

Università degli Studi di Napoli "Federico II"
Scuola di Dottorato in Architettura

Dipartimento di Configurazione e Attuazione dell'Architettura
Dipartimento di Progettazione Urbana e di Urbanistica

Dottorato di ricerca in Tecnologia dell'Architettura
XXI ciclo

Dottorando: arch. Mattia Federico Leone

Tutor: prof. arch. Mario Losasso

INNOVAZIONE TECNOLOGICA E MATERIALI AVANZATI

*ALTE PRESTAZIONI ED ECO-EFFICIENZA: NANOTECNOLOGIE
PER L'EVOLUZIONE DEI MATERIALI CEMENTIZI*

Il coordinatore
prof. arch. Augusto Vitale

INDICE

INTRODUZIONE. I MATERIALI AVANZATI PER L'ARCHITETTURA

1. <u>I materiali avanzati e la cultura del costruire</u>	
1.1. <i>Il ruolo dei materiali avanzati nel progetto di architettura</i>	7
1.2. <i>“Accumulo” prestazionale e gestione della complessità</i>	9
2. <u>Materiali avanzati: definizioni e caratteristiche</u>	
2.1. <i>Definizioni</i>	13
2.2. <i>Caratteristiche e proprietà</i>	16
2.3. <i>Criteri di classificazione: materiali “high performance” e materiali “smart”</i>	18

PARTE PRIMA. LE NANOTECNOLOGIE NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI: RICERCA, INNOVAZIONE E MERCATO

3. <u>Il ruolo delle nanotecnologie nel settore delle costruzioni</u>	
3.1. <i>Le “tecnologie molecolari”: dalla microinnovazione alle nanotecnologie</i>	23
3.1.1. La “materia progettata”: i livelli di intervento sui materiali per l'architettura	23
3.1.2. Nuovi percorsi dell'innovazione. Dematerializzazione, eco-efficienza e materiali <i>knowledge based</i>	27
3.1.3. L'impatto delle nanotecnologie nei settori produttivi	34
3.1.4. Le nanotecnologie: una innovazione radicale per il progetto di architettura	38
3.2. <i>Nanomateriali e materiali nanostrutturati: definizioni e classificazioni</i>	40
3.2.1. Nanoscala e nanomateriali	40
3.2.2. Materiali nanostrutturati e nanocompositi	44
3.2.3. Processi produttivi e di sintesi	49

4. <u>Le nanotecnologie per l'edilizia</u>	
4.1. <i>L'innovazione nel campo delle nanotecnologie per i materiali edilizi</i>	52
4.1.1. Problematiche attuali nei processi di trasferimento tecnologico nel settore edilizio	52
4.1.2. Gli attori dei processi di innovazione: ricerca scientifica e industria	55
4.1.3. Caratteristiche del mercato delle nanotecnologie per i prodotti edilizi	59
4.2. <i>Le ricadute ambientali e il ruolo delle normativa</i>	63
4.2.1. Nanotecnologie, ambiente e salute: i fattori di rischio e le potenzialità offerte	63
4.2.2. Prodotti innovativi e aggiornamento del quadro normativo internazionale	67
5. <u>Applicazioni dei materiali nanostrutturati in architettura</u>	
5.1. <i>L'impatto dei materiali nanostrutturati sull'architettura</i>	72
5.1.1. Nanotecnologie e architettura: percorsi evolutivi e fattori di criticità	72
5.1.2. Le applicazioni architettoniche dei materiali nanostrutturati	76
5.1.3. Le caratteristiche innovative dei materiali nanostrutturati e l'offerta dei prodotti	82
5.2. <i>Materiali nanostrutturati ed ecoefficienza</i>	90
5.2.1. Il controllo dell'eco-efficienza nel ciclo di vita dei prodotti	90
5.2.2. Il contributo dei materiali nanostrutturati all'eco-efficienza del processo edilizio	92
PARTE SECONDA. MATERIALI CEMENTIZI NANOSTRUTTURATI	
6. <u>Materiali cementizi nanostrutturati: alte prestazioni ed eco-efficienza</u>	
6.1. <i>Nanotecnologie per l'innovazione dei materiali cementizi</i>	99
6.1.1. Materiali cementizi per il XXI secolo: processi innovativi e ricadute ambientali	99
6.1.2. Il contributo delle nanotecnologie all'evoluzione dei prodotti a base cementizia	107
6.1.3. L'apporto delle nanotecnologie all'eco-efficienza dei materiali cementizi	115
6.1.4. Le applicazioni architettoniche: materiali cementizi nanostrutturati nella nuova edificazione e nel recupero	117

6.2. <i>Le tipologie di prodotti: caratteristiche e prestazioni</i>	122
6.2.1. Le tipologie di prodotti attualmente sul mercato	122
6.2.2. Le tipologie di materiali in fase di sperimentazione	134
6.2.3. Schedatura di prodotti nanostrutturati a base cementizia in commercio	138
7. <u>Prodotti convenzionali e nanostrutturati a confronto</u>	
7.1. <i>Premessa metodologica: strumenti di analisi e modalità di confronto tra opzioni tecnologiche</i>	145
7.1.1. Parametri di confronto tra materiali cementizi tradizionali e nanostrutturati	145
7.1.2. Indicatori sintetici per valutazioni preliminari al progetto: gli indicatori di sostenibilità e la metodologia LCA	146
7.2. <i>I materiali UHPC - Ultra High Performance Concrete</i>	149
7.2.1. Il contributo degli UHPC all'eco-efficienza del processo edilizio	149
7.2.2. Definizioni ed elementi costitutivi	152
7.2.3. Caratteristiche e proprietà	159
7.3. <i>I progetti realizzati con UHPC</i>	164
7.3.1. Problematiche progettuali e prestazioni meccaniche	164
7.3.2. Schedatura di progetti e realizzazioni	168
7.4. <i>La valutazione delle opzioni tecnologiche: UHPC vs C.A.</i>	183
7.4.1. Un caso applicativo per una struttura a telaio	183
7.4.2. Elaborazione del prototipo virtuale	184
7.4.3. Soluzioni progettuali elaborate per il confronto	188
7.5. <i>Analisi degli impatti nel ciclo di vita</i>	190
7.5.1. Definizione dei confini del sistema	190
7.5.2. Dati di origine per il confronto	191
7.5.3. Risultati del confronto	193
▪ Pre-produzione e produzione	
▪ Trasporto	
▪ Costruzione	
▪ Esercizio e gestione	
▪ Dismissione e riciclaggio	
7.5.4. Risultati sintetici	198
7.5.5. Analisi dei risultati	200

APPENDICE A - Fogli di calcolo fase di produzione	204
APPENDICE B - Fogli di calcolo fase di trasporto	206
APPENDICE C - Fogli di calcolo fase di costruzione	207
APPENDICE D - Fogli di calcolo fase di gestione	209
APPENDICE E - Fogli di calcolo fase di dismissione	210
BIBLIOGRAFIA	213
SITOGRAFIA	220

INTRODUZIONE

I MATERIALI AVANZATI PER L'ARCHITETTURA

1. I MATERIALI AVANZATI E LA CULTURA DEL COSTRUIRE

1.1. Il ruolo dei materiali avanzati nel progetto di architettura

Negli ultimi anni le innovazioni prodotte nel campo dei materiali hanno radicalmente modificato il modo di concepire e realizzare gli organismi edilizi. Nuovi prodotti e sistemi si affacciano ogni giorno sul mercato, ampliando le alternative a disposizione del progettista, ma anche il bagaglio di conoscenze necessarie per un corretto impiego di tecnologie sempre più innovative basate spesso sull'utilizzo di materiali avanzati.

Generalmente è possibile definire come "avanzati" quei materiali che possiedono proprietà meccaniche, termiche, chimiche, elettriche decisamente superiori rispetto ai materiali tradizionali o che presentano elevati livelli prestazionali derivanti da particolari e inedite conformazioni chimico-fisiche. Si tratta di materiali "progettati su misura" per una specifica esigenza (Langella, 2003), ottimizzando le prestazioni espresse in relazione al "contenuto" materico.

I materiali avanzati impiegati in ambito edilizio derivano spesso da processi di trasferimento tecnologico da altri settori industriali caratterizzati da forti spinte all'innovazione (quali il settore aeronautico, automobilistico o biomedico), in cui la ricerca nel campo di materiali con prestazioni sempre più elevate costituisce una condizione imprescindibile per la realizzazione di prodotti e sistemi più efficienti. Poiché generalmente in edilizia le innovazioni vengono assorbite in tempi più lunghi che in altri settori (sia dal punto di vista della produzione industriale che del progetto di architettura), affinché tali materiali siano acquisiti nella comune prassi costruttiva sono necessari processi di adattamento e di verifica delle prestazioni in condizioni d'uso che, uniti alle difficoltà tecnico operative legate all'impiego dei materiali avanzati e all'assenza di normative specifiche, tendono a ritardarne la diffusione.

In un'ottica del costruire sempre più orientata verso l'ottimizzazione e l'affidabilità delle prestazioni di prodotti e sistemi, nonché verso la sostenibilità economica e ambientale degli interventi architettonici, i materiali avanzati sembrano poter contribuire alla realizzazione di soluzioni più efficienti in termini di risparmio di risorse energetiche e materiali nell'intero ciclo di vita, attraverso l'utilizzo di minori quantità di materie prime, la capacità di facilitare e ridurre le operazioni di manutenzione necessarie, di produrre energia pulita o assorbire agenti inquinanti, di garantire durabilità e affidabilità prestazionale nel tempo. È necessario tuttavia tenere in considerazione le conseguenze legate ad un nuovo rapporto di equilibrio che tali materiali possono

instaurare con l'ambiente, fatto di continuo scambio di flussi di energia, di materia e di informazione che, se non pienamente controllati, possono avere anche impatti negativi sull'ambiente o sulla salute degli individui.

La sperimentazione sui nuovi materiali per l'architettura e l'ingegneria civile è senza dubbio un settore di ricerca sul quale convergono da tempo le attività di ricercatori, progettisti, produttori e imprese di costruzione. La proliferazione di materiali "avanzati", "innovativi", o semplicemente "nuovi", non è solo il frutto di tendenze generali del mercato che spingono verso una continua evoluzione dei prodotti offerti, ma riflette anche una mutata condizione nel rapporto tra l'uomo e le possibilità di trasformazione della materia che ha aperto la strada a una diversa modalità nello sviluppo, e perfino nella "creazione", di nuovi materiali. I progressi e l'interazione reciproca di ambiti tecnologici differenti (biotecnologie e nanotecnologie, tecnologie informatiche e di comunicazione), hanno, di fatto, rivoluzionato il mondo della chimica e della tecnologia dei materiali, moltiplicandone le potenzialità e le prospettive.

A valle del mondo della ricerca e della sperimentazione, avvicinandosi al progetto di architettura, l'entità delle informazioni che entrano in gioco¹ è tale da rendere necessaria una conoscenza approfondita delle innovazioni prodotte, volta alla possibilità di un'applicazione concreta e tecnicamente consapevole dei materiali che ogni giorno si affacciano sul mercato, considerando da un lato quelli destinati in maniera specifica al settore edilizio, ma individuando anche le potenzialità insite nei materiali soggetti a processi di trasferimento da altri settori.

Uno dei principali problemi da affrontare per un uso appropriato dei materiali cosiddetti *avanzati* riguarda infatti la qualità/quantità delle informazioni tecniche disponibili, che spesso risultano essere limitate e parziali, e soprattutto legate alla capacità e alla volontà di informare in maniera esaustiva da parte di chi produce tali materiali. Ciò si traduce inevitabilmente in una impossibilità da parte del progettista di valutare adeguatamente le opzioni tecnologiche a disposizione e di descriverle correttamente nel progetto, in termini sia di istruzioni sulle tipologie di materiali scelti e sulle modalità d'impiego, sia di richieste da rivolgere all'impresa che realizza il progetto. In molti casi, quindi, il progettista è portato ad escludere a priori la scelta di materiali e tecniche non

¹ Per avere un'idea della mole di informazioni tecniche relative ai nuovi materiali in commercio, basti pensare che *Material ConneXion*, il più grande centro di documentazione e ricerca sui materiali innovativi, fondato negli USA nel 1997 da George M. Baylerian e oggi presente anche a Milano, nel corso degli anni ha raccolto nella Library, la libreria dei materiali, una selezione di oltre 3.000 materiali e processi produttivi innovativi, provenienti da tutto il mondo. La Library si arricchisce ogni mese di 30-45 nuovi materiali, selezionati da una giuria internazionale e interdisciplinare tra quelli inviati direttamente da aziende, ricercatori e tecnici specializzati.

ancora codificate per timore di non riuscire a controllarne l'impiego. Tale quadro è reso ancor più delicato quando il progettista orienta le sue scelte verso materiali particolarmente innovativi e ancora poco sperimentati nel settore edilizio proponendone un uso inedito, attraverso processi di "innovazione adattiva".

Proporre un "uso innovativo" di materiali tradizionali o, ancor di più, l'uso di "nuovi" materiali diviene, quindi, una scelta difficile per il progettista, che, a sua volta, richiede un forte supporto di conoscenze culturali e tecniche. In questo senso, anche il progetto di architettura acquista un livello di complessità superiore, dovendosi arricchire di nuove competenze e configurandosi sempre di più come una sorta di "ponte" tra ambiti culturali e tecniche interdisciplinari (che vanno dalla fisica alla chimica, dall'informatica alla scienza e all'ingegneria dei materiali), che sappia muoversi tra la conoscenza delle potenzialità intrinseche delle nuove tecnologie e il loro impiego consapevole.

1.2. "Accumulo" prestazionale e gestione della complessità.

L'impiego di materiali avanzati porta dunque necessariamente i progettisti a prefigurare e gestire fenomeni con gradi di complessità ancora maggiori rispetto a quanto finora sperimentato. Se il governo di dinamiche complesse è ormai acquisito da tempo nella pratica operativa dell'architettura, oggi un ulteriore "accumulo" prestazionale generato da materiali con funzionalità nuove e migliorate, da materiali intelligenti, sensibili e attivi all'interno degli edifici, presuppone un approccio progettuale ancora più consapevole e capace di gestire le potenzialità e i rischi che accompagnano un loro impiego sempre più diffuso. La complessità "gestita" di cui parlava Manzini² propria dei materiali e dei prodotti sviluppati grazie alle nuove tecnologie, permette il controllo di fenomeni caratterizzati da un elevato numero di variabili con alto livello di interazione reciproca e stati di equilibrio dinamici.³ L'interazione con sistemi "quasi biologici"⁴ trasforma la

² Cfr. Ezio Manzini, *La materia dell'invenzione*, Milano, Arcadia, 1986, p. 30.

³ A questo proposito c'è chi individua nell'attuale livello tecnologico, parafrasando l'Edgar Morin de *La Methode*, la capacità di affrontare problemi caratterizzati da una "complessità organizzata", che si traduce ad esempio nella capacità di creare micro e nano-strutture spaziali a partire dalla conoscenza da parte dell'osservatore delle dinamiche di interazione della materia al livello elementare e dalla possibilità di controllarle e modificarle. Cfr. Sean Hanna, *Responsive Material/Responsive Structure*, Subtle Technologies, University of Toronto, 1 giugno 2006.

⁴ Cfr. Carla Langella, *Nuovi paesaggi materici: design e tecnologia dei materiali*, Alinea, Firenze, 2003. Nel testo si individua «una successione in quattro stadi principali, la cui linea di evoluzione conduce dai materiali grezzi primari ("bulk"), ancora molto vicini a quelli che Ezio Manzini definisce "materiali a complessità subita", fino a quelli ottenuti grazie alla manipolazione della struttura più intima della materia, che imita artificialmente i meccanismi biochimici e riesce ad ottenere raffinate forme di dinamismo *quasi-biologico*. Passando per due stadi intermedi, rispettivamente: quello dei compositi – caratterizzati dalla reciproca integrazione macroscopica di materiali diversi e dall'utilizzazione delle loro proprietà complementari per ottenere prestazioni aggiuntive, come ferro e calcestruzzo nel cemento armato – e quello dei materiali *funzionalizzati*, che riescono ad incorporare la capacità di reagire a specifiche sollecitazioni grazie all'apporto di sostanze capaci di modificare alcune delle loro caratteristiche fisico-chimiche, seppure ancora con risposte elementari e strettamente prevedibili, come le variazioni di trasparenza nei vetri fotocromatici o il recupero di una

prospettiva stessa dell'architettura, a cominciare dalla sua componente tecnologica, ponendole come obiettivo principale l'organizzazione dell'interfaccia tra uomo e ambiente a tutti i livelli: dallo scambio di flussi energetici e di informazioni, al prelievo delle risorse, alla loro gestione e trasformazione, al fine di garantire il benessere degli individui riducendo al contempo l'impronta ecologica di ogni azione antropica. Si tratta di obiettivi da tempo nell'agenda dei governi mondiali,⁵ che vedono nello sviluppo di tecnologie innovative (biotecnologie e nanotecnologie su tutte) nei processi industriali dei prodotti per l'edilizia (e di consumo in generale) una possibile risposta alle crescenti problematiche energetiche, ambientali e di sicurezza, in grado di garantire allo stesso tempo la competitività, la crescita e lo sviluppo economico.⁶

Per avvicinarsi concretamente, da progettisti, alla possibilità di sfruttare in maniera consapevole le potenzialità offerte dalle nuove tecnologie applicate ai materiali da costruzione, occorre dotarsi di strumenti di valutazione e di controllo che facciano riferimento quanto più possibile a dati certi, misurabili e confrontabili (cfr. cap. 7).

La necessità di un approccio analitico strutturato allo studio dei materiali avanzati deriva dalla constatazione che «le architetture che utilizzano questi materiali, richiedono crescenti livelli di conoscenza, un nuovo atteggiamento progettuale e un maggiore rigore nella definizione delle azioni di controllo e di mantenimento delle prestazioni nel tempo. L'alta tecnologia e la sua non compiuta sperimentazione fa, infatti, aumentare il rischio di rotture e/o malfunzionamenti che potrebbero compromettere l'efficienza dell'intero sistema».⁷

Le possibilità di un utilizzo appropriato di materiali avanzati è strettamente legata ad una reale conoscenza delle relative caratteristiche e condizioni di impiego – a partire da uno studio approfondito dell'informazione tecnica e dall'elaborazione dei dati progettuali attraverso protocolli e strumenti in grado di gestire la complessità dei fattori in gioco – poiché non sempre la scelta di un materiale “di per sé” innovativo è in grado di migliorare la durabilità, la sicurezza e la sostenibilità dell'architettura. È anzi possibile

sagoma geometrica preordinata nelle leghe metalliche a memoria di forma». Ernesto Antonini, “Materiali complessi”, in *Materia*, n. 58, giugno-agosto 2008, p. 144.

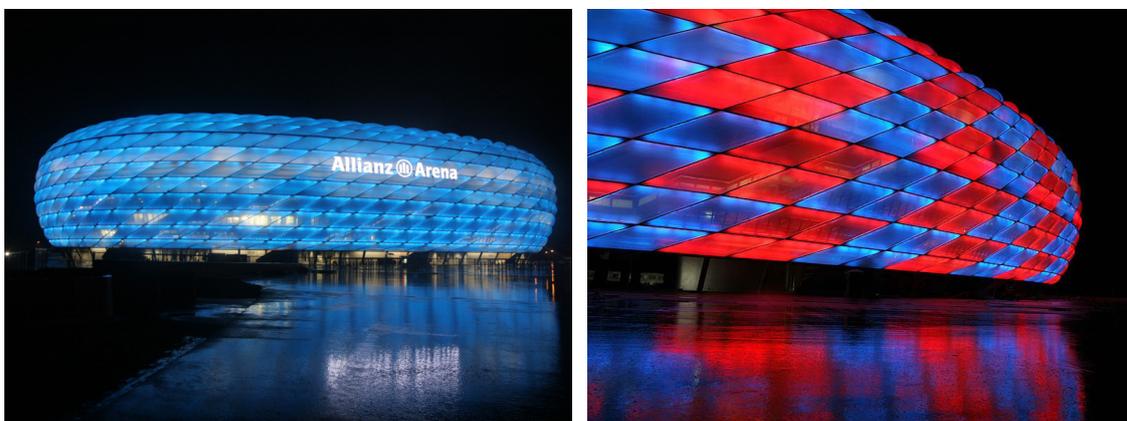
⁵ Cfr. European Construction Technology Platform (ECTP), *Strategic Research Agenda for the European Construction Sector. Achieving a Sustainable and Competitive Construction Sector by 2030*, Bruxelles, 2005.

⁶ Sulla effettiva possibilità di ottenere contemporaneamente “sviluppo” e “sostenibilità” attraverso le nuove tecnologie, si rimanda all'analisi di Serge Latouche, teorico della “decrescita”, che sottolinea come le realizzazioni innegabili e auspicabili della tecnica non contraddicono in alcun modo la logica suicida dello sviluppo, finalizzata unicamente al mantenimento dei profitti, anche attraverso la violazione sistematica del principio di precauzione (ad es. nel caso del nucleare, degli OGM, dei pesticidi, dell'amianto, ecc.) confermando l'ossimoro nascosto nella locuzione “sviluppo sostenibile”. Cfr. Serge Latouche, *Breve trattato per una decrescita serena*, Bollati Boringhieri, Torino, 2008, pp. 17-22.

⁷ Cfr. PRIN 2005, *Percorsi e gestione delle informazioni tecniche per la promozione e il controllo dell'innovazione nei materiali e nel progetto di architettura*. Coordinatore Scientifico del Programma di Ricerca: Attilio Nesi, Università degli Studi “Mediterranea” di Reggio Calabria. http://www.ricercaitaliana.it/prin/dettaglio_prin-2005089923.htm

che l'uso di materiali e prodotti che non hanno ancora raggiunto un adeguato livello di affidabilità possa portare a lungo termine a risultati complessivamente negativi.

Se allo stato attuale l'uso di materiali particolarmente avanzati resta ancora confinato nell'ambito di edifici caratterizzati da soluzioni ad alta tecnologia, si comincia ad assistere ad una progressiva fuoriuscita da un contesto "privilegiato" di sperimentazione, determinato dalla spinta tecnologica che comincia a rendere maggiormente accessibile ed economicamente conveniente il loro utilizzo. Lo sviluppo delle tecnologie di lavorazione, porta infatti verso l'affermazione di *custom-products* a costi assimilabili a quelli prodotti in serie, che si traduce, in particolar modo nel campo dell'architettura e del design, in una notevole crescita delle di opzioni e variabili tecnologiche.⁸



Herzog & de Meuron, Allianz Arena, Monaco. L'involucro dinamico e mutevole dello stadio realizzato in occasione dei mondiali di calcio del 2006 sfrutta al massimo le potenzialità offerte dalle tecnologie innovative (in questo caso cuscini di ETFE), fondendo insieme gli aspetti funzionali e legati alle condizioni di benessere con la carica comunicativa e rappresentativa dell'architettura.

In quest'ottica, diventa sempre più importante definire i possibili campi di applicazione dei nuovi prodotti in relazione alle caratteristiche prestazionali espresse, poiché le "proprietà ottimali"⁹ del materiale e del prodotto possono essere vanificate da un utilizzo errato o comunque non coerente con l'insieme del progetto. Da questo punto di vista si comprende anche come diventi essenziale per i progettisti poter interagire con tutti i settori chiave dei processi di trasformazione, dalla ricerca applicata al mercato,

⁸ Fino all'instaurarsi di rapporti privilegiati tra grandi progettisti e aziende produttrici di punta (come nel caso di Herzog & De Meuron con la Saint Gobain) che proprio nel campo dei materiali avanzati fanno convergere le ricerche comuni, per realizzare sistemi e componenti ad hoc da utilizzare in architetture che diventano poi il "veicolo" per una possibile diffusione.

⁹ Senza la pretesa di essere esaustivi, è possibile individuare alcune caratteristiche che accomunano gran parte dei "nuovi" materiali: minimo peso, massima flessibilità, minima/massima densità, massima resistenza alle sollecitazioni, massima resistenza alle abrasioni, massima resistenza alle temperature, massima sicurezza, minimo costo, minimo impatto ambientale. Cfr. N. Stattmann, *Ultra light – super strong. A new generation of design materials*, Birkhauser, Basel 2003, pag. 12.

dall'industria al cantiere, per saper rispondere in maniera adeguata alle sfide e alle nuove esigenze derivanti dalle innovazioni tecnologiche in atto; guardando all'evoluzione di settori di mercato che, una volta maturi, sembrano in grado di poter modificare profondamente le caratteristiche, il comportamento, l'aspetto degli edifici e la maniera di progettarli.

2. MATERIALI AVANZATI: DEFINIZIONI E CARATTERISTICHE

2.1. Definizioni

Benché la locuzione “materiale avanzato” sia di uso piuttosto comune e denoti in via generale qualunque materiale dotato di caratteristiche e proprietà non assimilabili a quelle dei materiali tradizionali, poco diffuso o confinato ancora in ambiti sperimentali, non è ancora diffusa una definizione condivisa che permetta di individuare le classi di materiali che è possibile includere in questa famiglia, evidentemente piuttosto articolata.

Una delle prime definizioni di “materiale avanzato” è data da Michael Bever nella sua *Encyclopedia of Advanced Materials*¹⁰, in cui definisce «materiali avanzati quei materiali in cui la caratteristica principale riguarda la capacità di sintesi e di controllo della struttura della materia al fine di ottenere un preciso insieme di proprietà su misura finalizzate ad applicazioni su richiesta».¹¹

Al di là di una definizione di questo tipo, peraltro assolutamente completa nella sua sintesi, è possibile ricercare ulteriori definizioni che possano meglio esplicitare le caratteristiche proprie dei materiali avanzati.

La genericità del termine “materiale” («materia, sostanza necessaria a un lavoro, destinata a un uso»¹²) implica una specificazione ulteriore dell’ambito che ci riguarda direttamente, dove per “materiale da costruzione” si intende un «materiale naturale o artificiale utilizzato per costruzioni edili, stradali, idrauliche».¹³

Una definizione più esaustiva proviene della Direttiva CE 89/106 sui prodotti da costruzione, che all’articolo 1 recita: «per materiale da costruzione s’intende *qualsiasi prodotto* fabbricato al fine di essere *permanentemente incorporato* in opere da costruzione, le quali comprendono gli edifici e le opere di ingegneria civile».¹⁴

Questa definizione risulta di particolare importanza sotto due punti di vista:

- sottolinea chiaramente la diretta connessione tra *materiale edile* e *prodotto industriale*, spostando in parte l’attenzione dal piano scientifico, della chimica e della fisica, e quindi della combinazione potenzialmente illimitata di elementi

¹⁰ L’opera rappresenta l’aggiornamento della *Encyclopedia of Materials Science & Engineering* del 1986 in cui Michael Bever affronta il problema della definizione degli ambiti di studio della scienza dei materiali.

¹¹ «Advanced Materials are defined as those where first consideration is given to the systematic synthesis and control of the structure of the material in order to provide a precisely tailored set of properties for demanding applications». Michael Bever et al., *The Encyclopedia of Advanced Materials*, Elsevier., Oxford, 1994.

¹² Enciclopedia Generale Mondadori, Verona, 1985.

¹³ Ivi.

¹⁴ Direttiva CE 89/106 del 21/12/1988, art. 1, comma 2.

semplici della materia, a quello appunto della produzione industriale, dove è necessario attribuire una finalità specifica al prodotto realizzato (in questo caso le “opere da costruzione”), sgombrando così il campo della ricerca da tutti quei materiali, scoperti o sintetizzati, per i quali non esiste un ambito produttivo destinato al settore edilizio.

- tende ad includere tra i materiali da costruzione anche una serie di dispositivi ed elementi, come i sensori e gli attuatori, che pur essendo destinati ad essere “*permanentemente incorporati*” negli edifici, non svolgono funzioni strutturali, di rivestimento o di protezione, ma piuttosto di “regolazione” o di “monitoraggio” di altre parti o elementi della costruzione.

L’aggettivo “avanzato”, ossia «che sta in avanti», «progredito, innovatore»¹⁵, rimanda direttamente all’idea di implementazione delle proprietà tipiche dei comuni materiali da costruzione. Inoltre, l’idea che un materiale da costruzione possa essere di per sé “innovatore”, suggerisce che in alcuni casi le caratteristiche possedute siano esse stesse in grado di introdurre nuovi attributi per il progetto di architettura.

Queste caratteristiche sono utili anche a definire meglio le relazioni esistenti tra materiale tradizionale e materiale avanzato, poiché è evidente che la principale differenza risiede nelle capacità prestazionali dei materiali, e non solo in una particolare o inedita conformazione fisico-chimica, per cui anche *materiali tradizionali “innovati” nelle loro prestazioni* (si pensi ad esempio ai calcestruzzi ad alte prestazioni o ai vetri fotocromici e termocromici) sono da considerarsi “avanzati” a tutti gli effetti.

Allo stesso modo particolari processi produttivi e di sintesi possono identificare alcune classi di materiali avanzati (si pensi ai nanocompositi, risultanti dall’accoppiamento a scala nanometrica di due o più materiali).

Negli ultimi venti anni molti autori hanno individuato o prefigurato in che modo le potenzialità dei nuovi materiali potessero incidere sul progetto e sulla costruzione dell’architettura. Già Ezio Manzini faceva notare come «oggi il possibile con cui interagire ha smesso di presentarsi nella forma di prestazioni congelate in pochi tangibili materiali. Di fronte al progettista si presenta un *insieme di potenzialità difficilmente riportabile a un modello mentale con cui lavorare*»¹⁶; circa un decennio più tardi Luigi Nicolais può affermare come «i nuovi materiali puntano ad una filosofia

¹⁵ Enciclopedia Generale Mondadori, Verona, 1985.

¹⁶ Ezio Manzini, *La materia dell’invenzione*, Milano, Arcadia, 1986, pag. 4.

totalmente diversa: il materiale viene progettato per l'applicazione specifica. Dunque *la progettazione di un oggetto non può prescindere dalla progettazione del materiale*. [...] Oggi il problema [della concezione strutturale degli elementi] è completamente diverso: ho un filo, una fibra, una resina, una matrice. Ora come il ragno realizza la sua tela noi possiamo realizzare il nostro oggetto». ¹⁷ Dall'inizio del ventunesimo secolo, tale prospettiva è mutata essenzialmente per il "cambio di scala" delle modifiche attuabili, che sono passate dalla scala *micro* alla scala *nano*, spostando ulteriormente «il margine di trasformazione possibile» ¹⁸ e ampliando in maniera esponenziale sia le potenzialità che i rischi connessi con l'uso di materiali sempre più avanzati e "quasi intelligenti". Le possibilità offerte dalle nuove tecnologie, unite alle problematiche crescenti legati alla necessità di ridurre sensibilmente il consumo di risorse materiali ed energetiche nel ciclo di vita dei prodotti e degli edifici, spingono a richiedere ai nuovi materiali contemporaneamente prestazioni elevate, affidabili, personalizzabili, e impatti ambientali minimi.

In base a tali considerazioni, è possibile definire come materiale (da costruzione) avanzato un materiale, o una classe di materiali, che rientri in una o più delle seguenti categorie:

- Materiali di nuova generazione o trasferiti nel settore edilizio
- Materiali progettati alla scala microscopica (o alla nanoscala) per applicazioni specifiche
- Materiali tradizionali "innovati" nelle loro prestazioni attraverso modifiche della struttura chimico-fisica
- Materiali risultanti dall'accoppiamento a scala microscopica (o alla nanoscala) di due o più materiali.
- Materiali in grado di modificare le proprie caratteristiche fisico-chimiche in relazione agli stimoli ricevuti.
- Materiali in grado fornire prestazioni variabili, selezionabili e controllabili.
- Materiali capaci di introdurre nuove prestazioni non raggiungibili né considerate in precedenza.
- Materiali caratterizzati da prestazioni molto elevate rispetto ai materiali tradizionali a parità di consumo di risorse materiali ed energetiche

¹⁷ Luigi Nicolais, "Progettare con i materiali compositi avanzati", in Umberto Caturano (a cura di), *Le tecnologie dei materiali tra progetto e innovazione*, FrancoAngeli, Milano, 1996, pag. 69.

¹⁸ «il problema è allora l'equilibrio tra la capacità di innovare [...] e la capacità di subordinare questi cambiamenti alla conservazione di una specifica identità, definendo il margine di trasformazione possibile». Silvano Tagliagambe, *L'albero flessibile. La cultura della progettualità*, Zanichelli, Bologna 1998, pag. 6.

2.2. Caratteristiche e proprietà

I materiali avanzati sono dunque generalmente caratterizzati da proprietà ottimizzate rispetto ai comuni materiali da costruzione in relazione allo specifico impiego previsto: possono essere in grado di fornire prestazioni variabili, selezionabili e controllabili, di modificare le proprie caratteristiche fisico-chimiche in relazione agli stimoli ricevuti, fino ad introdurre nuove proprietà e prestazioni non raggiungibili né considerate in precedenza.

Dal punto di vista delle proprietà specifiche, i materiali avanzati sono caratterizzati da una massima capacità di controllo della struttura molecolare e della sua composizione chimica (e quindi delle proprietà "intrinseche" della materia), e dalla capacità di sfruttare alla macroscale tali proprietà per ottenere un determinato comportamento in relazione allo stimolo ricevuto (proprietà "estrinseche").¹⁹ La corrispondenza delle proprietà e delle caratteristiche su più scale della materia è un dato fondamentale per comprendere il funzionamento di molte nuove classi di materiali.

PROPRIETÀ INTRINSECHE	
Proprietà meccaniche	Resistenza meccanica, rigidità, duttilità, modulo elastico, ecc.
Proprietà fisiche	Densità, conduttività, calore specifico, ecc.
Proprietà chimiche	Reattività, valenza, solubilità, ecc.
PROPRIETÀ ESTRINSECHE	
Proprietà meccaniche	Capacità di sostenere un carico o l'applicazione di una forza meccanica (comportamento sforzo/deformazione/rottura)
Proprietà elettriche/magnetiche	Capacità di conduzione/barriera per stimoli di origine elettrica o magnetica Capacità di convertire l'energia elettrica in altre forme (meccanica, termica, ecc)
Proprietà termiche	Capacità di conduzione/barriera per stimoli di origine termica Capacità di contrarsi/espandersi in relazione agli stimoli termici
Proprietà chimiche	Reattività a stimoli di origine chimica (contatto con liquidi o agenti aggressivi)
Proprietà ottiche	Comportamento in relazione a stimoli di origine luminosa (riflessione, trasmissione, assorbimento) Capacità di convertire l'energia della luce in altre forme (calore, elettricità, ecc.)

L'ampiezza della categoria dei materiali avanzati non permette di definire in maniera univoca le caratteristiche specifiche di ciascuno, tuttavia è possibile definire le tendenze in atto nella progettazione di nuovi materiali, che rappresentano in qualche

¹⁹ Cfr. Michelle Addington, Daniel Schodek, *Smart materials and technologies*, Elsevier, Oxford, 2005, pp. 38-41.

modo le attuali richieste prestazionali in relazione ai materiali da costruzione. Si tratta di requisiti “di progetto” del materiale, in base ai quali esso viene modificato nella struttura e nella composizione, oppure nel processo attraverso cui raggiunge la sua caratterizzazione finale.

È possibile individuare dunque i principali obiettivi alla base dello sviluppo dei materiali avanzati:²⁰

- Controllo completo delle proprietà dei materiali basato sulla conoscenza della struttura molecolare (porosità, microstruttura a comportamento alla nanoscala) per una completa libertà nel progetto strutturale e nell’aspetto fisico ed estetico dei componenti edilizi.
- Capacità di adeguare le proprie caratteristiche alle condizioni ambientali interne e a diverse tipologie di impiego, della destinazione d’uso, del comportamento degli utenti, ecc.
- Nuove funzionalità legate ad esigenze di comfort (resistenza ad ambienti aggressivi, igienicità e punibilità, controllo dell’umidità, isolamento termico, acustico ed elettromagnetico, reattività ai fattori ambientali, caratteristiche estetiche)
- Capacità di isolamento (termico, acustico, elettromagnetico) e di stoccaggio dell’energia (termica ed elettrica) aumentati almeno del 20% rispetto ai materiali convenzionali
- Introduzione delle biotecnologie e delle nanotecnologie per il controllo delle prestazioni offerte e il risparmio di risorse materiali ed energetiche nel processo produttivo e nel ciclo di vita
- Compatibilità con le tecnologie ICT all’interno degli edifici (sensori, monitoraggio, ecc.)
- Tempi e costi di produzione ridotti almeno del 30% grazie a processi innovativi, efficienti e *tailor made*
- Riduzione dei costi di montaggio, riparazione e manutenzione almeno del 20%
- Capacità di autodiagnosi dell’integrità fisica, controllo delle funzionalità e automanutenzione

²⁰ Cfr. European Construction Technology Platform (ECTP), *Strategic Research Agenda for the European Construction Sector. Achieving a Sustainable and Competitive Construction Sector by 2030*, Commissione Europea, 2005.

2.3. Criteri di classificazione: materiali *high performance* e materiali *smart*

Il problema della classificazione dei nuovi materiali è attualmente oggetto di studio nelle diverse discipline – scienza dei materiali, ingegneria e architettura – ciascuna tendendo ad organizzare la propria “paletta” in relazione a determinati aspetti caratterizzanti.

La classificazione tipica della scienza dei materiali è legata alla comprensione delle strutture interne della materia e si basa sulla composizione chimica della materia, in modo da conoscerne la processabilità a livello atomico e molecolare, e le proprietà specifiche (densità, conduttività elettrica, ecc.). In ambito ingegneristico la classificazione è orientata alla definizione delle possibilità applicative dei singoli materiali, e mette in relazione l’origine chimico-fisica (materiali organici, inorganici, leghe, materiali ferrosi, non metalli, compositi, ecc.) con le prestazioni (intrinseche ed estrinseche) e le modalità di produzione (stampaggio, laminazione, estrusione, ecc.).

In ambito architettonico la classificazione è fortemente legata agli aspetti normativi e prestazionali che determinano le possibili applicazioni dei materiali (visti dunque come “prodotti” industriali), in relazione alla rispondenza ai requisiti standard per gli edifici. La suddivisione del sistema edilizio individua “dove” un dato materiale viene impiegato, distinguendo ad esempio la struttura portante dai tamponamenti; di conseguenza le caratteristiche dei materiali sono specificate in relazione all’uso che se ne fa: si distinguono ad esempio le tipologie di legno impiegabili nelle strutture o nei serramenti. In altre parole «se la classificazione della scienza dei materiali spiega perché un materiale è diverso da un altro, quella ingegneristica determina come un materiale si comporta, e quella architettonica [...] indica cosa un materiale può essere e dove è utilizzato».²¹

È possibile individuare dunque due approcci prevalenti, il primo tipico della scienza e tecnologia dei materiali, il secondo più legato alle discipline architettoniche.

- in relazione all’*origine chimico-fisica* del materiale
- in relazione alle *prestazioni offerte* dal materiale

Per quanto riguarda il primo approccio, le modalità di classificazione dei materiali avanzati risulterebbero particolarmente complesse, considerato che la maggior parte di

²¹ Michelle Addington, Daniel Sodek, *Smart Materials and Technologies*, Elsevier, Oxford, 2005, p. 26.

essi è di natura composita. Tale sistema di classificazione, inoltre, non consente di associare direttamente un materiale ad una data funzione; è pur vero, però, che la connotazione chimico-fisica resta la matrice classificatoria fondamentale, per cui ogni metodo di classificazione non può prescindere dai necessari rimandi all'effettiva struttura della materia. Considerando gli attuali livelli di innovazione nel campo dei prodotti per l'edilizia, basati sulla modifica delle caratteristiche della materia per ottenere una sempre più spinta multiprestazionalità e multifunzionalità, il secondo approccio sembra più funzionale agli aspetti applicativi e dunque al progetto di architettura, offrendo un quadro chiaro delle potenzialità legate agli specifici impieghi ipotizzabili a prescindere dall'origine chimico-fisica, e della riconoscibilità materia di un dato prodotto.

Tra i materiali avanzati attualmente impiegati in ambito edilizio è possibile individuare due principali famiglie: i materiali *high performance*, con prestazioni fisse, in cui le proprietà finali sono selezionate e predeterminate attraverso particolari conformazioni chimico-fisiche e processi di sintesi; e i materiali *smart*, in grado di variare le proprie caratteristiche in risposta a stimoli esterni.

