C. *et alii*, “Computational Morphogenesis of 3D Structures by Extended ESO Method”, in *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, vol. 44, 2003, pp. 51-61.

D’Amato, G., *Storia del design*, Bruno Mondadori editore, Milano, 2005.

DAfStB UHPC, “State-of-the-art Report on Ultra High Performance Concrete”, in *Concrete Technology and Design*, Deutscher Ausschluss fur Stahlbeton/German Association for Reinforced Concrete, Berlin, draft 3, 2003.

Davies,C., *The Prefabricated Home*, Reaktion Books, Londra, 2005.

Davis, S., *Future Perfect*, Addison-Wesley, Reading, 1987.

De Larrard F e Sedran T., “Optimization of ultra-high performance concrete by using a packing model”, in *Cement and Concrete Research*, vol. 24, 1994, pp. 997-1009.

Deleuze, G., *A Thousand Plateaus: Capitalism and Schizophrenia*, University of Minnesota Press, Minneapolis, 1987.

–, *The Fold. Leibniz and the Baroque*, The Athlone Press, Londra, 1993.

–, *Difference and Repetition*, The Athlone Press, Londra, 1997.

De Luca, F. “Diagramma and Script”, in A. Saggio, *Architettura e Information Technology*, m.e. architectural book and review, Roma, 2011.

Del Nord, R., “Quale ricerca per quale domanda”, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 1, 2011, pp. 70-75.

–, “Potenzialità dell'area tecnologica in tema di ricerca progettuale”, in Perriccioli, M. (a cura di), *Pensiero tecnico e cultura del progetto. Riflessioni sulla ricerca tecnologica in architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2016.

De Nicolo, B., *Materiali da costruzione. Sperimentazione e normativa*, Franco Angeli, Milano, 1998.

De Paolis, V. e Principe, J., “Qualità del progetto oltre gli standard”, in Lucarelli, M. *et alii* (a cura di), *Progettare resiliente*, Maggioli Editore, Santarcalgeno di Romagna, 2018.

De Shutter, G. *et alii*, “Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials”, in *Cement and Concrete Research*, vol. 112, 2018, pp. 25-36.

De Shutter, G., “Smart casting of concrete structures by acrive control of rheology”, in AA.VV., *Smartcast. ERC Advanced Grant Project*, European Research Council, 2016-2021.

Deshpand, A., “Relationships between advanced manufacturing technologies, absorptive capacity, mass customization, time to market and financial and market performance”, in *Asia-Pacific Journal of Business Administration*, vol. 10, 2018, pp. 2-20.

Desprez, M. *et alii*, “The biological impact of overflowing sands around a marine extraction site: Dieppe”, in *ICES Journal of Marine Science*, vol. 67, 2010, pp. 270-277.

Diamond, D., “The way we live low: 9-28-03: questions for Linus Torvalds”, in *The New York Times Magazine*, 28 settembre 2003.

Dini, E., *Method for method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor*, brevetto depositato presso United States Patent Office, 2012.

Dong, Y., “Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts”, in *Construction and Building Materials*, vol. 167, 2018, pp. 414-425.

Drexler, E., *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, Anchor Books, New York, 1986.

–, “Open Letter to Richard Smalley”, in *Chemical&Engineering News*, vol. 81, pp. 38-39., 2003.

Duguay, C., “From mass production to flexible/agile production”, in *International Journal of Operations&Production Management*, vol. 17, pp. 1183-1195.

Ehrlich, P., *The Population Bom*b, Sierra Club, San Francisco, 1968.

Ehrlich, P. e Holdren, J., “A Bulletin Dialogue on ‘The Closing Circle. Critique’”, in *Bull. At. Sci.*, vol. 28, pp. 16-27, 1972.

EN, *EN 206: 2013+A1:2016: Concrete - Specification, performance, production and conformity*.

Epifani, S., “Misurare l’innovazione. La necessità di un confronto”, in Epifani, S. *et alii* (a cura di), *Decidere l’innovazione. Come misurare, valutare e scegliere il cambiamento*, Sperling&Kupfer Editori, Piacenza, 2006, pp. 39-84.

European Commission, *White Paper. Adapting to Climate Change: Towards a European framework for action*, EU Publishing, Brussels, BE, 2009.

–, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council. Establishing Horizon Europe – The Framework Programme For Research And Innovation*, 2018.

–, *An EU Strategy on adaptation to climate change*, EU Publishing, Brussels, BE, 2013.

–, *Implementation of the Circular Economy Action Plan*, EU Publishing, Brussels , BE, 2017.

European Environmental Agency, “Impacts of Europe’s Changing Climate – 2008 Indicators based-Assessement”, in *EEA Report No. 4/2008*, 2008.

–, *European Adaptation to Climate Change in Europe*, Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg-Copenaghen, 2012.

–, *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report*, Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg-Copenaghen, 2016.

Fabbri, R. *et alii*, “The Miles stair in Somerset House”, in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 ottobre 2017, pp. 595-614.

Fabbri, R. *et alii*, “Exploring UHPFRC Possibilities”, in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 ottobre 2017, pp. 905-914.

Fabbri, R. e Bernardi, S., “Designing UHPFRC structures with organic fibres”, in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 ottobre 2017, pp. 115-124.

Fabbri, R., Principe, J., Derimay, J. e Bernardi, S., “Key Parameters for Building Reinforcement with an UHPFRC Overlay”, in *Proceedings of the Second International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2IIS-UHPC)*, 2-5 giugno 2019, Albany, New York.

Fabbri, R. *et alii*, "UHPFRC Folded Pavillion", in *Journal of Civil Engeneering and Architecture*, vol. 14, 2020, pp. 10-19.

Faroldi, E., “Ideazione, progettazione, costruzione, gestione: l'architettura del progetto. Sette note costruite”, in Claudi de Saint Mihiel, A. (a cura di), *Tecnologia e progetto per la ricerca in Architettura*, CLEAN, Napoli, 2014, pp 85-102.

–, “L'opera di architettura come esperienza intellettuale”, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, 2017, pp. 14-20.

Federbeton, *Mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso l’applicazione dei principi di economia circolare*, Confindustria, 2018.

Fehling, E. *et alii*, *Ultra-High Performance Concrete UHPC. Fundamentals, Design, Examples*, Wiley Ernst&Sohn, Weinheim, 2014.

Feldman, R.F. e Sereda, P.J. “A new model for hydrated portland cement and its practical implications”, in *Engineering Journal*, vol. 53, n. 819, pp. 53-59, 1970.

Feynman, R. P., “There is Plenty of Room at the Bottom. An invitation to enter a new fields of physics”, in *Annual meeting of American Physical Society at Caltech*, trascrizione dell’intervento tenuto il 29 dicembre 1959.

Fleck, N. *et alii*, “Micro-architectured materials: past, present and future”, in *Proceedings of the Royal Society*, vol. 266, 2010, pp. 2495-2516.

Floridi, L., *The OnLife Manifesto*, Seminario, Centro Nexta su Internet&Società, Politecnico di Torino, DAUIN, Torino, 24 maggio 2013.

–, *La quarta rivoluzione. Come l’infosfera sta trasformando il mondo*, trad. it. Durante, M., Raffaello Cortina Editore, Milano, 2017 (ed. orig. *The Fourth Revolution. How the Infosphere is reshaping human reality*, Oxford University Press, Oxford, 2014).

Foer, J. S., *Possiamo salvare il mondo, prima di cena. Perché il clima siamo noi*, trad. it. Piccinini, I., Ugo Guanda Editore, Milano, 2019, pp. 27-29 (ed. orig. *We are the Weather. Saving the Planet Begins at Breakfast*, Farrar, Straus and Giroux, New York, 2019).

Forty, A., “The Material without a History”, in Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete*, Birkhäuser – Publisher for Architecture, Basel-Berlin-Boston, 2006, pp. 34-45.