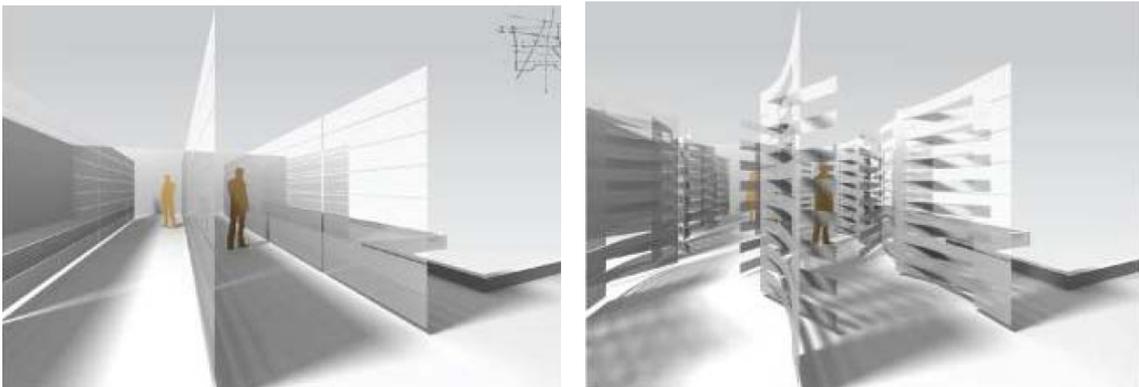
Tra i materiali *high performance* a prestazioni fisse è possibile distinguere:

- *materiali strutturali avanzati*, quali materiali compositi fibrorinforzati, calcestruzzi ad alte prestazioni, vetri strutturali, schiume metalliche e polimeriche, impiegati in diverse tipologie di applicazioni nelle quali la funzione richiesta è prevalentemente esprimibile in termini di proprietà meccaniche.
- *materiali termostrutturali*, quali fibre ignifughe e *flame retardant*, resine termoresistenti; ceramici avanzati; ceramiche trasparenti; high-performance ceramics; schiume ceramiche e ceramici leggeri con elevate proprietà termomeccaniche.
- *materiali a proprietà superficiali e di interfaccia*, quali rivestimenti e *coatings* nanostrutturati antiusura, anticorrosione, termici e fotocatalitici, vetri autopulenti, selettivi e bassoemissivi, che, se impiegati nell'involucro degli edifici, sono in grado di fornire una risposta a fattori ambientali di vario tipo grazie alla particolare conformazione chimico-fisica.

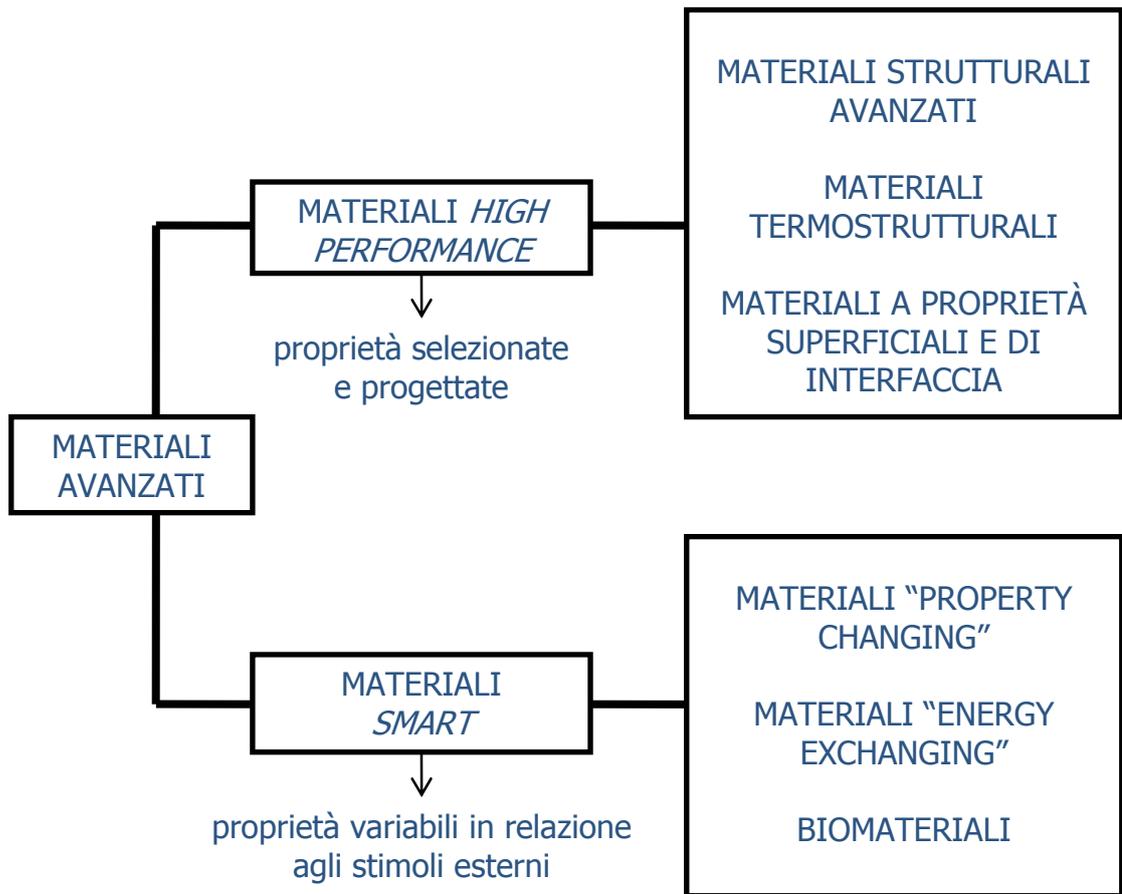
È possibile invece suddividere i materiali *smart* in due principali categorie:

- *materiali “property changing”*, come i materiali foto-termo-elettrocromici, i materiali a cambiamento di fase (magneto-elettroreologici, foto-termo-elettrotropici) e i materiali a memoria di forma, che modificano alcune proprietà (chimiche, meccaniche, ottiche, elettriche, magnetiche o termiche) in risposta al cambiamento delle condizioni ambientali senza la necessità di un sistema di controllo esterno.
- *materiali “energy exchanging”*, quali sensori e attuatori piezoelettrici, materiali foto-elettro-chimicoluminescenti; materiali organici per la conversione fotovoltaica, in grado di trasformare una forma di energia entrante in un'altra uscente in accordo con il primo principio della termodinamica e che vengono impiegati all'interno degli edifici come dispositivi per la produzione di energia o per sistemi di controllo.

È bene notare come una tale classificazione includa tipologie di materiali la cui applicazione in ambito edilizio è ormai consolidata (si pensi ai compositi fibrorinforzati impiegati per il consolidamento di strutture esistenti o per la realizzazione di componenti strutturali leggeri e resistenti) o per i quali la domanda è oggi in forte crescita (vetri bassoemissivi e selettivi per il risparmio energetico, sensori e dispositivi di controllo nel campo della domotica e della *building automation*), accanto a materiali impiegati solo in via sperimentale per i quali si intravedono tuttavia enormi prospettive nel settore delle costruzioni (come i rivestimenti nanostrutturati protettivi o fotocatalitici, materiali fotovoltaici organici o i materiali a memoria di forma).



L'uso di materiali *smart* consente di immaginare spazi architettonici dinamici, in cui l'aspetto degli spazi cambia a seconda della modalità di interazione con l'ambiente e con le persone. Il gruppo statunitense Urbana, nel progetto *Reactive Void*, combina l'impiego di materiali a memoria di forma con sofisticato sistema di sensori che si attivano in modo diverso a seconda delle tipologie di stimoli ricevuti.



- | | |
|---|--|
| MATERIALI STRUTTURALI | <ul style="list-style-type: none"> • materiali compositi fibrorinforzati • calcestruzzi ad alte prestazioni • vetri strutturali e componenti vetroceramici • schiume metalliche e polimeriche |
| MATERIALI TERMOSTRUTTURALI | <ul style="list-style-type: none"> • fibre ignifughe e flame retardant, resine termoresistenti • fibre di vetro e fibre ceramiche • ceramiche avanzate: ceramiche trasparenti e high-performance ceramics • schiume ceramiche e ceramici leggeri |
| MATERIALI A PROPRIETÀ SUPERFICIALI E DI INTERFACCIA | <ul style="list-style-type: none"> • rivestimenti [coatings] nanostrutturati antiusura, termici, anticorrosione • materiali fotocatalitici • vetri selettivi e bassoemissivi |
| MATERIALI "PROPERTY CHANGING" | <ul style="list-style-type: none"> • materiali foto-termo-elettrocromici • materiali a cambiamento di fase: magneto-elettroreologici, foto-termo-elettrotropici • materiali a memoria di forma |
| MATERIALI "ENERGY EXCHANGING" | <ul style="list-style-type: none"> • sensori e attuatori piezoelettrici e termoelettrici • materiali foto-eletto-chimicoluminescenti • materiali per la conversione fotovoltaica di nuova generazione |
| BIOMATERIALI | <ul style="list-style-type: none"> • materiali a microstruttura variabile • materiali biodegradabili e bioassorbibili |

Classificazione dei materiali avanzati. Elaborazione da Michelle Addington, Daniel Schodek, *Smart materials and technologies*, Elsevier, Oxford, 2005.

PARTE PRIMA

**LE NANOTECNOLOGIE NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI:
RICERCA, INNOVAZIONE E MERCATO**

3. IL RUOLO DELLE NANOTECNOLOGIE NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

3.1. Le “tecnologie molecolari”: dalla microinnovazione alle nanotecnologie

3.1.1. La “materia progettata”: i livelli di intervento sui materiali per l’architettura

Gli attuali livelli di innovazione nel settore dei materiali da costruzione pongono al centro dell’attenzione un diverso rapporto instauratosi tra l’uomo e il “progetto della materia”. Se in passato l’uomo aveva usato materiali naturali come il legno, l’argilla, la pietra, o artificiali come il cemento armato, l’acciaio o i polimeri, adattandoli agli usi specifici secondo la disponibilità locale e le potenzialità offerte dai sistemi produttivi esistenti, introducendo modifiche progressive alla struttura chimico-fisica dei materiali grazie alle nuove scoperte tecno-scientifiche, oggi, con il progressivo affinamento delle tecnologie di sintesi, la sperimentazione di nuove tecniche di lavorazione e un mercato globale che si configura come moltiplicatore delle possibilità di innovazione, è possibile, a partire da un’idea o un’intuizione, comporre le particelle elementari della materia per “creare” un materiale in grado di svolgere una determinata funzione.

Non si tratta dunque di una questione legata unicamente all’ambito tecnico-scientifico: l’uso dei nuovi materiali sembra in grado di poter contribuire alla risoluzione di problemi quali la limitatezza delle risorse, la crescita della produttività industriale, la garanzia di uno sviluppo costante, la competitività del mercato. E’ innegabile infatti che i materiali avanzati rappresentino l’alternativa e la continuità di crescita per una società moderna, oltre che una funzione chiave per contenere i costi e assicurare la flessibilità della produzione, a patto che siano in grado di rispondere adeguatamente alle attuali problematiche di tipo ambientale, come gli effetti nocivi dell’inquinamento prodotto in fase di lavorazione, le modalità di smaltimento dei rifiuti e i rischi per la salute dell’uomo.

Si è già sottolineato come l’uso di materiali avanzati implichi necessariamente una diversa cultura progettuale, poiché «gestire la complessità di questi materiali comporta l’acquisizione di una “neotecnica”»,²² e come la sempre più stretta connessione tra le sperimentazioni in campo architettonico e le ricerche ed innovazioni prodotte in ambito industriale mettano in risalto la necessità per i progettisti di saper governare l’impiego di tecnologie sempre più evolute, con crescenti livelli di complessità, che vanno a

²² Ezio Manzini, Mario Trimarchi, “I materiali compositi”. in *Modulo*, n.139, 1988,. p. 194.

caratterizzare l'edificio dal punto di vista formale e spaziale e che consentono di fornire una risposta adeguata alle esigenze sempre più articolate e puntuali della committenza e dell'utenza.

La richiesta di proprietà non raggiungibili con l'impiego delle conoscenze e delle tecnologie consolidate deriva da un ampio ed elaborato insieme di motivazioni, legate alla richiesta di migliori e più avanzate prestazioni di sicurezza, benessere, compatibilità ambientale, ma anche all'evoluzione del linguaggio architettonico, considerato lo stretto legame esistente tra le caratteristiche dei nuovi materiali e le «qualità della leggerezza, della trasparenza, della molteplicità o della flessibilità, ormai affermati paradigmi del costruire contemporaneo».²³

Sulla scorta di tali considerazioni, l'obiettivo dei *progettisti di materiali* è di potenziare e rinnovare l'offerta, utilizzando materiali che siano in grado di reagire agli stimoli esterni in maniera innovativa, garantendo funzionalità nuove rispetto a quelle tradizionali e, non ultimo, promuovendo caratteristiche di design originali e stimolanti sul piano della comunicazione. Il progetto del materiale viene quindi orientato dai requisiti relativi alla specifica applicazione prevista, che portano di volta in volta a modificarne le prestazioni, a seconda delle esigenze, agendo sulla funzionalità, sulla processabilità, sull'aspetto, fino ad intervenire sul contenuto di informazione incorporata²⁴.

Le trasformazioni cui la materia è sottoposta avvengono a scale sempre più ridotte, operando il definitivo trapasso, secondo la definizione di Pierre Levy²⁵, dalle tecnologie *molari* a quelle *molecolari* che consentono un controllo molto più elevato dei risultati previsti. Il passaggio "storico" dall'*high-tech*, alla *microinnovazione*, alle *nanotecnologie* rappresenta un fenomeno di enorme rilevanza e sempre più difficile da controllare in assenza di un adeguato supporto scientifico e culturale.

Non a caso l'autore prefigura, insieme all'evoluzione delle tecnologie molecolari, la nascita di un nuovo tipo di società, basata sulle capacità di autorganizzazione dei "collettivi intelligenti", in grado di combinare le possibilità offerte dall'interazione delle

²³ M. Losasso, "Innovazione tecnologica e qualità del progetto", in M. Losasso (a cura di), *Innovazione e progetto. Nuovi scenari per la costruzione e la sostenibilità del progetto architettonico*, CLEAN, Napoli, 2005, pag. 23. Nel testo si fa riferimento anche ai nuovi attributi che si affacciano nel panorama architettonico, tra cui la dinamicità, l'integrazione, la multifunzione, l'interattività, la polivalenza, che sono caratteristiche sicuramente proprie di molti materiali cosiddetti *avanzati*.

²⁴ Cfr. C. Langella, *Nuovi paesaggi materici: design e tecnologia dei materiali*, Alinea, Firenze, 2003.

²⁵ Cfr. Pierre Levy, "Dal molare al molecolare", in: Pierre Levy, *L'intelligenza collettiva. Per un'antropologia del cyberspazio*, Feltrinelli, Milano, 2002, pagg. 55-69. Edizione originale del 1994. L'autore distingue le tecnologie "molari", che considerano i loro oggetti in blocco, alla cieca, in modo antropico e sommario, alle tecnologie "molecolari", che si accostano in maniera molto fine agli oggetti e ai processi che controllano.

nuove tecnologie, trasferendole sul piano dell'attività, della socialità e del pensiero umano.

	Tecniche arcaiche	Tecniche molarie	Tecniche molecolari
Controllo delle specie viventi	Selezione naturale Assenza di finalità. Scala geologica, opera su popolazioni	Selezione artificiale Finalizzazione. Scala storica. Opera su popolazioni	Scienza genetica Finalizzazione. Tempo reale. Opera <i>gene per gene</i>
Controllo della materia	Meccanica Controllo della trasmissione e del punto di applicazione delle forze. Assemblaggio di tipo meccanico	Termodinamica (a caldo) Produzione di energia e trasformazione dei caratteri della materia attraverso la produzione di calore e mescolanza	Nanotecnologie (a freddo) Controllo della trasmissione e del punto di applicazione delle forze a livello microscopico. Assemblaggio <i>atomo per atomo</i>
Controllo dei messaggi	Somatico Produzione attraverso corpi viventi, variazione dei messaggi in funzione del contesto.	Mediatico Fissazione, riproduzione, decontestualizzazione e diffusione dei messaggi.	Digitale Produzione, diffusione e interazione in contesto. Controllo dei messaggi <i>bit per bit</i>
Regolazione dei gruppi umani	Organicità I membri di un gruppo organico hanno conoscenza reciproca delle proprie identità e dei propri atti	Trascendenza I membri di un gruppo molare sono organizzati in categorie, unificati da ledere e istituzioni, gestiti da una burocrazia o unita dall'entusiasmo	Immanenza Una collettività che si autorganizza è un gruppo molecolare. Servendosi di tutte le risorse delle tecnologie fini, valorizza il proprio patrimonio umano <i>qualità per qualità</i>

Gli impatti derivanti dall'evoluzione delle tecniche di controllo nei diversi processi umani.²⁶

Si tratta di una visione comune a molti autori, già nel 1984 Ciribini²⁷ prefigurava una "società dell'informazione" che si evolve sotto la spinta delle tecnologie, ma perseguendo i propri obiettivi secondo una concezione sistemica della realtà, sfruttando il proprio potenziale in maniera "equilibrante". L'organizzazione della società tuttavia, a venticinque anni di distanza, sembra andare verso quella «inconcludente dispersione di sistemi e tendenze» temuta da Ciribini stesso, smentendo in qualche modo l'utopia secondo cui nella società del futuro «il potere [...] si riequilibra, si media, si integra attraverso lo scambio di informazioni permesso dall'informatica e, soprattutto, dalla telematica: una società che realizzerà al massimo la libertà e la democrazia, perché potrà scambiarsi tutte quelle informazioni che rappresentano il contenuto

²⁶ Elaborazione da Pierre Levy, cit., p. 69.

²⁷ Giuseppe Ciribini, *Tecnologia e progetto. Argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, CELID, Torino, 1984.

stesso del potere».²⁸ Oggi, di fronte ai risultati prodotti finora dallo sviluppo delle *new technologies* c'è anche chi avverte come «nella sua storia l'umanità non si è mai trovata impreparata come oggi di fronte a nuove opportunità, a sfide e a rischi tecnologici ed economici»;²⁹ emerge infatti la consapevolezza che «la scienza è diventata troppo rapida per poterla conoscere adeguatamente e per prevedere applicazioni e conseguenze».³⁰

Si preconizza una società del futuro dunque di là da venire, di cui è già però anticipata la capacità di controllo e modifica dei sistemi naturali e tecnologici, che oltrepassa ambiti disciplinari specifici fino a permeare potenzialmente ogni aspetto dell'esistenza umana.

Si comprende quindi la dimensione etica della tecnologia, se la disciplina assurge al ruolo di "guida" dei processi di trasformazione in genere, che mettono in relazione le tre sfere del sistema ecologico (nella definizione di Erich Jantsch³¹): l'antroposfera, la biosfera e la tecnosfera. Uomo, natura e tecnica possono dialogare tra loro solo se realmente riconosciute come parti dello stesso sistema, in cui «la tecnologia, da elemento disequilibrante, va convertita in elemento equilibrante nei confronti del contesto naturale e della specie umana».³²

Sul versante architettonico nel momento di maggiore sviluppo delle tendenze *high-tech*, le principali critiche sembravano fare leva su di un'etica legata ad una sorta di "principio di responsabilità" (Jonas, 1979), secondo cui l'ottimismo tecnologico e l'adesione incondizionata ad un modello di società fortemente consumistico rappresentavano un atteggiamento sbagliato e fuorviante rispetto alle finalità sociali ed estetiche dell'architettura. Oggi che le logiche di mercato sembrano in grado di subordinare tutti gli altri aspetti che concorrono nel processo ideativo/programmatico/realizzativo del progetto di architettura, la questione principale è diventata piuttosto quella di misurare la capacità o meno dei progettisti di adeguare un prodotto obsoleto, come quello edilizio, alle esigenze di marketing, comunicazione, vendibilità, che ogni altro prodotto di consumo richiede.

È pur vero che oggi le problematiche di ordine etico non sono scomparse, ma appaiono orientate in massima parte verso il concetto (ormai abusato) di sostenibilità, provando a trasferire in un'ottica integrata di sviluppo le diverse spinte ecologiste, di

²⁸ Ivi, p. 75.

²⁹ Jeremy Rifkin, *Il secolo Biotech*, Baldini&Castoldi, Milano 1998, p. 25.

³⁰ Intervista a Marc Augé, *Corriere della Sera*, 12 agosto 2008, p. 41

³¹ Erich Jantsch, *The Self-Organizing Universe*, Pergamon, Oxford 1980.

³² G. Ciribini, cit., p. 92.

equità economica e sociale. Accanto ad una condizione di forte dipendenza dalle dinamiche economiche e di mercato, è possibile ora individuare una diversa fiducia e consapevolezza nell'impiego di tecnologie innovative, derivante da un'accuratissima capacità di controllo del risultato e delle prestazioni raggiungibili, soprattutto grazie allo sviluppo dell'informatica, delle reti di comunicazione, delle biotecnologie e delle nanotecnologie.³³

Il progresso e l'interconnessione di questi settori tecnologici, se da un lato porta con sé innegabili fattori di rischio in assenza di un adeguato controllo, sembra poter coniugare le istanze della competitività economica con quelle dell'affidabilità, della sicurezza, ma anche del risparmio di risorse materiali ed energetiche nel ciclo di vita di materiali, prodotti e sistemi, fornendo un contributo prezioso ad uno sviluppo, allo stesso tempo, sostenibile e compatibile con le richieste del mercato.

In ambito architettonico, l'uso appropriato dei nuovi materiali ha prodotto risultati notevoli, trasformando un approccio basato sull'esaltazione delle proprietà espressive della tecnologia, in cui spesso gli aspetti legati al funzionamento e al controllo delle prestazioni passano in secondo piano, in una nuova dimensione in cui l'apporto dell'innovazione tecnologica, pur permeando l'edificio in tutte le sue parti in maniera diffusa, resta "silenzioso" e "nascosto", consentendo in alcuni casi di integrarsi anche con le forme e i linguaggi della tradizione.³⁴

3.1.2. Nuovi percorsi dell'innovazione. Dematerializzazione, eco-efficienza e materiali "knowledge based"

Per sfruttare il potenziale offerto dalle nuove tecnologie, anche nel settore delle costruzioni le modalità di innovazione nel campo di processi e prodotti tendono a incorporare sempre maggiori quantità di conoscenza scientifica, trasformando le logiche di trasferimento tecnologico, i modelli di produzione e le tipologie di offerta di prodotti e servizi, poiché la competitività economica è legata alla possibilità di sfruttare in maniera efficiente le risorse a disposizione e di offrire prestazioni sempre più elevate e declinabili in relazione alle esigenze.

³³ Si tratta di tecnologie fortemente interrelate tra loro, tanto da essere ormai considerate, insieme alle scienze cognitive, "tecnologie convergenti" ed indicate spesso in maniera congiunta con l'acronimo NBIC.

³⁴ Si pensi ad esempio all'uso delle fibre di carbonio per il consolidamento degli edifici storici, di rivestimenti nanostrutturati invisibili per la protezione o l'isolamento degli edifici esistenti, o ancora alle fortunate applicazioni di alcuni progettisti, come Shigeru Ban nella sua Naked House, in cui attraverso la realizzazione di un involucro traslucido ad alte prestazioni, richiama la spazialità e l'atmosfera soffusa della tradizione giapponese degli *shoji*.

Per raggiungere tali risultati dal punto di vista economico è necessario sempre di più incorporare la conoscenza tra i fattori di produzione, affiancandola a quelli tradizionali (capitale e lavoro), in modo da diventare il principale “motore” dell’innovazione, fin al punto che «In un simile incorporamento di conoscenza in beni e servizi consiste oggi il valore aggiunto, il differenziale che assicura il massimo della competitività nell’economia globalizzata».³⁵

Sul versante opposto, il problema dell’efficienza nell’uso delle risorse va letto anche in relazione alle problematiche connesse con i rischi ambientali e sociali derivanti da un progressivo esaurimento globale di risorse materiali ed energetiche. Problematiche che saranno accresciute nei prossimi anni dall’aumento della domanda causato dalla progressiva completa industrializzazione di paesi quali la Cina e l’India. È opinione comune ormai che l’aumento dei consumi nei paesi in via di sviluppo, tale da garantire almeno un livello minimo di qualità globale della vita, deve essere compensato da una diminuzione dell’uso delle risorse da parte dei paesi industrializzati.

Di fronte a tale mutazione di scenario, per far emergere i livelli di innovazione delle tecnologie e dei prodotti presenti sul mercato, occorre indagare secondo modalità differenti da quelle convenzionali (legate ad esempio alle problematiche della serialità dei prodotti o della costruibilità dei diversi sistemi tecnologici), andando ad evidenziare i fattori che influenzano effettivamente i processi innovativi e che sono in grado di garantire al contempo l’efficienza prestazionale e l’effettiva sostenibilità di processi, prodotti e sistemi.

Dematerializzazione

Secondo le leggi della termodinamica, all’interno di un dato sistema il totale degli input deve per definizione essere pari al totale netto degli output più l’accumulazione netta di materiale. Questo principio di bilancio della materia vale per l’economia nel suo complesso, nonché per qualsiasi sub-sistema (un settore economico, un’impresa, una famiglia). Ne consegue che i crescenti problemi legati alla produzione di rifiuti e le emissioni sono direttamente connessi con il livello di *input* materiale. Le politiche ambientali si sono concentrate per 20 anni sull’*output* cioè su ciò che esce dal sistema industriale, inquinamento, rifiuti ed emissioni, secondo un orientamento *end-of-the-pipe*

³⁵ Cfr. Luciano Gallino, *Tecnologia e democrazia*, Einaudi, Torino, 2007, p. 5. L’autore sottolinea come «interagendo con il lavoro e il capitale in reti che passano dentro e fuori le imprese – coinvolgendo pure i centri di ricerca degli atenei – la produzione di conoscenza è stata industrializzata, mentre la produzione industriale si è scientificizzata», trasformando le industrie da *labor intensive* a *knowledge intensive*.

che porta ad adottare come principali soluzioni sistemi quali filtri, depuratori, discariche, inceneritori, bonifiche e risanamenti. Si tratta di una risposta sempre meno efficace e sempre più costosa, che ha portato le nuove strategie ambientali a concentrarsi invece sull'*input*, cercando di ridurre drasticamente il flusso di materiali che entrano nel sistema industriale. Da questo punto di vista, la dematerializzazione³⁶, ossia una riduzione dell'uso di materiali ed energia a parità di prestazioni offerte, grazie ad una maggiore efficienza nell'impiego delle risorse, si presenta come una strategia efficace per combattere problemi ambientali globali quali il cambiamento climatico, la perdita di biodiversità o la desertificazione.

L'effetto della dematerializzazione è duplice: da un lato il costo delle risorse ambientali impone di spostare l'attenzione dai prodotti materiali verso i servizi e l'informazione, dall'altro porta a sviluppare prodotti materiali basati su micro e nanotecnologie in grado di garantire il massimo delle prestazioni con quantità minime di materia e a costi sempre più bassi.

Nonostante la validità delle premesse, tuttavia, è da considerare come, «anche quando le motivazioni economiche hanno orientato l'innovazione nella direzione della riduzione della materia e dell'energia impiegate per unità di prodotto, le stesse motivazioni economiche hanno spinto ad un aumento più che proporzionale della produzione e quindi, in definitiva ad un incremento dei consumi complessivi», in tal modo «le potenzialità delle nuove tecnologie in termini di dematerializzazione dei prodotti vengono neutralizzate dalla spinta alla crescita della produzione».³⁷

Eco-efficienza

Strettamente legati al concetto di dematerializzazione, gli studi riguardanti l'eco-efficienza misurano e confrontano le tecnologie e i prodotti sulla base sia del loro impatto sull'ambiente (le emissioni e lo sfruttamento delle risorse primarie) che su quella della loro efficienza economica (costi e ricavi).

Negli anni la definizione di strumenti e metodologie atti a ridurre l'impatto delle attività umane sull'ambiente ha portato, grazie al contributo di studiosi ed istituti di ricerca³⁸ all'evoluzione di nuovi concetti quali lo zaino ecologico, il MIPS (Intensità di Materiali

³⁶ Il termine "dematerializzazione" ha fatto la sua prima apparizione durante gli anni '80 nel settore finanziario, con particolare riferimento ai titoli di credito al fine di superarne la fisicità e consentire forme di circolazione virtuali.

³⁷ Ezio Manzini, Carlo Vezzoli, *Lo sviluppo di prodotti sostenibili*, Maggioli Editore, Rimini, 1998. p. 40. L'autore si riferisce a quello che molti tecnici chiamano "effetto-rebound", ossia un aumento dei consumi dovuto al miglioramento di determinate tecnologie.

³⁸ Ernst Ulrich Weizsäcker, Friedrich Schmidt-Bleek e il *Wuppertal Institut for Climate, Environment and Energy* su tutti.

Per Servizio), il Fattore 4 e il Fattore 10 e l'ISEW (Indice di Benessere Economico Sostenibile).

zaino ecologico	E' il carico di natura che ogni prodotto o servizio si porta sulle spalle in un invisibile zaino, ³⁹ ossia il peso dei materiali prelevati dalla natura per realizzare un prodotto o un servizio, meno il peso del prodotto stesso. Lo zaino ecologico viene espresso in kg di natura / kg di prodotto o in kg di natura / unità di prodotto. Ad esempio: carta - 15 kg/kg, PVC - 8,8 kg/kg, succo d'arancia confezionato - 25 kg/kg, oppure automobile media (1 ton) - 25 ton, PC (15 kg) - 15 tonnellate. In generale più un prodotto industriale è prezioso o elaborato e maggiore è il suo zaino ecologico.
MIPS (Intensità di Materiali Per Servizio)	E' la quantità totale di natura impiegata per realizzare un prodotto, espressa in chilogrammi. Il MIPS è cioè la somma del peso del prodotto e del suo zaino ecologico. Secondo Schmidt-Bleek il MIPS dovrebbe diventare un'unità internazionale di valore ecologico, da affiancare al prezzo di ogni prodotto o, meglio ancora, di ogni servizio. Il MIPS indica il prezzo ambientale delle diverse attività produttive, cioè quanta "natura" un prodotto o un servizio sono costati.
Fattore 4 Fattore 10	Strettamente legato al concetto di MIPS, Fattore 4 e 10 rappresentano la possibilità di ridurre, con innovazioni tecnologiche di processo e di prodotto, nell'arco della prossima generazione, di un fattore 4 (75%) o 10 (90%) l'input di materie prime ed energia nel processo economico. Una riduzione di un fattore 4 è già possibile con le attuali tecnologie, tuttavia secondo il Wuppertal una riduzione di MIPS del 75% è insufficiente per le nazioni dell'OCSE (Organizzazione Europea per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico), per cui è necessario un fattore 10. Esiste un apposito istituto (Factor 10 Institut) che riunisce autorevoli esperti internazionali in materia e che promuove questo obiettivo, presente ormai in molti documenti ufficiali di singoli governi e delle Nazioni Unite.
ISEW (Indice di Benessere Economico Sostenibile)	L'Indice di Benessere Economico Sostenibile (<i>Index of Sustainable Economic Welfare</i>) formulato per la prima volta nel 1989 da Herman Daly e John B. Cobb (<i>For the Common Good</i> , Beacon Press, Boston, 1989). È uno strumento di contabilità economica, utile ad integrare l'informazione contenuta nel PIL e negli indicatori economici tradizionali, in modo da fornire una misura monetaria di fenomeni della società umana normalmente trascurati. Le spese per il consumo sono corrette tenendo conto di altri fattori come la distribuzione del reddito, il deperimento delle risorse naturali e le perdite economiche dovute alla degradazione dell'ambiente; viene inoltre attribuito un valore economico a fattori non considerati nel PIL come il tempo libero e il lavoro domestico non retribuito. Analisi compiute in diversi paesi (Stati Uniti, Germania, Austria, Regno Unito) mostra come ISEW e PIL crescono parallelamente fino alla metà degli anni '60, per poi divergere sensibilmente.

Tali strumenti, cui fanno riferimento le politiche economiche e ambientali di alcuni governi europei e di molte aziende, sono stati concepiti con l'obiettivo di affermare uno

³⁹ In un'analisi più precisa, Schmidt-Bleek distingue tra cinque diversi componenti dello zaino ecologico:
1. Materiali abiotici: pietre, ghiaia, sabbia, minerali, combustibili fossili (carbone, petrolio, gas minerale).
2. Materiali biotici: biomassa vegetale e animale.
3. Terreno: per produzioni agricole e forestali: quantità di terreno fertile perso per erosione.
4. Acqua: prelevata per usi industriali o agricoli
5. Aria: prelevata per trasformazioni fisiche (separazione dei suoi gas) o chimiche (reazione dei suoi gas, per esempio l'ossigeno per la combustione).

sviluppo economico compatibile con l'ambiente basato sulle potenzialità offerte dal progresso tecnologico unite ad una conoscenza effettiva degli impatti prodotti dai sistemi produttivi.

Gli indicatori di eco-efficienza sono ulteriori strumenti in grado di monitorare processi di "disaccoppiamento" dell'uso di risorse dalla crescita economica, relativi soprattutto all'uso sostenibile delle risorse e alla riduzione dei rischi per l'ambiente.

Secondo il WBCSD (*World Business Council for Sustainable Development*) sono sette le dimensioni dell'eco-efficienza che un'impresa deve prendere in considerazione durante tutte le sue funzioni: dal marketing allo sviluppo del prodotto, dalla produzione alla distribuzione dello stesso:

- Ridurre l'*intensità delle materie* utilizzate;
- Ridurre l'*intensità dell'energia* utilizzata;
- Ridurre la dispersione di *sostanze tossiche*;
- Favorire la *riciclabilità dei materiali*,
- Massimizzare l'uso di *risorse rinnovabili*,
- Aumentare la *durata del prodotto*,
- Aumentare l'*intensità dei servizi* (correlati ai prodotti e ai processi).

Ciò implica obiettivi come:

- minimizzare l'uso di energia, acqua, suolo, favorendo la riciclabilità e la durata del prodotto con una particolare attenzione agli imballaggi;
- minimizzare le emissioni, gli scarichi, la dispersione di sostanze tossiche e promuovere l'uso di risorse rinnovabili;
- fornire ai consumatori i benefici di funzionalità, flessibilità e modularità del prodotto, con servizi aggiuntivi e focalizzando l'attenzione sulla vendita dei prodotti di cui i clienti effettivamente necessitano;
- implementare gli SGA (Sistemi di Gestione Ambientale) da integrare con l'esistente Sistema di Management Economico per costruire "l'approccio eco-efficiente".

Gli obiettivi legati all'eco-efficienza, pur essenziali ai fini della riduzione degli impatti globali prodotti da ogni tipo di attività umana (impatti della *tecnosfera* sulla *biosfera*), possono essere fortemente compromessi dalla continua crescita dei consumi. I teorici della decrescita fanno notare come, nonostante il miglioramento dell'efficienza ecologica dei processi produttivi, "la diminuzione dell'impatto ecologico e

dell'inquinamento per ogni singola unità è sistematicamente annullata dalla moltiplicazione del numero delle unità vendute e consumate⁴⁰, secondo una tendenza conosciuta come "effetto-rebound"⁴¹ (effetto rimbalzo), per cui il risparmio di risorse è vanificato dall'aumento delle quantità consumate.

Materiali *knowledge based*

Come conseguenza diretta di una innovazione tecnologica sempre più basata sulla capacità di incorporare e trasmettere conoscenza, i prodotti della tecnologia, in questo caso i materiali da costruzione, diventano essi stessi *knowledge based*.

Gli attributi della "*new technology*" diventano i criteri base per il miglioramento delle procedure esistenti e per lo sviluppo di nuovi prodotti e sistemi.⁴²

Obiettivi della "New technology"
<ul style="list-style-type: none">▪ rapidità dei processi (<i>input-output</i>)▪ minore consumo di energia▪ minori rifiuti▪ minore inquinamento▪ minori spese (macchinari e strumenti)▪ prodotti prestazioni ottimizzate ed affidabili▪ ...

Il "fattore conoscenza" è presente innanzitutto a monte, nella fase di progetto del materiale, che parte dallo studio del comportamento, dal controllo e dall'addizione dei componenti elementari della materia per sviluppare nuove funzionalità nei prodotti, grazie anche alla capacità di prevedere ed organizzare le modalità di risposta ai fattori ambientali e alle condizioni d'uso. Dalla fase di progetto, l'approccio *knowledge based* si trasferisce all'intero processo produttivo e all'intero ciclo di vita.

La rapidità dei cambiamenti dei prodotti disponibili e delle condizioni del mercato richiede processi in cui i prototipi possano essere velocemente serializzati (siano cioè simili al prodotto finale), gli strumenti siano prodotti economicamente e i macchinari modificati rapidamente. È il caso delle tecnologie laser e ad ultrasuoni che permettono la realizzazione di materiali compositi per componenti edilizi con un'elevata capacità di controllo delle prestazioni offerte.

⁴⁰ Serge Latouche, La scommessa della decrescita, Feltrinelli, Milano, 2007, p. 34.

⁴¹ Definito come "l'aumento dei consumi legati alla riduzione dei limiti d'uso di una tecnologia, limiti che possono essere monetari, temporali, sociali, fisici, legati allo sforzo, al pericolo, all'organizzazione, ecc.". F. Schneider, cit. in Yves Cochet, Pétrole apocalypse, Fayard, Paris, 2005, p.132.

⁴² Come emerge dalla classificazione dei materiali avanzati riconducibili alle categorie "*high performance*" e "*smart*", mentre nei primi la conoscenza si traduce innanzitutto nell'affidabilità delle prestazioni, i secondi sono in grado di modificare il proprio comportamento in risposta a stimoli esterni, agendo in maniera "quasi intelligente".

Lo studio di materiali *knowledge based*, non può dunque prescindere dalla conoscenza delle modalità di produzione, poiché lo sviluppo di un nuovo materiale va spesso di pari passo con lo sviluppo di nuove modalità produttive, e allo stesso tempo lo sviluppo di una nuova tecnologia può estrinsecarsi in metodi di produzione sempre più innovativi per materiali già esistenti.⁴³ I costi addizionali derivanti dalla necessità di modificare i processi produttivi per rispondere agli attuali standard ambientali (ridurre scarti, inquinamento e consumi energetici), possono essere ridotti dall'uso efficiente dei materiali e dall'ottimizzazione del processo stesso, con un "riciclo integrato" e la precisione degli strumenti di lavorazione CAM (*Computer-Aided Manufacturing*).⁴⁴

Inquadrando la logica dei materiali *knowledge based* in quella più ampia relativa all'eco-efficienza di prodotti e processi in edilizia, occorre considerare un approccio che tenda ad orientare sempre più il "fattore conoscenza" verso la minimizzazione degli impatti sull'ambiente, partendo dalla concezione del materiale stesso (progetto delle prestazioni specifiche, della durabilità e della riciclabilità), avviando processi *knowledge intensive* in fase di produzione (di gran lunga la più impattante per la maggior parte dei prodotti edilizi), e considerando il contributo attivo in termini di riduzione degli impatti ambientali (principalmente consumi energetici degli edifici e inquinamento atmosferico) che materiali "quasi intelligenti" possono dare nel corso della vita degli edifici.



Studio M e Thom Faulders Architecture, Airspace, Tokyo. La pelle dell'edificio, composta da strati successivi di pannelli forati è disegnata e realizzata grazie al computer che ha ripreso, per ogni strato, geometrie parametriche cellulari che sono state successivamente "appiattite" su un piano per realizzare i pannelli in materiale composito rigido composto da alluminio e materie plastiche.

⁴³ Il cambiamento dell'aspetto dei materiali, ad esempio, è essenzialmente legato ad innovazioni di processo. La possibilità di trattare il legno come un materiale sintetico, di poter saldare la ceramica e lavorare a maglia i metalli, di ottenere calcestruzzi estremamente sottili e resistenti deriva innanzitutto dall'applicazione di nuove tecnologie di lavorazione che consentono di sfruttare al massimo le potenzialità insite nel materiale stesso attraverso la creazione di prodotti con caratteristiche formali e funzionali differenti.

⁴⁴ È il caso dei tessuti tecnici tridimensionali, in cui il processo produttivo è reso più veloce, versatile ed efficiente grazie all'aiuto dei computer che realizzano automaticamente la trama del tessuto, o di alcune tipologie di pannelli realizzati in materiali compositi forati in maniera irregolare che non presentano costi aggiuntivi grazie alla possibilità di realizzarli attraverso processi automatizzati.

Scenario ipertecnologico	mantenere le attuali aspettative di benessere basate sulla crescita di prodotti e servizi riducendo contemporaneamente i consumi di risorse attraverso il miglioramento delle prestazioni dei processi produttivi (deriva tecnologica).
Scenario iperculturale	discontinuità culturale nel quadro di una sostanziale continuità tecnologica (integrata verso una ecocompatibilità idealizzata). L'assunto di base è legato alla drastica riduzione dei consumi, parte da una posizione culturale individuale (o elitaria) difficilmente trasferibile su grande scala ed in tempi brevi (deriva del fondamentalismo ecologico).
Scenario praticabile	discontinuità parziali nel sistema sociotecnico, che guarda all'interazione delle sfere che agiscono nei diversi livelli della società, secondo alcune linee prioritarie: consapevolezza del costo reale delle risorse ambientali, riduzione dei flussi di materia e energia attraverso l'informazione (tecnica e culturale) legata allo sviluppo e all'applicazione di tecnologie innovative, riduzione delle priorità proprie di un'economia di mercato.