Frampton, K., *Storia dell’architettura moderna*, trad. it. Milesi, S., Zanichelli Editore, Bologna, 2008 (ed. orig. *Modern Architecture: a critial History*, Thames and Hudson, London, 1980).

Freyssinet, E., *Method and apparatus for the manufacture of hollow bodies of reinforced concrete*, brevetto depositato presso United States Patent Office, 1936.

Friedman, Y., “Flatwriter: Voice by Computer”, in *Progressive Architecture*, vol. 52, 1971, pp. 98-101.

Gallanti, F., “Elemental, Aravena!”, in *DOMUS*, 15 novembre 2005.

Gallinaro, S., “La modularità nello sviluppo e nella produzione dei servizi”, in *Impresa Progetto – Rivista online del DITEA*, vol. 1, 2009, pp. 1-22.

Garcìa de Soto, B. *et alii*, “Productivity of digital fabrication in construction: cost and time analysis of a robotically built wall”, in *Automation in Construction*, vol. 92, 2018, pp. 297-311.

Garud, R. *et alii*, “From the Process of Innovation to Innovation as Process”, in Langley, A. e Tsoukas, H. (a cura di), *The SAGE Handbook of Process Organization Studies*, SAGE Publications Ltd, Thousand Oaks, USA, 2016, pp. 451-465.

Gauntlett, D., *La società dei Makers. La creatività dal fai da te al Web 2.0*, trad. it Bonini, T. e Maestro, S. Marsilio Editori, Venezia, 2013 (ed. orig. *Making is Connecting. The Social Meaning of Creativity from DIY and Knitting to YouTube and Web 2.0*, Polity Press Ltd., Cambridge, 2011).

Gensheng, J. *et alii*, “Impacts of supply chain planning and integration on mass customization”, in *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 29, 2018, pp. 608-628.

Gershenfeld, N., *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop*, Basic Books, New York, 2005.

Giallocosta, G., *Riflessioni sull’innovazione. Architettura e produzione edilizia nei regimi di complessità delle fasi storiche di sviluppo del costruire*, Alinea Editrice, Firenze, 2006.

Gibb, A., *Off-site fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*, John Wiley & Sons, Hoboken, 1999.

Gibson, W., *Neuromancer*, Ace Books, New York, 1984.

Girardi, C., “Metodi e strumenti per la valutazione della sostenibilità dei prodotti edilizi”, in Losasso, M., *Percorsi dell’innovazione. Industria edilizia, tecnologie, progetto*, CLEAN, Napoli, 2010, pp. 78-79.

Giuffrè, R. *et alii*, (a cura di), *I linguaggi della riabilitazione. Problematiche di estetica e dei materiali nelle tecnologie del recupero*, Rubettino Editore, Soveria Mannelli, 2003.

Goldenberg, J. E Mazursky, D.C., *Creatività e innovazione di prodotto*, Etas, Milano, 2003.

Gordon, H. S., “The Economic Theory of a Common-Property Resource: The Fishery”, in *The Journal of Political Economy*, vol. 62, 1954, pp. 124-142.

Gosselin, C. *et alii*, “Large-Scale 3D printing of Ultra-High Performance Concrete, a new processing route for architects and builders”, in *Materials and Design*, vol. 100, 2016, pp. 102-109.

Graybeal, B., *FHWA TECHNOTE: Ultra High Performance Concrete*, FHWA Publication, 2011.

Greenhalgh, P., “The History of Craft”, in Dormer, P. (a cura di), *The Culture of Craft*, Manchester University Press, Manchester, 1997, pp. 20-52.

Griffith, A., “The phenomena of rupture and flow in solids”, in *Philosophical transactions of the royal Society of London*, vol. 221, 1921, pp. 163-197.

Grisotti, M., “L’industrializzazione edilizia in rapporto alla prima e alla seconda rivoluzione industriale”, in Fuzio, G. (a cura di), *Industrializzazione dell’edilizia*, Dedalo libri, Bari, 1965, pp. 27-70.

Guazzo, G., “La ‘ricerca paziente’ dell’architettura”, in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), *L’architetto tra tecnologia e progetto*, Franco Angeli, Milano, 1994, pag. 55.

Guerrini, G. L., “Applications of High-Performance Fiber- Reinforced Cement-Based Composites”, in *Applied Composite Materials*, vol. 7, 2000, pp. 195-207.

Hack, N. e Lauer, W. V., “Mesh-mould: robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork”, in *Architectural Design*, vol. 84, 2014, pp. 44-53.

Hallnäs, L. *et alii*, “Textile displays: using textiles to investigate computational technology as design material”, in *Proceedings of the 2nd Nordic Conference on Human-computer interaction*, New York, Marzo 2002, pp. 157-166.

Hanifan, L., “The Rural School Community Center”, in *Annals of the American Academy of Political and Social Scienze*, vol. 67, 1916, pp. 130-138.

Hannah, D., *Fibre Cements and Fibre Concretes*, John Wiley&Sons, Somerset, 1978.

Hardin, G., “The Tragedy of the Commons”, in *Science*, vol. 162, 1968, pp. 1243-1248.

Hart, C.W.L, “Mass customization: conceptual underpinnings, opportunities and limits”, in *International Journal of Service Industry Management*, vol. 6, 1995, pp. 36-45.

Heiskanen, E. e Jalas, M., “Dematerialization through services. A review and evaluation of the debate”, in *The Finnish Environment*, vol. 236, 2000.

Herman, R., Ardekani, S.A. e Ausubel, J.H., “Dematerialization”, in *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 37, 1990.

Hilgenberg, K., “Conoscere l’innovazione. L’anatomia di un tema”, in Epifani, S. *et alii* (a cura di), *Decidere l’innovazione. Come misurare, valutare e scegliere il cambiamento*, Sperling&Kupfer Editori, Piacenza, 2006, pp. 7-38.

Hinterberger, F. e Schmidt-Bleek, F., “Dematerialization, MIPS and Factor 10. Physical sustainability indicators as a social device”, in *Ecological Economics*, vol. 29, 1999.

Huijben, F. *et alii*, “Vacuumatics 3D-formwork systems: customized free-form solidification”, in Oñate, E. e Kröplin, B. (a cura di), *Proceedings of the International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures – Structural Membranes*, Stuttgart, 2009.

Hull, C., *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, brevetto depositato presso United States Patent, 1986.

–, “On Stereolithography”, in *Virtual Phys. Prototyp*, vol 7, 2012.

International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*, OECD/IEA, 2017.

Illich, I., *La convivialità. Una proposta libertaria per una politica dei limiti allo sviluppo*, trad. it. Cucchi, M., Boroli Editore, Novara, 2005, pag. 14 (ed. orig. *Tools for Conviviality*, Calder and Boyars, Londra, 1973).

Imai, M., *Kaizen: The Key To Japan's Competitive Success*, McGraw-Hill Education, New York, 1986.

Imperiale, A., “An american wartime dream: the packaged house system of Konrad Wachsmann and Walter Gropius”, in *Proceedings of ACSA Fall Conference/Modular Building Institute*, Philadelphia, 27-29 settembre 2012.

Iori, T. e Poretti, S., “Pop structures/Pop Concrete”, in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futuro*, Skira Editore SpA, Milano, 2016, pp. 36-51.

Januszkiewicz, K. e Banachowicz, M., “Non-linear Shaping Architecture Designed Using Evolutionary Structural Optimization Tools”, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 245, 2017, pp. 1-9.

Jencks, C., “Landform Architecture: Emergent in the Nineties”, in Carpo, M. (a cura di), *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*, John Wiley and Sons Publication, Chichester, 2013, pp. 88-107 (ed. orig. 1997).

Jiao, J. e Tseng, M.M., “A methodology of developing product family architecture for mass customization”, in *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 10, 1999, pp. 3-20.