Risorse e consumi: gli scenari possibili.⁴⁵

3.1.3. L'impatto delle nanotecnologie nei settori produttivi

Le possibilità connesse con la trasformazione della materia al livello molecolare sono state introdotte per la prima volta dal fisico premio Nobel Richard P. Feynman nel 1959 all'interno della lezione tenuta al California Institute of Technology dal titolo "*There's plenty of room at the bottom*"⁴⁶ ("c'è un sacco di spazio giù in fondo").

Gli studi condotti da Feynman e le sue intuizioni hanno posto le basi per una radicale trasformazione dell'orizzonte tecnoscientifico, a partire dalla possibilità di miniaturizzazione dei calcolatori cui si deve gran parte delle innovazioni tecnologiche prodotte negli ultimi cinquant'anni.

Il termine "nanotecnologia" viene coniato nel 1974 da Norio Taniguchi della Tokyo Science University⁴⁷, che la definisce come «un processo di riorganizzazione della materia atomo per atomo o molecola per molecola»⁴⁸. Bisognerà aspettare altri dodici anni, il 1986, perché le potenzialità insite in questo nuovo concetto scientifico e tecnologico potessero essere meglio chiarite, in particolare attraverso l'opera di da Kim Eric Drexler dal titolo *Engines of creation: the coming era of nanotechnology*.⁴⁹ Nel testo, che prefigura molti dei traguardi successivamente raggiunti dalle nanotecnologie

⁴⁵ Elaborazione da: Ezio Manzini, Carlo Vezzoli, Lo sviluppo di prodotti sostenibili. I requisiti ambientali dei prodotti industriali, Maggioli, Rimini, 1998.

⁴⁶ <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>.

⁴⁷ Norio Taniguchi, *On the Basic Concept of "Nano-Technology"*, Proceedings of International Conference on Product Engineering, Part II, Japan Society of Precision Engineering, 1974.

<http://nanodot.org/articles/01/06/04/1217257.shtml>

⁴⁸ Letteralmente: "'Nano-technology' mainly consists of the processing of separation, consolidation, and deformation of materials by one atom or one molecule."

⁴⁹ Kim Eric Drexler, *Engines of creation: the coming era of nanotechnology*, Anchor Books, New York, 1986.

sia in ambito scientifico che produttivo, si definisce il nuovo orizzonte tecno-scientifico della nanotecnologia come «la capacità di *controllo della materia* basato sul controllo dei prodotti e dei sottoprodotti *alla scala molecolare* attraverso sistemi ad *alta precisione*, nonché attraverso prodotti e processi di *molecular manufacturing*».⁵⁰

Da allora, e in maniera sempre più incisiva, le nanotecnologie si sono affacciate in molteplici settori industriali, permettendo di modificare il modo stesso di concepire il rapporto con la materia e le sue possibili trasformazioni e di introdurre sul mercato prodotti portatori di innovazioni radicali e basati su elevati livelli prestazionali.

Attraverso l'uso delle nanotecnologie è possibile sviluppare nuovi materiali che possono assolvere specifiche funzioni, realizzando prodotti e sistemi con straordinarie proprietà derivanti dalla particolare struttura molecolare oppure implementare qualità e caratteristiche di prodotti esistenti.

Lo studio dei fenomeni fisico chimici alla nanoscala e l'applicazione delle nanotecnologie hanno prodotto innovazioni significative nel campo dei materiali in quasi tutti i settori. L'opinione diffusa è che l'impatto di tali tecnologie avrà effetti comparabili alla diffusione degli antibiotici e delle materie plastiche, andando ad investire ampi settori di mercato, compreso quello edilizio.

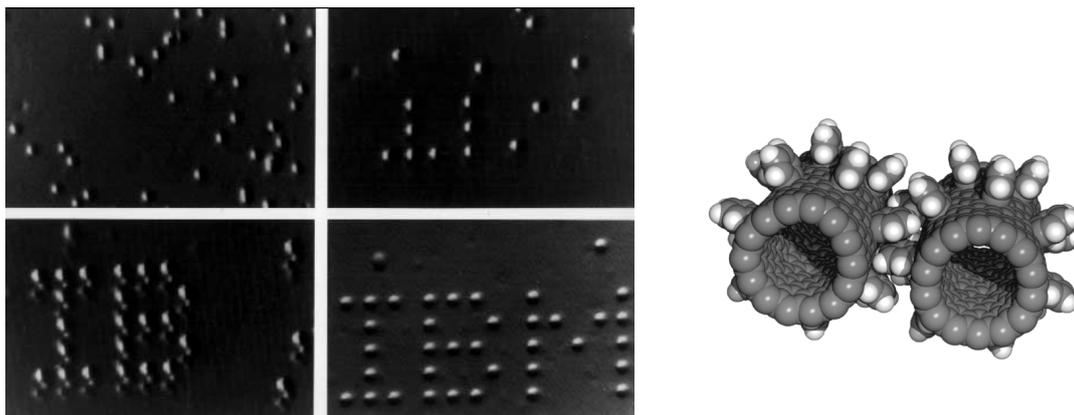
La "comparsa" iniziale delle nanotecnologie in settori quali l'elettronica, il biomedicale o la diagnostica è fortemente correlata alla necessità di una miniaturizzazione sempre più spinta dei componenti per migliorare le prestazioni dei prodotti, garantendo affidabilità ed elevata capacità di controllo.

È lo stesso Feynman a lanciare la sfida delle potenzialità offerte dalla miniaturizzazione in questi settori, affermando che le leggi fisiche non negano la possibilità di «scrivere la totalità dei 24 volumi dell'Enciclopedia Britannica sulla punta di uno spillo» e che «in chirurgia, sarebbe interessante poter ingoiare il chirurgo», rendendolo capace di trasmettere le informazioni all'esterno e operare direttamente dove è necessario,

⁵⁰ Occorre individuare meglio quest'ultima categoria di nanotecnologie individuate da Drexler: i processi di *molecular manufacturing* sono considerati parte di una "*advanced nanotechnology*", da distinguersi dalla "*near-term nanotechnology*" (cfr. Jean-Pierre Dupuy, *Complexity and uncertainty: a prudential approach to nanotechnology*, Commissione Europea, marzo 2004). Questa sarà resa possibile dalla diffusione degli "assemblatori" (*self-assemblers*) teorizzati da Drexler, che permettono di creare nanomacchine autoreplicanti. Su questo tema, l'autore ha negli anni orientato la sua posizione verso un atteggiamento di maggiore prudenza. Se in *Engines of creation* dichiarava semplicemente che «non possiamo permetterci determinati tipi di errori con gli assemblatori replicanti», già nella ristampa del 1990 aggiunge che «il problema – ed è enorme – non riguarda la possibilità di un incidente, ma di un abuso», fino a dichiarare recentemente (Cfr. Chris Phoenix, Eric Drexler, "Safe exponential manufacturing", in *Nanotechnology*, n. 15, 2004, pp. 869-872) che la prospettiva dei robot autoreplicanti non è necessaria e va seppellita anche attraverso proibizioni legali, sottolineando anche i rischi (militari, politici e ambientali) connessi alle nanotecnologie *near-term*, attualmente disponibili. Cfr. anche, ARNALL Alexander H., *Future Technologies, Today's Choices. Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; a technical, political and institutional map of emerging technologies*, Greenpeace Environmental Trust, Londra, 2003.

mentre «altre piccole macchine potrebbero essere incorporate in modo permanente per aiutare un organo malfunzionante».⁵¹

Tuttavia le nanotecnologie non rappresentano semplicemente un passaggio successivo nella scala della miniaturizzazione (milli-micro-nano): alla nanoscala, infatti, gli oggetti sono in grado di cambiare colore, forma e fase molto più facilmente che alla macroscale. ed è possibile progettare alcune proprietà fondamentali – come resistenza meccanica, rapporto tra superficie e massa, conduttività ed elasticità – per ottenere nuove classi di materiali. Dinanzi agli occhi di scienziati e tecnologi si è aperto un mondo ricco di nuove possibilità, dovuto essenzialmente al fatto che «il comportamento dei domini materiali di queste dimensioni si colloca giusto al limite fra le leggi della fisica classica e quelle della fisica quantistica».⁵² Si è compreso che conoscere meglio la natura aiuta a progettare le possibilità di modificazione e controllo, e che avere a disposizione macchine e strumenti di osservazione, dilata il campo dell'osservazione scientifica.⁵³ Le tecnologie, imparando a controllare quantità infinitesime di materia, ne sfruttano l'enorme potenziale in termini produttivi.⁵⁴



La prima applicazione in assoluto delle nanotecnologie risale al 1986: Dan Eigler, dell'Almaden Research Center di San José in California, depone 36 atomi di xenon su uno strato di nichel a formare la scritta IBM. A destra nanoingranaggi formati da atomi per la realizzazione di dispositivi meccanici nanometrica.

⁵¹ Richard Feynman, *There's plenty of room at the bottom*, American Physical Society, California Institute of Technology, 29 dicembre 1959.

⁵² Edoardo Boncinelli, *L'anima della tecnica*, Rizzoli, Milano, 2006, p.102.

⁵³ Nel 1983 Heinrich Rohrer e Gerd Binnig dell'IBM di Zurigo hanno sviluppato il microscopio a effetto tunnel (STM, *Scanning Tunneling Microscope*), uno strumento che permette ai ricercatori di analizzare e manipolare la materia su scala atomica. Grazie a particolari leggi della fisica quantistica, l'STM permette di vedere singoli atomi sulla superficie di un materiale conduttore, un materiale cioè che permette il passaggio della corrente elettrica grazie alla sua particolare struttura molecolare. Sempre nella sede IBM di Zurigo, viene realizzato nel 1986, l'AFM, ovvero l'Atomic Force Microscope. In questo caso, il microscopio permette di vedere, con una risoluzione atomica, le superfici dei materiali non conduttori. L'invenzione ha permesso ulteriori progressi nella nanotecnologia, che hanno indotto la domanda di nuovi strumenti commerciali per l'impiego ordinario di nanostrutture e nanostrumenti. Una vasta gamma di microscopi simili all'STM e all'AFM, e un'intera generazione di apparecchiature si è sviluppata per sostenere le innovazioni nanotecnologiche. È prevedibile che il mercato emergente di strumenti per la nanotecnologia svolgerà un ruolo-chiave nello sviluppo del settore.

⁵⁴ Le nanotecnologie rappresentano in questo senso «uno dei primi esempi di tecnica interamente o quasi interamente figlia della scienza», poiché «nessuno sarebbe andato a scavare nei recessi più profondi della materia senza una guida teorica e una conoscenza almeno parziale delle interazioni fra gli atomi e le molecole». E. Boncinelli, *ivi*, p. 103.

La maggior parte delle applicazioni sono ancora in fase di sperimentazione e molte di esse ancora di là da venire, specialmente quelle legate alla possibilità di operare trasformazioni della materia secondo processi di *molecular manufacturing*⁵⁵, ipotizzati da Drexler, per i quali si prevede tuttavia un sensibile sviluppo nei prossimi anni, soprattutto in ambito informatico, biomedico e militare.

Oggi sono tuttavia già numerose le applicazioni disponibili, e riguardano in massima parte la capacità di gestire le nanostrutture esistenti in ogni materiale, al fine di programmarne e controllarne le proprietà. Da tempo le nanotecnologie sono applicate nel settore dell'elettronica, per lo sviluppo di circuiti e sensori, nel settore dell'energia, per l'additivazione di combustibili, per l'evoluzione delle tecnologie a idrogeno o per la realizzazione di celle solari ad alto rendimento, nel settore cosmetico, ad esempio per la produzione di creme solari, fino al settore manifatturiero in genere, dal trattamento delle superfici alla nanomodificazione in massa dei materiali tradizionalmente impiegati.

Il settore di ricerca attualmente più in ritardo è probabilmente proprio quello relativo allo studio dei possibili fattori di rischio correlati alle nanotecnologie, poiché gli effetti delle nanoparticelle sull'uomo e l'ambiente sono ancora in massima parte sconosciuti agli stessi scienziati, e solo da pochi anni i diversi paesi (Unione Europea su tutti) hanno avviato politiche di monitoraggio e tutela. Una tale incertezza appare ancora più paradossale se si considera che le maggiori "promesse" delle nanotecnologie riguardano proprio i benefici dal punto di vista dell'impatto ambientale.

Se gli effetti positivi possono rintracciarsi innanzitutto in termini di una migliore efficienza nell'impiego di risorse (ottimizzando le prestazioni dei materiali e l'efficienza dei combustibili) e di una maggiore ecologicità dei processi industriali (attraverso la sostituzione di prodotti chimici tossici, una maggiore capacità di sfruttare le risorse rinnovabili e abbattendo inquinanti atmosferici), i rischi collegati alla diffusione dei nanomateriali e nanosistemi, qualora non chiaramente identificati e contrastati, saranno amplificati da una effettiva diffusione delle nanotecnologie nei diversi settori, con problematiche che investiranno l'intero ciclo di vita di prodotti e sistemi in commercio.

⁵⁵ Per *molecular manufacturing* si intende la capacità di costruire dispositivi, macchine o interi prodotti controllando la posizione di ciascun atomo. Si tratta delle tipologie di applicazioni più promettenti e insieme più rischiose, poiché, soprattutto se combinate con biotecnologie e genetica, potrebbero portare, secondo alcuni autori, a meccanismi di controllo e manipolazione di massa, senza considerare le applicazioni possibili in campo militare. Cfr. Simples Citoyens, *Minime introduction aux nanotechnologies*, Grenoble, 2006. Tr. It *Nano Technologie Mega Dominio*, Nautilus, Torino, 2007.

OPPORTUNITÀ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Migliore efficienza nello sfruttamento di risorse ▪ Sostituzione di prodotti chimici tossici ▪ Contributo alla riduzione di inquinanti atmosferici ed energia pulita ▪ Contributo al miglioramento dell'efficienza dei combustibili ▪ Miglioramento delle modalità di monitoraggio ambientale
RISCHI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potenziale tossicità per l'uomo e l'ambiente ▪ Diffusione di materiali con caratteristiche sconosciute ▪ Effetto-rebound (aumento di consumi dovuto al miglioramento di alcune tecnologie) ▪ Problemi di riciclaggio e dismissione

Opportunità e rischi legati alla diffusione delle nanotecnologie.

3.1.4. Le nanotecnologie: una innovazione radicale per il progetto di architettura

Il settore delle costruzioni è stato tra i primi, sin dall'inizio degli anni '90, ad essere identificati come promettente area applicativa per le nanotecnologie. Ad oggi, tuttavia, le innovazioni prodotte non hanno ancora raggiunto i risultati attesi e si tratta di un comparto tuttora ancora in una fase embrionale di sviluppo, soprattutto dal punto di vista delle applicazioni concrete.

L'origine di questa condizione è in parte legata alla natura tendenzialmente "conservativa" dei grandi *contractors* in edilizia e alla complessità delle regolamentazioni e dei codici normativi, ma dipende principalmente dai costi delle materie prime⁵⁶ e delle fasi di produzione che non raggiungono ancora un adeguato livello di competitività in un settore ad ampio consumo come quello edilizio. Il miglioramento delle tecnologie di produzione, unito alla consapevolezza degli ambiti su cui concentrare gli investimenti legati alle nanotecnologie, porterà nei prossimi anni ad un cambiamento radicale nell'offerta dei prodotti e sistemi per l'edilizia, di cui solo alcuni sembrano destinati a restare legati ad un mercato di nicchia, mentre la maggior parte andrà letteralmente a sostituire i prodotti e le tecnologie convenzionali.

Gli obiettivi dichiarati dei soggetti impegnati nello sviluppo di nanomateriali e nanosistemi riguardano principalmente il passaggio da uno sviluppo dei materiali basato sullo sfruttamento di risorse, ad uno basato sulla conoscenza, in grado di trasformare il settore dell'industria delle costruzioni in un settore ad alto potenziale tecnologico, centrato su innovazione, competitività, rispetto dell'ambiente e sicurezza sociale, attraverso alcuni punti chiave:

- Utilizzo più razionale delle materie prime

⁵⁶ Le applicazioni di alcuni nanomateriali le cui proprietà hanno generato particolare entusiasmo, quali nanotubi di carbonio e *buckyballs*, sono attualmente poco sviluppate rispetto ad esempio a quelle basate su ossidi metallici proprio per il costo molto elevato della materia prima.

- Riduzione dei costi nel ciclo di vita dei prodotti
- Produzione di nuovi materiali con elevati livelli prestazionali
- Miglioramento dell'efficienza e della durabilità dei prodotti

I materiali e i prodotti “potenziati” grazie alle nanotecnologie permetteranno di costruire edifici, strade e ponti molto più durevoli, a basso consumo energetico lungo tutto il ciclo di vita, che non necessitano di manutenzione e assorbono l'inquinamento.

In un futuro immediato sarà possibile progettare edifici cinque volte più alti, in grado di sopportare carichi molto maggiori, con sezioni strutturali ridotte ma ugualmente in grado di resistere a sismi e perfino ad eruzioni vulcaniche. Pareti e solai che modificano il proprio colore in base all'intensità della luce solare, oppure trasparenti di giorno e opachi di notte. Sarà possibile sostituire i vetri con un metallo o una ceramica trasparente e infrangibile, comprare al supermercato case prefabbricate a più piani trasportabili da piccoli veicoli oppure grandi componenti strutturali a prezzi economici e sufficientemente leggeri da essere trasportati da un bambino.⁵⁷

Lo sviluppo di reti e sistemi impiantistici basati sulle proprietà dei nanomateriali andranno ad incidere sul comportamento degli edifici in fase di esercizio, rendendoli veri e propri *smart buildings*, delle macchine autosufficienti e a basso impatto ambientale. Sensori incorporati nei sistemi di involucro saranno in grado di indurre mutazioni di aspetto agli edifici reagendo agli stimoli di temperatura, luce e ventilazione per ottimizzare in progress la risposta all'ambiente esterno, altri sensori potranno monitorare le prestazioni meccaniche e il degrado di parti ed elementi; si realizzeranno così sistemi di illuminazione energeticamente efficienti basati su materiali in grado di trasmettere la luce, sistemi di trattamento delle acque finalizzato al riciclo basati su nano-filtraggio, sistemi solari ultraefficienti uniti a sistemi avanzati di stoccaggio in grado di eliminare la necessità di connessioni alla rete.

Questo quadro restituisce uno scenario a breve e medio termine (5-15 anni), in cui l'accresciuta familiarità con i prodotti e i sistemi basati su nanotecnologie, nonché una prova della loro affidabilità a partire dallo sviluppo di progetti pilota, consentirà di ampliare le applicazioni in ambito architettonico

Allo stato attuale, le applicazioni più promettenti riguardano i rivestimenti nanostrutturati: vernici, sigillanti, trattamenti superficiali antimacchia e antinquinamento, resistenti all'abrasione e agli agenti aggressivi, fotoreattivi, trasparenti e anti UV.

⁵⁷ Cfr. Ernesto Ocampo Ruiz, *Nanotecnología y Arquitectura*, <http://nanotecnologiayarquitectura.blogspot.com/>.

Significative innovazioni riguardano anche la capacità di strutturare alla nanoscala i materiali convenzionali – in particolare acciaio, ceramica, calcestruzzo e materiali compositi – sia attraverso l'aggiunta di nanomateriali in fase di produzione, sia semplicemente osservando il comportamento delle nanostrutture responsabili delle proprietà finali dei materiali e modificando le tecnologie produttive in modo da minimizzare le imperfezioni del prodotto finito.

Si comprende dunque come gli ambiti di applicazione delle nanotecnologie nel settore delle costruzioni siano piuttosto ampi e promettenti. La capacità di introdurre significativi livelli di innovazione appare fortemente legata da un lato alla capacità dell'industria di rendere competitivi, affidabili e sicuri i prodotti nanotecnologici in un settore da sempre restio ad accettare a scatola chiusa "invenzioni rivoluzionarie", dall'altro alla volontà dei progettisti di sperimentare gli esiti architettonici – in termini tecnologici, funzionali ed estetici – legati all'uso di tali prodotti, nella consapevolezza che solo rafforzando il binomio progettista-industria sarà possibile controllare l'accresciuta complessità, in termini di offerta ma anche di domanda, di prodotti, sistemi e tecnologie innovative.

3.2. Nanomateriali e materiali nanostrutturati: definizioni e classificazioni:

3.2.1. Nanoscala e nanomateriali

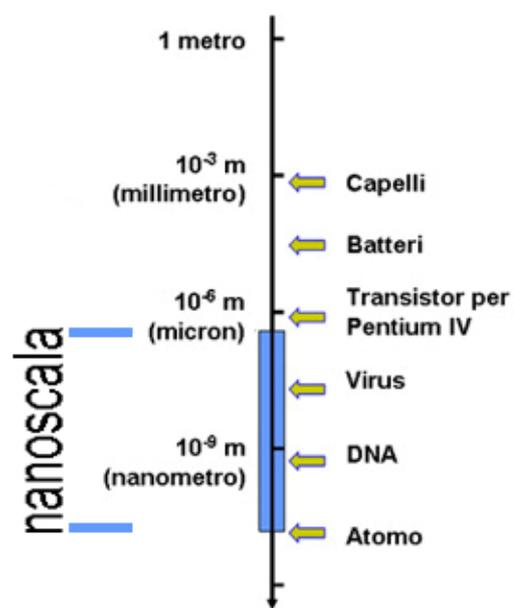
Le definizioni del concetto di nanotecnologie date da Taniguchi e Drexler conservano oggi una piena attualità, poiché specificano le caratteristiche fondamentali che identificano le nanotecnologie, ossia la capacità di controllo e organizzazione della materia alla scala molecolare finalizzata alla realizzazione di prodotti, sistemi e dispositivi. Tuttavia, una definizione condivisa, più articolata e utile a definirne gli ambiti applicativi è quella data dalla *National Nanotechnology Initiative*.⁵⁸

Secondo tale definizione per poter parlare effettivamente di nanotecnologie, è necessario che siano coinvolti ciascuno dei seguenti aspetti:

⁵⁸ Lanciata sotto la presidenza Clinton e divenuta operativa a partire dal 2001, la NNI può contare su ingenti finanziamenti pubblici e privati, e rappresenta una delle principali organizzazioni mondiali legata alla ricerca e sviluppo nel campo delle nanotecnologie in tutti i settori, in particolare elettronico, biomedico e militare.

- Ricerca e sviluppo tecnologico ai livelli atomico, molecolare e macromolecolare, in un range dimensionale compreso approssimativamente tra 1 e 100 nm⁵⁹
- Creazione e uso di strutture, dispositivi e sistemi dotati di nuove proprietà e funzioni dovuti alla dimensione nano e micro
- Abilità di controllo o manipolazione alla scala atomica

Un nanometro equivale a un milionesimo di millimetro, ossia 10^{-9} m. Per avere dei termini di confronto, è possibile pensare che un capello è spesso circa 100.000 nm (circa 0,1 mm), mentre un atomo misura circa 0,15 nm, una molecola di DNA 2,5 nm e un virus 50 nm. Generalmente vengono definiti *nanomateriali* le strutture cristalline con almeno una delle dimensioni inferiori ai 100 nm (le nanoparticelle comunemente utilizzate hanno tutte e tre le dimensioni inferiori ai 100 nm o poco più).



Classificazione dei nanomateriali

Generalmente è possibile classificare i nanomateriali in relazione al numero di dimensioni nanometriche che presentano; esistono infatti:

- strutture zerodimensionali, in cui tutte le dimensioni sono in scala nanometrica, come le nanoparticelle (ossidi metallici e non metallici, semiconduttori, fullereni, ecc.);
- strutture monodimensionali, con due dimensioni nanometriche e una sola dimensione finita come i nanofili (*nanowires*), i *nanorods* o i nanotubi;
- strutture bidimensionali, con una dimensione nanometrica e due dimensioni finite, come i film sottili (monolayer, multilayer, *Self-Assembled*, ecc.).

⁵⁹ Al di sopra di questo range si può parlare di microtecnologie, al di sotto di picotecnologie (per i liquidi) e femtotecnologie (per i solidi). Si tratta del livello subatomico al quale lavora già l'elettronica molecolare.

Le proprietà peculiari di tali materiali risiedono proprio nelle caratteristiche delle nanostrutture. Al di sotto dei 100 nm, infatti, la percentuale di atomi di superficie di un corpo diventa sempre più significativa fino a predominare su quella degli atomi interni quando la dimensione è assai prossima al nanometro. Poiché in un solido le proprietà macroscopiche sono strettamente correlate a quelle microscopiche, anche alla macroscale è possibile sfruttare le particolari caratteristiche proprie degli atomi di superficie (in termini di contenuto di energia, polarizzabilità elettrica, proprietà termiche, proprietà meccaniche, ecc.).

Tipologie di nanomateriali

Quantum dots

I *quantum dots* sono nanostrutture della dimensione di 2-10 nm composte da metalli, ossidi metallici o semiconduttori con particolari proprietà elettriche, ottiche, magnetiche o catalitiche. Denominati anche “atomi artificiali” non sono considerati né una struttura solida né una singola entità molecolare. Possono essere prodotti con vari metodi, in particolare tramite processi chimici colloidali (*Sol-Gel*). Alcune tipologie di *quantum dots* sono impiegate nel settore edilizio per le proprietà ottiche, quali la possibilità di variare la lunghezza d’onda (e quindi il colore) della luce emessa, che permettono di realizzare ad esempio led luminosi incorporati in alcuni prodotti edilizi quali vernici e rivestimenti.

Fullereni

I fullereni sono una delle diverse forme del carbonio presenti in natura, scoperte per la prima volta nel 1980. Si tratta di molecole di carbonio di forma sferica o tubolare cava, in grado di creare strutture tridimensionali composte da pentagoni ed esagoni (la tipologia di fullerene più conosciuta, il c-60 o buckminsterfullerene (cfr. par. 5.1.1.) ha la forma simile ad un pallone da calcio), dotate di particolari proprietà elettriche. Possono essere ottenuti a partire dalla grafite, attraverso processi termici, elettrici o meccanici, oppure attraverso processi pirolitici e di trattamento dei rifiuti contenenti carbone. Scarsamente utilizzati nel settore edilizio, sono state effettuate sperimentazioni per la realizzazione di celle solari polimeriche.

Nanotubi

I nanotubi di carbonio sono strutture di forma cilindrica del diametro di circa 1 nm e lunghe anche parecchi millimetri che presentano proprietà meccaniche, termiche ed elettriche non comuni. Possiedono un modulo elastico fino a 5 volte quello dell'acciaio e una resistenza meccanica anche 10 volte superiore (fino a 100 volte sul piano teorico), con una densità 6 volte inferiore. La principale difficoltà risiede nella funzionalizzazione delle particelle e nella possibilità di disporre ordinatamente i nanotubi nella matrice impiegata. Inoltre, il loro costo è inoltre attualmente proibitivo per applicazioni nel settore edilizio (da 20 € a 1000 € al grammo a seconda della qualità), anche se destinato a calare. L'impiego di nanotubi di carbonio in prodotti per l'edilizia (a base cementizia, polimerica, o in sorgenti luminose) rappresenta una delle sfide delle nanotecnologie nel prossimo futuro, finalizzate principalmente ad ottenere materiali di eccezionale resistenza meccanica o in grado di automonitorarsi sfruttando le particolari proprietà elettriche..

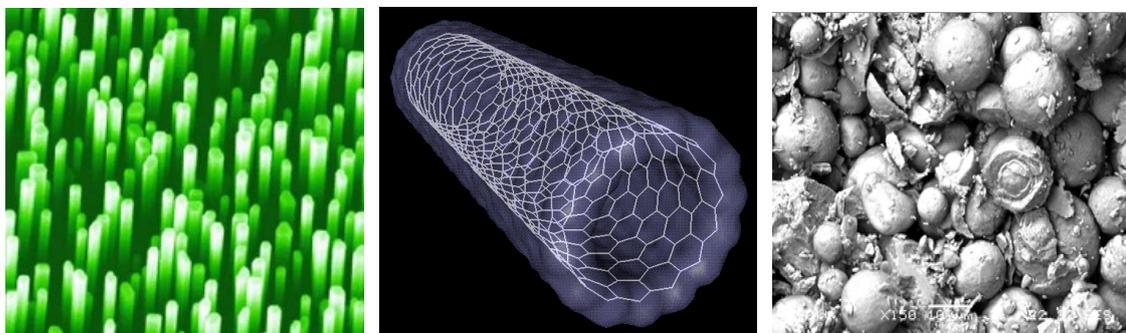
Nanowires

I *nanowires* sono nanoparticelle di conduttori o semiconduttori di forma allungata del diametro di poche decine di nanometri, utilizzati generalmente in applicazioni di nanoelettronica (interconnettori e microchips). Per realizzarli possono essere impiegati diverse tipologie di materiali, quali cobalto, oro, rame o zinco, ma anche silicio, in forma di vapore, in grado di aggregarsi in forma di "fili" una volta depositi sulla superficie trattata. Le principali applicazioni in ambito edilizio potrebbero riguardare la realizzazione di dispositivi piezoelettrici per il monitoraggio delle strutture.

Altre tipologie

Questa categoria include un'ampia varietà di forme sferiche o aggregate di nanoparticelle, per esempio ossidi metallici, semiconduttori, composti inorganici ultrafini, prodotti attraverso processi chimici di vario tipo oppure attraverso processi pirolitici e il recupero di scarti della combustione nei processi industriali. Si tratta di una tipologia di particelle le cui dimensioni sono abbastanza variabili, particolarmente idonee alla produzione in grandi quantità e su scala industriale rispetto alle altre tipologie. In ambito edilizio sono impiegate principalmente nanoparticelle di biossido di titanio ad attività fotocatalitica, nanoparticelle di ossidi argento o zinco per la realizzazione di vetri selettivi e nanoparticelle di silicio per realizzare film fotovoltaici

trasparenti. Cenere volante e fumo di silice ultrafini possono essere invece impiegati come inerti per la realizzazione di cementi ad altissima resistenza o in additivi per calcestruzzo.



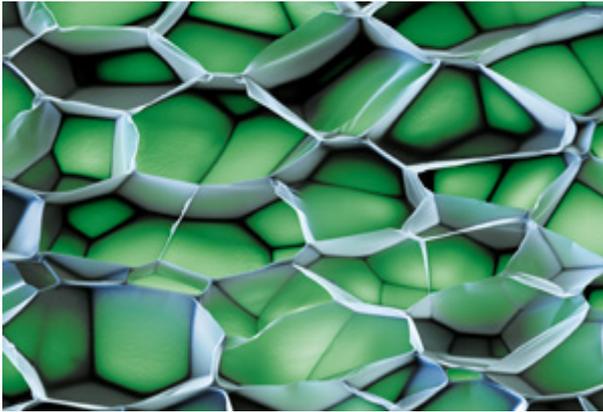
Nanofili di ossidi di zinco, nanotubo di carbonio e nanoparticelle di silice

3.2.2. Materiali nanostrutturati e nanocompositi

Se i nanomateriali rappresentano indubbiamente il settore trainante della ricerca nanotecnologia, in base alle precedenti definizioni si comprende come sia un errore identificare le nanotecnologie per i materiali con l'impiego di nanoparticelle, cioè appunto i materiali prodotti in dimensioni nanometriche quali ad esempio i nanotubi, le nanopolveri, ecc. Il concetto è ben più ampio ed è più corretto riferirsi, soprattutto in relazione ai prodotti per l'edilizia, a *materiali nanostrutturati*,⁶⁰ cioè con una struttura controllata alle dimensioni nanometriche, anche se prodotti e applicati alla scala di centimetri o metri.

Infatti, nel caso specifico di molti materiali da costruzione, quelli a base cementizia in particolare, ma anche determinate tipologie di polimeri o di materiali compositi, la possibilità di osservare le caratteristiche fisico-chimiche alla nanoscala e di testare le proprietà con un tale grado di precisione permette di “correggere” ed ottimizzare le caratteristiche delle nanostrutture a seconda delle prestazioni finali ricercate, anche senza l'aggiunta di nanomateriali. Nei calcestruzzi ad alte prestazioni, ad esempio, è sufficiente modificare il *mix-design* (in relazione alla tipologia e alla dimensione degli inerti, alla tipologia di additivi e al rapporto acqua/cemento) per incrementare le prestazioni di resistenza meccanica e durabilità.

⁶⁰ In letteratura è possibile riscontrare anche la denominazione alternativa di “materiali nanoingegnerizzati”.



La struttura di un polistirene estruso ad alta densità (XPE), vista al microscopio elettronico. Le cavità circondate da sottili lamine di colore chiaro hanno dimensioni fra i 100 e i 200 nanometri e sono l'effetto del processo di espansione in seguito alla reazione del polimero con la CO₂. All'aria contenuta all'interno di queste cavità si devono le eccellenti proprietà termoisolanti del pannello Styrodur di Basf. (Fonte: documentazione tecnica BASF).

Si delineano quindi due principali famiglie di materiali nanostrutturati, distinte essenzialmente dal fatto di essere o meno additivati con nanomateriali. Una tale distinzione non è stata ancora formalizzata dal punto di vista scientifico, ma appare di particolare rilievo in questa sede poiché risulta riscontrabile in maniera evidente tra i materiali e i prodotti esistenti in ambito edilizio.

Un “materiale nanostrutturato” può essere definito dunque come un materiale di tipo tradizionale – quale per esempio l'acciaio, il cemento, il vetro, o i polimeri – additivato, nella sua massa o superficialmente, mediante nanomateriali,⁶¹ oppure modificato nella sua struttura chimico-fisica in seguito all'osservazione, al *testing* e alla caratterizzazione delle proprietà alla nanoscala.⁶² In entrambi i casi le caratteristiche originali dei materiali di base vengono modificate ed implementate al fine di ottenere specifiche prestazioni, generalmente superiori o comunque non assimilabili a quelle esibite dai materiali nella loro consistenza originaria non “nanostrutturata”.

Operare la strutturazione della materia alla scala nanometrica significa dunque:

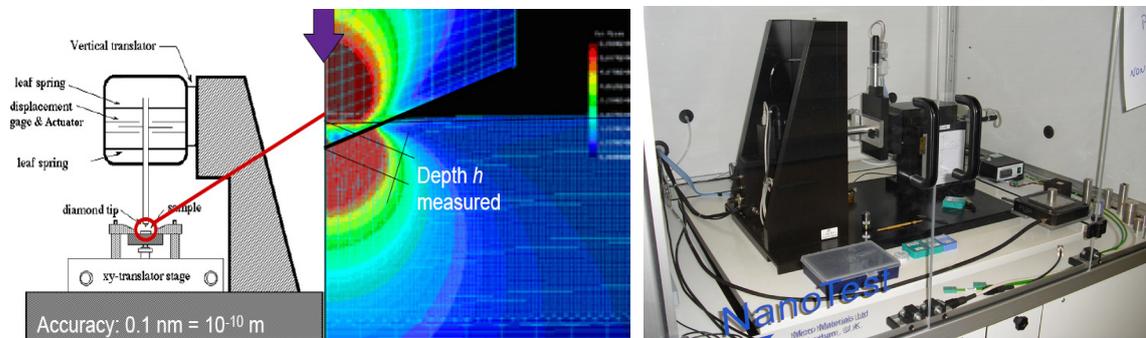
- Osservare le dimensioni nanometriche con un'adeguata strumentazione, quali *microscopi elettronici a scansione o a trasmissione* (SEM, TEM); *risonanza magnetica nucleare* in grado di rappresentare immagini tridimensionali della materia alla scala nanometrica; *microscopio a forza atomica* (AFM), in grado di “fotografare” la superficie di un materiale distinguendo i singoli atomi: il *sincrotrone*,

⁶¹ A questa prima famiglia appartengono i materiali che vengono comunemente chiamati “nanocompositi”.

⁶² Questa seconda famiglia di materiali nanostrutturati non è ancora ufficialmente individuata. In relazione all'apporto delle nanotecnologie impiegate per svilupparli potrebbero essere indicati come materiali “nanocaratterizzati”.

in grado di registrare l'evoluzione della nanostruttura di un materiale nel tempo come in una sequenza cinematografica.

- Controllare la struttura del materiale alle dimensioni nanometriche modificandola nella direzione voluta, definendo le variabili di composizione chimica del formulato, le cinetiche di reazione dei singoli componenti il formulato tra loro e identificando i meccanismi di degrado del materiale.
- Correlare la nanostruttura ottenuta con la funzionalità desiderata, misurando le caratteristiche chimico-fisiche, reologiche e fisico-meccaniche del materiale con strumenti adeguati (ad es. il *nanoindenter*, capace di testare le proprietà meccaniche alla nanoscala), nonché l'evoluzione delle caratteristiche nel ciclo di vita del materiale stesso.



Il *nanoindenter* consente di misurare la “nanodurezza” dei materiali. È possibile applicare tramite un ago una forza in un punto con una precisione pari a 0,1 nm e misurare la profondità di penetrazione nel materiale testato. A destra, nanoindenter del IMCB (Istituto Materiali Compositi e Biomedici) di Portici (NA).

Nanocompositi

I nanocompositi rappresentano una particolare tipologia di materiali nanostrutturati, che sfrutta le proprietà peculiari dei nanomateriali, unendoli alla capacità di governare la struttura molecolare delle diverse tipologie di materiali comunemente impiegati nel settore edilizio. In accordo con la definizione di materiale composito⁶³, i nanocompositi sono realizzati aggiungendo nanoparticelle in un materiale che funge da matrice (detto anche materiale *bulk*) al fine di migliorarne le prestazioni⁶⁴, ed è possibile utilizzare matrici di vario tipo (polimeriche, cementizie, metalliche, ecc.), modificate attraverso

⁶³ È possibile definire come materiale composito una miscela o combinazione di materiali diversi che differiscono nella forma e nella composizione chimica e che essenzialmente sono insolubili l'uno nell'altro. Il materiale composito risulta pertanto essere un sistema eterogeneo in cui i singoli costituenti (denominati “fasi”) sono solo fisicamente assemblati e risultano facilmente identificabili a diversi livelli di ingrandimento. I materiali compositi sono costituiti da una fase continua detta “matrice” ed una fase dispersa detta comunemente “carica” o “rinforzo”. In base a questa definizione i materiali compositi si suddividono in macro, micro e nano-compositi in relazione alle dimensioni caratteristiche dei singoli costituenti.