Juenger, M. e Siddique, R., “Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete”, in *Cement and Concrete Research*, vol. 78, 2015, pp. 71-80.

Kamien, M. e Schwartz, N., *Market Structure and Innovation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982

Kastler, A., *Cette étrange matiére*, Stock, Paris, 1976.

Kaufmann, J. *et alii*, “Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes”, in *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp 541-549.

Keating, S. e Oxman, N., “Compound fabrication: A multi-functional platform for digital design and fabrication”, in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, 2013, pp. 439-448.

Khoshnevis, B., “Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies”, in *Journal of Automation in Construction*, vol. 13, 2004, pp. 5-19

Khoshnevis, B. e Hwang, D., “Contour crafting – a mega scale fabrication technology”, in *Journal of Industrial and Manufacturing Systems Engineering*, vol. 6, 2004, pp. 221-251.

Kline, S. J. e Rosenberg, N., “An overview of innovation”, in Landau, R. e Rosenberg, N. (a cura di), *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth*, National Academies Press, Washington DC, USA, 1986, p. 275.

Kohlhase, N. e Birkhofer, H., “Development of modular structures: the prerequisite for successful modular products”, in *Journal of Engineering Design*, vol. 7, 1996, pp. 279-291.

Kolarevic, B., “Introduction”, in Kolarevic, B. (a cura di), *Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing*, Spon Press, New York-Londra, 2003, pp. 1-16.

Koren, B. e Muller, T., “Digital fabrication of non-standard sound-diffusing panels in the large

hall of the Elbphilharmonie", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 122-129.

Korpa, A. *et alii*., "Principles of development, phase composition and nanostructural features of multiscale Ultra High Performance Concrete modified with pyrogenic nanoparticles – A review article", in *American Journal of Materials Science and Application*, vol. 2, 2014, pp. 17-30.

Krausmann, F. *et alii*, "Growth in global material use, GDP and population during the 20th century", in *Ecological Economics*, vol. 68, 2009, pp. 2696-2705.

Kuhn, T., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, trad. it. Carugo, A., Einaudi, 2009, ed. orig. *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962.

Le Corbusier, *Verso una Architettura*, trad.it. Cerri, P. e Nicolin, P., Longanesi, Milano, 1973 (ed. orig. *Vers une Architecture*, Cres, Parigi, 1923).

Labonnote, N. *et alii*, "Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities", in *Automation in Construction*, vol. 72, 2016, pp. 347-366.

La Creta, R., "L'architetto tra tecnologia e progetto", in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), *L'architetto tra tecnologia e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994, pp. 7-18.

Lacy, P. *et alii*, *Circular Economy. Dallo spreco al valore*, trad. it. Vegetti, M., Egea, Segrate, 2016 (ed. orig. *Waste to Wealth. The Circular Economy Advantage*, Palgrave Macmillan, London, 2015)

Lampel, J. e Mintzberg, H., "Customizing Customization", in *Sloan management review*, gennaio, 1996, pp. 21-30.

Lankard, D., "Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON): Properties and Applications", in *Materials Research Society*, vol. 42, 1985, pp. 227–286.

Legault, R., "The Semantincs of Exposed Concrete", in Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete*, Birkhäuser – Publisher for Architecture, Basel-Berlin-Boston, 2006, pp. 46-56.

Legge 160/2019, Bilancio di previsione dello stato per l'anno finanziario 2020 e bilancio pluriennale per il triennio 2020-2022.

Leone, M., *Cemento nanotech. Nanotecnologie per l'innovazione del costruire*, CLEAN, Napoli, 2012.

Lévy, P., *L'intelligenza collettiva. Per un'antropologia del cyberspazio*, trad. it. Colò, M. e Feroldi, D., Giangiacomo Feltrinelli Editore, Milano, 2002 (ed. orig. *L'intelligence collective. Pour une anthropologie du cyberspace*, Éditions La Découverte, Parigi, 1994).

Lim, S. *et alii*, "Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components", in *Additive manufacturing*, vol. 12, 2016, pp. 216-230.

Lloret, E. *et alii*, "Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication", in *Computer-Aided Design*, vol. 60.

Losasso, M., *Percorsi dell'innovazione. Industria edilizia, tecnologie, progetto*, CLEAN, Napoli, 2010.

–, "Il progetto come prodotto di ricerca scientifica", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 2, 2011, pp. 78-85.

–, "Tra teorie e prassi: cultura, tecnologia, progetto", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, 2017, pp. 9-13.

–, "Produrre il progetto nell'era digitale", in in Lauria, M., Mussinelli, E. e Tucci, F. (a cura di), *La Produzione del Progetto*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2019, pp. 213-217.

Lothenbach, B. *et alii*, "Supplementary cementitious materials", in *Cement and Concrete Research*, vol. 41, 2015, pp. 1244-1256.

Lowke, D. *et alii*, "Particle-based 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges", in *Cement and Concrete Research*, vol. 112, 2018, pp. 50-65.

Lynn, G., "Architecture Curvilinearity: the Folded, the Pliant and the Supple", in Carpo, M. (a cura di), *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*, John Wiley and Sons Publication, Chichester, 2013, pp. 29-44 (ed. orig. 1993).

Mainka, J. *et alii*, "A novel precise formwork-technology based onCNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements", in *Proceedings of the International Society Of Flexible Formwork (ISOFF) Symposium 2015*, Amsterdam, 16-17 agosto 2015.

Mainka, J. *et alii*, "Non-Waste wax formwork-technology: Innovative precision formwork for concrete members made of recyclable industrial waxes", in Bögle, A. e Grohmann, M. (a cura di), *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017*, Amburgo, 22-25 settembre 2017, Amburgo.

Makita T., e Brühwiler, E., "Fatigue behaviour of bridge deck slab elements strengthened with reinforced UHPFRC", in *Proceedings of IABMAS: Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa*, giugno 2012, pp. 1974-1980;

Maldonato, T., *Disegno industriale: un riesame*, Giangiacomo Feltrinelli Editore, 2008, (ed. orig. 1976).

–, *Reale e virtuale*, Giangiacomo Feltrinelli Editore, Milano, 2015, (ed. orig. 1992)

Manfron, V., "Buckminster Fuller: la ricerca Dymaxion, una storia americana tra innovazione e utopia", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione tra tecniche e architettura*, Franco Angeli, Milano, 2002, pp. 81-94.

Manzini, E., *The material of invention*, trad. in. Shugaar, A., The Mit Press, Cambridge, 1989 (ed. orig. *La materia dell'invenzione. Materiali e progetto*, Arcadia, Milano, 1986).

–, "Geologia dell'artificiale", in *Alfabeta*, vol. 106, 1988, pp. 1-2.

–, "Superfici comunicative. Dal sistema degli oggetti alla scena interattiva globale", in *Quaderni Di*, vol. 8, 1989, pp. 19-26

–, *Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale*, Domus Academy, Milano, 1990.

Marchon, D. *et alii*, "Molecular design of comb-shaped polycarboxylate dispersants for environmentally friendly concrete", in *Soft Matter*, vol. 9, 2013, pp. 10719-10728.

Mari, E., *Autoprogettazione?*, Edizioni Corraini, Mantona, 2002, (ed. orig. 1974).

Maruyama, I. e Teramoto, A., "Temperature dependence of autogenous shrinkage of silica-fume cement pastes with a very low water-binder ratio", in *Cement and Concrete Research*, vol. 50, 2013, pp. 41-50.

Mata-Falcón, J., "Exploiting the Potential of Digital Fabrication for Sustainable and Economic Concrete Structures", in Wangler, T. e Flatt, J. R. (a cura di), *Proceedings of the First RILEM*

International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018, Zurigo, 10-12 settembre 2018, pp. 157-166.

Mayr, E., *Populations, Species and Evolution*, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, 1963.

–, *What Evolution is*, Phoenix, Londra, 2002.

Megat Johari, M. *et alii*, "Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash", in *Construction and Building Materials*, vol. 30, 2012, pp. 281-288.

Meibodi, L. *et alii*, "The smart takes from the strong. 3D printing stay-in-place formwork for concrete slab construction", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 210-217.

Menges, A. e Ahlquist, S., "Introduction", in Menges, A. e Ahlquist, S. (a cura di), *Computational Design Thinking*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2011, pp. 10-29

Micelli, S., *Fare è innovare. Il nuovo lavoro artigiano*, Il Mulino, Bologna, 2016.

Mimram, M. *et alii*, "Roofing of Montpellier – South of France TGV station", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 ottobre 2017, pp. 837-856.

Ministero dell'Ambiente e Ministero dello Sviluppo Economico, *Strategia Energetica Nazionale SEN 2017*, 2017.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *NTC - Norme Tecniche per le Costruzioni, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 2018.

Mitchell, W. J., *Computer-aided architectural design*, Petrocelli/Charter, New York, 1977.

–, "Constructing complexity", in *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures*, Vienna, 20-22 giugno 2005, pp. 41-50.

–, "A New Agenda for Computer-Aided Design", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 86-93 (ed. orig. 1990).

Monosilio, F. (ANCE), *Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni*, presentazione tenutasi a Roma il 15 gennaio 2020.

Morel, P., "Un cemento del XXI secolo per un'architettura del XXI secolo", in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futuro*, Skira Editore SpA, Milano, 2016, pp. 26-35.

Müller, F. *et alii*, "Dematerialization – A Disputable Strategy for Resource Conservation Put under Scrutiny", in *Resources*, vol. 6, n. 68, 2017.

Mumford, L., *Tecnica e cultura*, trad.it. Gentilli, E., Il Saggiatore, Milano, 2005 (ed. orig. *Technics and Civilization*, Harcourt Barace&Company, San Diego, 1934).

Naboni, R. e Paoletti, I., *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Springer, Berlino, 2014.

Nardi, G., "Prefabbricazione chiusa e prefabbricazione aperta", in Nardi, G. (a cura di), *Progettazione architettonica per sistemi e componenti*, Franco Angeli, 1977.

Nardi, G., "Progettare: il declino della cultura materiale. L'architetto dimezzato", in *Costruire per*

abitare, n. 44, 1986, pp. 236-243.

–, "Dialogo sul pensiero inventivo in architettura", in Boeri, R. *et alii* (a cura di), *Il pensiero inventivo*, Edizioni Unicopli, 1988, pp. 249-264.

–, "La cultura dell'innovazione", *L'Arca*, n.65, nov. 1992, pp. 86-87.

–, "Euristica e Architettura", in Bonfantini, M. *et alii* (a cura di), *La vita inventiva. Il Club Psòmega per Renato Boeri*, Edizioni scientifiche italiana, Milano, 1998, pp. 114-126.

–, "Innovazione. Sue caratteristiche nell'architettura", in Zanelli, A. (a cura di), *Ricerche di tecnologia dell'architettura*, Libreria Clup, Milano, 2000, pp. 20-24.

–, "Cultura tecnica", in Bertoldini, M. (a cura di), *Saperi e saperi. Teoria e pratica nel progetto di architettura*, Libreria Clup, Milano, 2002, pp. 21-38.

Negroponte, N., *Being Digital*, Vintage Books, New York, 1995,

–, "Towards a Humanism Through Machines", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 78-85 (ed. orig. 1969).

Nelson, R.R. e Winter. S.G., *An Evolutionary Theory of Economic Change*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, USA, 1982.

Nematollahi, B. *et alii*, "A review on ultra high performance 'ductile' concrete (UHPdC) technology", in *International Journal of civil and structural engineering*, vol. 2, 2012, pp. 1003-1018.

Nishida, A. *et alii*, "Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene fibre for spalling resistance", in *Proceedings of the International Symposium on Concrete under Severe Conditions*, Sapporo, agosto 1995.

Norman, D., *The design of everyday things*, Basic Books, New York, 2013.

Noshiravani, T. e Brühwiler, E., "Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear", in *ACI Structural Journal*, vol. 110, 2013, pp. 251-262.

Oesterlee, C., *Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members*, Tesi di Dottorato, N. 4848, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Svizzera, 2010.

Onderdonk, F., *The Ferro-concrete Style: Reinforced Concrete In Modern Architecture, With Four Hundred Illustrations Of European And American Ferro-concrete Design*, Hennessey & Ingalls, Los Angeles, 1998 (ed. orig. 1928).

Ortega, L., *The Total Designer. Authorship in architecture in the postdigital age*, Actar Publishers, New York-Barcellona, 2017.

Osterle, S. *et alii*, "Zero Waste Free-Form Formwork", in *Proceedings of ICFF 2012*, University of Bath UK, 2012.

Ostrom, E., *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

Oxman, R., "Theory and design in the first digital age", in *Design Studies*, vol.27, 2006, pp. 229-265.

Oxman, R. e Oxman, R., "Introduction", in *Architectural Design – Special Issue*, vol. 80.

– (a cura di), "The New Structuralism. Design, engineering and architectural technologies", in

Architectural Design – Special Issue, vol. 80, 2010.

Pahl, G. e Beitz, W., *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer, Londra, 1996.

Paris, T., "Cultura del progetto e cultura della tecnica", in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), *L'architetto tra tecnologia e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994, pag. 89.

Peduzzi, P., *Sand, rarer than one thing*, UNEP-Global Environmental Alert Service (GEAS), 2014, pp. 1-15.

Pegna, J., "Application of cementitious bulk materials to site processed solid freeform construction", in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 1995.

–, "Exploratory investigation of solid freeform construction", in *Automation in Construction*, vol. 5, 1997, pp. 427-437.

Pelisser, F. *et alii*, "Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete", in *Materials Research*, vol. 15, 2012, pp. 679-686.

Perano, M. e Maturo, A., "L'evoluzione del concetto di innovazione", in Ventriglia, F. (a cura di), *La Strategia di Innovazione. Opzioni e problematiche valutative*, Giappichelli Editore, Torino, 2005, pp. 3-45.

Pereira De Oliveira, L. e Castro-Gomes, J., "Physical and mechanical behaviourof recycled PET fibre reinforced mortar", in *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011, pp. 1712–1717.

Perkins, I. e Skitmore, M., "Three-dimensional printing in the construction industry: a review", in *International Journal of Construction Management*, vol. 15, 2015, pag. 3.

Petrignani, A., "Introduzione del seminario di studi sulle Problematiche e Prospettive della industrializzazione edilizia per componenti", in *Bollettino n. 5 del Centro di documentazione sulla industrializzazione edilizia*, Dedalo, Bari, 1968.

Piazza, G., "Come si inventa la scienza", in Boeri, R. *et alii* (a cura di), *Il pensiero inventivo*, Edizioni Unicopli, Milano, 1988, pp. 171-181.

Picon, A., "Architecture and Technology: Two Century of Creative Tensions", in Cohen, J. e Moeller, M. (a cura di), *Liquid Stone. New Architecture in Concrete*, Birkhäuser – Publisher for Architecture, Basel-Berlin-Boston, 2006, pp. 8-19.

Pine, J., "Making mass customization happen: Strategies for the new competitive realities", in *Planning Review*, vol. 21, 1993, pp. 23-24.

Pine, J., *et alii*, "Making Mass Customization Work", in *Harvard Business Review*, settembre-ottobre 1993, pp. 108-116.

Pone, S. e Colabella, S., *Maker. La fabbricazione digitale per l'architettura e il design*, Progedit, Bari, 2017.

Powers, T.C. e Brownyard, T.L., "Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste", in *Research Laboratories of the PCA*, Bulletin 22, 1948.

Putnam, R., *Capitale sociale e individualismo*, trad. it Cartocci, R., Il Mulino, Bologna, 2004, pag. 14 (ed. orig. *Bowling Alone: The Collpase and Revival of American Community*, Simon and Schuster, New York, 2001).