⁶⁴ Cfr. Surinder Mann, *Nanoforum report: nanotechnology and construction*, Institute of Nanotechnology, 2006.

l'applicazione di "cariche" o "filler" costituiti da nanomateriali, in grado di intervenire sulle caratteristiche fisico-chimiche e di determinare le proprietà finali in termini di resistenza termica, meccanica, fotochimica e agli agenti atmosferici:

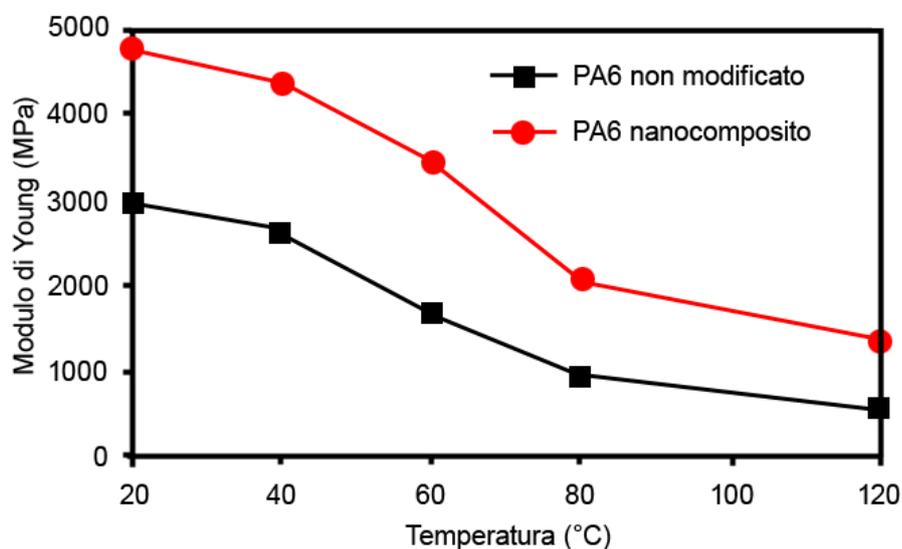
TIPOLOGIA DI MATRICE	TIPOLOGIA DI CARICA/RINFORZO	PRESTAZIONI SPECIFICHE
Ceramica	Nanoargilla (nanoclay)	Migliore lavorabilità Maggiore resistenza meccanica, modulo elastico e resistenza al <i>creep</i>
	Nanotubi di Carbonio	Maggiore resistenza meccanica, durezza e tenacità Migliori proprietà termiche ed elettriche
Polimerica	Nanoargilla (nanoclay)	Maggiore resistenza meccanica, al calore e agli attacchi chimici Migliori proprietà di barriera allo scambio gassoso, Migliore trasparenza Maggiore conduttività elettrica
	Nanosilice	Migliori proprietà meccaniche Migliori proprietà di barriera allo scambio gassoso Maggiore resistenza all'umidità e alle alte temperature
	Nano-ossidi metallici	Maggiore resistenza e stabilità meccanica Maggiore stabilità termica, chimica e alla luce Maggiore resistenza ad agenti atmosferici e chimici aggressivi, maggiore resistenza all'invecchiamento.
	Nanotubi di carbonio	Maggiore resistenza meccanica, durezza e tenacità Migliori proprietà termiche ed elettriche
Metallica	Nano-ossidi metallici	Maggiore durezza, carico allo snervamento, particolari proprietà elettriche
Vetrosa	Nano-ossidi metallici	Proprietà fotocromiche (nanoparticelle di biossido di titanio disperse in idrossido di nichel) Proprietà fotocatalitiche (biossido di titanio, ossido di zinco o biossido di stagno)
Cementizia	Nanosilice	Migliori proprietà meccaniche Migliori proprietà di barriera allo scambio gassoso, Maggiore resistenza all'umidità e alle alte temperature
	Nanoargilla (nanoclay)	Migliore lavorabilità Maggiore stabilità dimensionale Maggiore resistenza all'umidità e agli agenti aggressivi
	Nanotubi di carbonio	Maggiore resistenza meccanica, durezza e tenacità Migliori proprietà termiche ed elettriche
	Biossido di Titanio	Proprietà fotocatalitiche

Attualmente nel settore edilizio cominciano a essere utilizzate diverse tipologie di nanocompositi, con matrice organica (polimerica) o inorganica (cementizia o vetrosa) alla quale mediante processi chimici vengono legate nanopolveri o nanoparticelle anch'esse a base inorganica (carbonio, ossidi metallici, silicati o ceramica) o organica

(polimeri). È inoltre possibile rivestire mediante *coatings* nanostrutturati la maggior parte dei materiali comunemente impiegati nelle costruzioni, selezionando la tipologia di rivestimento in base alle prestazioni specifiche richieste (con applicazioni che vanno dalla protezione di legno e metallo al miglioramento delle proprietà termiche e di durabilità delle vernici). Le proprietà fotocatalitiche del biossido di titanio cominciano ad essere impiegate su molte tipologie di superfici, in particolare vetri e materiali a base calce o cemento. Il progressivo avanzamento delle tecnologie di lavorazione porterà ad ulteriori possibilità applicative, a partire dall'utilizzo di dispositivi e attuatori nanostrutturati all'interno di componenti edilizi (ad esempio nanotubi di carbonio in grado di trasformare stimoli meccanici in impulsi elettrici), fino ad ipotizzare elementi strutturali ultrasottili molto più resistenti, leggeri e flessibili dell'acciaio.



Da sinistra, granulato di PA6 (Poliammide 6) e nanoparticelle di argilla modificata (dimensione 1nm) formano un nanocomposito a matrice polimerica.



Andamento del modulo elastico in funzione dell'aumento di temperatura. Uno dei principali limiti dei materiali polimerici è la ridotta capacità di resistere alle alte temperature. Il nanocomposito PA6-nanoargilla garantisce l'affidabilità delle proprietà meccaniche anche in un range di temperature compreso tra 60 e 120°C. (Fonte: Klaas van Breugel, Ye Guang, "Multi-scale Modelling: the vehicle for progress in fundamental and practice-oriented research", in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction Materials*, Bilbao, Spagna, 13-16 novembre 2006).

Ulteriori innovazioni potrebbero riguardare compositi nanomodificati nei quali, oltre ai benefici derivanti dalla nanomodificazione, vengano sfruttati in maniera sinergica anche quelli derivanti dall'additivazione con fibre di rinforzo. È possibile quindi prevedere lo sviluppo di nanocompositi bifasici (polimero + nanorinforzo) e nanocompositi trifasici (polimero + nanorinforzo + fibre).⁶⁵

I principali ostacoli legati alla produzione di nanocompositi riguardano la necessità di una migliore comprensione delle proprietà all'interfaccia matrice-carica, del perfezionamento delle tecniche di dispersione, dell'efficienza prestazionale in condizioni d'uso, oltre che una maggiore attenzione agli impatti ambientali durante il ciclo produttivo, legati alla volatilità e alla tossicità di alcune tipologie di nanomateriali.

Per alcune tipologie di nanocompositi, infatti, occorre ancora definire con attenzione i reali impatti prodotti lungo l'intero ciclo di vita. Ad esempio, nanocompositi realizzati con nanopolveri di ossidi di ferro, stagno o argento, determinano un costo ambientale in fase produttiva che richiede di essere necessariamente compensato in fase di esercizio in virtù delle prestazioni offerte.⁶⁶ Per molti di questi prodotti restano da verificare la stabilità nel tempo delle reazioni chimiche prodotte sulla superficie dei materiali, l'eventuale rilascio di sostanze tossiche nel lungo periodo, i livelli di efficienza e di sostenibilità nei processi produttivi su scala industriale e le modalità di dismissione (cfr. par. 4.2.). Da più parti sono stati lanciati avvertimenti sugli effetti sconosciuti che le nanoparticelle presenti in tali prodotti possono provocare sulla salute umana e sull'ambiente, al punto che in molti hanno chiesto che la ricerca nanotecnologica sia accompagnata da studi sull'ecotossicologia.

3.2.3. Processi produttivi e di sintesi

Processi di produzione dei nanomateriali

I processi di lavorazione dei nanomateriali per il settore edilizio sono di natura complessa e richiedono un accurato controllo al fine di ottenere le prestazioni richieste. A seconda della tipologia di nanomateriale da ottenere si può operare seguendo diversi

⁶⁵ Cfr. Marino Quaresimin et al, "Preparazione e caratterizzazione di nanocompositi a matrice epossidica", in *Atti del XXXIV Convegno Nazionale AIAS (Associazione Italiana per l'Analisi Delle Sollecitazioni)*, Milano, 14-17 settembre, 2005.

⁶⁶ E il caso dei vetri selettivi a base di nanoparticelle di ossido di argento, il cui costo in termini di emissioni nocive in fase di produzione è compensato (a detta delle case produttrici) nell'arco di soli 8 mesi di vita grazie al contributo derivante dai minori consumi energetici necessari alla climatizzazione degli ambienti.

processi di lavorazione; questi possono essere classificati secondo due metodi principali:

Un primo metodo, denominato *top-down*, consiste nell'ottenere strutture di dimensioni nanometriche a partire dalla lavorazione di un solido di dimensioni discrete. Il processo più comune è basato su tecniche di miniaturizzazione mediante litografia a fasci di elettroni, ioni o raggi X, che tendono a ridurre progressivamente le dimensioni dei reticoli cristallini. Attualmente tuttavia i metodi di miniaturizzazione non sono in grado di produrre nanostrutture con una dimensione inferiore ai 100nm per limitazioni legate principalmente alla capacità di focalizzazione dei fasci.

L'altro approccio è quello *bottom-up* in cui la nanostruttura è generata per addizioni successive di atomi, con una tecnica basata principalmente sull'attivazione di processi chimici (ad esempio con tecniche *Sol-Gel* o di *Chemical Vapor Deposition*). I metodi nanochimici consentono il controllo della dimensione delle strutture fin da un livello atomico o molecolare e appaiono oggi i più adeguati per la produzione di quantità elevate di nanomateriali, poiché sembra matura la possibilità di un trasferimento della produzione su scala più ampia.

Processi di produzione dei materiali nanostrutturati

I processi produttivi dei materiali nanostrutturati possono essere distinti a seconda che sia previsto o meno l'impiego di nanomateriali al loro interno. L'approccio che parte dalla nanostrutturazione dei materiali convenzionali alla nanoscala per migliorarne le prestazioni, senza l'aggiunta di nanomateriali, prevede sostanzialmente l'impiego tecnologie di lavorazione analoghe a quelle dei materiali convenzionali, ad eccezione dell'eventuale aggiunta di additivi o prodotti speciali, che si presentano in forma di liquidi colloidali (ad es. lattici per vernici, additivi per calcestruzzo, ecc.) o polveri finissime (ad es. cementi ultrafini, aggiunte minerali per malte e calcestruzzi, ecc.), ma che pur essendo in alcuni casi basati su nanotecnologie in fase di lavorazione, non rientrano nel range dimensionale dei nanomateriali e presentano modalità di impiego sostanzialmente analoghe ai prodotti chimici convenzionali comunemente utilizzati come additivi o filler. In altri casi tali materiali (ad es. nel caso dei calcestruzzi ad altissime prestazioni) possono prevedere semplicemente una diversa e più accurata composizione dei costituenti di base (non necessariamente sviluppati mediante nanotecnologie), tale da indurre significative modifiche al comportamento delle nanostrutture presenti all'interno del materiale.

Nel caso dei nanocompositi una delle principali difficoltà risiede nell'attitudine delle nanoparticelle ad aggregarsi in forme cristalline di dimensioni micrometriche per ridurre la propria energia libera di superficie. È necessario invece che le cariche siano disposte uniformemente nella matrice e che ciascuna presenti le medesime caratteristiche di forma, dimensione e composizione, contribuendo alla stessa maniera al raggiungimento delle proprietà finali del composito (la forma delle nanoparticelle, ad esempio, risulta fondamentale per aumentare la resistenza meccanica del materiale secondo direzioni preferenziali).

I nanocompositi possono essere realizzati direttamente in laboratorio, dove il processo di sintesi delle nanoparticelle può avvenire in presenza della matrice o come materiali tradizionali (vetro, legno, alluminio, ecc.) rivestiti con film sottili mediante processi di *sputtering*. È inoltre possibile realizzare *coatings* mediante film sottili di diversa natura di superfici tramite uno o più strati, e i singoli strati possono essere chimicamente funzionalizzati per assolvere alle diverse funzioni. È il caso dei SAMs (*Self Assembled Monolayers*), in cui il film sottile si forma in maniera spontanea sulla superficie da ricoprire mediante l'aggregazione di un solo strato di molecole alla volta.

Glossario sintetico nanotecnologico

- *Nanoscienza*: studio dei fenomeni, delle proprietà e delle possibilità di interazione della materia alla scala atomica, molecolare e macromolecolare
- *Nanotecnologia*: capacità di osservare, misurare e manipolare la materia su scala atomica e molecolare
- *Nanometro*: Unità dimensionale pari a 10^{-9} m
- *Nanoscala*: range dimensionale entro cui operano le nanotecnologie, convenzionalmente individuato tra 1 e 100 nm
- *Nanomateriale*: struttura molecolare in cui una delle tre dimensioni nello spazio è inferiore ai 100 nm
- *Materiale nanostrutturato/nanoingegnerizzato*: materiale le cui proprietà sono controllate alla nanoscala attraverso l'impiego di nanotecnologie, può contenere o meno nanomateriali al suo interno
- *Nanocomposito*: materiale composito in cui almeno una delle fasi costituenti possiede una o più dimensioni inferiori a 100 nm

4. L'INNOVAZIONE NEL CAMPO DELLE NANOTECNOLOGIE PER L'EDILIZIA

4.1. Le traiettorie dell'innovazione nel campo delle nanotecnologie per i materiali edilizi

4.1.1. Problematiche attuali nei processi di trasferimento tecnologico nel settore edilizio

L'innovazione nel campo delle nanotecnologie pone in primo piano le problematiche legate al trasferimento di tecnologie da settori più avanzati quali l'elettronica, l'ottica, l'aerospaziale e il biomedicale,⁶⁷ verso quello edilizio. I materiali originariamente sviluppati per rispondere a specifiche necessità in relazione a particolari destinazioni d'uso vengono oggi trasferiti all'interno del settore edilizio con i seguenti effetti:

- permettono il raggiungimento di standard prestazionali più elevati
- offrono nuovi stimoli ai progettisti contribuendo all'evoluzione di linguaggi architettonici
- creano una "domanda indotta" derivante dalle svariate applicazioni possibili (non necessariamente richieste originariamente)
- attivano nuovi canali di ricerca e sviluppo interni all'ambito edilizio
- amplificano i fattori di "rischio tecnico" quando l'applicazione non è sufficientemente supportata da conoscenze tecniche e le procedure di controllo sono molto più approssimative che nei settori originari

La diffusione nel mercato edilizio di materiali e prodotti con caratteristiche innovative, supportata da un'adeguata analisi delle prestazioni raggiungibili, dei campi di applicazione appropriati, dei costi-benefici legati all'utilizzo di tecnologie di punta, può costituire uno dei terreni fertili per far confluire in maniera proficua i differenti *know-how* provenienti dai settori della ricerca, dell'industria e delle aziende. È una tendenza positiva confermata, ad esempio, dal successo dei materiali compositi nel campo del presidio e rinforzo strutturale, la cui diffusione si sta realizzando in tempi relativamente brevi proprio grazie alla rispondenza delle caratteristiche prestazionali del materiale a quel determinato tipo di impiego, e che di fatto ha aperto la strada ad ulteriori studi finalizzati alla sperimentazione di lavorazioni e applicazioni innovative.

⁶⁷ Ossia settori in cui ai materiali vengono richieste particolari proprietà meccaniche, elettriche, termiche, chimiche, ottiche, ecc. in condizioni d'uso anche estreme.

L'affermarsi di processi e prodotti dematerializzati ha negli ultimi anni indotto sostanziali modificazioni alle modalità di trasferimento tecnologico e di adattamento al settore edilizio di innovazioni sviluppate in altri ambiti industriali. Il trasferimento di tecnologie convenzionali si è sempre basato sulla permanenza della riconoscibilità dei caratteri distintivi di prodotti e sistemi, adattati in maniera da rendere tali sistemi compatibili con l'applicazione architettonica, mentre nel caso delle tecnologie dematerializzate, le logiche applicative iniziali possono essere completamente trasformate determinando scenari applicativi e ibridazioni non prevedibili, in grado di innescare ulteriori processi innovativi interni al settore edilizio tramite azioni progressive di perfezionamento, adeguamento e rielaborazione delle tecnologie originariamente trasferite.

Campi di applicazione iniziali	medicina elettronica ottica nautica e aeronautica ingegneria aerospaziale <i>auto motive</i> e robotica <i>high performance athletics</i>
Richiesta prestazionale originale	migliori proprietà meccaniche resistenza in condizioni d'uso estreme riduzione di peso e dimensioni stabilità chimico-fisica capacità di autoregolazione particolari proprietà di interfaccia (elettro-magneto-fotoreologiche)

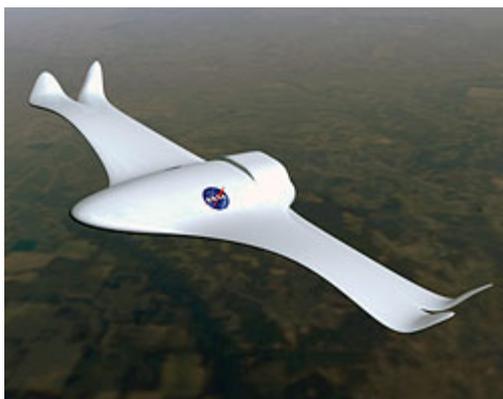
Ciò è tanto più evidente nel caso delle nanotecnologie, il cui trasferimento nel settore edilizio ha riguardato da un lato l'importazione di una serie di strumenti ad alta precisione per l'osservazione e il *testing* di materiali, dall'altro le conoscenze e le tecnologie necessarie alla lavorazione della materia alla scala atomica e molecolare.⁶⁸ In altre parole ciò che viene trasferito non è più il risultato finale di un'applicazione o di una scoperta scientifica, quanto piuttosto un'insieme di fattori materiali e immateriali necessari allo sfruttamento di una specifica tecnologia, che come tale può essere adattata al fine di rispondere alle esigenze legate allo sviluppo di prodotti e sistemi all'interno di un comparto specifico (industria del vetro, del cemento, della ceramica,

⁶⁸ La maggior parte delle innovazioni di prodotto basate sulle nanotecnologie in ambito edilizio non sarebbero state infatti attuabili senza il supporto di continue innovazioni di processo che rendono ri-producibili i risultati sperimentali anche negli ambiti di produzione industriale. Un caso evidente è quello dell'*aerogel*, isolante trasparente utilizzato a partire dagli anni '80 nell'industria aerospaziale, il cui trasferimento nel settore edilizio è stato possibile solo in seguito a modalità produttive basate su nanotecnologie che permettono di abbassare i costi di produzione.

ecc.). Pertanto, nel caso delle nanotecnologie, le possibilità di sinergie tra i vari settori industriali, ma anche tra più comparti in uno stesso settore, sono particolarmente promettenti.

I processi di trasferimento tecnologico legati alle nanotecnologie riguardano dunque generalmente innovazioni di *processo* il cui risultato finale si traduce in innovazioni di *prodotto*, sostanzialmente legate ai seguenti ambiti:

- progettazione e creazione di nuovi materiali artificiali (più leggeri, più flessibili e duttili nel loro impiego, ecc.);
- individuazione di nuove applicazioni e funzionalità per i materiali tradizionali modificati nelle loro proprietà;
- progettazione e realizzazione di componenti con migliorate caratteristiche di posa in opera e durabilità;
- realizzazione di manufatti edilizi con nuova o migliore flessibilità nell'impianto strutturale, funzionale e organizzativo grazie all'impiego di materiali ad alte prestazioni all'interno di *smart environments*.



Prototipo di smart plane realizzato dalla NASA. L'aereo è realizzato con materiali in grado di modificare la propria forma a seconda delle condizioni ambientali e delle fasi di volo.

Com'è noto l'innovazione di prodotto può essere *incrementale* (miglioramento di prodotti esistenti) o *radicale* (immissione sul mercato di un nuovo prodotto). Molti autori (Mangiarotti, 1993; Tonelli, 2003) affermano che l'innovazione incrementale sia quella che caratterizza maggiormente il mercato edilizio, tuttavia, se consideriamo l'ambito specifico delle nanotecnologie per l'edilizia, ci troviamo quasi sempre davanti ad innovazioni di tipo radicale, che anche quando riguardano il miglioramento di prodotti di uso comune e diffuso (come malte, intonaci, pitture, pannelli leggeri), presuppongono un cambiamento radicale delle proprietà, delle prestazioni e quindi anche delle funzioni

che tradizionalmente li caratterizzano, implicando un cambiamento radicale anche nel modo in cui il progettista vi si relaziona.

Un fattore chiave da considerare in relazione ad un crescente trasferimento delle nanotecnologie nel settore edilizio riguarda la capacità di controllo degli impatti ambientali e sociali. In settori quali l'industria aerospaziale i livelli produttivi si attestano su scala modesta ed il controllo accurato di tutte le fasi, dalla produzione all'assemblaggio, è condizione essenziale per la sperimentazione di nuove tecnologie. Il timore è che in un settore come quello edilizio, con livelli produttivi elevatissimi e in cui a valle dei produttori il funzionamento corretto in opera di prodotti e sistemi è affidato alla competenza delle imprese, i rischi già accennati legati alla diffusione delle nanotecnologie possano essere amplificati. La risposta a questo tipo di problemi risiede nella capacità dei produttori di garantire e certificare l'efficienza e l'ecologicità dei processi e di offrire al contempo un'interfaccia costante con progettisti e imprese al fine di ridurre le condizioni di rischio tecnico in fase di realizzazione e gestione.

4.1.2. Gli attori dei processi di innovazione: ricerca scientifica e industria

L'interesse crescente verso le potenzialità applicative dei materiali avanzati, ed in particolare delle nanotecnologie applicate ai materiali, è confermato dalla rilevanza della tematica, a livello nazionale ed europeo, nei documenti strategici per la programmazione della ricerca scientifica e dei finanziamenti legati all'innovazione tecnologica.⁶⁹

In Europa la ricerca e gli investimenti sulle nanotecnologie sono destinati a crescere notevolmente nei prossimi anni, grazie anche alla rilevanza del tema all'interno del VII Programma Quadro⁷⁰, che individua il settore "Nanoscienze, nanotecnologie, materiali e nuove tecnologie di produzione" tra gli ambiti prioritari per lo sviluppo economico e industriale, indicando nei materiali con proprietà innovative «la chiave per la futura competitività dell'industria europea e le basi per il progresso tecnico».⁷¹

Nel programma si sottolinea la necessità di generare «nuove conoscenze sui materiali ad alte prestazioni per nuovi prodotti e processi», con l'obiettivo di introdurre «sistemi

⁶⁹ Nel 6PQ (2002-2006) sono stati forniti finanziamenti per circa 1,4 miliardi di euro a favore di 550 progetti nel settore delle "Nanoscienze e Nanotecnologie". Il contributo della Commissione europea era stato, invece, di 120 milioni di euro nel 4PQ (1994-1998) e di 220 milioni di euro nel PQ (1998-2002). Per tutta la sua durata il 6PQ ha rappresentato circa un terzo della spesa pubblica complessiva in Europa a favore delle N&N. Fonte: Commissione Europea.

⁷⁰ Approvato alla fine del 2006. Cfr. http://ec.europa.eu/research/fp7/pdf/amended-28_06_06-en.pdf, p. 29.

⁷¹ Nell'approvare definitivamente il VII Programma Quadro (a dicembre 2006), la Commissione Europea ha assegnato al settore di ricerca "Nano-scienze, nano-tecnologie, materiali e nuove tecnologie di produzione" 3475 milioni di euro per il quinquennio 2007-2013, una cifra inferiore soltanto a quelle assegnate ai settori "Informazione e tecnologie di comunicazione", "Salute" e "Trasporti", raddoppiando il contributo previsto dal VI PQ, pari a 1,9 milioni di euro.

di progettazione e simulazione più affidabili per una maggiore compatibilità ambientale», affiancando lo studio dell'«impatto su sicurezza umana; salute e ambiente» alla definizione di un apparato comune di «metrologia, nomenclatura e norme».

Mentre nel VII Programma Quadro è possibile registrare un'attenzione marginale alle problematiche del settore edilizio, i singoli paesi dell'Unione, hanno focalizzato l'attenzione sulle potenzialità insite nelle nanotecnologie come veicolo di innovazione per i materiali edilizi, seguendo gli orientamenti più avanzati in tal senso di Stati Uniti, Giappone e Corea del Sud. Convegni, iniziative, programmi di ricerca specifici e centri di ricerca dedicati sono stati avviati⁷² già in seguito all'approvazione del VI Programma Quadro, nel 2002, in cui per la prima volta le nanotecnologie sono state individuate come area specifica di finanziamento.

La differenza sostanziale tra l'Europa e i paesi extraeuropei citati risiede da un lato nei finanziamenti globali stanziati per la ricerca (nel 2002 erano pari al 1,9% del PIL in Europa a fronte del 2,7% degli Stati Uniti e del 3,1% del Giappone⁷³). L'obiettivo a breve termine dell'UE è quello di raggiungere quota 3% nel rapporto investimenti/PIL, tuttavia la situazione attuale indica che lo scarto tra l'UE e gli Stati Uniti per quanto riguarda gli investimenti a favore della ricerca supera già 130 miliardi di euro l'anno e continua ad aumentare. Incide su questo in massima parte la quota di finanziamenti privati, pari negli Stati Uniti al 50% del totale ed in Giappone al 75%. In Europa dunque il livello di conoscenze su nanoscienze e nanotecnologie è elevato⁷⁴, ma non raggiunge la maturità nelle applicazioni industriali (considerando sia i brevetti, sia gli *start-up*, sia le quote di investimenti).⁷⁵

Uno dei principali ostacoli da superare riguarda infatti il coinvolgimento dei settori di Ricerca & Sviluppo delle imprese e delle industrie sui grandi temi legati alle nanotecnologie. L'ingente sostegno finanziario previsto nel 7PQ dovrebbe tendere a ridurre il *gap* dell'Europa nei confronti dei principali *competitors* internazionali,

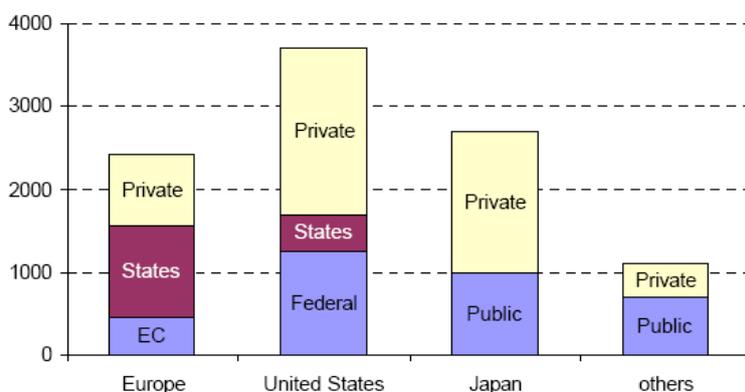
⁷² Cfr. tra gli altri: International Symposium on Nanotechnology in Construction (2003, Paisley, Scozia e 2005, Bilbao, Spagna), la rete europea Nanoforum, le iniziative NanoTecture in Germania, Nanobyg in Danimarca e le attività del centro di ricerca Nanoc, in Spagna.

⁷³ Fonte: Unione Europea 2008. Nell'UE, secondo Eurostat, il settore imprenditoriale ha finanziato nel 2001 il 55% delle spese totali di ricerca dell'UE, mentre la percentuale di questo settore negli Stati Uniti e in Giappone ammontava a 74% nel 2002. Nel 2003, l'intensità di ricerca più elevata si è registrata in Svezia (4,27% del PIL nel 2001) e in Finlandia (3,51%), seguite dalla Danimarca (2,6%), dalla Germania (2,50%), dal Belgio (2,33%), dalla Francia e dall'Austria (2,19%).

⁷⁴ Nella classifica delle pubblicazioni scientifiche (1991-2000) collegate alle nanotecnologie l'Italia è all'ottavo posto (958), preceduta da Stati Uniti (9993), Giappone (4251), Cina (3168), Germania (3634), Francia (2673), Russia (1708) e Regno Unito (1545).

⁷⁵ Si tratta comunque di un dato che non riguarda unicamente le nanotecnologie, ed è riferibile in generale alle applicazioni delle tecnologie innovative.

seguendo l'ottima spinta derivante dalle precedenti azioni di sostegno all'industria europea.⁷⁶



Finanziamenti pubblici e privati destinati nel 2005 alla R&S nel campo delle nanotecnologie, dati in milioni di euro. (Fonte: Commissione Europea, 2005)

Le grandi multinazionali sono sicuramente attori chiave nello sviluppo delle nanotecnologie, soprattutto in settori quali la chimica e l'ottica (Bayer, BASF, Carl Zeiss), il che sottolinea il carattere internazionale di questo tipo di ricerca. Tuttavia a differenza dei settori della genetica e delle biotecnologie, dove la ricerca e il mercato sono dominati da colossi quali la Monsanto o la Novartis, nel *nanotech* anche i settori di R&S di piccole aziende *start-up* possono giocare un ruolo di primo piano considerando che la maggioranza delle imprese coinvolte in questo settore sono nate alla fine degli anni '90⁷⁷ e non esistono di fatto attualmente aziende leader nel settore. Inoltre il costo relativamente basso di alcune tecnologie di produzione e ricerche applicate basate su nanotecnologie, potrebbe favorire una migliore distribuzione del mercato ed un livello potenzialmente analogo di potenzialità innovative tra piccole e grandi aziende, contrastando una logica che vede un progressivo spostamento "a monte" della possibilità di esprimere un valore aggiunto legato alla diffusione di nuove tecnologie, sempre più raffinato, ma appannaggio di pochi.

⁷⁶ Il 6PQ ha sostenuto l'elaborazione di tabelle di marcia per giungere ad applicazioni industriali (legate principalmente ai nanomateriali) tramite un'ampia diffusione dei risultati delle ricerche presso le imprese (ad esempio, NanoRoadSME e NanoRoadMap). Questa attività ha completato il lavoro svolto delle piattaforme tecnologiche europee, ad esempio ARTEMIS (sistemi informatici integrati), ENIAC (nanoelettronica), EPoSS (integrazione dei sistemi intelligenti), FTC (tessili e abbigliamento del futuro), ManuFuture (metodi di fabbricazione del futuro), NanoMedicine, Sicurezza industriale e SusChem (chimica sostenibile). Sono stati inoltre avviati gruppi di lavoro sulla micro e nanofabbricazione (MINAM e MNTERA-Net), mentre altre politiche, quali l'azione di coordinamento CONCORDE-NSOCRA sui catalizzatori ossidi nanostrutturati, hanno contribuito a dimostrare l'impatto positivo delle nanotecnologie sull'efficienza energetica dei processi industriali e sull'ambiente.

⁷⁷ Cfr. Angela Hullmann, *The economic development of nanotechnology. An indicators based analysis*, Commissione Europea, 2006.

ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nanoarticle_hullmann_nov2006.pdf

In Italia, nonostante il bilancio negativo globale legato alla ricerca e la carenza di finanziamenti pubblici, alcuni distretti tecnologici sono in grado di reggere il confronto con le realtà straniere. È il caso del Distretto per le Nanotecnologie, Veneto Nanotech, istituito nel 2003, che funge da catalizzatore per progetti di ricerca congiunti tra centri di ricerca, università e imprese. Numerosi sono anche i progetti del CNR basati sullo sviluppo di materiali nanostrutturati e nuove tecnologie di lavorazione, che in alcuni casi hanno portato allo sviluppo di brevetti proprio per materiali da costruzione⁷⁸.

Allo stesso tempo, si registrano importanti traguardi da parte di alcune aziende italiane, su tutti Italcementi, che nel 2006 ha guadagnato le prime pagine dei quotidiani internazionali grazie al suo cemento "mangia smog" *TX Active*⁷⁹, mentre molte altre aziende (tra cui, ad esempio, MAPEI) stanno avviando programmi di ricerca volti a studiare il contributo delle nanotecnologie allo sviluppo di prodotti e sistemi.

Sul modello dell'americana *National Nanotechnology Initiative*⁸⁰ anche in Italia, a partire da centro Nanotec IT⁸¹, è stata avviata la proposta per un'azione di sviluppo e coordinamento a livello nazionale, che tenga in considerazione la «sinergia tra gli attori dello sviluppo, una giusta politica di incentivazione e supporto da parte governativa, focalizzata alla selezione e promozione dell'eccellenza, l'attenzione alle problematiche della sicurezza e della valutazione del rischio»⁸².

Comincia a farsi strada l'idea che tali temi sono affrontabili unicamente con un approccio integrato. Tale approccio è tanto più prezioso per le imprese e le industrie, poiché per sfruttare le conoscenze di frontiera necessarie allo sviluppo di prodotti e sistemi basati su tecnologie innovative è fondamentale attivare una intensa collaborazione con la comunità scientifica e con la ricerca di base.

Si è compreso come le nanotecnologie rappresentino una discontinuità tecnologica nel mondo dei materiali per l'edilizia poiché consentono in massima parte la protezione delle proprietà intellettuale delle nuove tecnologie sviluppate e dunque vantaggi competitivi notevoli. Tuttavia per ottenere tali vantaggi sono necessari investimenti

⁷⁸ È il caso ad esempio di *Hypucem*, composito nanostrutturato a base cementizia e poliuretanicamente brevettato da una società *spin-off* dell'Istituto per i Materiali Compositi e Biomedici del CNR-IMCB (Istituto per i Materiali Compositi e Biomedici).

⁷⁹ Cfr. *Italians discover a smog-eating cement*, Herald Tribune, 23-11-2006 e *Church on the edge of Rome offers a solution to smog*, New York Times, 28-11-2006.

⁸⁰ Cfr. M.C. Roco, [National Nanotechnology Initiative: past, present and future?](#), NNI, 2006. Articolo del responsabile della NNI USA, sullo sviluppo attuale e futuro delle iniziative americana e più in generale delle nanotecnologie.

⁸¹ Nanotec IT (Centro Italiano per le Nanotecnologie) è stato creato nel 2003 da AIRI, Associazione Italiana per la Ricerca Industriale, per farne un punto di riferimento nazionale sulle le nanotecnologie per industria, ricerca pubblica, istituzioni governative. Aderiscono, tra gli altri, enti di ricerca quali CNR, ENEA, Politecnico di Torino e aziende come Italcementi e Pirelli.

⁸² Cfr. *Governare le nanotecnologie in Italia*, convegno, Centro Congressi Frentani, Roma, 3 luglio 2006.

significativi in termini di risorse umane ed economiche e che i tempi di ritorno sono prevedibili solo nel medio-lungo periodo, rendendo più problematico per il sistema italiano di piccole e medie imprese l'ingresso nel mondo delle nanotecnologie in assenza di una strategia globale di sviluppo..

Percentuale di fatturato attribuibile a prodotti o materiali innovativi

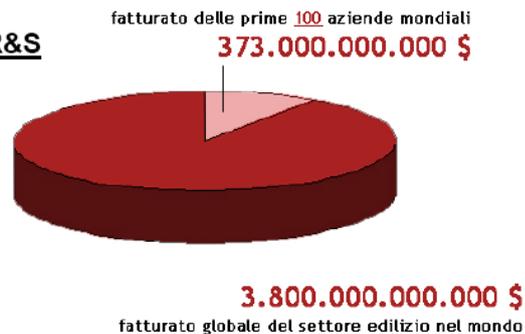
Edilizia: 10,7%

Altri settori industriali: 37,1%

Percentuale di imprese impegnate in R&S

Edilizia: 24%

Altri settori industriali: 48%



Specificità del settore edilizio: la percentuale di fatturato attribuibile ai prodotti innovativi è decisamente più bassa che negli altri settori e solo una piccola parte delle imprese produce innovazioni grazie ad attività di R&S. Si tratta inoltre di un settore estremamente frammentato: le prime 100 aziende mondiali coprono appena il 10% del mercato globale.

Fattori di successo dei prodotti innovativi	
Presenza di vantaggi dimostrabili in comparazione ad altri prodotti dello stesso settore.	Caratteristiche fisiche del materiale e caratteristiche del materiale in uso, certificabilità delle prestazioni offerte
Riduzione/abbattimento dei rischi di adozione e continuità con le prassi e le modalità di impiego correnti.	Consenso ottenuto presso gli operatori del processo edilizio, progettisti e costruttori; capacità di semplificare operazioni
Facilità di impiego.	Semplicità operativa e possibilità di ridurre fasi di lavorazione, capacità di incidere sull'organizzazione del lavoro in cantiere
Competitività economica.	Costo-qualità, disponibilità, efficienza delle tecnologie di produzione
Comunicabilità dei vantaggi comparativi.	Rilevanza delle azioni di marketing

Elaborazione da Nicola Sinopoli, Valeria Tatano (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2002.

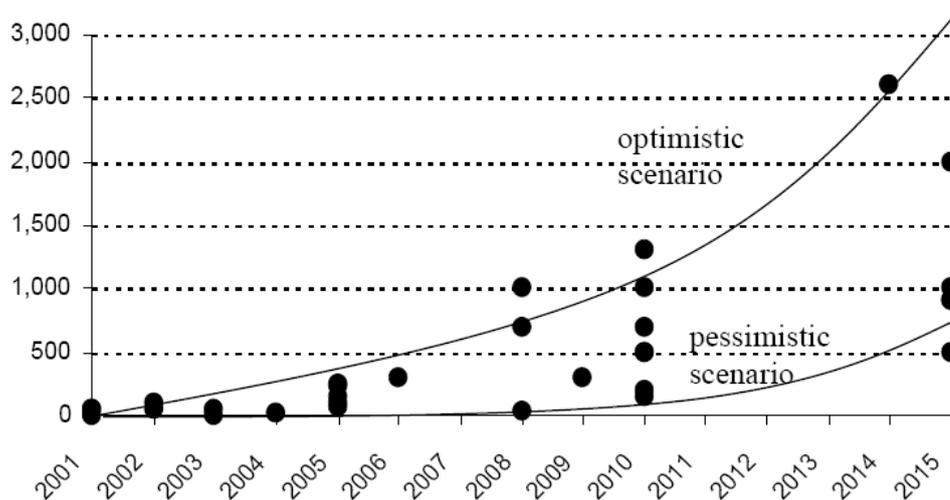
4.1.3. Caratteristiche del mercato delle nanotecnologie per i prodotti edilizi

Poiché «l'innovazione è l'affermazione di una novità tecnica o organizzativa sul mercato, e non solo la sua invenzione»,⁸³ lo studio delle potenzialità applicative dei materiali avanzati non può prescindere dalla conoscenza delle possibilità evolutive di

⁸³ D. Fonhoff, "Lo sviluppo di materiali innovativi", in M. Hegger et al., *Atlante dei materiali*, UTET Scienze Tecniche, Torino, 2006, p. 28.

un mercato costituito da settori tuttora *in embrione*, con livelli di aleatorietà elevati in termini di costi, prestazioni e rischi globali.

La fase attuale è caratterizzata da una forte espansione del mercato delle nanotecnologie applicate ai materiali, ai prodotti e ai sistemi per l'edilizia, e richiede la capacità di saper seguire gli sviluppi della tecnologia, per tradurre in un tempo ragionevole le innovazioni in prodotti e processi produttivi.



Previsioni di mercato per il settore delle nanotecnologie in miliardi di dollari (fonti diverse).

D'altra parte le nanotecnologie non costituiscono una tipologia di industria che può essere facilmente identificata e quantificata. Il *nanotech* porterà quasi certamente al miglioramento di molti prodotti esistenti e allo sviluppo di prodotti completamente nuovi, ma il suo contributo non sarà sempre rintracciabile con evidenza, potendo contribuire ai processi produttivi in modo diverso, a seconda delle tipologie di prodotto finale.

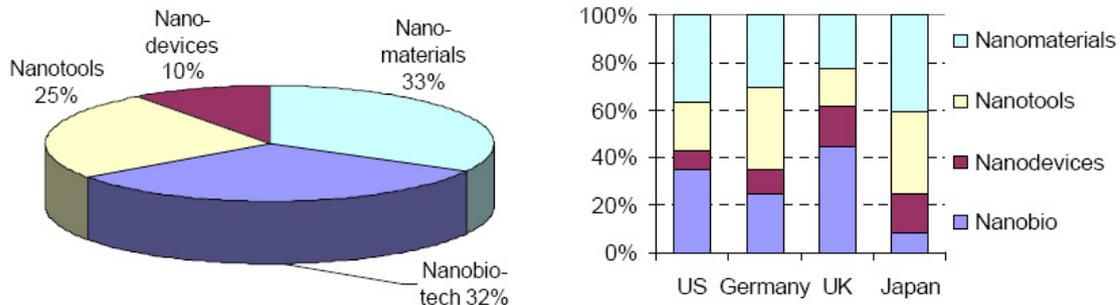
Le stime su scala mondiale del mercato delle nanotecnologie possono variare molto a seconda della definizione stessa di nanotecnologia e del valore aggiunto che si prevede sarà in grado di apportare ai prodotti e sistemi in commercio. Si prevede che nel 2015 il mercato delle nanotecnologie nei diversi settori industriali oscillerà tra i 600 e i 3.000 miliardi di dollari.⁸⁴

Al di là degli ordini di grandezza, occorre considerare che circa un terzo delle aziende impegnate nelle nanotecnologie opera nel campo dei nanomateriali⁸⁵ e che una quota non marginale di tale mercato riguarda i prodotti destinati al mercato edilizio. Nonostante infatti la domanda in questo settore sia finora piuttosto limitata (nel 2006

⁸⁴ Cfr. Angela Hullmann, cit., p. 9.

⁸⁵ Nel 2005 la vendita globale di prodotti per il consumatore contenenti nanomateriali hanno superato i 32 miliardi di dollari e si contano oltre 300 prodotti in commercio.

negli Stati Uniti è stata pari a soli 20 milioni di dollari), è prevista⁸⁶ una forte crescita che porterà ad un ampliamento del mercato, pari a circa 100 milioni di dollari nel 2011 e circa 1,75 miliardi nel 2025.



Distribuzione delle aziende per segmenti di mercato (Fecht, 2003).

Bisogna includere in questa previsione sia i prodotti per l'edilizia contenenti nanomateriali (come i vetri selettivi e fotocatalitici o le vernici antiusura), sia i prodotti la cui struttura chimico-fisica viene modificata in seguito all'osservazione e al *testing* alla scala nanoscopica senza aggiunta di nanomateriali (come alcuni materiali cementizi e polimeri ad alte prestazioni).

La strutturazione del mercato delle nanotecnologie per l'edilizia vede dunque a monte i produttori degli "elementi di base" da impiegare nel processo tecnologico, da un lato i produttori di nanomateriali (ad es. BASF, Dow Chemical, General Electric, General Motors, Hewlett-Packard, Intel, IBM, ecc.), dall'altro i produttori di strumenti di analisi nanometrica (ad es. Jeol, FEI Company, Varian, ecc.).

Nella prima categoria sono pochi i casi in cui l'azienda produce anche prodotti destinati in maniera specifica al mercato edilizio (è il caso, ad esempio, della BASF o della DuPont). Generalmente ad acquistare nanomateriali e strumentazioni sono, oltre alle migliaia di centri di ricerca in tutto il mondo, solo alcune grandi aziende che generalmente operano su scala internazionale (è il caso, ad esempio, di Mapei, Glaverbel, Italcementi o Lafarge), impegnate a sviluppare nuovi prodotti e sistemi ed i relativi brevetti per le possibili applicazioni.

⁸⁶ Cfr. Freedonia *Nanotechnology in Constuction. US industry study with forecasts for 2011, 2015 and 2025*, 2007. Per le previsioni di mercato globali cfr. Hans-Jörg Fecht et al., *Nanotechnology Market and Company Report - Finding Hidden Pearls*, WMtech Center of Excellence Micro and Nanomaterials, Ulm, 2003 e Freedonia: *Nanotech Tools to 2008: Nanotech Tool Technologies – Microscopy*, http://freedonia.ecnext.com/coms2/summary_0285-21108_ITM, 2004.

Società	Capit. di borsa (mil. USD)	Focus sulla nanotecnologia	Settore
BASF	36.7	Superfici funzionali, additivi nanostrutturati, nanofillers, nanocubi per lo stoccaggio di idrogeno, ecc.	Chimica
Dow Chemical	43.2	Particelle nanostrutturate, additivi nanostrutturati, ecc.	Chimica
General Electric	38.3	Nanotubi, nanofili, nanocompositi, ecc.	Industria
General Motors	15.1	Nanocompositi, cellule combustibili a idrocarburo	Automobile
Hewlett-Packard	60.2	Elettronica molecolare, nanofili, semiconduttori, ecc.	Elettricità Elettronica
Intel	144.7	Componenti avanzate per semiconduttori	Componenti elettroniche
IBM	121.2	Microscopia, sensoristica, ecc.	Elettricità Elettronica

Società	Capit. di borsa (mil. USD)	Prodotti
FEI Company	701	Prodotti basati sulla tecnologia con fascio di particelle cariche, microscopi elettronici a trasmissione, microscopi a scansione, elettronica e componentistica
JEOL LTD	470	Microscopi a scansione elettronica, microscopi elettronici e a trasmissione
SYMYX	832	Sistemi automatizzati di flussi lavorative per l'ottimizzazione della ricerca, strumenti di <i>testing</i>
VARIAN	1284	Strumenti di analisi e di ricerca, inclusi gli spettrometri
VEECO	438	Dispositivi per lo stoccaggio dei dati e per l'industria dei semiconduttori

A valle dei principali soggetti produttori, il settore edilizio si presenta molto frammentato, con molte aziende di piccole e medie dimensioni, nessuna delle quali riesce a conquistare quote di mercato rilevanti. Nel loro caso l'attenzione alle nanotecnologie è fortemente motivata proprio dalle logiche di mercato che impongono, per attrarre la domanda e acquistare posizioni di forza, di puntare verso una nuova segmentazione dell'offerta e di concentrare risorse su settori ad alto sviluppo, sfruttando quindi una sorta di "*nanotech branding*". Per questi soggetti, le principali barriere all'entrata sono costituite proprio dalla necessità di strumentazioni e conoscenze specifiche per sviluppare nuove tecnologie di lavorazione e nuovi prodotti. In questo senso, negli ultimi anni lo sviluppo delle nanotecnologie, ma più in generale di tecnologie *knowledge based*, ha modificato non poco le caratteristiche del mercato edilizio. La possibilità di avere materiali multifunzionali, o al contrario altamente specializzati, ha 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*.

La strategia ottimale impone ai principali produttori di entrare nel mercato con prodotti basati su poche prestazioni-chiave, per ampliare successivamente l'offerta in relazione agli sviluppi successivi della tecnologia e alle risposte del mercato stesso. Coperti dal brevetto legato alla "nano-innovazione" le grandi aziende possono strutturare una rete di partner commerciali con un duplice obiettivo: ampliare il proprio mercato e la propria visibilità, e ricevere *feed-back* utili all'evoluzione di prodotti originari.

Le piccole e medie imprese traggono un beneficio immediato da un tale modello di partnership, poiché da un lato rinnovano la propria offerta di prodotti basati su tecnologie innovative e competitive, dall'altro sono in grado, grazie all'efficace supporto tecnico-scientifico dei produttori principali nel trasferimento del *know-how* necessario, di operare a loro volta innovazioni incrementali sui prodotti o di introdurre nuove funzioni aziendali, dalle consulenze esterne alla Ricerca e Sviluppo.⁸⁷

Il livello di sviluppo di tecnologie, materiali e prodotti innovativi basati su nanotecnologie condiziona in misura sempre maggiore la possibilità per i paesi industrializzati di conquistare posizioni strategiche di controllo nei diversi settori produttivi.

Le tradizionali motivazioni alla base delle innovazioni (non solo di prodotto, ma anche di processo o in campi immateriali), ossia *technology push* e *demand pull*, sono la principale molla anche nel caso delle innovazioni nel campo dei materiali, tuttavia in molti contesti, ed è in massima parte il caso delle nanotecnologie, la spinta tecnologica tende sempre di più a "creare" la domanda, al di là dei bisogni effettivamente espressi agli utenti finali.

4.2. Le ricadute ambientali e il ruolo delle normative

4.2.1. Nanotecnologie, ambiente e salute: i fattori di rischio e le potenzialità offerte

Le implicazioni sanitarie e ambientali connesse alla crescente diffusione delle nanotecnologie nei diversi settori produttivi rappresentano in massima parte delle

⁸⁷ Interessante in tal senso l'esperienza italiana de IlCantiere, finora unica azienda italiana a commercializzare il *Ductal*, calcestruzzo ad altissime prestazioni della Lafarge. Si tratta di una piccola azienda impegnata nel design e arredo di interni, divenuta in breve tempo consulente internazionale della Lafarge per le applicazioni in questo settore e tra i referenti per le prime sperimentazioni in Italia.

problematiche tuttora aperte, attorno alle quali la stessa comunità scientifica internazionale si sta interrogando. I principali rischi derivano principalmente da una produzione sempre maggiore su scala mondiale di nanomateriali, destinati ai diversi settori industriali, anche in assenza di dati certi sugli effetti che producono sull'uomo e l'ambiente. Nonostante infatti non esistano studi che possano individuare in via definitiva la pericolosità di tali sostanze, studi autorevoli hanno ammesso che «alcune nanoparticelle sono più tossiche, per unità di massa, rispetto a particelle più grandi del medesimo prodotto chimico».⁸⁸ Inoltre, determinate condizioni di rischio per la salute umana sono state in parte già individuate, quali infiammazioni polmonari, disturbi cardiovascolari e malattie cutanee, causate dall'inalazione, dall'ingestione o dal semplice contatto con le nanoparticelle.⁸⁹ I soggetti maggiormente a rischio per queste patologie sono in primo luogo gli addetti negli impianti produttivi, maggiormente esposti, per i quali una sensibile riduzione del rischio può essere ottenuta attraverso l'isolamento di determinate fasi del processo produttivo, sistemi di areazione e filtraggio degli ambienti di lavoro e lo sviluppo di processi che riducano al minimo la dispersione di sostanze volatili e rifiuti. Nel caso dei prodotti edilizi, in cui principalmente le nanoparticelle eventualmente presenti sono inglobate all'interno di un materiale, i principali rischi riguardano i possibili fenomeni di degrado (polverizzazione, lacerazione, corrosione, ecc.), ma anche le operazioni di manutenzione (ad esempio di pulizia mediante solventi), smaltimento e riciclaggio di prodotti contenenti nanomateriali.⁹⁰

I fattori di rischio tuttavia non sono limitati ai possibili effetti di nanomateriali e nanoparticelle sulla salute umana. Un ulteriore aspetto riguarda l'impatto in termini di inquinamento atmosferico e di consumi energetici derivanti dalla produzione di nanomateriali. Nonostante infatti sia generalmente acquisita la possibilità di ottenere

⁸⁸ The Royal Society and The Royal Academy of Engineering, *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, 2004, p. 4. Nel documento si sottolinea inoltre come sia un motivo di «preoccupazione seria» la lentezza dei diversi governi nell'affrettare i tempi «della riduzione dell'incertezza per ciò che riguarda gli impatti ambientali e sulla salute dei nanomateriali».

⁸⁹ È un dato certo, ad esempio, che le nanoparticelle, una volta nell'organismo (dopo essere state inalate, ingerite, iniettate o assorbite dalla pelle) possono attraversare la barriera ematoencefalica, che evita che le sostanze potenzialmente tossiche entrino dal flusso sanguigno nel cervello. Resta da verificare quanto questa condizione (che rappresenta un presupposto fondamentale per molte applicazioni legate alla nano-medicina) sia realmente motivo di preoccupazione: nuove discipline, quali la nanotossicologia e la nanoecotossicologia, sono nate proprio con questo scopo.

⁹⁰ Sono state condotte ricerche sulla tossicità delle nanoparticelle di biossido di titanio, ampiamente utilizzate nel settore delle costruzioni per la realizzazione di vernici antibatteriche e autopulenti. È stato dimostrato come esse siano potenzialmente in grado di danneggiare il DNA e le cellule se a contatto con pelle non integra. Tali rischi sono notevolmente ridotti da una dimensione maggiore delle stesse particelle, tanto che alcune aziende hanno modificato in tal senso le caratteristiche dei propri prodotti, pur rinunciando a sfruttare appieno le potenzialità fotocatalitiche del biossido di titanio..

prestazioni elevate con quantità ridotte di materiale rispetto alle tecnologie convenzionali, di realizzare processi meno energivori ed inquinanti, con una minore produzione di rifiuti derivanti dalla estrema precisione della progettazione alla scala atomica, recenti studi hanno mostrato come dal punto di vista dell'intensità energetica (riferita quindi all'unità di prodotto), i processi produttivi di alcune nanoparticelle possono essere particolarmente impattanti⁹¹ (fino a 400 volte più alti rispetto ad un frigorifero e 700 volte quelli di un'automobile).⁹² È da considerare inoltre come determinati processi produttivi richiedano anche l'impiego di ingenti quantità d'acqua, impiegata nei solventi per la necessità di ottenere elementi di estrema purezza (ad esempio per produrre un cm² di silicio puro ne occorrono da 10 a 60 litri, mentre un impianto di produzione di semiconduttori necessita da 11 a 19 milioni di litri d'acqua al giorno⁹³), e come la presenza di nuovi elementi chimici e materie prime all'interno dei prodotti, in precedenza non presenti all'interno di una data filiera produttiva, potrebbe richiedere la necessità di nuove cave e miniere, con evidenti ricadute ambientali e sociali.

A causa della sempre maggior evidenza di tali problematiche, comincia a svilupparsi una disciplina specifica, la *green nanotechnology*, con il duplice obiettivo di produrre nanomateriali e prodotti nanostrutturati che minimizzino i possibili rischi all'ambiente o alla salute umana e offrire soluzioni innovative alle sfide ambientali del ventunesimo secolo attraverso l'impiego delle nanotecnologie. I fautori della *green nanotechnology* propongono di applicare i principi della chimica e dell'ingegneria sostenibile⁹⁴, in modo da realizzare processi che non impiegano sostanze tossiche, a bassa temperatura, che impiegano meno energia, sfruttano dove possibile risorse rinnovabili, integrando una logica *life cycle thinking* al progetto e alla realizzazione di nuovi prodotti. Tale diverso approccio ha consentito di ottenere importanti risultati, soprattutto in relazione all'efficienza energetica dei processi produttivi dei nanomateriali, arrivando a definire un approccio LCA (*Life Cycle Assessment*) applicabile ai nanomateriali.⁹⁵

⁹¹ Le nanoparticelle di carbonio, ad esempio, sono materiali particolarmente *energy-intensive*, dalle 2 alle 100 volte in più rispetto all'alluminio (materiale particolarmente energivoro). Cfr. Commissione Europea, *Proceedings of NanoEuroForum 2007. Nanotechnology in Industrial Applications*, Düsseldorf, 19-21 giugno 2007, p. 42. Altre nanoparticelle, quali quelle di titanio e magnesio richiedono, rispettivamente 60 e 16 kWh/kg, mentre i semiconduttori possono richiedere da 0,7 a 1,6 kWh/cm². Cfr. Hatice Şengül, et al., "Toward Sustainable Nanoproducts An Overview of Nanomanufacturing Methods", in *Journal of industrial ecology*, vol. 12 issue 3, giugno 2008, pp.329-359.

⁹² Cfr. Hatice Şengül, et al., "Toward Sustainable Nanoproducts An Overview of Nanomanufacturing Methods", cit., p. 352.

⁹³ *Ibidem*.

⁹⁴ Cfr. tra gli altri *European Technology Platform for Sustainable Chemistry*, www.suschem.org.

⁹⁵ Allo stesso tempo si richiede un aggiornamento delle metodologie LCA per adeguarsi alla prospettiva nanotecnologica e alla molteplicità dei fattori, economici, ambientali, sociali e sanitari, collegati. Cfr. Matthew J.

La possibilità di una conoscenza effettiva delle ricadute ambientali rappresenta una risorsa essenziale per l'applicazione dei materiali nanostrutturati nel settore edilizio, considerando l'attuale richiesta di prodotti sempre più ecologici ed efficienti, e si inserisce in una problematica più ampia relativa alla valutazione delle opzioni tecnologiche in relazione agli impatti nel ciclo di vita dei prodotti da costruzione (cfr. cap. 7). Nel settore edilizio, di fronte al rischio della creazione di un "nuovo amianto", un significativo passo in avanti può venire dalla classificazione e dalla standardizzazione dei processi e dei prodotti legati ai nanomateriali, in modo da avere a disposizione dati misurabili e confrontabili attraverso cui orientare le scelte legate al loro impiego (incentivando ad esempio sistemi di etichettatura e certificazione ambientale per i prodotti contenenti nanomateriali), evitando così il rischio di valutazioni arbitrarie o distorte derivanti dalla mancanza di sistemi di controllo e regolamentazione.

Prodotto	Principali applicazioni in edilizia	Produzione (t/anno)		
		2006-07	2008-10	2011-14
Nanopolveri di nichel (carbon coated), Ni-C	Sigillanti; materiali ad assorbimento elettrico; display ottici; processi produttivi a bassa temperatura di materiali metallici e ceramici	3.500	7.500	15.000
Nanopolveri di ossidi di ittrio (Y ₂ O ₃)	Rivestimenti fluorescenti	2500	7.000	7.500
Nanoparticelle di cerio (CeO ₂)	Rivestimenti per vetri smart; catalizzatori e celle solari ad alta efficienza	nd	10.000	nd
Fullereni	Nanocompositi polimerici	1.000.000	nd	nd
Nanoparticelle di silicio (SiO ₂)	Additivi e filler per calcestruzzo; sorgenti luminose ad alta efficienza; <i>coatings</i> fotovoltaici	100.000	100.000	>100.000
Nanoparticelle di biossido di titanio (TiO ₂)	Rivestimenti fotocatalitici	5.000	5.000	>10.000
Nanopolveri di ossidi di zinco	sensori e attuatori piezoelettrici; materiali fotoelettrocromici; celle solari	20	nd	nd
		USD/anno		
Carbon black	Pigmenti per vernici e materiali cementizi	≈ 8 mld.	10 mld.	12 mld.
Nanotubi di carbonio	Nanocompositi polimerici, cementizi o ibridi; OLED e sorgenti luminose ad alta efficienza	700 mil.	3.6 mld.	13 mld.

Previsione dei livelli di produzione delle principali tipologie di nanomateriali in commercio. Fonte: Nanoroad SME, 2006.

Eckelman et al., "Toward Green Nano. E-factor analysis of several nanomaterial syntheses" e Thomas P. Seager, Igor Linkov, "Couplin Multicriteria Decision Analysis and Life Cycle Assessment for Nanomaterials, in *Journal of industrial ecology*, cit.

4.2.2. Prodotti innovativi e aggiornamento del quadro normativo internazionale

Nonostante la validità e l'importanza di un ripensamento in chiave "verde" dei processi tecnologici connessi alla produzione dei materiali nanostrutturati che parta dalla stessa comunità scientifica, bisogna considerare come attualmente l'attenzione sia rivolta in massima parte verso le possibili "applicazioni" delle nanotecnologie piuttosto che sulle loro effettive "implicazioni". Gli Stati Uniti nel 2006 hanno speso complessivamente 60 milioni di dollari per la ricerca sulle implicazioni ambientali e sanitarie legate alle nanotecnologie⁹⁶, a fronte di un investimento complessivo nel settore pari a circa 4,5 miliardi di dollari, vale a dire circa lo 0,6% dei fondi complessivi stanziati, e tale tendenza è confermata nei principali paesi industrializzati, Europa Compresa. Per riequilibrare questa distanza, appare quanto mai necessaria un'adeguata definizione delle strategie di *governance* globali da attuare nei confronti delle nanotecnologie nel loro complesso, in modo da introdurre una capacità di controllo costante e una trasparenza nella comunicazione delle possibili ricadute ambientali e sanitarie che accompagni ogni possibile innovazione dei prodotti e dei processi industriali.

Da questo punto di vista negli ultimi anni è stata l'Europa ad individuare le principali linee di condotta da seguire, affermando l'importanza di «effettuare adeguate valutazioni dei rischi *ex ante* ed elaborare in anticipo procedure di gestione degli stessi, prima di avviare, ad esempio, la produzione di massa di nanomateriali artificiali», e di come occorra «incentrare l'attenzione sui prodotti che sono già sul mercato o stanno per esservi immessi».⁹⁷

L'indirizzo dell'Unione Europea è orientato alla «massima utilizzazione della struttura normativa esistente (ad esempio quella sulle sostanze pericolose, sull'etichettatura, ecc.) e – quando necessario – sua revisione per adattarla al fenomeno nanotecnologico».⁹⁸ La Commissione Europea, nel riesaminare l'attuale quadro normativo in relazione ai rischi legati ai nanomateriali,⁹⁹ intende considerare eventuali modifiche regolamentari sulla base degli sviluppi scientifici e delle esigenze normative in settori specifici. Un ulteriore passo in avanti proviene dall'adozione di un "codice di

⁹⁶ Fonte: Subcommittee on Nanotechnology Science, Engineering and Technology, 2007.

⁹⁷ Commissione Europea, *Nanoscienze e nanotecnologie: un piano di azione per l'Europa 2005-2009. Prima relazione sull'attuazione, 2005-2007*, Bruxelles, 2007.

⁹⁸ Luciano Butti, Luca De Biase, *Nanotecnologie, ambiente e percezione del rischio*, Giuffrè, Milano, 2005, p. 38. La Commissione ha preferito questo orientamento ad altre cinque alternative analizzate nel dettaglio: nessuna regolazione; moratoria della ricerca e/o della commercializzazione; misure volontarie; completa e approfondita normativa specifica sulle nanotecnologie.

⁹⁹ Cfr. Commissione Europea, *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) on The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies*, Bruxelles, marzo 2006.

condotta”¹⁰⁰ che, pur essendo indirizzato ad una “ricerca responsabile” su nanoscienze e nanotecnologie, può aver interessanti ricadute sui principi generali che dovrebbero indirizzare i pur necessari aggiornamenti normativi. In particolare si fa riferimento all’applicazione del “principio di precauzione”,¹⁰¹ che tuttavia non viene interpretato in maniera rigida,¹⁰² ma è subordinato ad un’attenta valutazione costi-benefici che permetta di valutare l’effettiva proporzionalità delle misure di cautela ai fattori di rischio individuati.

L’obiettivo è quello di incoraggiare l’autodisciplina da parte della comunità scientifica, in modo da porre le basi per un atteggiamento proattivo nello sviluppo delle nanotecnologie, evitando l’approvazione di discipline cogenti che, allo stato, sarebbero basate su informazioni parziali o inadeguate, e promuovendo al contempo i principi basilari di responsabilità, autocontrollo, tracciabilità.¹⁰³

Significato	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Comprensibilità al pubblico ▪ Rispetto dei diritti fondamentali delle persone ▪ Finalità di benessere per gli individui e la società
Sostenibilità	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Attenzione agli aspetti della sicurezza, dell’etica e ai principi dello sviluppo sostenibile ▪ Contributo al raggiungimento degli “<i>UN Millenium Development Goals</i>”¹⁰⁴ ▪ Riduzione dei rischi biologici, fisici e morali nel presente e nel futuro per uomini, animali, piante e ambiente
Precauzione	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anticipazione dei potenziali impatti su ambiente, salute e sicurezza ▪ Precauzione proporzionale al livello di protezione adottato nell’incoraggiare progetti che portano benefici alla società e all’ambiente
Inclusione	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Apertura verso i portatori d interessi, trasparenza e rispetto per il legittimo diritto di accesso all’informazione ▪ Partecipazione ai processi decisionali dei vari soggetti coinvolti nello sviluppo di nuove applicazioni

Principi generali individuati dalla Commissione Europea per una ricerca responsabile su nanoscienze e nanotecnologie.¹⁰⁵

¹⁰⁰ Fonte: Commissione Europea, *Commission Recommendation on a code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research*, Bruxelles, febbraio 2008

¹⁰¹ Il principio di precauzione costituisce una delle fondamentali linee guida della politica ambientale comunitaria, ed impone l’adozione di determinate cautele anche in condizioni di incertezza dei rischi possibili.

¹⁰² Ad esempio attraverso una limitazione generale delle attività di ricerca e sviluppo collegate alle nanotecnologie, che oltre a privare dei potenziali benefici ad esse connessi rischierebbe di alimentare una complessa struttura burocratica per vigilare sull’applicazione del divieto.

¹⁰³ Luciano Butti, Luca De Biase, *Nanotecnologie, ambiente e percezione del rischio*, cit. p. 37. Il problema di un approccio unitario e globale allo sviluppo della ricerca nanotecnologia è stato affrontato in diverse sedi a livello internazionale. Negli Stati Uniti il CRN (*Centre for Responsible Nanotechnology*) sulla base di dettagliate analisi di scenario relative ai diversi approcci adottati nella ricerca applicata e nella regolamentazione in un orizzonte temporale di 20 anni, propone l’adozione di criteri per favorire uno sviluppo sostenibile di nanoscienze e nanotecnologie (v. anche: www.crnano.org).

¹⁰⁴ Nel 2000 l’assemblea delle Nazioni Unite ha individuato 8 obiettivi fondamentali da raggiungere entro il 2015: eliminare la povertà estrema e la fame; raggiungere un’educazione primaria universale; promuovere la parità dei sessi e favorire le possibilità della donna; ridurre la mortalità infantile; combattere l’aids, la malaria e altre malattie; assicurare la sostenibilità ambientale, avviare una partnership globale per lo sviluppo. Le nanotecnologie possono potenzialmente contribuire al raggiungimento di molti di questi obiettivi, soprattutto in relazione all’ambiente, alla salute umana e alla cooperazione internazionale.

Tale approccio consente comunque di adottare misure cogenti per divieti specifici,¹⁰⁶ consentendo la gestione preventiva dei rischi, istituendo un quadro in cui i diversi portatori di interesse possono contribuire alla definizione delle azioni prioritarie da intraprendere e monitorando in maniera flessibile gli sviluppi delle nanotecnologie per adattare “*in progress*” le normative esistenti.

Azioni chiave per la riduzione dei rischi associati alle nanotecnologie

- individuare ed affrontare le problematiche di sicurezza associate alle applicazioni nanotecnologiche
 - dati sui rischi potenziali per l'uomo e per l'ambiente, nonché metodi di prova che consentano di generarli;
 - dati sull'esposizione durante tutto il ciclo di vita dei nanomateriali o dei prodotti che li contengono, nonché metodi di valutazione dell'esposizione;
- valutare l'adeguatezza delle metodologie esistenti in relazione ai rischi potenziali legati ai prodotti nanotecnologici
 - metodi misurazione e di caratterizzazione dei nanomateriali, materiali di riferimento e metodi di campionamento e di analisi delle esposizioni.
- elaborare con gli stati membri, le organizzazioni internazionali, le agenzie europee, l'industria e altre parti interessate, la terminologia, gli orientamenti, i modelli e le norme per la valutazione dei rischi durante l'intero ciclo di vita dei prodotti nanotecnologici
- promuovere misure sicure e *cost-effective* per ridurre al minimo l'esposizione dei lavoratori, dei consumatori e dell'ambiente a nanoparticelle e nanomateriali
- valutare i livelli di esposizione attuali e previsti in futuro
- valutare l'adeguatezza delle strategie attuali per il controllo delle esposizioni
- esaminare l'adeguatezza della regolamentazione comunitaria in merito a:
 - soglie di tossicità
 - misure e soglie di emissione
 - requisiti in materia di etichettatura
 - valutazione dei rischi e livelli massimi di esposizione
 - soglie di produzione e importazione al di sotto delle quali una sostanza può essere esente da regolamentazione (di norma basate su quantità espresse in massa)

Elaborazione da Commissione Europea, *Nanoscienze e nanotecnologie: un piano di azione per l'Europa 2005-2009. Prima relazione sull'attuazione, 2005-2007*, Bruxelles, 2007.

Sul piano più strettamente operativo, in Europa la tendenza sembra essere quella di trattare alcuni aspetti relativi alla sicurezza di nanoparticelle e nanomateriali (soprattutto per quelli prodotti in quantità elevate) all'interno della nuova regolamentazione sulle sostanze chimiche REACH (*Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals*),¹⁰⁷ ad esempio prevedendo che le nanoparticelle di sintesi

¹⁰⁵ Elaborazione da Commissione Europea, *Commission Recommendation on a code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research*, cit., p. 6.

¹⁰⁶ Quale quello relativo alla ricerca e alla costruzione di “nanomacchine autoreplicanti” che recentemente lo stesso Drexler, papà delle nanotecnologie, ha pubblicamente sconfessato auspicandone la proibizione.

¹⁰⁷ Operativa da giugno 2007, la normativa REACH viene applicata in parallelo alla Direttiva 67/548/CEE sulla classificazione, imballaggio e certificazione delle sostanze pericolose (che ha introdotto l'obbligo nella redazione degli

vengano considerate come nuovi prodotti chimici.¹⁰⁸ Ulteriori approfondimenti dovrebbero riguardare anche la normativa sui brevetti, considerando i rischi connessi (soprattutto nel campo delle nanobioteχνologie) con la possibilità di monopolizzare di fatto alcuni degli elementi fondamentali che rendono possibile la vita.

Anche negli Stati Uniti sono recentemente emerse le problematiche relative all'aggiornamento delle normative esistenti sul controllo delle sostanze tossiche e delle nanotecnologie in generale. Il protocollo che attualmente regola l'impiego di sostanze chimiche in processi industriali, il *Toxic Substances Control Act* (TSCA), non sempre è applicabile alle nanotecnologie in base alla clausola della "piccola quantità" (*low volume*), che permette di non applicarlo alle sostanze chimiche prodotte in quantità inferiori alle 11 tonnellate e quindi alla maggior parte delle produzioni di nanomateriali. L'orientamento adottato punta ad una revisione della normativa¹⁰⁹ in funzione delle criticità sollevate dalle nanotecnologie, in modo da fornire all'organismo operativo che vigila sui rischi derivanti dall'impiego di sostanze chimiche, l'EPA (*Environmental Protection Agency*), gli strumenti per effettuare valutazioni adeguate.

Tale impostazione ha consentito di avviare negli Stati Uniti la prima regolamentazione in assoluto sui nanomateriali, riferita in particolare ai prodotti contenenti nanoparticelle di argento, ampiamente utilizzate per la loro funzione battericida in indumenti e prodotti per la pulizia, ma anche nel settore edilizio per la realizzazione di rivestimenti e vernici,¹¹⁰ per le quali numerosi studi dimostrano come una volta disperse nell'ambiente attraverso l'atmosfera o gli scarichi idrici possano eliminare anche batteri benigni ed organismi acquatici.

Di fronte ad un tale quadro internazionale occorre rilevare, al di là delle problematiche relative alla formulazione di normative specifiche e appropriate, l'importanza di un approccio globale alla regolamentazione delle nanotecnologie e delle loro applicazioni, che parta dall'assunzione di tutte le implicazioni possibili legate ad una loro diffusione su scala mondiale, che non si limitano ai rischi ambientali e sanitari. Secondo alcuni

MSDS, *Material Safety Data Sheet* per molti prodotti impiegati in edilizia), recentemente rielaborata attraverso la Direttiva 2006/121/CE, proprio per adeguarsi alla nuova normativa.

¹⁰⁸ Tale impostazione può avere ricadute significative sull'applicazione di certificazioni di prodotto quali l'EPD (*Environmental Product Declaration*, cfr. cap. 7) anche a materiali nanostrutturati. L'EPD deve infatti indicare tutti i materiali e le sostanze contenute nel prodotto in percentuale superiore allo 0,5% in peso; tutti i materiali e le sostanze che sono regolamentati da specifiche normative, pericolosi per l'uomo o l'ambiente (sensibilizzanti, cancerogeni, mutageni, tossici, ecc.) se presenti in concentrazioni tali da essere soggette all'etichettatura secondo le direttive comunitarie in materia (REACH e Direttiva 2006/121/CE).

¹⁰⁹ Cfr. EPA, *TSCA Inventory Status of Nanoscale Substances - General Approach*, gennaio 2008. Nel 2007, l'EPA ha inoltre avviato il *Nanoscale Materials Stewardship Program*, che invita le compagnie ad inviare tutti i dati che hanno sulla caratterizzazione dei nanomateriali e tutti i risultati delle ricerche condotte sulla sicurezza e sugli impatti ambientali.

¹¹⁰ Nel 2008 è stata firmata una petizione da parte di 14 ONG in favore della regolamentazione che individuava oltre 260 prodotti per il consumatore contenenti nanoparticelle di argento.

autori infatti, la diffusione dei brevetti sui nanomateriali, ed in generale l'assenza di un'adeguata struttura normativa internazionale sulle nanotecnologie, potrebbe accrescere il divario tra nazioni ricche e povere, generando una nuova fonte di discriminazione: il *nano-divide*. D'altra parte, i paesi in via di sviluppo potrebbero essere i primi a beneficiare delle principali applicazioni nanotecnologiche, ad esempio nei settori della medicina o della gestione delle risorse idriche.¹¹¹

Alla luce di questo quadro e di fronte alle prospettive evolutive dell'applicazione delle nanotecnologie, occorre avviare una riflessione che coinvolga ricercatori, politici, governi e associazioni non governative, aziende produttrici, fino alle associazioni di consumatori e ai singoli cittadini, in modo da realizzare un confronto che possa tenere conto delle diverse istanze provenienti da ambiti scientifici e culturali differenti con l'obiettivo di raggiungere un sistema di *governance* condiviso ed in grado di tutelare le esigenze ambientali e sociali in un'ottica sostenibile.

¹¹¹ Cfr. Anisa Mnyusiwalla et al., "Mind the gap: science & ethics", in *Nanotechnology*, n. 14, febbraio 2003.

5. APPLICAZIONI DEI MATERIALI NANOSTRUTTURATI IN ARCHITETTURA

5.1. L'impatto dei materiali nanostrutturati sull'architettura

5.1.1. Nanotecnologie e architettura: percorsi evolutivi e fattori di criticità

Non è facile prevedere gli impatti sull'architettura derivanti dalla crescente diffusione delle nanotecnologie nel campo dei materiali da costruzione. La tradizionale "paletta" di materiali a disposizione dei progettisti sarà ampliata enormemente e sovvertita nelle regole progettuali, poiché sarà possibile associare ai diversi materiali ogni proprietà desiderata, in funzione dell'applicazione prevista.

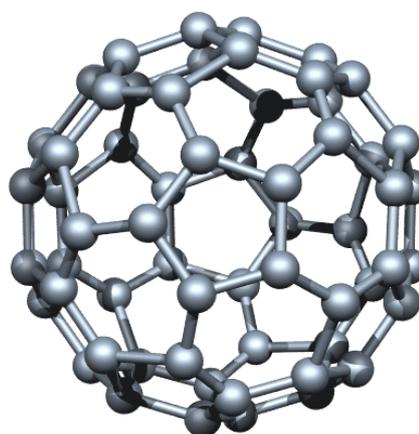
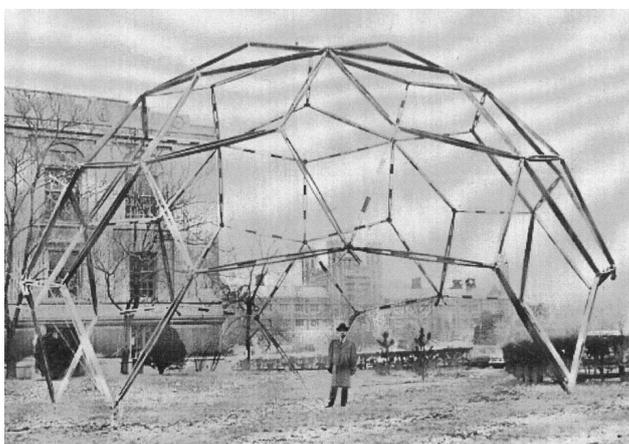
Attualmente è possibile ottenere, ad esempio, calcestruzzi con caratteristiche simili all'acciaio in termini di peso in rapporto alla capacità portante, materiali ceramici di maggiore resistenza meccanica e tenacità; metalli di maggiore durezza, con elevato carico allo snervamento, particolari proprietà elettriche; polimeri con maggiore resistenza meccanica, al calore e agli attacchi chimici, oppure con migliori proprietà di barriera allo scambio gassoso, migliore conduttività elettrica, resistenza ad agenti atmosferici e all'invecchiamento. Non sarà più possibile, in altre parole, associare ad un materiale una determinata funzione, ma esisteranno piuttosto diverse modalità per raggiungere le prestazioni ricercate, a seconda del materiale che si è deciso di impiegare. Le nanotecnologie permettono inoltre di sintetizzare nuove classi di materiali, con proprietà in precedenza non ipotizzabili, quali materiali ceramici o isolanti trasparenti, oppure rivestimenti invisibili in grado di rendere altamente isolante qualsiasi tipologia di materiale, oltre a nuove generazioni di materiali *smart*, con particolari proprietà di interfaccia con l'ambiente esterno e di autoregolazione.

Tuttavia, al di là delle promettenti ed innovative applicazioni relative a prodotti destinati al settore edilizio, il rapporto che lega nanotecnologie e architettura va ben oltre l'impiego di materiali nanostrutturati negli edifici, investendo aspetti centrali relativi alla progettazione, anche se ad una scala ridotta, tanto da poter dichiarare "*nanotechnology is a matter of design*"¹¹², o più precisamente, secondo una definizione diffusa e condivisa, la nanotecnologia riguarda "il progetto, la caratterizzazione, la

¹¹² George Elvin, *NanoBioBuilding: nanotechnology, biotechnology, and the future of building*, Proceedings of 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction, Bilbao, Spain (nov. 2005), 2006.

produzione e l'applicazione di strutture, dispositivi e sistemi attraverso il controllo della forma e delle dimensioni alla scala nanometrica".¹¹³

Pur essendo nel complesso una tipologia di progettazione molto diversa da quella cui normalmente gli architetti sono abituati, si comprende la possibile analogia tra progetto del materiale e progetto dell'architettura. Inoltre, le caratteristiche delle strutture alla scala del miliardesimo di metro hanno molto in comune con quelle architettoniche. Le direzioni delle forze e le modalità di trasmissione delle tensioni, la serialità e l'aggregabilità su base modulare, la capacità di assorbire liquidi, di trasmettere il calore e l'elettricità, seguono leggi fondamentalmente analoghe tra nanoscala e macroscala. Non a caso, una delle prime nanoparticelle scoperte, i fullereni¹¹⁴, o "buckyballs", devono il loro nome alla contrazione di "BuckminsterFullerene", originariamente coniato dagli scopritori in omaggio all'architetto delle cupole geodetiche.



Cupola geodetica di Buckminster Fuller (1954) e schematizzazione della struttura molecolare di un fullerene.

Un approccio alle nanotecnologie per i materiali basato sulla logica di un progetto di architettura, ossia organizzando i singoli componenti ed elementi costruttivi in un sistema capace di rispondere ad un dato insieme di prestazioni richieste in condizioni d'uso, può portare alla risoluzione di problemi specifici legati alla progettazione dei materiali nanostrutturati. Una volta comprese e valutate le proprietà specifiche della materia alla nanoscala, conoscendo le modalità di assemblaggio e i vincoli alla creazione di nanostrutture (soprattutto in termini di attrazione elettromagnetica e di interazione reciproca dei singoli "nanocomponenti"), nonché considerando le

¹¹³ "Nanotechnology is the design, characterisation, production and application of structures, devices and systems by controlling shape and size at nanometre scale". The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (UK), 2005

¹¹⁴ Scoperti nel 1985 da Richard Smalley, Harold Croto e Robert Curl vaporizzando campioni di carbonio con un apparecchio laser. Si tratta di una molecola composta da 60 atomi con la forma di un pallone da calcio: 20 esagoni e 12 pentagoni saldati a forma di sfera (Cfr. 4.1. Definizioni e classificazioni).

caratteristiche delle tecnologie di lavorazione, l'applicazione di un punto di vista "architettonico" alle nanotecnologie può aiutare a comprenderle meglio e contribuire allo sviluppo di nuovi materiali da costruzione a partire dalle regole elementari di costruzione della materia, prevedendone già l'applicazione specifica. Non a caso molti team di sviluppatori di materiali nanostrutturati comprendono anche architetti, le cui competenze e capacità creative¹¹⁵ vengono per così dire "trasferite" all'universo dell'infinitamente piccolo.

Se l'architettura può incidere sulle nanotecnologie è certamente vero anche il contrario. Le nanotecnologie non modificheranno solamente gli oggetti architettonici, ma anche il processo progettuale e costruttivo. Potrebbero andare a modificare la prassi progettuale introducendo non solo nuovi materiali ma anche considerazioni che fino ad ora non avevano toccato le discipline architettoniche. Se ciò accadesse, non sarebbe la prima volta che una rivoluzione scientifica porta alla graduale trasformazione delle pratiche architettoniche: l'illuminismo, la rivoluzione industriale e poi quella informatica hanno contribuito nel tempo a modificare i metodi di progettazione, ad incorporare nel progetto di architettura molteplici aspetti tecnologici (ad esempio reti ed impianti), fino a dare forma a nuovi linguaggi architettonici basati su nuovi materiali e tecnologie di produzione.

Nella storia dell'architettura i procedimenti costruttivi e i materiali da costruzione hanno influito in maniera determinante sulle caratteristiche formali e funzionali degli edifici, tanto che le tendenze e gli stili di architettura sono spesso riconducibili a caratteristiche legate alla disponibilità di tecnologie e di materiali. I greci elessero il marmo bianco come materiale ideale e crearono procedimenti costruttivi in grado di sfruttarlo; i romani avevano la necessità di espandere rapidamente la propria cultura nell'impero e inventarono il cemento per costruire i loro templi rapidamente in ogni parte del mondo. Oggi la maggior parte degli edifici sono realizzati con tecnologie sviluppate negli ultimi due secoli. Con la modernità il proliferare di materiali e tecniche ha consentito di sviluppare ogni sorta di linguaggio architettonico, e senza lo sviluppo di nuove tecnologie sarebbe stato difficile anche solo immaginare molti edifici progettati da architetti contemporanei. Tuttavia l'entità della "rivoluzione nanotecnologica" in architettura (Elvin, 2006) sembra essere di portata addirittura maggiore, in termini di

¹¹⁵ Il binomio nanotecnologie-creatività ha già prodotto alcuni risultati sorprendenti: la nano-arte, ossia la capacità di realizzare "sculture" e "dipinti" di dimensioni nanometriche è ormai considerata una nuova disciplina, con tanto di esposizioni al microscopio elettronico, quotazioni economiche e competizioni artistiche. In Italia, i nanoartisti Alessandro Scali e Robin Goode creano nanosculture e nanolitografie invisibili a occhio umano, realizzando le proprie opere in collaborazione con una squadra di scienziati del Politecnico di Torino. Cfr. <http://nanoart21.org>.

potenzialità e di rischi, proprio considerandone la complessità e la molteplicità degli scopi, tali da trascendere i limiti tradizionali tra sistemi viventi e non viventi.¹¹⁶ Più sarà accresciuta la capacità di controllo della materia a livello molecolare, più sarà possibile virtualmente progettare e manipolare ogni cosa, ma a causa della complessità della “progettazione molecolare” coloro che progettano i nuovi materiali non saranno le stesse persone che progettano i prodotti e gli edifici, cui pure sono destinati, ma dovranno essere necessariamente scienziati “in camice bianco”.¹¹⁷ Di conseguenza, senza un adeguato supporto di conoscenze, sarà sempre più difficile per architetti e designer conoscere l’esatta composizione o le conseguenze che possono avere i materiali utilizzati.