Radjou, N. e Prabhu, J., *Frugal Innovation. Come fare di più con meno*, trad. it Cherubini, B. e Buffoni, M., Rubettino Editore, Soveria Mannelli, 2016 (ed. orig. *Frugal Innovation. How to do more with Less*, Profile Books, London, 2015).

Rahmani, T. *et alii*, "Application of different fibers to reduce plastic shrinkage cracking of concrete", in Scarpas, A. *et alii* (a cura di), *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, Springer, Berlino, 2012, pp. 635-642.

Ramadevi, K., Manju, R., "Experimental investigation on the properties of concrete with plastic PET (bottle) fibres as fine aggregates", in *Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, 2012, pp. 42–46.

Ratti, C., *Architettura Open Source. Verso una progettazione aperta*, Giulio Einaudi Editore, Torino, 2014.

Raymond, E., *The Cathedral and the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary*, O'Reilly Media, Sebastopol, 1999.

Raworth, K., *L'economia della ciambella. Sette mosse per pensare come un economista del XXI secolo*, trad. it. Cella, E., Edizioni Ambiente, Milano, 2017 (ed. orig. *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st Century Economist*, Random House, London, 2017).

Rebolj, D. *et alii*, "Can we grow buildings? Concepts and requirements for automated nano to meter-scale building", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, 2011, pp. 390-398.

Rees, W. e Wackernagel, M., *Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth, New Society Pub*, Gabriola Island, 1995.

Reichlin, A., "Standardizzazione", in *Dan*, vol. 6, Roma, 1969.

Reijnders, J., "The factor X debate: setting targets for eco-efficiency", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, pp. 13-21.

Resplendino, J., "Introduction: what is a UHPFRC?", in Resplendino, J. e Toutlemonde, F. (a cura di), *Designing and Building with UHPFRC. State-of-the-Art and Development*, ISTE, London and John Wiley&Sons, Hoboken, 2011, pp. 3-14.

Resplendino, J. e Toutlemonde, F., "The UHPFRC revolution in structural design and construction", in *Proceedings of RILEM, fib, AFGC Int. Symposium on Ultra-high Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2013*, Marsiglia, 1-3 ottobre 2013.

Ricciotti, R., *L'architecture est un sport de combat*, Textuel, Paris, 2013.

Richard, P. e Cheyrezy, M., "Composition of Reactive Powder Concrets", in *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp. 1501-1511, 1995.

Ridolfi, G., "La condizione contemporanea del progetto. Rapporto sul matema digitale", in Lauria, M., Mussinelli, E. e Tucci, F. (a cura di), *La Produzione del Progetto*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2019, pp. 388-395.

Rifkin, J., *La Terza Rivoluzione Industriale. Come il «potere laterale» sta trasformando l'energia, l'economia e il mondo*, trad. it. Canton, P., Mondadori, Milano, 2018 (ed. orig. *The Third Industrial Revolution*, Palgrave Macmillan, Londra, 2011).

–, *La società a costo marginale zero. L'Internet delle cose, l'ascesa del «Commons» collaborativo e l'eclissi del capitalismo*, trad. it. Vanni, L., Mondadori, Milano, 2017, pag. 15 (ed. orig. *The Zero Marginal Cost Society*, Palgrave Macmillan, Londra, 2014).

Rogers, R. "Intervista", in D'Alessandro, M. (a cura di), *Eteronomia versus autonomia. Dodici interviste su progetto di architettura e progresso scientifico*, Dedalo, Roma, 1997, pp. 168-179.

Rose, C., "The Comedy of the Commons: Custom, Commerce, and Inherently Public Property",

in *The University of Chicago Law Review*, vol. 53, 1986, pp. 711-781.

Rossi, A., "Intervista", in *Modulo*, n. 145, 1988, pp. 1264-1269.

Roy, D., *et alii*, "Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques", in *Cement and Concrete Research*, vol. 2, 1972, pp. 349-366.

Ruffilli, M., "Aspetti della progettazione architettonica nella evoluzione della società industriale", in Spadolini P. L. (a cura di), *Design e tecnologia, un approccio progettuale all'edilizia industrializzata*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1974.

Ruffray N. *et alii*, "Complex architectural elements from HPFRC and 3D printed sandstone", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 ottobre 2017.

Ruskin, J., *La natura del Gotico*, trad. it. Mattioli, C., Jaca Book, Milano, 2016 (ed. orig. "The nature of Gothic", in *The Stones of Venice*, vol. 2, London, 1851-1853).

Russo Ermolli, S. (a cura di), *The Changing Architect. Innovazione tecnologica e modellazione informativa per l'efficienza dei processi*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2018.

Sabbadin, E., "Disegnare l'innovazione. Le traiettorie del marketing", in Epifani, S. *et alii* (a cura di), *Decidere l'innovazione. Come misurare, valutare e scegliere il cambiamento*, Sperling&Kupfer Editori, Piacenza, 2006, pp. 129-186.

Saggio, A., *The IT Revolution in Architecture. Thoughts on a paradigm shift*, trad. eng. Jackson, S., Carocci, Roma, 2007, pag. 16 (ed. orig. *Introduzione alla Rivoluzione Informatica in Architettura*, Carocci, Roma, 2007).

Sasaki, M., *Morphogenesis of Flux Structures*, AA Publications, Londra, 2007.

Sass, L. e Oxman, R., "Materializing design: the implications of Rapid Prototyping in digital design", in *Design Studies*, vol. 27, 2006, pp. 325-355.

Saviour, N., "Environmental impact of soil and sand mining: a review", in *International Journal of Science, Environment and Technology*, vol. 1, 2012, pp. 125-134.

Schmidt-Bleek, F., *Wieviel Umwelt braucht der Mensch. MIPS: Das Mass für ökologisches Wirtschaften*, Birkhäuser Verlag, Berlino, 1994.

Schmidt-Bleek, F., "Dematerialisation – From Concept to Practice", in *Dematerialisering – en strategi för uthållig utveckling*, seminar, Stoccolma, 16 giugno 1996.

Schmookler, J., *Invention and economic growth*, Harvard University Press, Cambridge, 1966.

Schumacher, P., "A New Global Style", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londra, 2017, pp. 240-257 (ed. orig. 2009).

Schumpeter, J.A., *Teoria dello sviluppo economico*, trad.it. Berti, L., Rizzoli Etas, Milano, 2013 (ed. orig. *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*, Duncker & Humblot, Berlino, 1911).

–, *Capitalism, Socialism and Democracy*, Harper and Row, New York, 1975.

Schwab, K., *The Fourth Industrial Revolution*, Currency, New York, 2016.

Scrivener, K. L. *et alii*, "Eco-Efficient Cements: Potential, Economically Viable solutions for a Low-CO2 Cement-Based Materials Industry", in *United Nations Environment Program*, 2017.

Scott, R., "The Closing Circle: A Review of Barry Commoner's Book", in *IUSTITIA*, vol. 1, 1973.

SETRA-AFGC, *Interim recommendations for ultra high performance fiber-reinforced concrete, Association Française du Génil Civil (AFGC)*, 2013.

Shahab, A. *et alii*, "Smart dynamic casting or how to exploit the liquid to solid transition in cementitious materials", in *Proceedings of the 1st international conference on rheology and processing of construction materials and of the 7th international conference on self-compacting concrete*, Parigi, 2013.

Sinopoli, N., "L'innovazione tecnologica in edilizia: una premessa", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, Franco Angeli, Milano, 2001, pp. 7-20.

Sinopoli, N., "Cinquant'anni di innovazione tra domanda e mercato", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione tra tecniche e architettura*, Franco Angeli, Milano, 2002, pp. 21-42.