Di fronte ad un ampio ventaglio di prestazioni ottenibili attraverso le innovazioni prodotte, bisogna avere ben chiari i fattori di rischio ad esse collegati, il che può avvenire solo insieme ad una maggiore responsabilizzazione del progettista nella scelta e nella gestione delle tecnologie e dei singoli prodotti. È probabile che la spinta per una regolamentazione su scala internazionale unita ad una maggiore consapevolezza da parte dei progettisti permetterà di orientare la produzione per l’edilizia verso innovazioni basate su nanotecnologie sempre più sicure ed efficienti.¹¹⁸

Non si tratta unicamente di limitare le già citate ricadute ambientali e sanitarie legate ad una sempre maggiore dispersione di nanoparticelle nell’atmosfera, inalate¹¹⁹ o assorbite attraverso la pelle¹²⁰, di cui pure gli edifici potranno essere indubbiamente tra i principali responsabili, considerando applicazioni nei sistemi di areazione e nei trattamenti superficiali di componenti e arredi. Ulteriori ricadute negative potranno essere legate alla diffusione dei sensori e della domotica, un settore su cui converge una buona parte della ricerca nanotecnologica: quali possono essere i rischi dipendenti dalla proliferazione di *smart environments* regolati in funzione delle preferenze dell’utente o delle condizioni ambientali? La possibilità di regolare la trasparenza di

¹¹⁶ Cfr. George Elvin, *NanoBioBuilding: nanotechnology, biotechnology, and the future of building*, cit., p. 2.

¹¹⁷ Per rendersi conto di ciò basta osservare i laboratori dei centri di ricerca in cui vengono sviluppati ad esempio calcestruzzi innovativi, dove sabbia, ghiaia e acqua hanno lasciato il posto a polveri ultrafini e provette con liquidi ambrati, ed in cui rigidi protocolli di sicurezza regolano le attività dei ricercatori.

¹¹⁸ Di fronte al concreto rischio che svariate tipologie di coatings, rivestimenti nanostrutturati impiegati per la protezione di materiali quali legno, metallo, vetro, potessero rilasciare composti volatili tossici durante la fase di “cura”, alcune aziende produttrici quali la *Ecology Coatings*, hanno sviluppato coatings che rilasciano unicamente sostanze non volatili come l’idrogeno.

¹¹⁹ Sono già sul mercato, ad esempio, sistemi di filtraggio dell’aria per edifici basati su nanocatalizzatori metallici, che potrebbero disperdere nanoparticelle dannose all’interno dei condotti di areazione, all’interno degli ambienti e all’esterno..

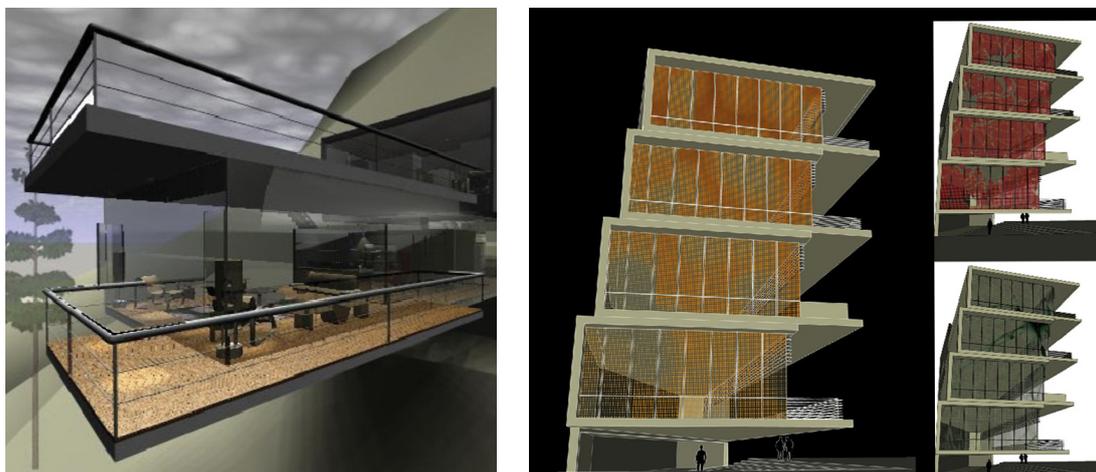
¹²⁰ Rispetto all’assorbimento per contatto basti considerare l’accusa di molte ONG nei confronti di creme solari e saponi contenenti nanoparticelle, che si ritiene possano essere causa di tumori. Senza un adeguato controllo ripiani, corrimano, maniglie e arredi potrebbero diventare altrettante fonti di contatto.

pareti, il livello di illuminazione e la qualità dell'aria negli ambienti impone di considerare i fattori connessi legati alla sicurezza e alla privacy all'interno degli edifici per utilizzare in maniera appropriata tali sistemi.

Non si tratta tuttavia di rifiutare a priori una tecnologia a causa dei molteplici fattori di rischio che incorpora, nella consapevolezza che si tratta di un'evoluzione ben difficile da contrastare, quanto piuttosto di portarla ad un livello di comprensibilità e controllabilità commisurata all'uso a agli scopi in architettura, valutando e studiando a fondo le possibilità a disposizione, optando per le soluzioni tecnologiche che offrono un maggior grado di sicurezza ed eco-compatibilità.

5.1.2.. Le applicazioni architettoniche dei materiali nanostrutturati

I crescenti livelli di diffusione di prodotti innovativi derivanti dalla ricerca nanotecnologica applicata ai materiali da costruzione trovano un riscontro nelle numerose applicazioni architettoniche realizzate in anni recenti. Con il progressivo passaggio dall'ambito della ricerca scientifica alla sfera applicativa, è possibile registrare un interesse crescente da parte dei progettisti, che da un lato iniziano a scoprire i vantaggi offerti dai prodotti già presenti sul mercato, e dall'altro cominciano a studiare le applicazioni dei materiali "nano" del futuro, immaginandone i possibili impieghi architettonici, ma anche gli impatti ambientali e sociali, dalla tossicità alla sicurezza della privacy.¹²¹

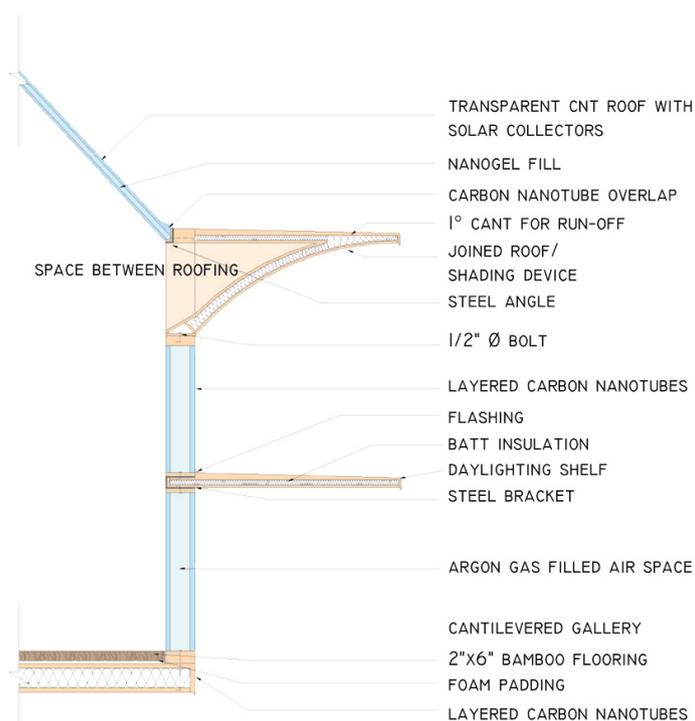


Nanostudio, progetti degli studenti della Ball State University. Elementi portanti ed involucri ad alte prestazioni realizzati con materiali nanostrutturati.

¹²¹ Ad esempio, alla Ball State University, sotto la guida del prof. George Elvin e in collaborazione con l'Illinois Institute of Technology, è nato il progetto *Nanostudio*, che raccoglie progetti di architettura e design che partono dallo studio e dall'impiego di diverse tipologie di materiali nanostrutturati, realizzati nell'ambito di workshop e corsi specifici da studenti.

Fino a pochi anni fa l'apporto delle nanotecnologie ai prodotti per l'edilizia era limitata all'impiego di vetri selettivi e rivestimenti fotocatalitici, mentre oggi è possibile assistere ad un numero crescente di applicazioni che riguardano tipologie di materiali, quali acciaio e cemento ad altissime prestazioni, destinati in futuro a sostituire le tecnologie convenzionalmente adottate per la realizzazione di elementi strutturali..

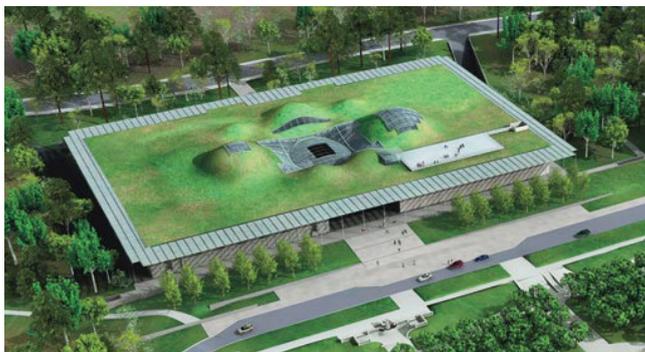
Il fermento che si sta creando in relazione alle crescenti potenzialità offerte dalle nanotecnologie all'architettura deriva da più fattori, che investono aspetti sia funzionali che estetici degli edifici, oltre a problematiche più ampie relative al contributo all'eco-efficienza dei processi e dei prodotti industriali.



Involucro trasparente ad alte prestazioni basato su nanotecnologie: diaframmi portanti e sbalzo orizzontale in fogli stratificati di nanotubi di carbonio, copertura trasparente ultrasolante in nanogel con strato superficiale fotovoltaico.

Emergono infatti le potenzialità legate a una completa trasformazione delle logiche costruttive degli elementi tecnici e alle conseguenti ricadute architettoniche, anche sul piano formale. Involucro trasparenti sottilissimi, ultrasolanti e autoregolanti, strutture esili e leggere con una resistenza cento volte maggiore di quella dell'acciaio, edifici che si autoriparano e inviano rapporti sull'efficienza nel funzionamento dei vari componenti, cominciano a stimolare ricerche progettuali tese a sfruttare le straordinarie proprietà dei nuovi materiali. Sul versante applicativo la sperimentazione comincia a cedere il

passo ad una diffusione sempre più ampia, proprio grazie a progetti “dimostrativi” che aprono la strada alle innovazioni.



Renzo Piano, California Academy of Sciences. Per le barre di armatura delle fondazioni e delle grandi vasche dell'acquario è stato impiegato un acciaio nanostrutturato resistente alla corrosione (MMFX, Technologies Corp.), più economico a parità di prestazione degli acciai inossidabili convenzionali.

Uno degli aspetti principali che riguardano l'apporto delle nanotecnologie al progetto di architettura è proprio legato alla possibilità di realizzare una nuova generazione di *green buildings* caratterizzati dall'impiego di materiali sempre più *high-tech* in grado di conciliare le esigenze di ridotto impatto ambientale con quelle estetiche e comunicative dell'architettura contemporanea (leggerezza, trasparenza, dinamicità, multimedialità, ecc.).¹²²

Nel campo degli involucri nuove proprietà permettono di assecondare la volontà di realizzare edifici completamente trasparenti ma energeticamente efficienti, superando anche le recenti innovazioni delle tecnologie pneumatiche (come i cuscini di ETFE, diventati una sorta di “icona” per gli edifici sportivi, agli ultimi mondiali di calcio e poi alle olimpiadi di Pechino) dal punto di vista della capacità isolante e della semplicità di posa in opera. Gli stessi involucri trasparenti possono modificare le proprietà fisiche in funzione del livello di radiazione luminosa e termica o contribuire alla produzione di energia pulita, sfruttando le innovazioni nanotecnologiche legate al fotovoltaico.

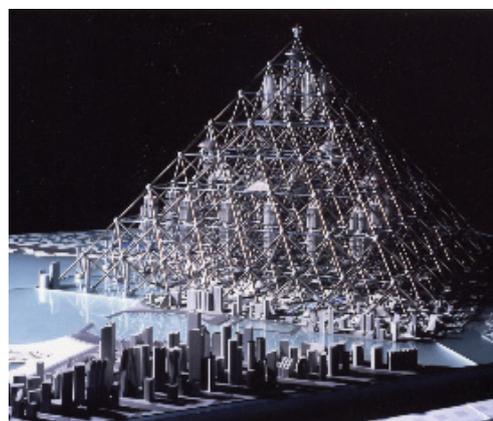
Alcuni degli interventi più interessanti sono stati realizzati impiegando materiali cementizi nanostrutturati: la ricerca di Richard Meier per le vele in cemento bianco della chiesa Dives in Misericordia a Roma, ha portato alla scelta di sfruttare le proprietà autopulenti del biossido di titanio lavorato alla nanoscala che permetteranno di conservare le proprietà estetiche del materiale cementizio, incrementandone la durabilità e riducendo i costi di manutenzione; in altri casi calcestruzzi speciali

¹²² Cfr. George Elvin, *Nanotechnology for Green Buildings*, Green Technology Forum, 2008. <http://www.greentechforum.net>

sviluppati grazie all'apporto di nanotecnologie consentono di ridurre enormemente i tempi di cantiere grazie a tempi di maturazione rapidissimi o di realizzare elementi strutturali con percentuali bassissime di rinforzo. In questi interventi l'apporto delle nanotecnologie al materiale di base impiegato (in questo caso il cemento) determina un valore aggiunto con ricadute in termini sia formali che prestazionali ottenute impiegando quantità ridottissime di materiale.



A sinistra, P.T.D. Architects, Fond du Lac, Stati Uniti, copertura inclinata realizzata con pannelli in policarbonato e aerogel. A destra, Richard Meier, Dives in Misericordia, Roma. L'involucro è realizzato con 256 pannelli e 600 tonnellate di cemento bianco fotocatalitico con effetto autopulente.

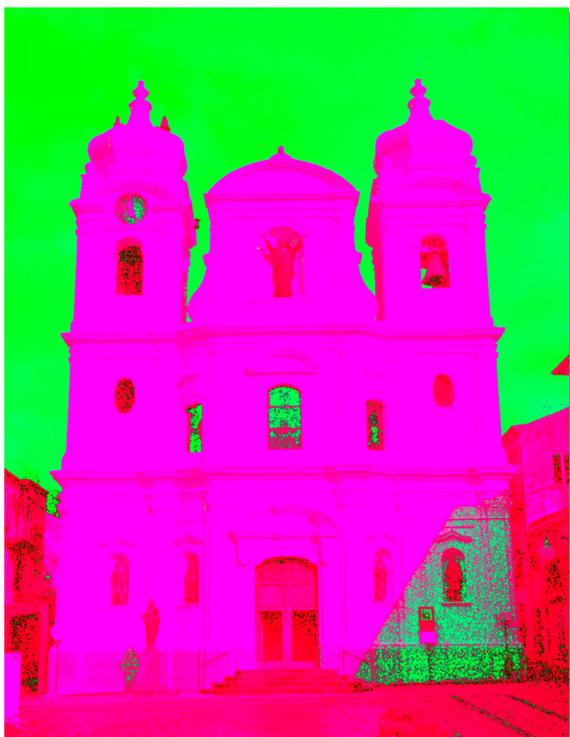


A sinistra, Suvarnabhumi International Airport, Bangkok, Murphy/Jahn Architects. I pannelli in alluminio dell'involucro e dei controsoffitti sono stati rivestiti con uno speciale spray isolante nanostrutturato. A destra, Shimizu Corporation, TRY 2004 Mega-City Pyramid. L'enorme struttura progettata nella baia di Tokyo potrebbe essere realizzata impiegando cemento e acciaio rinforzati con nanotubi di carbonio.

In un futuro non troppo lontano un sviluppo pieno delle potenzialità legate alle nanotecnologie per i materiali potrà eliminare i fattori che tradizionalmente segnavano il confine tra l'immaginazione dei progettisti e le limitazioni imposte dalle necessità

costruttive. Tra i progetti più ambiziosi che potrebbero vedere la luce grazie all'applicazione di materiali nanostrutturati c'è la Shimizu TRY 2004 Mega-City Pyramid, un'enorme struttura piramidale nella baia di Tokyo, alta 2.004 metri e capace di ospitare 750.000 persone.¹²³ Considerate le enormi dimensioni delle aste (circa 550 m, con sistemi di trasporto all'interno), si prevede di realizzare il telaio con nanotubi di carbonio inseriti in matrici cementizie o metalliche, in modo da ottenere elementi strutturali con una elevatissima resistenza meccanica e duttilità, in grado di rendere la piramide resistente a terremoti e tsunami.

Anche l'ambito del recupero sembra destinato ad essere un banco di prova di primo piano per l'impiego di nanotecnologie nel settore delle costruzioni. La possibilità di migliorare le risposte prestazionali dei materiali impiegati attraverso tecnologie dematerializzate fino a diventare praticamente invisibili all'occhio dell'uomo, può risultare determinante quando la principale esigenza, unita alla necessità del recupero "funzionale" di parti ed elementi, è la salvaguardia dei caratteri architettonici e costruttivi.



Pittura fotocatalitica (Italcementi/CIM) per il rifacimento della facciata barocca della chiesa Matrice di Cittanova (1700). A destra, copertura con vetri autopulenti (Pilkington Activ) realizzata per la Royal Arcade di Melbourne (1869).

¹²³ Progettata con la consulenza dell'architetto italiano Dante Bini, conosciuto per gli studi su sistemi strutturali spaziali innovativi e sull'automazione delle tecniche costruttive, prevedrà in fase di cantiere l'utilizzo di grossi robot che assembleranno la struttura a telaio.

È possibile prevedere, dunque, il ruolo crescente che le nanotecnologie avranno nello sviluppo di prodotti ad altissime prestazioni ottenuti ottimizzando la struttura cristallina del materiale alla scala nanometrica oppure additivando materiali tradizionali, quali legno, cemento, acciaio, pietra, polimeri tramite nanoparticelle, creando nanocompositi ultraperformanti. Applicazioni specifiche riguardano la realizzazione di prodotti e sistemi per il ripristino delle strutture in cemento armato e in muratura, a partire dalle malte da ripristino nanostrutturate, fino allo sviluppo di nuovi sistemi per il rinforzo strutturale con materiali compositi fibrorinforzati. Sono numerose le ricerche tese ad un incremento delle prestazioni (prevalentemente meccaniche e di resistenza alle alte temperature) degli FRP (*Fiber Reinforced Polymers*) mediante nanoparticelle di argilla o carbonio. Allo stesso modo è possibile prevedere un'evoluzione delle tecnologie FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) in seguito al miglioramento delle prestazioni delle matrici cementizie nanostrutturate in termini di proprietà meccaniche, di contenimento degli spessori, di miglioramento dell'adesione e delle caratteristiche delle fibre ad esse accoppiate.¹²⁴

Risulta inoltre di particolare interesse l'impiego di nanotecnologie nel controllo e monitoraggio delle strutture esistenti, sia per la realizzazione di strumenti di rilevamento ad altissima precisione, sia per lo sviluppo di materiali capaci di "automonitorsi" grazie alla presenza al loro interno di sensori e attuatori di dimensioni nanometriche, in grado di convertire gli stimoli termo-meccanici in impulsi elettrici.¹²⁵ Altri strumenti sviluppati grazie alle nanotecnologie consentono di intervenire sulle superfici esistenti in maniera selettiva, realizzando rivestimenti protettivi e funzionali completamente trasparenti o sistemi *smart* per la pulitura delle superfici. Nel campo del restauro e della conservazione dei beni culturali sono stati sperimentati sistemi basati su laser¹²⁶ in grado di limitare l'azione a strati superficiali molto sottili, dell'ordine di poche decine di nanometri senza danneggiare gli strati sottostanti e senza fare uso di prodotti chimici tossici.

¹²⁴ È stato testato ad esempio l'accoppiamento di nanotubi di carbonio a fibre di Zylon (o PBO, fibra comunemente impiegata per la realizzazione di reti impiegate come rinforzo nei sistemi FRCM) per circa il 10% del peso incrementa di circa il 50% la resistenza a trazione del materiale.

¹²⁵ Un'interessante ricerca in tal senso è stata condotta presso il Politecnico di Torino (cfr. *Impiego di nanotecnologie nei beni culturali per l'efficienza di sistemi manutentivi del costruito in legno: tecnologie innovative di recupero*, Ricerca PRIN, 2005, Coordinatore scientifico prof. Clara Bertolini, Politecnico di Torino), sperimentando sia le potenzialità espresse dai nanomateriali (in questo caso nanotubi di carbonio per migliorare le prestazioni delle resine polimeriche impiegate come adesivi per il legno), sia l'applicazione di nanotecnologie per il perfezionamento dei sistemi di diagnosi e monitoraggio (ad es. micro e nano-chips come sorgenti dati).

¹²⁶ Ricerca condotta presso il Centro Conservazione e Restauro "La Venaria Reale", in collaborazione con il Dipartimento di Chimica dell'Università di Torino nell'ambito del progetto Nanomat.

5.1.3. Le caratteristiche innovative dei materiali nanostrutturati e l'offerta dei prodotti

Individuare con precisione l'attuale offerta di prodotti per l'edilizia basati su nanotecnologie è una operazione non semplice proprio in virtù delle molteplici applicazioni possibili e dalle diverse modalità di approccio alla nano-modificazione di materiali e prodotti esistenti.

Il controllo delle nanostrutture presenti all'interno dei diversi materiali da costruzione e la possibilità di sfruttare le particolari proprietà dei nanomateriali, rendono potenzialmente realizzabili prodotti di vario tipo, con funzione strutturale, di rivestimento, di involucro, fino all'impiantistica e alla sensoristica.

Le principali caratteristiche innovative risiedono nella possibilità di modulare l'offerta prestazionale di prodotti e sistemi in maniera estremamente versatile. La proliferazione di prodotti "nanomodificati" è legata in parte alla relativa semplicità, una volta immesso sul mercato un determinato prodotto, di ampliarne la relativa gamma, aggiungendo e abbinando prestazioni specifiche, rendendo in definitiva molto complessa una catalogazione analitica di tutte le varianti disponibili. È tuttavia possibile effettuare una ricognizione dei principali campi su cui si sta orientando l'attuale produzione industriale in ambito edilizio veicolata dalle nanotecnologie, individuando le innovazioni prodotte in relazione alle tipologie di impiego e ai livelli prestazionali raggiungibili.

Materiali e prodotti per applicazioni strutturali

L'utilizzo di materiali nanostrutturati per impieghi strutturali rappresenta un interessante settore di sviluppo delle nanotecnologie in ambito edilizio. L'obiettivo in questo caso è quello di ottimizzare le proprietà meccaniche (resistenza meccanica, modulo elastico, duttilità, resistenza a fatica, ecc.) dei materiali tradizionali, combinandole con altre proprietà specifiche che ne incrementano ad esempio la lavorabilità e la duttilità. Le prestazioni finali contribuiscono a migliorare aspetti legati alla posa in opera (più rapida e agevole) o agli impatti ambientali (risparmio di risorse e durabilità).

Nel campo dei calcestruzzi ad alte prestazioni e delle malte strutturali si sta assistendo ad una vera e propria rivoluzione, poiché è possibile formulare un *mix-design* specifico a seconda dell'insieme di prestazioni ricercate e dell'applicazione prevista, ottenendo ad esempio calcestruzzi strutturali con sezioni particolarmente ridotte e che richiedono quantità minime di armatura, resistenti a trazione, altamente duttili, impermeabili e resistenti agli agenti aggressivi. Attraverso un semplice processo di ingegnerizzazione alla nanoscala delle caratteristiche dell'impasto (selezione e dimensione degli inerti,

dosaggio degli additivi e del rapporto acqua/cemento) è possibile variare le proprietà finali, incidendo sulla lavorabilità e sulla fluidità, sui tempi di presa e di maturazione, ottenendo calcestruzzi altamente durevoli anche in ambienti aggressivi, che non presentano imperfezioni dovute al ritiro del conglomerato e che limitano il rischio di errori in fase di posa in opera.¹²⁷

Simili innovazioni sono state prodotte anche nel campo dell'acciaio, attraverso lo studio dell'influenza delle caratteristiche delle nanostrutture del materiale sulle proprietà meccaniche e sulla durabilità. Possono essere realizzati profili, giunti strutturali, cavi e armature in acciaio, con migliorate caratteristiche di resistenza a fatica e ai carichi dinamici, utilizzando nanoparticelle (ad esempio di rame, molibdeno e vanadio) in grado di modificare il comportamento chimico-fisico dell'acciaio a seconda del variare degli stati tensionali (limitando il rischio di fratture da fatica) oppure migliorando la resistenza agli agenti aggressivi (limitando i processi corrosivi).¹²⁸ Oltre all'acciaio, numerose tipologie di leghe metalliche nanostrutturate, inizialmente impiegate nel settore aerospaziale, cominciano ad essere trasferite nel settore edilizio per applicazioni che richiedono di coniugare leggerezza ed elevata resistenza meccanica. Un interessante settore di innovazione infine è costituito dai materiali compositi rinforzati con fibre corte o lunghe, impiegati per la realizzazione di profili strutturali o per il ripristino di elementi degradati, in cui le proprietà della matrice possono essere modificate attraverso l'impiego di nanoparticelle. Ad esempio l'aggiunta di nanoparticelle di argilla in una matrice polimerica permette di migliorare l'interfaccia matrice-rinforzo o la resistenza alle alte temperature e all'umidità, mentre l'aggiunta di nanosilice in una matrice cementizia influisce sulle sue proprietà meccaniche.¹²⁹



Leghe metalliche leggere e calcestruzzo ad alte prestazioni.

¹²⁷ Alcune significative innovazioni prodotte nel campo dei materiali cementizi nanostrutturati per applicazioni strutturali riguardano sia calcestruzzi ad alte prestazioni (*Ductal* e *Chronolia* di Lafarge) che malte cementizie (*Nanocrete* di BASF) con particolari prestazioni meccaniche, di durabilità e lavorabilità (Cfr. cap. 6).

¹²⁸ *Sandvik Nanoflex* (Sandvik Materials Technology) e *MMFX2* (MMFX Steel Corp.) recentemente immessi sul mercato sono frutto di differenti applicazioni nanotecnologiche, ma sono entrambi caratterizzati da una elevata resistenza a corrosione e particolari proprietà meccaniche.

¹²⁹ Innovazioni in questo campo permetteranno di superare gli attuali limiti delle tecnologie FRP (Fiber Reinforced Polymer) e FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) impiegate per il ripristino strutturale, oppure quelli legati all'impiego di materiali compositi nella realizzazione di armature per calcestruzzo.

Materiali e prodotti da rivestimento

Il settore dei rivestimenti protettivi e funzionali per le diverse tipologie di prodotti impiegati in edilizia è stato letteralmente rivoluzionato grazie all'apporto delle nanotecnologie. Il comparto dei rivestimenti per pannelli, vetrate e componenti per l'involucro in generale rappresenta oggi un mercato mondiale da 10 miliardi di euro all'anno. Accanto alle prestazioni comunemente richieste (stabilità nel lungo periodo, durabilità e resistenza agli agenti atmosferici, buona adesione al substrato, trasparenza, sostenibilità del processo produttivo, ecc.), è possibile, attraverso rivestimenti e *coatings* nanostrutturati introdurre ulteriori funzionalità, quali l'autopulizia, la resistenza alla corrosione, al graffio e ai graffiti, la variazione della gamma cromatica, la riflessione selettiva, l'effetto di barriera ai gas e l'isolamento termico.¹³⁰

Possono essere impiegati sotto forma di spray¹³¹ materiali ibridi organici-inorganici nanostrutturati, caratterizzati da un'ottima adesione ai diversi tipi di substrato (alluminio e leghe di alluminio, legno, marmo, acciaio, polietilene, ceramica, ecc.). Nel caso delle vernici e intonaci, l'impiego di nanolattici come fissativo consente di garantire adesione al supporto, riduzione della porosità e permeabilità al vapore.

Un'ulteriore innovazione nel campo dei rivestimenti è rappresentata dalla diffusione dei trattamenti fotocatalitici a base di nanoparticelle di biossido di titanio, utilizzate per realizzare rivestimenti attivi in grado di abbattere l'inquinamento dell'aria sia all'interno che all'esterno degli edifici, all'interno di prodotti di vario tipo a base di calce o cemento, quali pitture, intonaci, rasanti, ma anche per pavimentazioni stradali in masselli autobloccanti, pavimentazioni continue in cls o in asfalto.

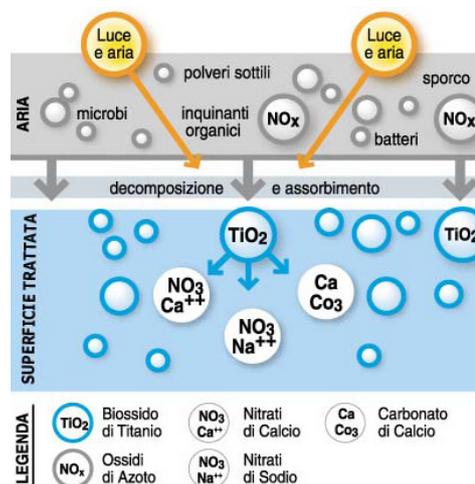
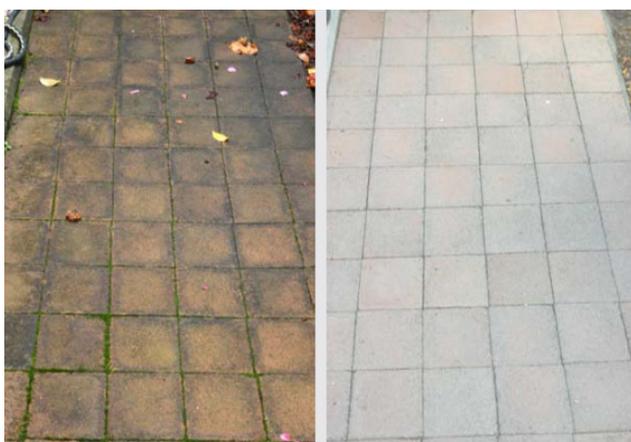


Rivestimento di pannelli in alluminio con isolante spray nanostrutturato (Fonte: documentazione tecnica Industrial Nanotech).

¹³⁰ Le proprietà di isolamento termico di alcune tipologie di rivestimenti trasparenti (ad es. Nanosulate della Industrial Nanotech), che presentano valori di conducibilità termica pari a circa 0,017 W/mK, permettono di ottenere in soli 180 micron di spessore un abbattimento del flusso termico fino al 30%.

¹³¹ O legati al supporto mediante processi chimici quali ad esempio la polimerizzazione attraverso raggi UV.

Vantaggi dei <i>coatings</i> protettivi nanostrutturati	
Substrato	Vantaggi
Legno	Durezza, resistenza al graffio, agli agenti atmosferici e al fuoco
Metalli	Durezza, resistenza agli agenti atmosferici e alla corrosione
Pietra	Resistenza agli acidi e agli agenti atmosferici
Plastiche	Durezza, resistenza al graffio, agli agenti atmosferici e al fuoco



Trattamenti protettivi per pavimentazioni. (Fonte: documentazione tecnica Nanovations). A destra, principio di funzionamento della fotocatalisi.

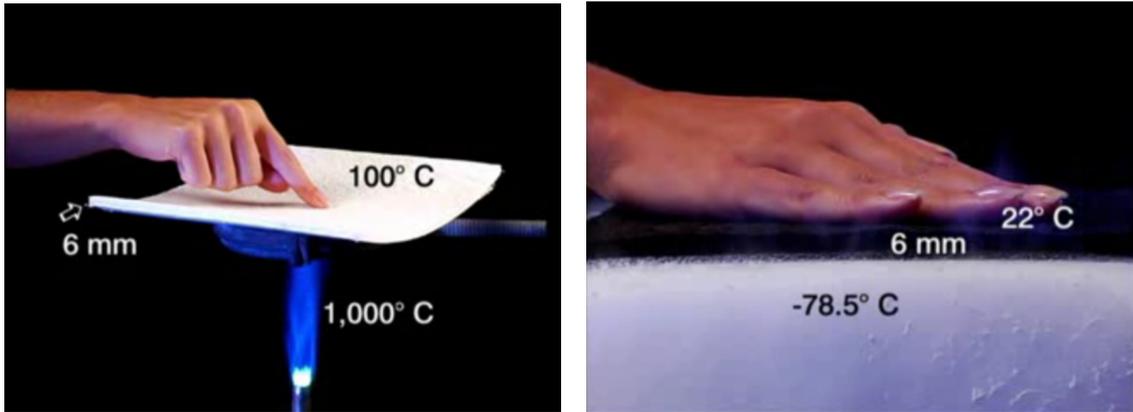
Materiali e prodotti per l'involucro

Nel settore dei prodotti per l'involucro, una delle innovazioni più sorprendenti legate alle nanotecnologie riguarda la possibilità di impiegare l'aerogel (il materiale isolante più leggero e performante esistente, costituito al 99% di aria e con una conducibilità termica pari a 0,013 W/mK), inizialmente utilizzato solo per applicazioni dell'industria aerospaziale, in range di temperature ordinarie come quelle ambientali.¹³²



Il processo di trasformazione dell'aerogel in lastra isolante, fornisce un'integrità meccanica e una forma idonee al suo impiego.

¹³² Le innovazioni introdotte dalla Aspen hanno trasformato l'aerogel da curiosità di laboratorio a prodotto industriale di largo consumo (ad esempio il processo di estrazione, con CO₂ supercritico, riduce la durata del ciclo di formazione dell'aerogel da mesi a ore). Il materiale si crea dalla gelificazione della silice in un solvente. Con l'eliminazione del solvente, ciò che rimane è in pratica "sabbia gonfiata" con una porosità fino al 99%. I nanopori sono tanto fitti e numerosi da rallentare il trasporto di calore e massa, fornendo così un valore di conduttività termica bassissimo.



Proprietà di isolamento termico del Nanogel (conducibilità termica 0,018 W/mK).

Il prodotto, nella sua versione per applicazioni edili (Spaceloft, prodotto dalla Aspen Aerogel) consente di raggiungere una elevata resistenza termica con spessori ridotti di materiale, contribuendo all'isolamento dell'involucro edilizio e all'eliminazione dei ponti termici. In altri casi la tecnologia dell'aerogel è stata impiegata per realizzare isolanti trasparenti, racchiuso in pannelli sandwich in *lexan*, che raggiungono un valore di trasmittanza termica pari a 0,72 W/mqK in soli 25 mm di spessore (Nanogel - Kalwall, di Cabot Corp.).



Confronto dello spessore dei materiali isolanti a parità di prestazioni.

Importanti innovazioni legate alle nanotecnologie riguardano anche gli involucri trasparenti: vetri selettivi, fotocromici e termocromici possono essere ottenuti attraverso l'aggiunta di nanoparticelle di ossidi metallici (zinco, ferro o stagno) sulla superficie delle singole facce del vetro, mentre l'uso di nanoparticelle di biossido di titanio

consente di ottenere vetri autopulenti e fotocatalitici (Activ di Pilkington, SGG Bioclean di Saint Gobain).

Infine, le proprietà fotocatalitiche del biossido di titanio sono sfruttate anche nella realizzazione di diverse tipologie di pannelli per l'involucro, in alluminio o titanio (Ecotim di AluBuild), calcestruzzo (Helios TX di Cividini) ed elementi di facciata prefabbricati in c.a.



A sinistra pannelli in polycarbonato e aerogel (Nanogel, Cabot Corp.), a destra vetro selettivo autopulente (SGG Bioclean, Saint Gobain).

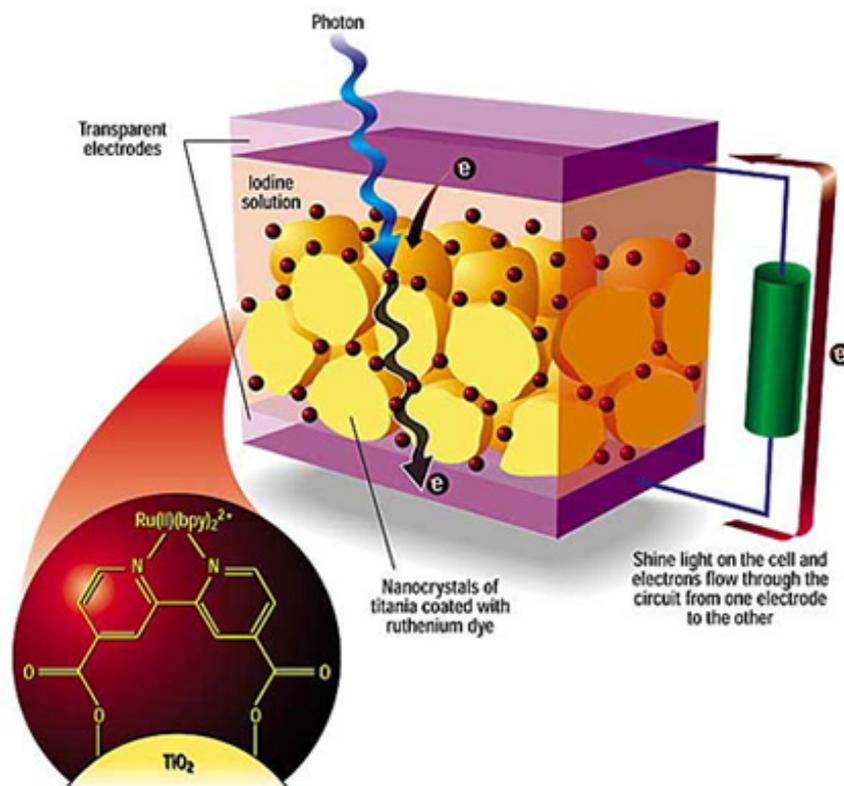


Vetri fotoelettrocromici destinati ad applicazioni edilizie realizzati presso il Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Sulla lastra vengono depositati uno strato trasparente elettroconduttivo, che funge da "elettrodo trasparente", poi uno strato elettrocromico in ossido di tungsteno e quindi uno strato nanoporoso di ossido di titanio, che funziona da materiale fotovoltaico e fornisce l'energia per alimentare l'elettrocromatismo.

Impiantistica e sensoristica

Si ritiene che nei prossimi anni i settori dell'impiantistica e della sensoristica saranno completamente rivoluzionati dai progressi nel campo della nanoelettronica. In particolare la tecnologia del fotovoltaico sta ricevendo una notevole spinta dalle

potenzialità offerte dalle nanotecnologie.¹³³ I recenti sviluppi legati al fotovoltaico organico¹³⁴ sono dovuti in massima parte a studi nanotecnologici, che hanno consentito di raggiungere livelli di efficienza fino al 10% (e quindi competitivi con le tecnologie convenzionali del film sottile). Più in generale la ricerca sul fotovoltaico sta puntando alla sostituzione del silicio come materiale di base, attraverso l'impiego di nanoparticelle funzionalizzate e lo sviluppo di tecnologie produttive più convenienti simili alla stampa a getto d'inchiostro.

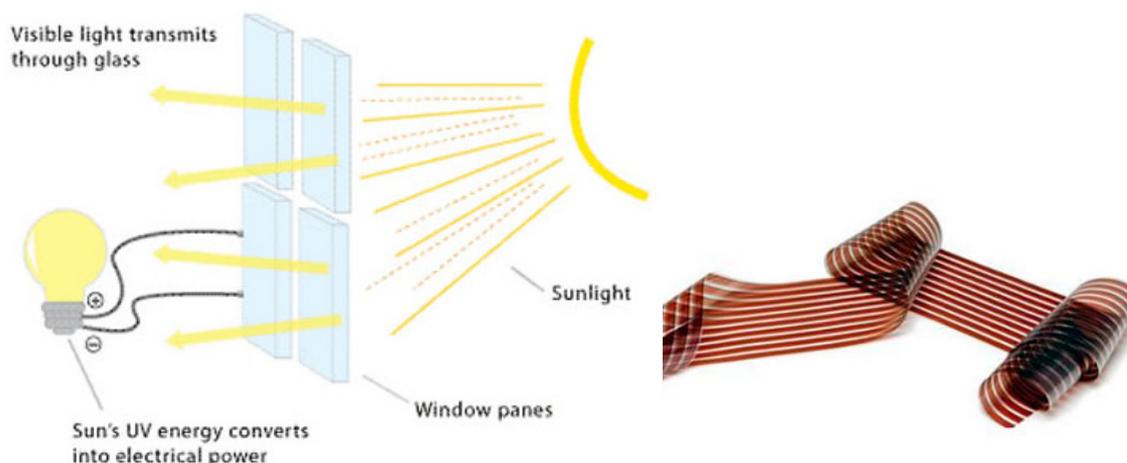


Schematizzazione del funzionamento delle celle di Graetzel: l'assorbimento della luce è migliorato dalla presenza di uno strato di colorante chimicamente legato ad uno strato di nanoparticelle di biossido di titanio (TiO₂) interconnesse tra loro e depositate su un vetro trasparente e conduttore.