Sischka, J., "Engineering the construction of the Great Court Roof fot the British Museum", in Barnes, M. e Dickson, M. (a cura di), *Widespan Roof Structures*, Thomas Telford Publishing, Londra, 2000, pp. 199-207.

Smalley, R., "Of Chemistry, Love and Nanobots", in *Scientific American*, vol. 285, 2001, pp. 76-77.

Smith, A., *Teoria dei sentimenti morali*, trad.it. Di Pietro, S., Rizzoli BUR, Milano, 2013 (ed. orig. *The Theory of Moral Sentiments*, London, 1759).

–, *Lezioni di Glasgow*, trad. it. Zompanti Oriani, V., Giuffrè Editore, Milano, 1989.

Smith, R., *Prefab Architecture. A guide to modular design and construction*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2011.

Sobek, W., "Radical sources of design engineering", in *Architectural Design – Special Issue*, vol. 80, 2010.

Soliman, A. M., *Early-Age Shrinkage of Ultra High-Performance Concrete: Mitigation and Compensating Mechanisms*, Electronic Thesis and Dissertation Repository, 2011.

Spadolini, P., "Design e tecnologia: struttura e contenuti di un campo di indagine", in Spadolini P. (a cura di), *Design e tecnologia, un approccio progettuale all'edilizia industrializzata*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1974.

–, "Progettare nel processo edilizio", in Zaffagnini, M. (a cura di), *Progettare nel processo edilizio. La realtà come scenario per l'edilizia residenziale*, Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1981.

Spinelli, L., "Quando l'infrastruttura diventa paesaggio", in *Domus*, 2007, disponibile all'indirizzo https://www.domusweb.it/it/architettura/2007/10/17/quando-l-infrastruttura-diventa-paesaggio.html.

Sreebha, S. e Padmalal, D., "Environmental impact assessment of sand mining from the small catchment rivers in Southwestern Coast of India: a case study", in *Environmental Management*, vol. 47, 2011, pp. 130-140.

Stallman, R., "Manifesto GNU", in *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, vol. 10, 1985.

Stansfield, K., "British Museum: the Great Court", in *The Structural Engineer*, vol. 77, 1999.

Stoneman, P., *Soft Innovation. Economics, Product Aesthetics, and the Creative Industries*, Oxford University Press, Oxford, 2010.

Suh, N., *The Principles of Design*, Oxford University Press, New York, 1990.

Sun, W. *et alii*, "The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete", in *Cement and Concrete Research*, vol.31, 2001, pp. 595-601.

Sungwook, K. *et alii*, "Shrinkage Behavior of Ultra High Performance Concrete at the Manufacturing Stage", in Schmidt, M. *et alii* (a cura di), *Proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel University Press, Kassel, 7-9 marzo 2012, pp. 317-324.

Szabo, A. *et alii*, "Adapting Smart Dynamic Casting to Thin Folded Geometries", in Wangler, T. e Flatt, J. R. (a cura di), *Proceedings of the First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*, Zurigo, 10-12 settembre 2018, pp. 81-93

Tatum, C.B. *et alii*, "Constructability improvement using prefabrication, pre-assembly and modularization", in *Technical Report*, vol. 297, Construction Industry Institute, Standford University, novembre 1986.

Tang, M. e Zhang, M., "Impact of Product Modularity on Mass Customization Capability: An Exploratory Study of Contextual Factors", in *International Journal of Information Technology and Decision Making*, vol. 16, 2017, pp. 939-959.

Taniguchi, N., "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'", in *Proc. Intl. Conf. Prod. Eng., Part II*, Japan Society of Precision Engineering, Tokyo, 1974.

Tay, J., "Ash from oil-palm waste as concrete material", in *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 2, 1990, pp. 94-105.

Tedeschi, A., *AAD_Algorithms-Aided Design*, Le Penseur, Brienza, 2014.

The Economist, *The third industrial revolution*, 21 aprile 2012.

The Green New Deal. A Blue Print for Europe's Just Transition, Draft for Public Consultation, 2019. Disponibile all'indirizzo: https://report.gndforeurope.com/.

Thibaux, T., "UHPFRC Development: The Experience of BSI® Applications", in Resplendino, J. e Toutlemonde, F. (a cura di), *Designing and Building with UHPFRC. State-of-the-Art and Development*, ISTE, London and John Wiley&Sons, Hoboken, 2011, pag. 63-76.

Thurik, R, "Entreprenomics: Entrepreneurship, Economic Growth, and Policy", in Acs, Z. *et alii* (a cura di), *Entrepreneurship, Growth, and Public Policy*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009, pp. 219-249.

Toffler, A., *Future Shock*, Random House, New York, 1970.

–, *The Third Wave. The classic study of tomorrow*, William Morrow edition, New York, 1980.

–, *Powershift*, Bantam Books, New York, 1990.

Torres, A. *et alii*, "A looming tragedy of the sand commons", in *Science*, vol. 357, 2017, pp. 970-971.

Toyo Ito&Associates e Balmond, C., "Geometric Algorithm. Serpentine Gallery Pavilion 2002", in Sakamoto, T. e Ferré, A. (a cura di), *From Control to Design. Parametric/Algorithmic Architecture*, Actar-D, Barcellona, 2012, pp. 36-43.

Trummer, P., "Associative Design. From Type to Population", in Menges, A. e Ahlquist, S. (a cura di), *Computational Design Thinking*, John Wiley&Sons Inc, Hoboken, 2011, pp. 179-197.

Tucci, F., "Resilienza ed economie green per il futuro dell'architettura e dell'ambiente costruito", in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 15, 2018.

–, "Requisiti, approcci, visioni, nelle prospettive di sviluppo della Progettazione Tecnologica", in Lauria, M., Mussinelli, E. e Tucci, F. (a cura di), *La Produzione del Progetto*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, 2019, pp. 35-43.

Trucy, L. *et alii*, "Ultra High Performance Shotcrete: yes we can!", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 ottobre 2017, pp. 153-161.

Truppi, C., "La dimensione tecnologica del progetto", in La Creta, R. e Truppi, C. (a cura di), *L'architetto tra tecnologia e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994, pag. 29.

UNI, *UNI EN 1992-1-1:2015 Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici*.

UNI, *UNI 7699:2018 - Prova sul calcestruzzo indurito – Determinazione dell'assorbimento di acqua alla pressione atmosferica*.

UNI, *UNI 11164: 2005 - Calcestruzzo. Determinazione della permeabilità all'ossigeno*.

UNI, *UNI 11307: 2008 - Prova sul calcestruzzo indurito. Determinazione del ritiro*.

UNI, *UNI EN 12350-1:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 1: Campionamento e apparecchiatura comune*.

UNI, *UNI EN 12350-2:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 2: Prova di abbassamento al cono*.

UNI, *UNI EN 12350-3:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 3: Prova Vébé*.

UNI, *UNI EN 12350-4:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 4: Indice di compattabilità*.

UNI, *UNI EN 12350-5:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 5: Prova di spandimento alla tavola a scosse*.

UNI, *UNI EN 12350-6:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 6: Massa volumica*.

UNI, *UNI EN 12350-7:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 7: Contenuto d'aria - Metodo per pressione*.

UNI, *UNI EN 12350-8:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 8: Calcestruzzo autocompattante - Prova di spandimento e del tempo di spandimento*.

UNI, *UNI EN 12350-9:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 9: Calcestruzzo autocompattante - Prova del tempo di efflusso*.

UNI, *UNI EN 12350-10:2019: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 10: Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante scatola ad L*.

UNI, *UNI EN 12350-11:2010: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 11: Calcestruzzo autocompattante - Prova di segregazione mediante setaccio*.

UNI, *UNI EN 12350-12:2010: Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 12: Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante anello a J*.

UNI, *UNI EN 12390-1:2012: Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 1: Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme*.

UNI, *UNI EN 12390-2:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza*.

UNI, *UNI EN 12390-3:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini*.

UNI, *UNI EN 12390-4:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 4: Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova*.

UNI, *UNI EN 12390-5:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 5: Resistenza a flessione dei provini*.

UNI, *UNI EN 12390-6:2010: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 6: Resistenza a trazione indiretta dei provini*.

UNI, *UNI EN 12390-7:2019: Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 7: Massa volumica del calcestruzzo indurito*.

UNI, *UNI EN 12390-8:2019 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 8: Profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione*.

UNI, *UNI EN 12390-9:2019 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 9: Resistenza al gelo-disgelo con sali disgelanti – Scagliatura*.

UNI, *UNI EN 12390-10:2019 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 10: Determinazione della resistenza alla carbonatazione del calcestruzzo a livelli atmosferici di anidride carbonica*.

UNI, *UNI EN 12390-11:2015 - Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 11: Determinazione della resistenza ai cloruri del calcestruzzo, diffusione unidirezionale*.

UNI, *UNI EN 12390-13:2013: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 13: Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione*.

UNI, *UNI EN 12390-14:2018: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 14: Metodo semi-adiabatico per la determinazione del calore rilasciato dal calcestruzzo durante il suo processo di indurimento*.

UNI, *UNI EN 12390-15:2019: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 15: Metodo adiabatico per la determinazione del calore rilasciato dal calcestruzzo durante il suo processo di indurimento*.

UNI, *UNI EN 12390-16:2019: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 16: Determinazione del ritiro del calcestruzzo*.

UNI, *UNI EN 12390-17:2019: Prova sul calcestruzzo indurito. Parte 17: Determinazione della viscosità (creep) del calcestruzzo in compressione*.

UNI, *UNI EN 14630:2007 – Determinazione della profondità di carbonatazione di un calcestruzzo indurito con il metodo della fenolftaleina e protezione dell'armatura del calcestruzzo*.

UNI, *UNI EN 14651:2007: Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione della resistenza a trazione per flessione*.

UNI, *UNI EN 14889-1:2006: Fibre per calcestruzzo - Parte 1: Fibre di acciaio - Definizioni, specificazioni e conformità*.

UNI, *UNI EN 14889-2:2006: Fibre per calcestruzzo - Parte 2: Fibre polimeriche - Definizioni, specificazioni e conformità*.

United Nations Environment Program, *Global Green New Deal*, UNEP Publishing, Brussels, BE, 2008.

–, *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*, UNEP Publishing, Brussels, BE, 2011.

–, *Green Economy Coalition*, UNEP Publishing, Brussels, BE, 2012.

Usher, A. P., *A History of Mechanical Inventions*, Harvard University Press, Cambridge, 1954 (ed. orig. 1929).

Utterback, J.M. e Abernathy, W.J., "A Dynamic Model of Process and Product Innovation", *OMEGA The International Journal of Management Science*, vol. 3, n. 6, 1975.

Vacca, H. *et alii*, "Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete with calcium carbonate as a substitute of cementitious material", in *Proceedings of the 2nd International Interactive Symposium on UHPC*, Albany, 2-5 giugno, 2019.

Vähä, P., "Extending automation of building construction – survey on potential sensor techcnologies and robotic applications", in *Automation in Construction*, vol. 36, pp. 168-178.

Vallgårda, A. e Sokoler, T., "A material strategy: Exploring material properties of computers", in *International Journal of Design*, vol. 4, 2010, pp. 1-14.

Van Campenhout, L. *et alii*, "Physical interaction in a dematerialized world", in *International Journal of Design*, vol. 7, 2013.

Van Damme, H., "Concrete material science: Past, present, and future innovations", in *Cement and Concrete Research*, vol. 112, 2018, pp. 5-24.

Velikov, K., Thun,G. e Tish, D., "Infundibuliforms. Kinetic systems, additive manufacturing for cable nets and tensile surface controls", in Menges, A. *et alii* (a cura di), *Fabricate. Rethinking design and construction*, UCL Press, Londr-a, 2017, pp. 84-91.

Venturi, R., *Complexity and Contradiction in Archtitecture*, Museum of Modern Art, New York, 1977 (ed. orig. 1966).

Vinci, A., "Oltre il prodotto: altre forme di innovazione", in Losasso, M., *Percorsi dell'innovazione. Industria edilizia, tecnologie, progetto*, CLEAN, Napoli, 2010, pp. 83-94.

Vinodh, S. *et alii*, "Agility through rapid prototyping technology in a manufacturing environment using a 3D printer", in *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 20, 2009, pp. 1023-1041.

Vitek *et alii*, "Precast structural elements made of UHPC", in Toutlemonde, F. e Resplendino, J. (a cura di), *Proceedings of AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPFRC 2017*, Montpellier, 2-4 ottobre 2017, pp. 115-124.

Vittoria, E., "Progetto cultura tecnica", in *Controspazio*, vol. 3, 1983, pp. 38-42.

Vogt, T., "Buying time – Using Nanotechnologies for a Sustainable Future", in Fiedeler, U. *et alii* (a cura di), *Understanding Nanotechnology*, AKA Verlag, Berlino, 2010, pp. 43-60.

Voyatzaki, M., "Rompere gli schemi", in Andriani, C. (a cura di), *Cemento Futur*o, Skira Editore, Milano, 2016, pp. 52- 67.

Wildemann, H., *Komplexitaetsmanagement: Vertrieb, Produkte, Beschaffung*, TCW Tranfer-Centrum, Monaco, 2000.

Winner, L. "Do Artifacts Have Politics?", in *Daedalus*, vol. 109, 1980, pp. 121-136.

Woodbury, R., *Elements of Parametric Design*, Routledge, Londra-New York, 2010.

Wong, H. e Kwan, A., "Packing density of cementitious materials: part 1– measurement using a wet packing method", in *Materials and Structures*,vol. 41, 2008, pp. 689–701.

World Commission on Environment and Development, *Our common future*, a cura di Brundtland, G., Oxford University Press, Oxford, 1987. Disponibile anche all'indirizzo https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf.

Wu, L. *et alii*, "Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review", in *Construction and Building Materials*, vol. 149, 2017, pp. 62-75.

Wu, P. *et alii*, "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry", in *Automation in Construction*, vol. 68, 2016, pp. 21-31.

Xie, Y e Steven, G., "Shape and layout optimization via an evolutionary procedure", in *Proceedings of the International Conference on Computational Engineering*, Hong Kong, 1992.

–, "A simple evolutionary procedure for structural optimization", in *Computers and Structures*, vol. 49, 1993, pp. 885-886.

Yang, R. *et alii*, "Low carbon design of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) incorporating phosphorous slag", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 240, 2019, pp. 118-128.

Young J. F. e Berg M., "Macro-defect-free cement: A novel organoceramic composite", in *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 271, 1992.

Zaera, A. e Moussavi, F., *Phylogenesis: FOA's Ark*, Barcellona, Actar, 2003.

Zaffagnini, M., *Il componenting*, Ente autonomo Fiere di Bologna, Bologna, 1968.

Zanuso, M., "Cultura progettuale e cultura industriale", in *Caleidoscopio*, Gruppo Industriale Businelli, n. 29, 1983.

Zennaro, P., "Lo 'stile Jean Prouvè'", in Sinopoli, N. e Tatano, V. (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione tra tecniche e architettura*, Franco Angeli, Milano, 2002, pp. 99-103.

Zhong, R. *et alii*, "Material efficiency in the design of UHPC paste from a life cycle point of view", in *Construction and Building Materials*, vol. 160, pp. 505-513.

SITOGRAFIA

Aalborg Portland, *History*, https://www.aalborgportlandholding.com/history/;

Adapa, https://adapa.dk/.

Adapa, *Materials*, https://adapa.dk/materials/.

Bouygyes Group, https://www.bouygues.com/en/.

Buzzi, A., *Il contributo della filiera del calcestruzzo all'economia circolare*, casaclima.com.