¹³³ NanoMarkets, azienda analista del settore delle nanotecnologie nel fotovoltaico, rilascerà nei prossimi mesi uno studio di settore che affronterà le opportunità di mercato riguardanti i film fotovoltaici sottili, il fotovoltaico organico e il fotovoltaico stampabile.

¹³⁴ Il campo delle celle solari organiche (note anche come celle di Grätzel, dal nome del loro inventore, professore di chimica dell'Ecole Polytechnique Fédérale di Losanna) comprende tutti quei dispositivi la cui parte fotoattiva è basata sui composti organici del carbonio. La struttura base di una cella organica è "a sandwich", composta da un substrato, generalmente vetro ma anche plastica flessibile, e da una o più sottilissime pellicole, che contengono i materiali fotoattivi, fraposte tra due elettrodi conduttivi. Le celle organiche più efficienti, ispirandosi al processo di fotosintesi clorofilliana, utilizzano una miscela di materiali in cui un pigmento assorbe la radiazione solare e gli altri componenti estraggono la carica per produrre elettricità. La gamma di pigmenti che possono essere impiegati include quelli a base vegetale, come le antocianine derivate dai frutti di bosco, i polimeri e le molecole sintetizzate in modo da massimizzare l'assorbimento dello spettro solare. Cfr. Maria L. Terranova, "Nanotubi di Carbonio per la Produzione di Energia e Gestione del Calore", in *Atti del Convegno Nanoweek*, Verona, 15-20 gennaio 2007.

Grazie alle evoluzioni in questo settore, sono già disponibili sul mercato celle fotovoltaiche basate su materiali alternativi, quali i CIGS¹³⁵ o il silicio nero¹³⁶. Sono inoltre già in produzione (Octillion Corp.) vetri fotovoltaici completamente trasparenti realizzati con spray a base di nanoparticelle di silicio del diametro da 1 a 4 nm¹³⁷, in grado di aumentare di oltre il 50% l'efficienza delle celle solari rispetto alle tecnologie convenzionali, ma anche celle di dimensioni nanometriche per applicazioni nel campo della sensoristica.



A sinistra, vetro fotovoltaico con nanoparticelle di silicio (Octillion Corp.), a destra film sottile in CGIS stampato (Konarka).

Nel campo della nanoelettronica, interessanti applicazioni per il settore edilizio sono legate allo sviluppo dei cosiddetti NEMS (*Nano Electro Mechanical Systems*) applicati a materiali da costruzione, in modo da realizzare sensori "incorporati" in grado di convertire stimoli meccanici in impulsi elettrici e viceversa, con funzioni di automonitoraggio e autoriparazione, oppure destinati ad applicazioni nel campo della domotica.

Le nanotecnologie sono impiegate infine anche nello sviluppo di sistemi di illuminazione ad alta efficienza quali gli OLED (*Organic Light Emitting Diode*) e altre tipologie di sorgenti luminose basate sull'impiego di nanotubi di carbonio, ad esempio lampadine ad incandescenza realizzate con filamenti di nanotubi al posto del

¹³⁵ Film sottili a base di CGIS, (Copper Indium Gallium (di)Selenite, un semiconduttore di nuova generazione) sono prodotti dall'azienda americana Nanosolar. Sfruttano la tecnologia a getto d'inchiostro e sono in grado di raggiungere efficienze fino al 15% ad un costo contenuto (attualmente circa \$ 0.99/Watt).

¹³⁶ Frutto di un brevetto realizzato alla Harvard University, il silicio nero proviene da uno speciale trattamento laser del silicio convenzionale che porta ad un aumento da 100 a 500 volte della capacità di assorbimento dell'energia solare, fino alle frequenze degli infrarossi.

¹³⁷ Le nanoparticelle vengono deposte sul vetro tramite un elettro-spray in grado formare una pellicola di un determinato spessore. L'elettro-spray permette di deporre le nanoparticelle di silicio potendo controllare il grado di efficienza energetica con il grado di luce che queste lasciano trasparire attraverso il vetro, tipicamente lo spettro del visibile viene lasciato passare mentre le celle assorbono energia dai raggi UV.

tungsteno, che garantiscono un abbattimento dei consumi energetici e un innalzamento della vita utile.

Tipologia di prodotto		Prestazioni a caratterizzanti
Materiali strutturali	Calcestruzzo ad alte prestazioni	Elevata resistenza meccanica e duttilità, durabilità e resistenza agli agenti aggressivi, lavorabilità e flessibilità dimensionale
	Acciaio ad alte prestazioni	Elevata resistenza meccanica e duttilità, durabilità e resistenza agli agenti aggressivi, lavorabilità e flessibilità dimensionale
	Compositi fibrorinforzati a matrice polimerica	Resistenza all'umidità e alle alte temperature, particolari proprietà elettriche ed elettromagnetiche
	Leghe metalliche	Elevata resistenza meccanica, leggerezza, lavorabilità
Rivestimenti	Materiali cementizi fotocatalitici (intonaci, pitture, pavimentazioni)	Durabilità e autopulibilità, abbattimento degli inquinanti atmosferici
	Vernici e rivestimenti protettivi	Resistenza ad agenti aggressivi, all'umidità e alle alte temperature (prestazioni aggiuntive autopulibilità)
	Isolanti trasparenti	Isolamento termico e acustico
Materiali per l'involucro	Rivestimenti isolanti	Isolamento termico e acustico, inerzia termica
	Vetri fotocatalitici	Durabilità e autopulibilità, abbattimento degli inquinanti atmosferici
	Vetri fotocromici e termocromici	Controllo del fattore solare e del carico termico
	Ceramiche trasparenti	Resistenza all'impatto e alle alte temperature
	Vetri fotovoltaici	Integrabilità
Impiantistica e sensoristica	Fotovoltaico organico	Biodegradabilità, efficienza energetica
	Nanofotovoltaico	Flessibilità di impiego, efficienza energetica
	OLED (Organic Light Emitting Diode)	Flessibilità di impiego, durabilità, efficienza energetica
	NEMS (Nano Electrical Mechanical Systems)	Capacità di automonitoraggio e autoriparazione

5.2. Materiali nanostrutturati ed eco-efficienza

5.2.1. Il controllo dell'eco-efficienza nel ciclo di vita dei prodotti

Un comportamento eco-efficiente in edilizia può dipendere sia da caratteristiche intrinseche dei prodotti (prestazioni, impieghi, rendimenti nel tempo, modalità di messa in opera, ciclo di vita, ecc.) sia dei processi produttivi (dematerializzazione, produzione *tailor-made*, *lean production*, ecc.). È inoltre possibile valutare l'eco-efficienza un determinato prodotto considerando le ricadute in termini di contributo alla riduzione

dell'impatto ambientale dell'intero "sistema edificio" (capacità di determinare una riduzione dei livelli di inquinamento e dei consumi energetici dell'edificio, di permettere il controllo degli impatti nel tempo).

Valutazione dell'eco-efficienza	
In relazione ai prodotti	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dematerializzazione (riduzione dell'intensità materica ed energetica per unità di prodotto) ▪ Multifunzionalità ▪ Risparmio di risorse energetiche e materiali in fase di realizzazione, esercizio ▪ Durabilità ▪ Manutenibilità ▪ Atossicità ▪ Presenza di Certificazioni ▪ Possibilità di riciclabilità/riuso
In relazione al processo produttivo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dematerializzazione (riduzione dell'intensità materica ed energetica dei processi, <i>lean production</i>) ▪ Disponibilità delle materie prime impiegate ▪ Riduzione dei flussi di materiali ▪ Riduzione delle emissioni nocive in fase di produzione ▪ Riciclaggio e riuso degli scarti per una nuova produzione
In relazione alle ricadute dei prodotti sul sistema-edificio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contributo al recupero e ripristino di strutture e edifici esistenti ▪ Contributo al benessere termoigrometrico ▪ Contributo alla riduzione dei consumi energetici ▪ Contributo al miglioramento delle condizioni di illuminazione (naturale o artificiale) ▪ Contributo alla riduzione di inquinamento elettromagnetico ▪ Contributo alla riduzione dell'inquinamento acustico e atmosferico

La Commissione Europea¹³⁸ ha definito alcuni obiettivi fondamentali affinché i processi industriali collegati ai prodotti per l'edilizia possano raggiungere un adeguato livello di efficienza nello sfruttamento delle risorse ambientali, ad esempio:

- 30% di riduzione dell'energia incorporata nei materiali e componenti edilizi a parità di prestazione
- 30% di riduzione nell'impiego di materie prime per unità di prodotto;
- 40% riduzione dei rifiuti nel processo produttivo
- Meno dell'1% dei rifiuti da costruzione destinati a discarica
- 100% dei materiali da costruzione riciclabili e verso il 100% di riuso dei rifiuti da costruzione e demolizione
- Riduzione sostanziale del consumo di acqua

¹³⁸ European Construction Technology Platform (ECTP), *Strategic Research Agenda for the European Construction Sector. Achieving a Sustainable and Competitive Construction Sector by 2030*, Bruxelles, 2005, p. 22.

Sono numerose le “azioni di controllo” che permettono di valutare i livelli di eco-efficienza nei prodotti industriali. Lo studio delle caratteristiche dei materiali e del loro processo produttivo risulta senza dubbio uno dei principali fattori che possono determinare un primo livello di conoscenza, in base al quale ad esempio individuare una potenziale tossicità per gli individui o un rischio per l’ambiente. Tuttavia, nel caso dei prodotti per l’edilizia, non è possibile prescindere da una valutazione delle prestazioni in condizioni d’uso, a partire dalla valutazione del ciclo di vita degli edifici e dei prodotti con cui sono realizzati, che consente di determinare gli impatti ambientali prodotti e gli eventuali vantaggi dal punto di vista economico nel lungo periodo, nonché una effettiva rispondenza alle esigenze costruttive e legate alla fase di esercizio. Un approccio *Life Cycle Based* permette anche di valutare correttamente i livelli prestazionali espressi in relazione al consumo di risorse materiali ed energetiche, e di confrontare le tecnologie innovative con quelle convenzionalmente impiegate, secondo un approccio teso a valutare i costi e i benefici dal punto di vista ambientale ed economico, in modo da orientare l’innovazione verso lo sviluppo di prodotti e sistemi affidabili che contribuiscano a ridurre effettivamente gli impatti globali.

5.2.2. Il contributo dei materiali nanostrutturati all’eco-efficienza del processo edilizio

Un particolare aspetto della ricerca tecnologica sui nuovi materiali nanostrutturati riguarda proprio il loro grado di eco-efficienza, principalmente basato sulla possibilità di ridurre l’intensità nel consumo di materiali ed energia nell’intero ciclo di vita, attraverso l’utilizzo di minori quantità di materie prime, la capacità di facilitare e ridurre le operazioni di manutenzione, di produrre energia pulita o assorbire agenti inquinanti, di garantire durabilità e affidabilità prestazionale nel tempo.

Le nanotecnologie, insieme alle *information and communications technologies* (ICT) e alle biotecnologie sono considerate *cross-cutting environmental technologies*, ossia tecnologie di tipo trasversale, in grado di modificare in maniera determinante il rapporto dell’uomo con l’ambiente, soprattutto per la capacità di minimizzare il consumo di risorse materiali ed energetiche a parità di livelli produttivi e di efficienza prestazionale dei prodotti. Non a caso il *Wuppertal Institut for Climate, Environment and Energy*, promotore di teorie legate all’eco-efficienza dei processi e dei prodotti industriali come Factor 10 e MIPS (cfr. par. 3.1.2.), ha partecipato a numerosi progetti di ricerca collegati alle nanotecnologie, contribuendo ad evidenziare la portata del cambiamento

che può derivare da una progressiva diffusione nei diversi settori industriali, facendo emergere le opportunità ma anche i rischi in relazione ai possibili impatti ambientali.

Se da un lato infatti appare certa la possibilità di ottimizzare l'efficienza nell'uso delle risorse, grazie alla capacità di minimizzare il contenuto materico per ottenere le prestazioni richieste a un dato prodotto, dall'altro i principali ostacoli alla diffusione dei materiali nanostrutturati sono rappresentati dall'incertezza sulle conseguenze che le nanoparticelle possono avere sull'ambiente e sulla salute umana, in particolare per i materiali realizzati con nanopolveri di ossidi metallici, altamente inquinanti. Esempi in tal senso sono forniti dai vetri selettivi a base di nanoparticelle di ossido di argento, il cui costo in termini di emissioni nocive in fase di produzione viene compensato solo considerando i benefici ottenuti in fase di esercizio; oppure da alcune tipologie di additivi supefluidificanti per calcestruzzo a base di tetracloroetilene.

Allo stato attuale, tra la grande fiducia espressa da ricercatori ed enti governativi e i segnali di allarme provenienti da associazioni e da parte della comunità scientifica, non esistono di fatto sistemi di regolamentazione e controllo adeguati, ciò innanzitutto per la non piena consapevolezza delle tipologie di prodotti e processi da sottoporre a verifica. Gli effetti potenzialmente dannosi dei materiali nanostrutturati potrebbero provenire, come si è visto (cfr. par. 4.2.), dalla natura delle nanoparticelle stesse, dalle caratteristiche dei prodotti nei quali vengono impiegate o dai processi produttivi con cui vengono realizzati.

	Embodied Energy per Thermal Resistance	Embodied CO ₂ per Thermal Resistance
Spaceloft Insulation	4.42	0.35
Fiberglass (Recycled Glass)	7.37	0.58
Expanded Polystyrene	24.80	1.97
Polyisocyanurate	11.63	0.92

Confronto tra l'energia incorporata e la CO₂ emessa per la realizzazione di diverse tipologie di materiali isolanti a parità di resistenza termica. L'aerogel (*Spaceloft*) risulta essere il meno impattante grazie alla possibilità di utilizzare spessori estremamente ridotti.

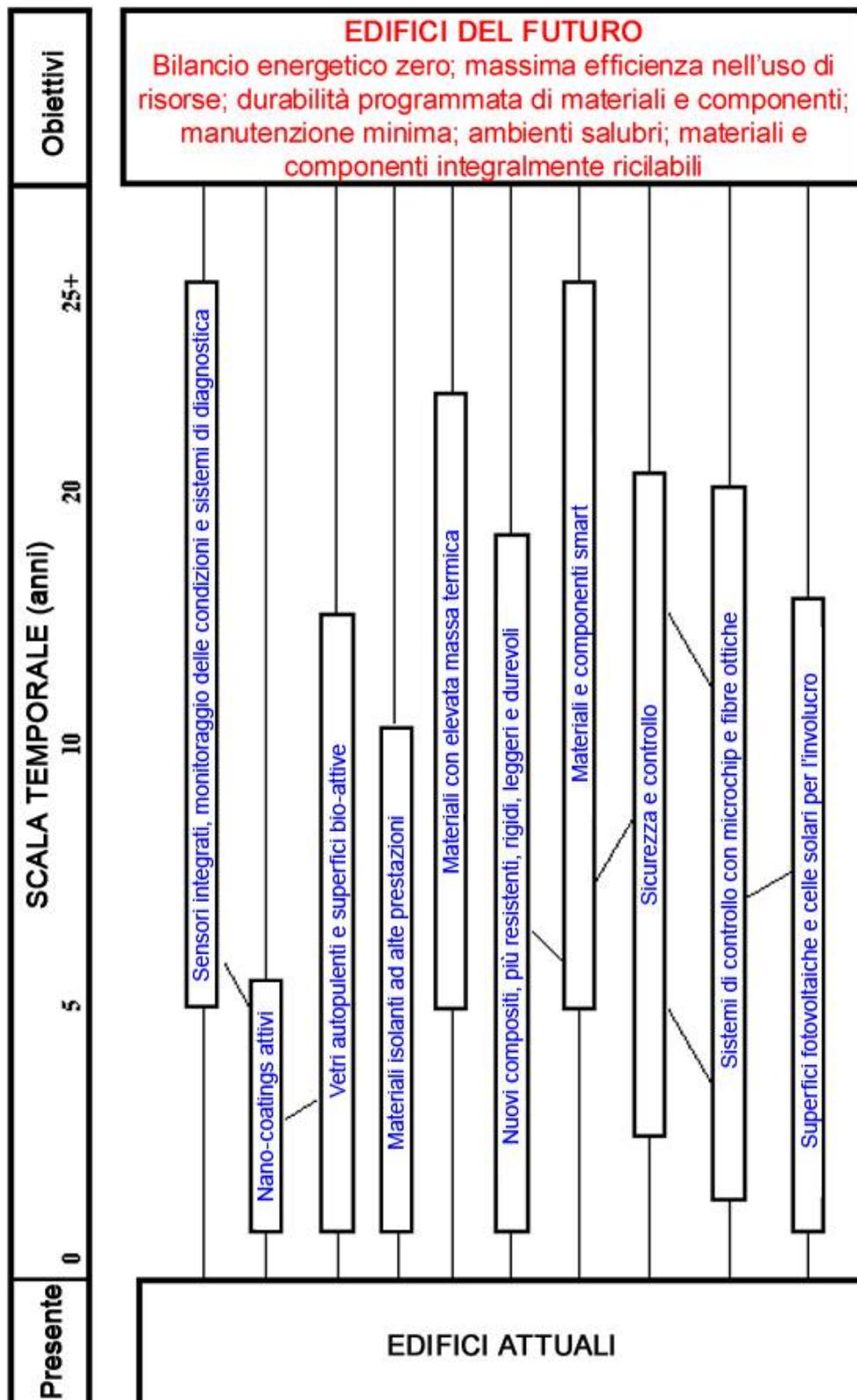
In ogni caso, appare essenziale rapportare i livelli di eco-efficienza alle prestazioni espresse dai materiali e non considerarli in "valore assoluto". I processi tecnologici

legati alle nanotecnologie possono risultare anche più impattanti rispetto a prodotti convenzionali per unità di prodotto, ma offrire prestazioni tali da consentire di impiegare minori quantità di materiale per la realizzazione degli elementi tecnici.

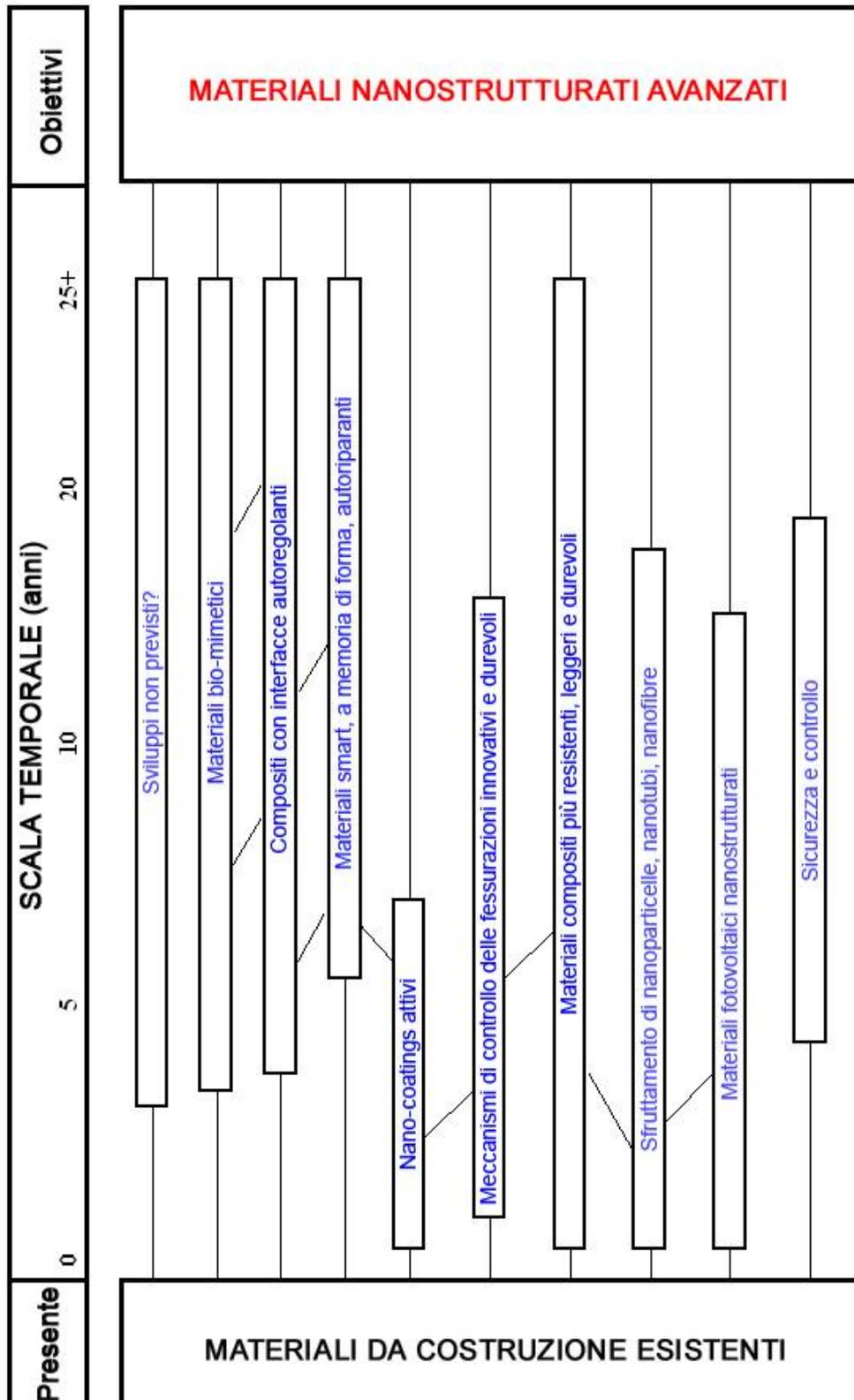
Le opportunità per l'impiego di materiali nanostrutturati andrebbero valutate a seconda dell'applicazione prevista in uno specifico settore industriale, risultando difficile definire criteri validi di ordine generale. Ciò è tanto più valido in ambito architettonico, dove non sempre le scelte legate ai materiali sono frutto di una riflessione consapevole sulle conseguenze che derivano dal loro impiego, favorendo, ad esempio, considerazioni di ordine estetico, legate alla spettacolarizzazione delle forme e dei contenuti dell'architettura, piuttosto che orientate alla riduzione degli impatti ambientali del processo edilizio, alla durabilità e all'affidabilità di prodotti e componenti impiegati.

In questo senso occorre considerare che se le nanotecnologie presentano indubbe opportunità in relazione ai principali obiettivi di eco-efficienza, solo un'adeguata conoscenza dei fattori di rischio che esse possono incorporare permette di operare una corretta valutazione delle opzioni tecnologiche a disposizione dei progettisti.

Eco-efficienza dei materiali nanostrutturati nel settore edilizio	
Obiettivi di eco-efficienza	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incremento delle prestazioni dei prodotti a parità di intensità materiale ed energetica ▪ Riduzione dei tempi e dei costi in fase di esecuzione ▪ Miglioramento della durabilità dei componenti edilizi ▪ Miglioramento della qualità dell'aria in ambienti interni ed esterni (attività fotocatalitiche e antibatteriche) ▪ Sostituzione di prodotti chimici tossici ▪ Riduzione e semplificazione delle operazioni di manutenzione, fino all'auto-monitoraggio e all'auto-riparazione
Ostacoli all'eco-efficienza	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potenziale tossicità per l'uomo e l'ambiente legata all'impiego di nanomateriali ▪ Problemi di riciclaggio e dismissione ▪ Conoscenze parziali delle caratteristiche dei materiali nanostrutturati lungo il ciclo di vita ▪ Effetto-rebound (aumento di consumi e dei potenziali carichi ambientali dovuto alla diffusione di una tecnologia).



Impatto delle nanotecnologie sulle caratteristiche degli edifici. Elaborazione da J. M. Bartos, "Roadmap for Nanotechnology" in Construction, *Proceedings of 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Bilbao, 2006.



Evoluzione dei materiali nanostrutturati. Elaborazione da J. M. Bartos, "Roadmap for Nanotechnology" in Construction, *Proceedings of 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Bilbao, 2006.

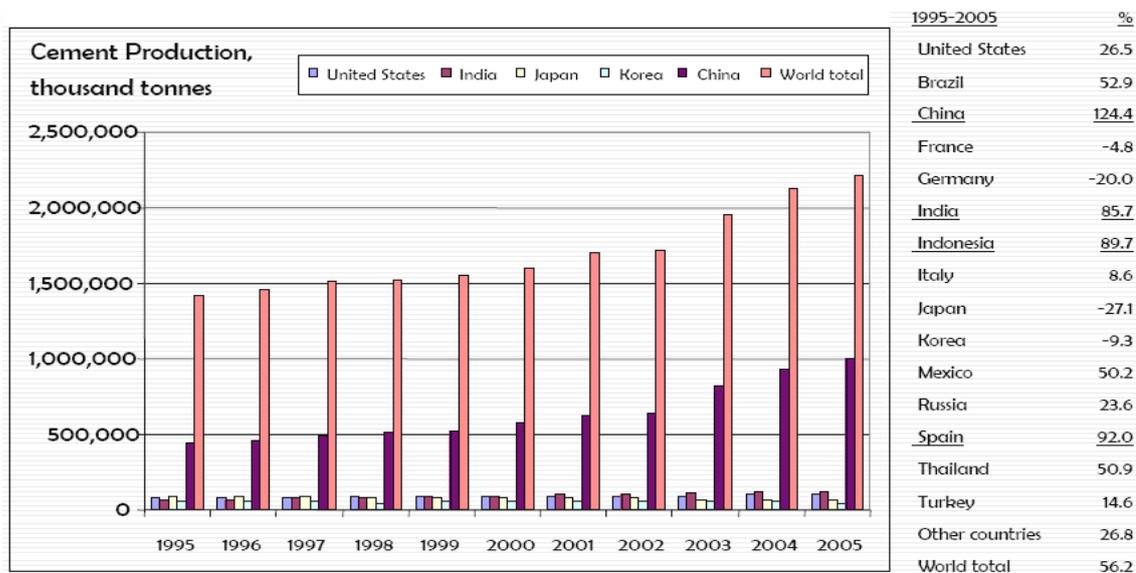
PARTE SECONDA
MATERIALI CEMENTIZI NANOSTRUTTURATI

6. MATERIALI CEMENTIZI NANOSTRUTTURATI: ALTE PRESTAZIONI ED ECO-EFFICIENZA

6.1. Nanotecnologie per l'innovazione dei materiali cementizi

6.1.1. Materiali cementizi per il XXI secolo: processi innovativi e ricadute ambientali.

Com'è noto, il cemento Portland è uno tra i materiali maggiormente utilizzati nel settore delle costruzioni per il costo ridotto e la versatilità di impiego, tanto che attualmente nel mondo viene prodotto circa 1 m³ di cemento per persona all'anno (oltre sei miliardi di m³ all'anno). Tuttavia, il processo produttivo inquinante, il costo in termini energetici sia in fase di produzione che di realizzazione e di esercizio, unito alla vita limitata dei manufatti a base cementizia, ne fanno un materiale dalle ridotte connotazioni di sostenibilità.



Crescita della produzione del cemento dal 1995 al 2005. Il consumo di cemento in questo decennio è aumentato nel mondo di oltre il 55%, è più che raddoppiato in Cina (+124,4%, 1 miliardo di tonnellate prodotte), quasi raddoppiato in India (+85,7%, 100 milioni di tonnellate prodotte), Spagna e Indonesia.

Appare perciò di estrema importanza – considerando gli attuali livelli produttivi e di diffusione globali dei materiali a base cementizia, nonché il ruolo primario che il cemento riveste nel settore delle costruzioni – favorire quei processi tecnologici innovativi che possano renderne maggiormente sostenibile l'impiego, soprattutto in fase di produzione e di esercizio, da un lato limitando le emissioni e la quantità di materie prime impiegate e dall'altro incrementando la durabilità e riducendo la necessità di onerose operazioni di manutenzione.

Attualmente l'industria del cemento produce ogni anno circa 1,4 tonnellate di CO₂ (equivalente a circa il 6% delle emissioni globali¹³⁹), a fronte di una produzione annuale di 1,6 miliardi di tonnellate di materiale.¹⁴⁰ A ciò si deve aggiungere l'inquinamento prodotto nel processo di lavorazione dalle polveri iperfini e dalla combustione di materiali dannosi, come rifiuti non trattati e scarti della lavorazione del petrolio, che contribuiscono al rilascio nell'aria di metalli pesanti e altre sostanze dannose.¹⁴¹

Principali fattori di costo economico ed ambientale dei materiali cementizi	
Costi iniziali	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiali (cemento, aggregati, acqua) ▪ Energia (produzione di clinker e cemento) ▪ Manodopera e tempi di lavorazione (trasporto e messa in opera)
Costi nel tempo (collegati alla durabilità)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manutenzione ▪ Riparazione, recupero e riqualificazione
Carico ambientale	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estrazione di materie prime ▪ Inquinamento atmosferico (in particolare CO₂)

Negli ultimi anni, i controlli dei vari Enti nazionali e sovranazionali hanno consentito di ridurre il livello di emissioni rispetto al passato, così come le innovazioni nel campo degli additivi (antiritiro, superfluidificanti, acceleratori, ecc.) e dei rinforzi (fibre corte organiche e inorganiche) hanno contribuito a rendere più durevoli e resistenti i manufatti cementizi, sviluppando prodotti che a parità di prestazioni richiedono minori quantità di materiale. Le tecniche di prefabbricazione hanno inoltre ormai raggiunto un elevato livello di maturazione e permettono di realizzare sezioni sempre più lunghe e sottili, che necessitano di minori quantità di rinforzo.

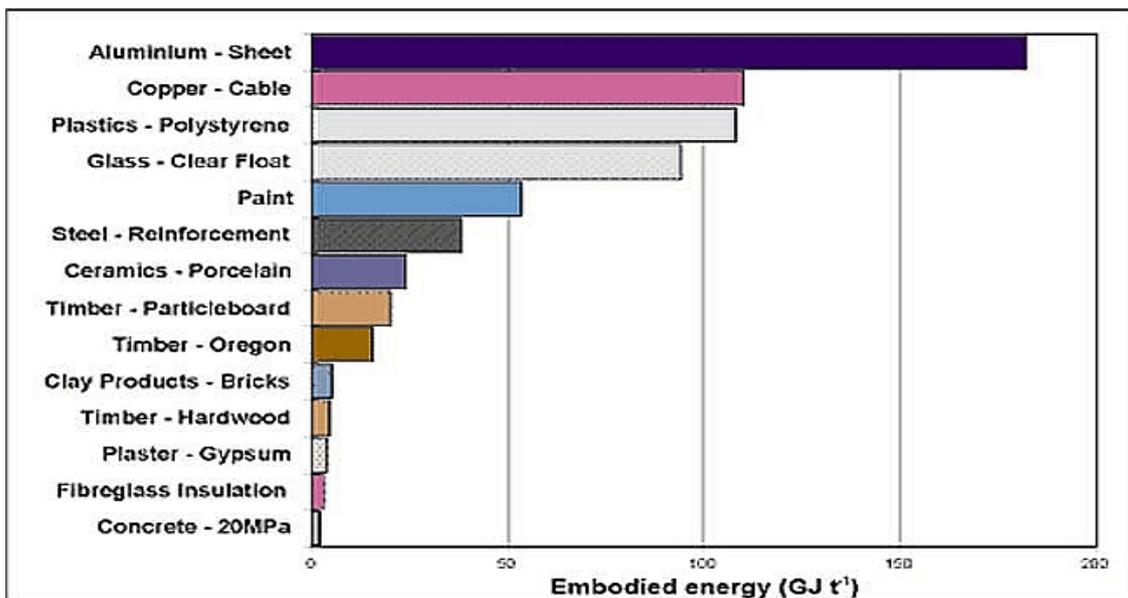
Mentre nel mondo delle costruzioni si fa sempre più pressante la domanda di prodotti edilizi sostenibili, che producano ridotti impatti ambientali nell'intero ciclo di vita e che contribuiscano a ridurre i consumi energetici degli edifici stessi, comincia a farsi strada la possibilità per il cemento di competere da questo punto di vista con materiali come l'alluminio o l'acciaio, che pur essendo completamente riciclabili richiedono grandi quantità di energia in fase di produzione.¹⁴²

¹³⁹ L'energia teorica necessaria per produrre il clinker è di circa 1700 Joule per grammo, ma a causa delle dispersioni il valore è molto più alto. Questo comporta una grande richiesta di energia per la produzione del cemento, che porta all'emissione di circa 0,97 tonnellate di CO₂ per ogni tonnellata di clinker prodotto, considerando che per ogni quintale di cemento sono necessari 900 kg di clinker.

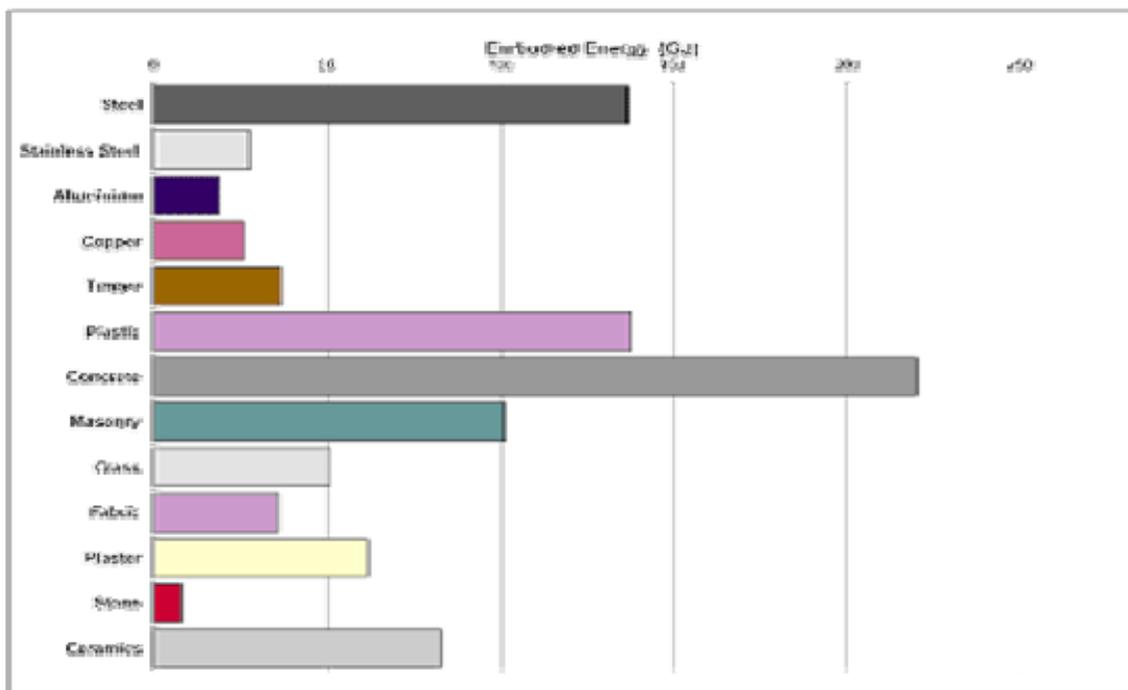
¹⁴⁰ Sulla base di tali parametri si evince che Una riduzione del 10% delle emissioni di CO₂ legate alla produzione mondiale di cemento permetterebbe di contribuire per un quinto al raggiungimento degli obiettivi del Protocollo di Kyoto.

¹⁴¹ In particolare la cottura del clinker richiede grandi quantità di combustibile, spesso carbone, che assieme alle impurità presenti nella calce provoca una significativa emissione di inquinanti, tra cui gas serra, ossidi di azoto (NO_x), biossido di zolfo (SO₂), monossido di carbonio (CO), composti organici volatili e polveri fini (PM₁₀ e PM_{2,5}).

¹⁴² La richiesta di un'immagine più sostenibile del cemento proviene innanzitutto dai produttori, sotto osservazione principalmente per i danni ambientali prodotti dall'estrazione di materie prime e dall'emissione di CO₂. Il miglioramento delle tecnologie produttive e delle prestazioni dei materiali hanno aperto la strada a nuovi cementi "eco-orientati" e alla



Confronto tra il livello di *Embodied Energy*¹⁴³ di alcuni comuni materiali da costruzione. Il valore rappresenta l'energia necessaria per produrre 1 tonnellata di materiale.



Confronto tra il livello di *Embodied Energy* riferito alle quantità medie impiegate in prodotti e componenti per l'edilizia.

pubblicazione dei primi bilanci di sostenibilità delle aziende produttrici in questo settore (ad es. Lafarge, 2005 e Buzzi Unicem, 2006). All'interno del WBCSD (*World Business Council for Sustainable Development*) è stato anche lanciato un programma di cinque anni dal titolo "*Towards a sustainable cement industry*" che coinvolge 19 industrie del cemento alla ricerca di soluzioni per la mitigazione degli impatti ambientali, attraverso la riduzione delle emissioni, del consumo di combustibili e materie prime.

¹⁴³L'*Embodied Energy* (energia incorporata) esprime il contenuto energetico di un bene o di un servizio, cioè la quantità totale di energia necessaria per produrlo e renderlo disponibile. È espressa, come l'energia, in J.

Su una base puramente quantitativa, l'acciaio strutturale è circa 30 volte più energivoro del cemento armato, ma un simile confronto è meno appropriato se si considerano le rispettive quantità impiegate, ad esempio, negli elementi strutturali (per un pilastro 40 x 40 cm in c.a. alto 3 m sono necessari 0,49 mc di calcestruzzo, mentre il volume di un pilastro HEA 240 della stessa altezza è di appena 0,04 mc).

Queste considerazioni hanno portato a migliorare le prestazioni espresse dai materiali a base cementizia, soprattutto per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche e di durabilità. La strada è stata quella di spingere sempre di più verso l'ingegnerizzazione del cemento, dei calcestruzzi e delle malte, cercando di comprendere le relazioni esistenti tra la struttura chimico-fisica e le proprietà espresse dal materiale finale. Ci si è concentrati così sulla ricerca di materie prime alternative (in particolare derivanti dal trattamento di rifiuti industriali), su uno studio approfondito dei processi di maturazione e dei *mix-design* più appropriati, selezionando accuratamente inerti, additivi e fibre al fine di ottimizzare le prestazioni attese a seconda degli impieghi previsti.

Area	Alta priorità	Media priorità	Bassa priorità
Italia	CO2 NOx Rifiuti	CH4 N2O Risorse (acqua)	VOC (rilevante per luoghi di lavoro) Sostanze dannose alla salute e all'ambiente (metalli pesanti)
Unione Europea	Sostanze dannose alla salute e all'ambiente (prodotti chimici tossici, metalli pesanti) CO2, CH4, N2O Risorse (acqua)	SO2, NOX Demolizione selettiva Qualità dell'acqua	VOC (rilevante per luoghi di lavoro) Rifiuti (potenziare rifiuto e riciclaggio, minimizzare la dismissione in discarica, demolizione selettiva)
Internazionale	CO2 Risorse (acqua) Qualità dell'acqua	Materie prime seconde, Riciclaggio e minimizzazione dei rifiuti	Risorse (energia)

Principali priorità legate alla riduzioni degli impatti derivanti dalla produzione del cemento. Fonte: Brite TESCOP, 2000.

Potenzialità di innovazione nei materiali cementizi
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alto grado di diffusione del materiale, possibilità di sviluppare linee di R&S innovative interne al settore delle costruzioni. ▪ Prestazioni migliorabili attraverso una elevata capacità di controllo e selezione dei materiali di base impiegati. ▪ Ridotto impatto ambientale per unità di prodotto, problemi in termini di eco-efficienza derivanti dagli elevati livelli produttivi.

Approccio al progetto del materiale: il caso del calcestruzzo

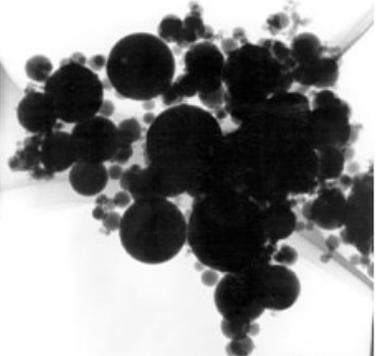
Tra i materiali cementizi oggetto di una continua innovazione legata alla modifica delle caratteristiche fisiche in funzione dell'ottenimento di specifiche prestazioni, il caso del calcestruzzo risulta particolarmente emblematico. L'obiettivo di combinare le prestazioni meccaniche con un determinato comportamento reologico per mantenere fluido e lavorabile l'impasto, ha portato alla definizione di strategie legate al *mix-design* sempre più efficaci e diversificate, tanto da non permettere più di parlare di "calcestruzzo" come un materiale specifico, quanto piuttosto di diverse tipologie di conglomerati cementizi studiati a seconda delle esigenze progettuali.