CementirHolding, http://www.cementirholding.it/.

Contour Crafting, *Home*, http://contourcrafting.com/.

D-Shpae, *Company*, https://d-shape.com/company/.

Enciclopedia Treccani, *Arts and Crafts*, http://www.treccani.it/enciclopedia/arts-and-crafts.

Enciclopedia Treccani online, *Innovazione*, http://www.treccani.it/vocabolario/innovazione/.

Enciclopedia Treccani online, *Marketing*, http://www.treccani.it/enciclopedia/marketing/.

Enciclopedia Treccani online, *Spillover*, http://www.treccani.it/enciclopedia/spillover/.

Etsy, https://www.etsy.com/it/about.

Fab@Home, www.creativemachineslab.com.

Federbeton, *La nostra mission*, https://www.federbeton.it/La-Federazione/La-nostra-mission.

Federbeton, *Infrastrutture sostenibili: al Saie di Bari la proposta di Federbeton per il rilancio del paese e del comparto*, casaclima.com.

IAAC, *Fab Lab House*, https://divisare.com/projects/332964-iaac-adria-goula-fab-lab-house.

iFixit, *Right to Repair*, https://it.ifixit.com/Right-to-Repair.

Il Post, *Che fine hanno fatto i fondatori di Napster?*, https://www.ilpost.it/2014/06/29/fondatori-napster/.

Ingenio, *ATECAP: crescita possibile solo con rilancio delle infrastrutture e delle costruzioni*, https://www.ingenio-web.it/23419-atecap-crescita-possibile-solo-con-rilancio-delle-infrastrutture-e-delle-costruzioni.

InJob, *Design e Arredamento Made in Italy: trend di crescita*, 2019, https://www.injob.com/it/it/storie-di-business/arredamento-e-design-i-numeri-di-un-settore-in-crescita.

Italcementi: al via i lavori di adeguamento del primo ponte in Italia con calcestruzzi high-tech, casaclima.com.

Italcementi, *Effix*, https://www.italcementi.it/it/idesign-EFFIX.

Italcementi, *La nostra storia*, https://www.italcementi.it/it/la-nostra-storia.

Karamba 3D, www.karamba3d.com.

Kulish Design Co., https://kulishdesignco.com/.

LafargeHolcim, https://www.lafargeholcim.com/.

Labini, M.S., *Dizionario Treccani di Economia e Finanza*, http://www.treccani.it/enciclopedia/innovazione_%28Dizionario-di-Economia-e-Finanza%29/.

Lerbini, A., *Atecap, innovazione e ricerca per rilanciare il calcestruzzo e le costruzioni*, ediliziaeterritorio.ilsole24ore.com.

Linux.it, *Cos'è Linux*, https://www.linux.it/linux.

Make:community, https://make.com.

MakerBot, https://www.makerbot.com/.

Modus Architects, *Treehugger*, https://www.modusarchitects.com/en/work/projects/offices-commercial/treehugger.

NIH, *ImageJ*, https://imagej.nih.gov/ij/.

OECD-Eurostat, *Oslo Manual. Guidelines for collecting and interpreting Innovation data*, 2005. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/OSLO?inheritRedirect=true.

PERI, *Rundflex*, https://www.peri.it/prodotti/casseforme/rundflex.html.

RepRap, https://reprap.org/wiki/RepRap.

Russo, D., "La situazione dell'industria del mobile in Italia nel 2019", in *Linkiesta*, 2019, https://www.linkiesta.it/it/blog-post/2019/08/01/la-situazione-dellindustria-del-mobile-in-italia-nel-2019/28244/.

Russo Spena, R., *Progresso e Utopia: la "Metropolis" di King Camp Gillette e la "Universal Architecture" di Richard Buckminster Fuller*, www.esempidiarchitettura.it, 2017.

Rutten, D., *Evolutionary Principles applied to Problem Solving using Galapagos*, 2010, https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles.

Sika, *Chi siamo: storia*, https://ita.sika.com/it/chi-siamo/storia.html.

Taktl, https://www.taktl-llc.com/.

The Future of Creative Commons, https://wiki.creativecommons.org/images/c/ce/Future-of-creative-commons.pdf.

The Opera House Project, *Concept, Design, Architecture*, http://theoperahouseproject.com/#!/concept-design-architecture/.

Ufficio Comunicazione Federbeton, *Il futuro delle costruzioni è già qui*, www.stradeeautostrade.it.

Waagner biro, wb-sg.com.

Walo, *Chillon Viaducts*, https://walo.com/case-studies/chillon-viaducts-switzerland/.

Wikipedia, *Bouygues*, https://it.wikipedia.org/wiki/Bouygues

Wikipedia, *Eiffage*, https://it.wikipedia.org/wiki/Eiffage; Eiffage, eiffage.com.

Wikipedia, *Mesh poligonale*, https://it.wikipedia.org/wiki/Mesh_poligonale.

Wikipedia, *Processo markoviano*, https://it.wikipedia.org/wiki/Processo_markoviano.

Wikipedia, *Rhodia (company)*, https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodia_(company).

Wikipedia, *Summit della Terra*, https://it.wikipedia.org/wiki/Summit_della_Terra.

Wikipedia, *Wikipedia*, https://it.wikipedia.org/wiki/Wikipedia.

Wikipedia, *YouTube*, https://it.wikipedia.org/wiki/YouTube.

Ufficio Comunicazione Federbeton, *Il futuro delle costruzioni è già qui*, www.stradeeautostrade.it.

RINGRAZIAMENTI

In cima alla lista dei ringraziamenti non può che esserci il Prof. Mario Losasso che, calcolando anche la tesi di laurea, è ormai mio relatore dal 2015: lo ringrazio per essere stato una preziosa guida durante questi anni e per avermi riportato in carreggiata tutte le (numerose) volte che sono uscita fuori strada.

Ringrazio il Prof. Raphaël Fabbri che per primo mi ha introdotto agli ultra-performanti e tutto l'Atelier Masse: Marino Tosi, Matthias Carrière, Agathe Seroux, Camille Chevrier e Paul Boulc'h.

Ringrazio la Dott.ssa Cinzia Palazzetti che mi ha aperto le porte de il Cantiere, dove ho imparato moltissimo. Ringrazio, inoltre, Riccardo Sabaini per le involontarie lezioni di marketing, Stefano Rossi e tutto lo staff, in ufficio e in produzione. Un particolare ringraziamento va a Laura, Lorenzo, Fulvio, Massimo, Antonella, Catia, Giovanni, Omar, Marcelo e Max.

Ringrazio la Prof.ssa Barbara Liguori che mi ha seguito durante lo svolgimento delle prove di durabilità presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale dell'Università Federico II di Napoli. Ringrazio, inoltre, l'Ing. Assunta Campanile, il cui aiuto è stato fondamentale e sinceramente apprezzato.

Ringrazio, naturalmente, i miei compagni di viaggio e, in particolare, Marina Block, compagna di banco prima di partire per mete lontane, Valentina Vittiglio e Giulia Proto, le altre "industriali" con cui ho condiviso questo percorso, e Giovanni Spizuoco, con cui abbiamo contato battute fino all'ultimo giorno. Ringrazio anche i Proff. Massimo Perriccioli e Mattia Leone, per i libri e per i consigli, e tutti i colleghi incrociati negli anni e in particolare Rosa Scognamiglio, Luciano Ambrosini, Anita Bianco, Federica dell'Acqua ed Enza Tersigni.

Ringrazio gli amici di sempre: Daria e Giandonato, che ringrazio anche per avermi ospitato innumerevoli volte, Maria Giovanna e Francesco, Eugenio, Corrado, Gianluca, Davide e Gianni.

Ringrazio, infine, i miei genitori e Sino per avermi sempre incoraggiato e supportato.

Ringrazio per ultimo, come promesso, Giampaolo, perché è il più importante.

Marzo 2020