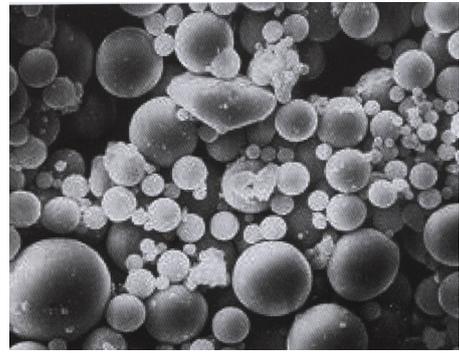
A partire dagli anni '70 lo sviluppo di nuovi additivi e "aggiunte" (minerali e non) ha trasformato il calcestruzzo in un materiale "*high-tech*" capace di esprimere prestazioni sempre più avanzate e diversificate. I conglomerati cementizi che si ottengono sono a tutti gli effetti dei materiali compositi a matrice cementizia e sono identificati con acronimi a seconda delle caratteristiche specifiche.¹⁴⁴

- SCC – *Self Compacting Concrete* (calcestruzzi autocompattanti)
- FRC – *Fiber Reinforced Concrete* (calcestruzzi fibrorinforzati)
- HPC – *High Performance Concrete* (calcestruzzi ad alta resistenza meccanica)
- RPC – *Reactive Powder Concrete* (calcestruzzi a polvere reattiva)
- DSP – *Densified with Small Particles* (calcestruzzi con fumo di silice)
- SCC' – *Shrinkage Compacting Concrete* (calcestruzzi a ritiro compensato)

Principali componenti di base dei materiali cementizi avanzati
<ul style="list-style-type: none">▪ Superfluidificanti e riduttori d'acqua con proprietà aggiuntive per accelerare o ritardare la presa e l'indurimento degli impasti▪ Modificatori di viscosità per favorire una miscelazione omogenea e resistenza alla segregazione▪ Additivi espansivi, per contrastare il ritiro delle paste cementizie e prevenire fenomeni di fessurazioni▪ Aggiunte minerali e non (cenere volante, fumo di silice, filler calcarei, ecc.)▪ Aggiunte di fibre metalliche, polimeriche, al carbonio, ecc.▪ Riduttori di ritiro igrometrico senza espansione o <i>Shrinkage Reducing Agents</i> (SRA)

¹⁴⁴ Elaborazione da Roberto Marino (a cura di), *La durabilità delle strutture. Calcestruzzo e normativa*, La fiaccola, Milano 2007, p. 226.

Fumo di silice	
	<p>Il fumo di silice si presenta in forma di microsfele con dimensioni prevalentemente al di sotto di $0,1\ \mu\text{m}$, e quindi capaci di riempire gli interstizi tra le particelle di cemento ($1\text{-}50\ \mu\text{m}$), principalmente composte da silice amorfa non cristallina (SiO_2). L'elevata finezza non consente una percentuale d'impiego maggiore del 10% per il conseguente aumento nella richiesta d'acqua di impasto. Il fumo di silice, quasi sempre abbinato ad un superfluidificante per compensare la eccessiva richiesta d'acqua, viene impiegato come additivo in polvere per calcestruzzi speciali impermeabili e ad alta resistenza meccanica a compressione ($> 60\ \text{MPa}$).</p>

Cenere volante (<i>fly ash</i>)	
	<p>La cenere volante è un materiale fine inorganico con proprietà pozzolaniche; si tratta di un sottoprodotto della combustione del carbone e le parti più fini hanno dimensioni comprese tra 1 e 90 micron, presentando una struttura prevalentemente vetrosa (silice amorfa) e quindi reattiva.</p> <p>La cenere volante prende parte alla reazione di idratazione, apportando un contributo sostanziale alla formazione dei prodotti di idratazione e quindi alle proprietà dell'impasto cementizio, rallentando lo sviluppo iniziale della resistenza ma contribuendo al miglioramento della resistenza meccanica finale.</p>

Gli aspetti architettonici

Oltre ai significativi vantaggi rispetto agli impatti ambientali l'evoluzione di materiali cementizi di nuova generazione, caratterizzati da proprietà innovative e dall'affidabilità delle prestazioni, ha contribuito a stimolare le ricerche progettuali, dando "nuova vita" ad uno dei materiali più antichi e più diffusi nel mondo delle costruzioni.

L'ardita concezione di Zaha Hadid per il museo Maxxi a Roma, con un muro alto 8 metri e lungo 100 senza giunti, non sarebbe stata possibile senza l'impiego di un calcestruzzo autocompattante (SCC, *Self Compacting Concrete*) a faccia vista appositamente progettato nel *mix-design* con additivi superfluidificanti e antiritiro.¹⁴⁵

Solo nel campo degli autocompattanti, l'accurata selezione nella composizione degli impasti ha permesso di ottenere calcestruzzi ad altissima resistenza in grado di

¹⁴⁵ La composizione prevede l'aggiunta di un additivo superfluidificante a base di eteri policarbossilati (6,3 kg/mc), uno espansivo a base di ossido di calcio (35 kg/mc) e uno antiritiro (SRA, 4 kg/mc). Si tratta in sostanza di un cemento precompresso chimicamente, che richiede particolari accorgimenti in cantiere, soprattutto nei periodi caldi.

scorrere perfettamente anche in armature complesse, con una vita utile molto superiore ai 50 anni richiesti per normativa.¹⁴⁶



Zaha Hadid, museo MAXXI, Roma e Santiago Calatrava, Ponte sul Canal Grande, Venezia. Entrambi i progetti sono stati realizzati impiegando calcestruzzi autocompattanti (SCC) specificamente formulati nel *mix-design* per rispondere alle esigenze di resistenza meccanica, posa in opera, durabilità.

Interessanti sviluppi sono inoltre legati all'impiego in interventi ex-novo (come pannelli di facciata o di copertura) o nel recupero (come sistemi di rinforzo per strutture in c.a. o in muratura) dei cosiddetti calcestruzzi tessili o FRCM¹⁴⁷ (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), in cui tessuti¹⁴⁸ a maglia larga in fibre realizzate con materiali di vario tipo (vetro alcali-resistente, acciaio, carbonio, aramide, Pbo-Zylon) fungono da rinforzo per la matrice cementizia e hanno il compito di assorbire gli sforzi di trazione, permettendo di ottenere elevate prestazioni meccaniche con spessori molto ridotti.

Oltre alle innovazioni mirate al raggiungimento di migliori proprietà meccaniche e di durabilità, negli ultimi anni il cemento è stato riscoperto anche per le sue caratteristiche estetiche. Si torna a celebrare l'espressività e la bellezza del cemento, inteso come "*liquid stone*"¹⁴⁹ da tradurre in segni architettonici, materiale sempre più oggetto di sperimentazioni che tendono a modificarne l'aspetto in vari modi, rendendolo di volta in volta curvo, traforato, trasparente o traslucido (come nel caso del LiTraCon, *Light*

¹⁴⁶ È il caso del progetto di Norman Foster per il Trade World Center di San Marino, realizzato con un SCC-HPC con una resistenza caratteristica di 90 MPa (mentre la normativa italiana impone di considerare un valore massimo di 50 MPa), grazie all'aggiunta di fumo di silice (65 kg/mc), con un rapporto a/c di 0,33.

¹⁴⁷ Cfr. "I materiali compositi fibrorinforzati per il recupero delle strutture in c.a.", in Attilio Nesi (a cura di), *Progettare con l'informazione. Percorsi e gestione delle informazioni tecniche per la promozione e il controllo dell'innovazione nei materiali e nel progetto architettura*, Gangemi, Roma, in corso di pubblicazione.

¹⁴⁸ I tessuti vengono realizzati con fasci di fibre (roving), che a loro volta constano di alcune centinaia di fibre continue singole (filamenti), mediante un processo produttivo mutuato dalle tecniche di tessitura.

¹⁴⁹ Jean-Louis Cohen, Martin, G., *Liquid Stone: New Architecture in Concrete*, Princeton Architectural Press, New York, 2006.

Transmitting Concrete), con immagini stampate sulla superficie o addirittura impiegato come fonte luminosa.

Punti di forza per la progettazione	Versatilità di impiego Costo ridotto Possibilità di prefabbricazione Possibilità di rinforzo con materiali di vario tipo
Punti di debolezza per la progettazione	Bassa resistenza a trazione (non rinforzato) dovuta a pori e difetti Bassa rigidità Tempi lunghi di maturazione Impossibile da rimodellare una volta indurito

Aspetti normativi

È opportuno osservare come le innovazioni nel campo dei materiali cementizi risentano notevolmente del ritardo dell'apparato normativo. Nel caso del calcestruzzo, prima delle Norme Tecniche 2005, l'Italia era ferma alla normativa del 1973 (nonostante l'introduzione del 1996 dell'Eurocodice 2), e anche con l'introduzione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) la parte relativa al calcestruzzo¹⁵⁰ non ha subito modifiche sostanziali. Nonostante i passi avanti introdotti con l'organizzazione e la razionalizzazione e dei documenti attraverso un "Testo Unico", resta comunque presente la necessità di aggiornamento continuo in relazione alle nuove acquisizioni tecnico scientifiche e alle proprietà dei calcestruzzi innovativi.¹⁵¹ Un passo in avanti ha riguardato una particolare attenzione alla durabilità delle strutture (che deriva dal recepimento della normativa europea UNI EN 206-1, "Calcestruzzo, specificazione, prestazione e conformità"), individuando come «le strutture e gli elementi strutturali devono essere progettati, eseguiti, collaudati e soggetti a manutenzione in modo tale da consentirne la prevista utilizzazione, per tutta la vita utile di progetto, in forma economicamente sostenibile e con il livello di sicurezza previsto dalle presenti norme»¹⁵². Alla durabilità è stato dedicato un capitolo di particolare importanza (ripreso dalle Norme 2008), in cui si impone al progettista di valutare le condizioni ambientali del sito e le condizioni di impiego, specificando come «al fine di ottenere la prestazione richiesta, il progettista potrà fare utile riferimento alle indicazioni contenute nelle Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale ovvero nelle

¹⁵⁰ Capitolo 11 - "Materiali e prodotti per uso strutturale".

¹⁵¹ Cfr. Roberto Marino (a cura di), *La durabilità delle strutture. Calcestruzzo e normativa*, La fiaccola, Milano 2007, e gli Atti del Convegno SaieConcrete, 2008.

¹⁵² Cfr. Norme Tecniche per le Costruzioni 2005, par. 2.1.

norme UNI EN 206-1 e UNI 1104».¹⁵³ Seguendo un indirizzo comune a tutta l'unione Europea, in parte accolto anche in Italia ad esempio con i Documenti Tecnici del CNR e le linee guida del Servizio Tecnico Centrale,¹⁵⁴ nuove linee guida possono integrare e aggiornare la normativa, aiutando a definire i protocolli di valutazione necessari a stabilire gli standard cui fare riferimento per le nuove classi di materiali.¹⁵⁵

Ulteriori aspetti normativi da considerare riguardano le potenzialità di riciclabilità di molti materiali cementizi innovativi, in cui la finezza degli inerti, l'omogeneità della granulometria e la presenza di fibre permetterebbero di ipotizzare impieghi diversi dalla semplice funzione di riempimento, come attualmente prescritto, valutando anche la possibilità di impiegarli con funzione strutturale.¹⁵⁶

Problema	Possibili strategie
Fragilità - rischio di fessurazioni	Miglioramento della duttilità
Stabilità dimensionale ▪ Comportamento termico e idratazione	Riduzione del ritiro ▪ Miglioramento del processo di idratazione
Durabilità ▪ ASR e DEF* ▪ Attacco solfitico ▪ Corrosione ▪ Gelo-disgelo	Riduzione della permeabilità ▪ Selezione e controllo delle materie prime ▪ Additivi impermeabilizzanti ▪ Auto riparazione e sigillatura delle fessure
Controllo della durata dei manufatti	Automonitoraggio

* *Alkali-Silica Reaction* (ASR) e *Delayed Ettringite Formation* (DEF). Alterazioni chimiche prodotte in fase di idratazione del cemento, responsabili del ritiro e della presenza di microvuoti nella struttura cristallina.

Possibili approcci al progetto di materiali a base cementizia in relazione alle prestazioni ricercate.¹⁵⁷

6.1.2. Il contributo delle nanotecnologie all'evoluzione dei prodotti a base cementizia

Tra le varie tipologie di materiali che è possibile ripensare alla luce dello sviluppo delle nanotecnologie applicate ai materiali da costruzione, i materiali cementizi

¹⁵³ Cfr. Norme Tecniche per le Costruzioni 2005, par. 11.1.11.

¹⁵⁴ Cfr. Presidenza del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Servizio Tecnico Centrale, ATECAP, *Linee guida sul calcestruzzo preconfezionato*, La Fiaccola, Milano, 2003. Nel testo vengono introdotti i criteri definitivi, di progettazione e controllo delle opere realizzate con calcestruzzi con resistenza caratteristica fino a 115 MPa e viene fatto riferimento all'influenza delle caratteristiche delle microstrutture e delle nanostrutture presenti all'interno del calcestruzzo sulle prestazioni finali in termini di resistenza meccanica e durabilità. Viene sottolineato inoltre come l'impiego di tali materiali resti tuttavia subordinato a valutazioni specifiche, tra cui la modellazione del materiale operata sulla base di specifica documentazione teorica e sperimentale, una trattazione circostanziata a giustificazione delle regole di calcolo adottate, l'indicazione delle procedure da seguire nella realizzazione delle strutture, il piano di assicurazione della qualità (p. 29).

¹⁵⁵ È necessario, nella definizione dei criteri minimi da rispettare, tenere presente l'evoluzione dei materiali (cemento, additivi, capacità di controllo del *mix-design*, ecc). La norma relativa al conglomerato cementizio (cap. 11.1) definisce valori di progetto per la resistenza caratteristica, diametro massimo degli inerti, consistenza. Il presupposto normativo è che il prodotto cementizio nasce con un 5% di impurità e irregolarità che vengono compensate dai coefficienti di sicurezza. Le procedure di controllo in fabbrica (FPC), introdotte dalla nuova normativa, consentono di utilizzare coefficienti di sicurezza più larghi ($g=1,5$ anziché 1,6), ma la capacità di controllare le condizioni di ritiro e indurimento, con le conseguenti ricadute sulle caratteristiche meccaniche, implica per alcuni la necessità di rivedere l'approccio normativo dovendo essere necessariamente verificata di volta in volta in condizioni d'uso.

¹⁵⁶ Come accade in molti paesi, tra cui gli Stati Uniti e la Francia.

¹⁵⁷ Elaborazione da Perumalsamy N. Balaguru, "Nanotechnology and concrete: background, opportunities and challenges" Proceedings of the 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction Materials, Bilbao, Spagna, 13-16 novembre 2006.

nanostrutturati costituiscono uno dei settori di ricerca più stimolanti, sia per i significativi livelli prestazionali ottenibili attraverso la nano-ingegnerizzazione del materiale, sia in relazione agli obiettivi di eco-efficienza nel ciclo di vita dei prodotti.

Nonostante il cemento sia così diffuso, i meccanismi fondamentali che ne regolano il comportamento sono solo in minima parte acquisiti nella comune prassi progettuale e costruttiva. I criteri di progettazione delle strutture in c.a. sono in gran parte desunti dai comportamenti osservati, secondo un approccio tradizionalmente empirico piuttosto che orientato dal punto di vista scientifico. Le caratteristiche di resistenza «vengono presunte in base ad una ingiustificata tradizione di calcolo e costruttiva, e non vengono determinate in base al progetto: in tempi nemmeno troppo lontani la maggioranza dei progettisti attribuiva al calcestruzzo gettato in opera una immutabile resistenza caratteristica di 30 MPa e preferiva rivedere il dimensionamento della struttura, in caso di mancata verifica delle sezioni, piuttosto che rivedere le caratteristiche prestazionali del calcestruzzo», portando in molti casi alla realizzazione di «strutture certamente verificate, ma altrettanto sicuramente illogiche e aberranti, lontane da un progetto fisicamente coerente ed ergonomico»,¹⁵⁸ che spesso presentano ridotte caratteristiche di durabilità.

La maggior parte delle reazioni chimiche che regolano le proprietà finali dei materiali cementizi avvengono alla scala nanometrica mentre, paradossalmente, la ricerca su questi materiali si è sempre concentrata al livello macroscopico. L'assenza di una effettiva comprensione del comportamento a scala molecolare rende difficile una esatta previsione dell'efficienza delle prestazioni nel tempo e potrebbe limitare i futuri sviluppi nell'impiego di materiali cementizi.

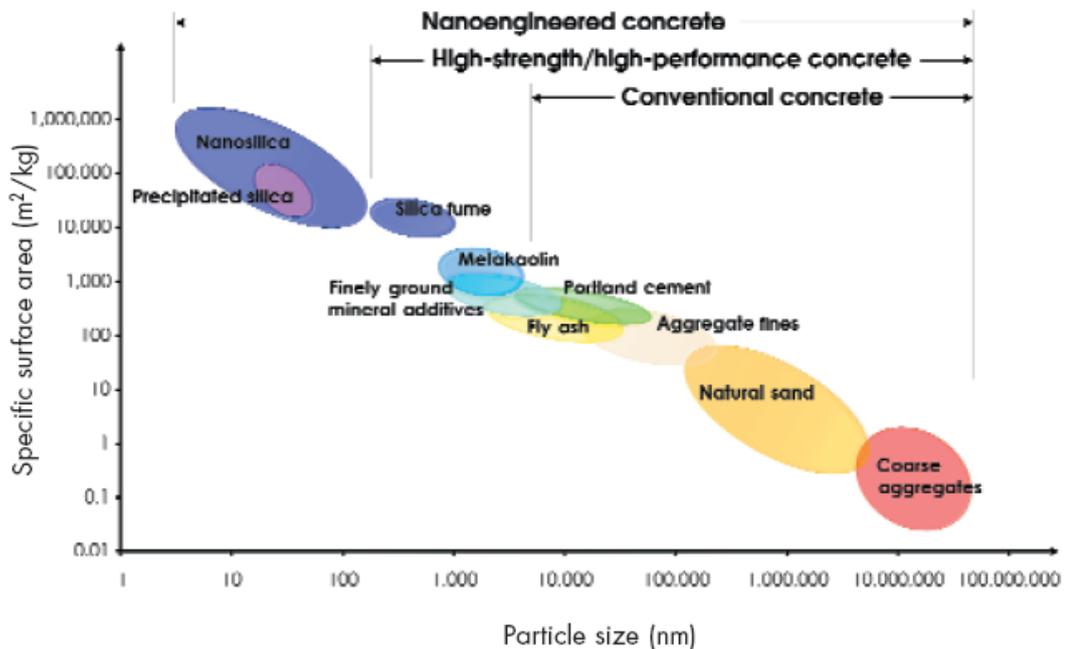
Essendo il cemento un "macro-materiale" fortemente influenzato dalle "nano-proprietà" espresse dalla sua struttura cristallina, i processi chimici che si innescano sin dal momento della reazione dell'impasto con l'acqua possono influire sulla micro e nanostruttura del conglomerato e, di conseguenza, sulle prestazioni a lungo termine del materiale.¹⁵⁹

Le nanotecnologie permettono di analizzare e modificare tali processi chimici, trasformando in tal modo la maggior parte delle caratteristiche normalmente esibite dai

¹⁵⁸ Giacomo Morioni, "Il progetto della struttura: dal calcolo statico al calcolo per la durabilità", in Roberto Marino (a cura di), cit., p. 52.

¹⁵⁹ L'Ettringite, ad esempio, è una molecola che si produce nelle prime fasi di idratazione del cemento, dalla reazione tra acqua, fasi alluminose del cemento e il solfato di calcio che viene aggiunto per ritardare la presa del cemento e incrementare le proprietà meccaniche. Osservata al microscopio elettronico, si presenta come un feltro fittissimo di cristalli, ha permesso di comprendere come la dimensione e la morfologia dei cristalli svolga una funzione primaria nella presa idraulica del cemento e influenza lo sviluppo delle proprietà meccaniche.

materiali cementizi in relazione alla resistenza meccanica, alla durabilità e alla resistenza agli agenti aggressivi.

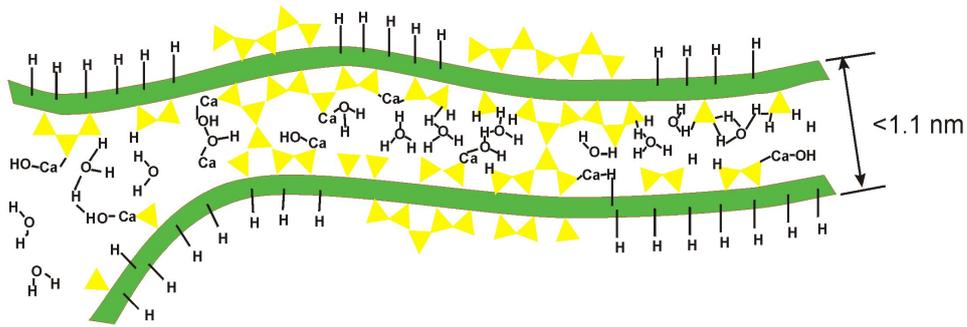


La dimensione e l'area superficiale delle particelle dei materiali costituenti i prodotti cementizi permettono di distinguere i calcestruzzi convenzionali, quelli ad alte prestazioni meccaniche e quelli nanoingegnerizzati. Fonte: Kostantin Sobolev e Miguel Ferrada Gutierrez, "How nanotechnology can change the concrete world" - Part 1, in *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 84, n. 10, ottobre 2005, pp. 14-18.

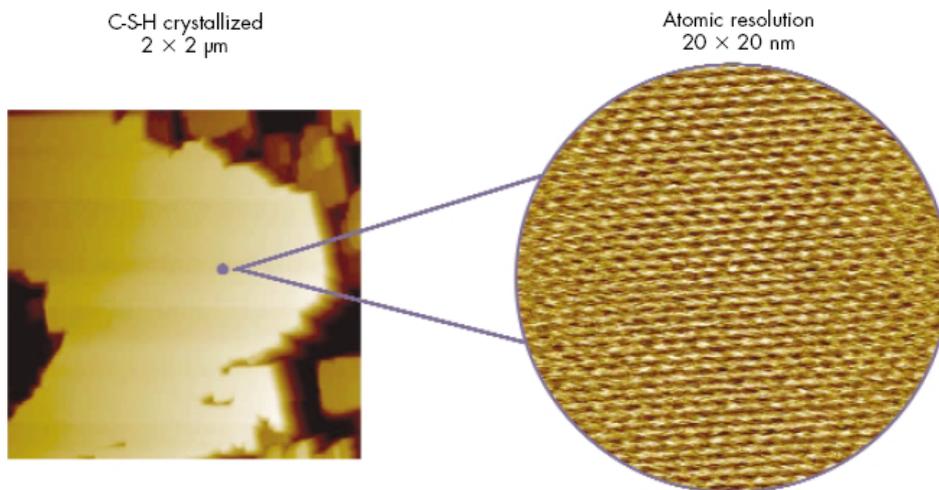
Il controllo dell'idratazione del cemento presente in malte e calcestruzzi, consente di realizzare una nuova generazione di prodotti con un rapporto migliore delle prestazioni globali in relazione alla massa, così da ottenere eccellenti proprietà meccaniche e chimico-fisiche con minore quantità di materiale. Inoltre, la struttura di calcio-silicato-idrato (C-S-H¹⁶⁰) generata dalla reazione tra i diversi componenti chimici in fase di idratazione del cemento – responsabile delle proprietà fisiche e meccaniche degli impasti cementizi (incluso ritiro, *creep*, porosità, permeabilità ed elasticità) – può essere modificata per ottenere una durabilità più elevata o per realizzare impasti caratterizzati da una migliore lavorabilità nel tempo. Lo studio del comportamento delle particelle che compongono il gel C-S-H, di dimensioni nell'ordine dei 2 nm, rappresenta uno dei principali settori della ricerca nanotecnologica legata ai materiali cementizi, riconoscendo come in queste nanostrutture si trovi una sorta di "codice genetico" del

¹⁶⁰ Acronimo inglese di *Calcium Silicate Hydrated*, il C-S-H include una famiglia di composti chimici prodotti nelle fasi di idratazione del cemento, la cui osservazione alla nanoscala ha consentito di chiarirne il ruolo determinante rispetto alle proprietà finali del calcestruzzo, in particolare rispetto a fenomeni quali il ritiro ed il *creep* (scorrimento viscoso).

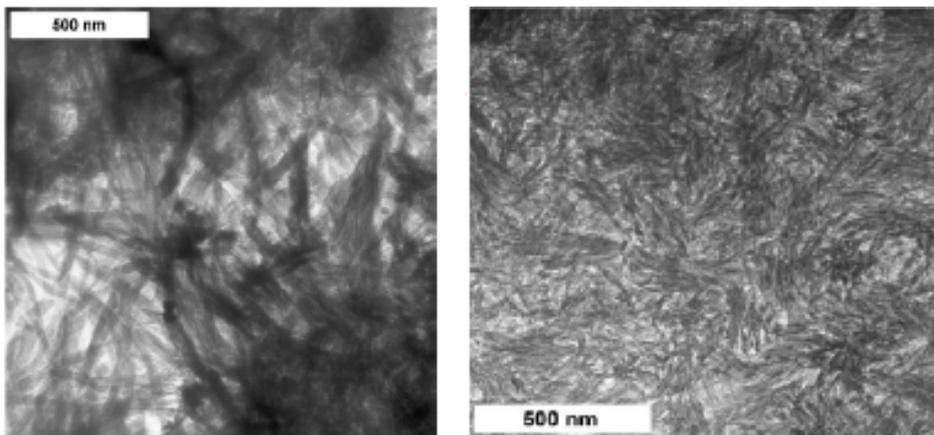
cemento, l'impronta delle caratteristiche nanomeccaniche che si traducono nelle proprietà finali del materiale.¹⁶¹



Schema della nanostruttura del legame tra C-S-H e calcestruzzo



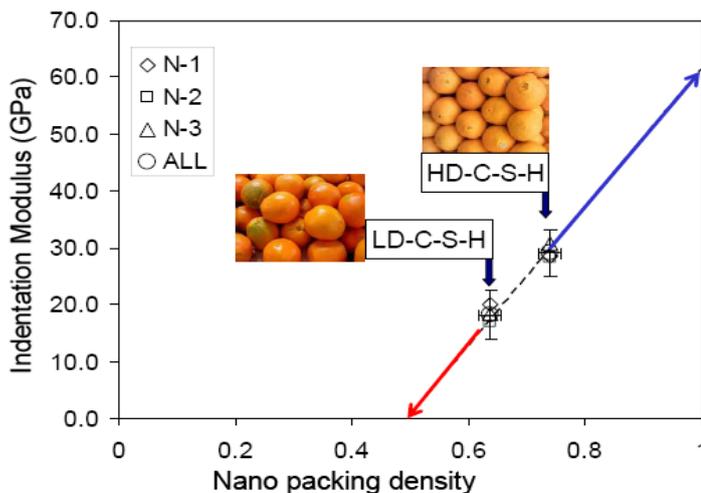
Gel C-S-H con struttura ordinata e compatta (Ca/Si=0,9) osservato alla nanoscala con un microscopio a forza atomica.



Gel C-S-H a bassa (a sinistra) e alta densità (a destra). Tipicamente in un calcestruzzo tradizionale la percentuale di C-S-H ad alta densità è pari circa al 30%, mentre in un calcestruzzo ad alta resistenza si arriva al 65-70%; in un calcestruzzo nanostrutturato può arrivare al 74% con un notevole incremento delle proprietà meccaniche e della durabilità.

¹⁶¹ Cfr. Denise Brehm, "Nanoengineered concrete could cut carbon dioxide emissions", in TechTalk, vol. 51, n. 57, MIT (Massachusetts Institute of Technology), febbraio 2007.

Una delle scoperte più importanti per lo sviluppo di materiali nanostrutturati riguarda la comprensione delle diverse tipologie di C-S-H che possono formarsi durante l'idratazione del cemento, a bassa ed alta densità. È stato dimostrato come avvicinandosi alla dimensione nanometrica delle particelle costituenti il C-S-H, si raggiunge la più alta densità matematicamente ottenibile aggregando oggetti di forma sferica, pari al 74%, contro il 64% del C-S-H non nanostrutturato. La differenza di densità si traduce in una maggiore omogeneità dell'impasto e quindi nell'ottimizzazione delle proprietà meccaniche, reologiche e di durabilità.



Influenza della densità del C-S-H sulle proprietà fisico-meccaniche del cemento.¹⁶²

L'idratazione del cemento vista al microscopio elettronico

- I tre componenti principali dell'impasto cementizio idratato sono: il silicato di calcio idrato (CSH), cristalli di idrossido di calcio (CH o portlandite) e calciosulfoalluminati (CS o ettringite). Il CSH occupa dal 50 al 60% del volume, mentre i CH e i CS rispettivamente dal 20 al 25% e dal 15 al 20%.
- Lo spessore di un "foglio" di CSH è inferiore ai 2 nm e lo spazio tra i singoli fogli varia tra 0,5 e 2,5 nm.
- I prodotti di idratazione CH sono tipicamente più grandi, con uno spessore di circa 1000 nm.
- L'ettringite ha un aspetto aghiforme ed è particolarmente instabile.
- La dimensione dei fori capillari può variare tra i 10 e i 1000 nm. In un impasto ben idratato con un basso rapporto acqua-cemento, la dimensione dei pori è tipicamente inferiore ai 100 nm.
- Il calore di idratazione ha due picchi, uno in corrispondenza della fase di dissoluzione dei componenti, il secondo durante la creazione dei vari composti.
- Gli alluminati idratano più rapidamente dei silicati. Questi ultimi, che producono circa il 75% del cemento, giocano un ruolo chiave nello sviluppo delle proprietà meccaniche.

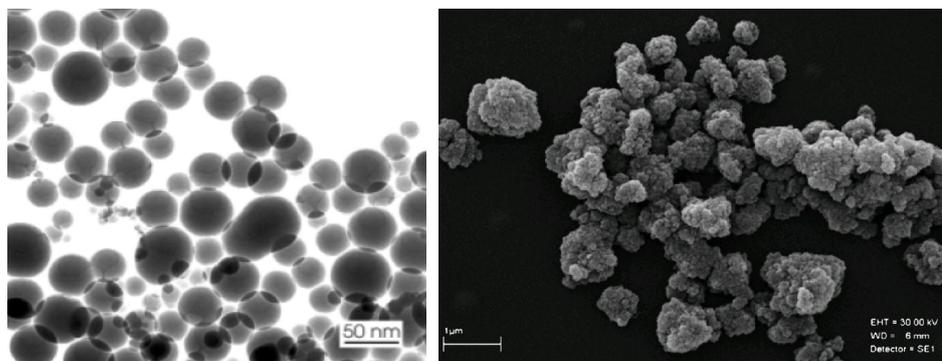
Accanto a questi risultati, ottenibili nella maggior parte dei casi semplicemente applicando nanotecnologie per l'osservazione e il *testing* dei materiali¹⁶³ (rientrando

¹⁶² Fonte: Franz-Josef Ulm, "What's the matter with concrete?", *Proceedings of Pollution Prevention through Nanotechnology Conference*, Arlington, USA, 25 Settembre, 2007.

quindi nella prima tipologia di materiali nanostrutturati individuata, cfr. par. 3.2.1.), l'aggiunta di nanomateriali di vario tipo all'impasto cementizio (e la creazione quindi di nanocompositi a base cementizia) permette di introdurre nuove proprietà in precedenza non immaginabili, come la capacità di degenerare sostanze inquinanti o di auto-monitorare il proprio comportamento nel tempo.

Rispetto agli additivi tradizionali, l'aggiunta quantità minime di nanoparticelle nell'impasto cementizio consente di incrementare specifiche proprietà del materiale. Per realizzare nanocompositi a matrice cementizia è possibile intervenire secondo due processi differenti:

- Additivazione tramite sospensioni colloidali o liquide in grado di modificare la nanostruttura della matrice cementizia (ad es. additivi con nanosilice).
- Additivazione in massa con nanoparticelle allo stato solido in grado di reagire nelle fasi di idratazione o con proprietà specifiche (ad es. fotocatalitiche).



Fumo di silice ultrafine (diametro 5-50 nm) e nanoparticelle di biossido di titanio (diametro 85 nm).

In particolare, l'aggiunta di nanoparticelle nell'impasto influenza i seguenti fattori:

- aumentano la viscosità della fase liquida, contribuendo a mantenere in sospensione i granuli di cemento e gli aggregati, migliorando la resistenza alla segregazione e la lavorabilità di cementi e calcestruzzi;
- riempiono i vuoti tra i granuli di cemento, riuscendo a immobilizzare l'acqua "libera" (*filler effect*);
- agiscono come "centri di cristallizzazione" dei componenti di idratazione, accelerando il processo;
- favoriscono la creazione di microcristalli e ottimizzano la nanostruttura del CSH;
- partecipano alle reazioni pozzolaniche, eliminando componenti indesiderati e contribuendo alla formazione di strati aggiuntivi di CSH;

¹⁶³ Con strumenti quali risonanza magnetica nucleare, microscopio elettronico a scansione (SEM) o a trasmissione (TEM), microscopio a forza atomica (AFM), *nano-indentation* e *synchrotron radiation*.

- migliorano la struttura delle zone di contatto degli aggregati, creando un legame migliore tra aggregati e legante cementizio.

Ulteriori potenzialità di incremento delle prestazioni derivano dalla nanostrutturazione dei rinforzi fibrosi per calcestruzzi. Ad esempio, incorporando il 10% di SWNT (*Single Wall Carbon Nanotubes*) alle fibre di PBO (noto anche come Zylon, è la fibra più resistente mai prodotta dall'uomo) è possibile ottenere un nuovo materiale con una resistenza meccanica superiore del 50%. Altre ricerche hanno dimostrato come fibre composite realizzate con il 60% di SWNT e il 40% di PVA (Polivinilalcol), prodotte per filatura continua con speciali sistemi di indurimento, consente di raggiungere resistenze a trazione di oltre 1,8 GPa. Allo stesso tempo lo studio del dosaggio, delle modalità di dispersione e di interazione con gli altri componenti presenti all'interno della matrice cementizia delle fibre corte comunemente impiegate nella realizzazione di FRC (*Fiber Reinforced Concrete*), quali fibre metalliche o polimeriche, offre la possibilità di incrementare caratteristiche di resistenza a trazione e duttilità.

Sviluppi attuali della ricerca nanotecnologica sui materiali cementizi:

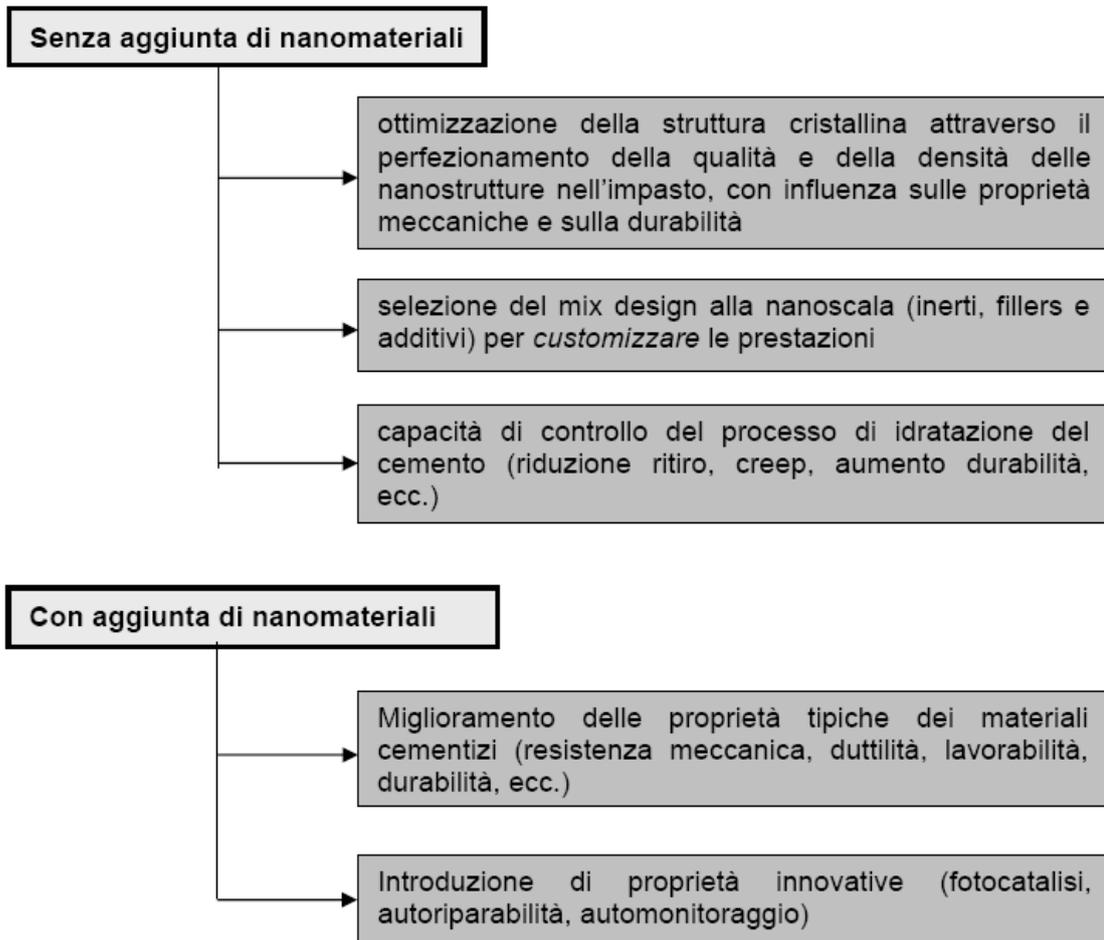
- Catalizzatori per la sintesi a basse temperature del clinker e accelerazione dell'idratazione dei cementi convenzionali;
- Sistemi produttivi per la realizzazione di inerti superfini (approccio *top-down*) e per l'attivazione chimico-meccanica dei componenti del cemento (approccio *bottom-up*);
- Miglioramento delle caratteristiche dei leganti mediante l'impiego di nanoparticelle, *nanorods*, nanotubi, nanoreti, ecc.;
- Leganti modificati con nanoparticelle polimeriche, emulsioni o nanofilm polimerici;
- Sviluppo di cementi che si comportano come bio-materiali, con autosviluppo della struttura chimico-fisica (ad es. imitazione della struttura e del comportamento dei gusci dei molluschi o delle ossa umane);
- Compositi fibrorinforzati a matrice cementizia con fibre innovative contenenti nanotubi o trattamento superficiale delle fibre con *nano-layers* in grado di migliorare i legami chimici e la resistenza a corrosione, o di introdurre nuove proprietà, quali la conducibilità elettrica);
- Nuova generazione di superfluidificanti per il "*total workability control*" e la massima riduzione di acqua nell'impasto;
- Materiali cementizi ad elevatissima resistenza a trazione e a flessione, duttilità e rigidità;
- Leganti con controllo dell'umidità interna per evitare o ridurre le microfessurazioni;
- Materiali cementizi con ingegnerizzazione della nano e microstruttura per il miglioramento della durabilità;
- Eco-leganti modificati con nanoparticelle prodotti con volumi ridotti di cemento Portland (fino al 10-15% in meno) o leganti basati su componenti alternativi (magnesio, fosfati, geopolimeri, gesso);
- Materiali autoriparanti e tecnologie di riparazione basate su nanotubi e additivi chimici;
- Materiali con caratteristiche di autopulizia e antinquinamento basati su tecnologie fotocatalitiche;
- Materiali con controllo della conduttività elettrica, delle proprietà di deformazione, con assenza di ritiro e bassa espansione termica;
- Materiali smart, in grado di rispondere a stimoli di temperatura, umidità, sforzi meccanici.

Fonte: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction Materials, Bilbao, Spagna, 13-16 novembre 2006.*

Principali vantaggi dell'applicazione di nanotecnologie ai materiali cementizi

- comprensione dei meccanismi fisico-chimici alla nanoscala, responsabili delle proprietà finali dei materiali cementizi
- modifica delle reazioni di idratazione per controllare la nanostruttura del C-S-H
- comprensione delle modalità di interazione di superfluidificanti e altri additivi chimici con la formazione del C-S-H
- ottimizzazione della stabilità volumetrica
- miglioramento delle prestazioni globali (resistenza meccanica, durabilità, resistenza agli agenti aggressivi, ecc.)
- introduzione di proprietà non possedute in precedenza, di tipo meccanico (ad es. capacità di resistere a trazione) o di interfaccia con l'ambiente esterno (ad es. autopulibilità, capacità di degradare sostanze inquinanti e di automonitorare i valori di temperatura e umidità, gli stati tensionali interni, ecc.)
- possibilità di realizzare elementi estrusi di maggiori dimensioni
- aumento della vita utile dei manufatti

Tipologie di materiali cementizi nanostrutturati



Applicazioni delle nanotecnologie ai materiali cementizi	
Additivi <ul style="list-style-type: none"> • Minerali <ul style="list-style-type: none"> • nanosilice • nanoparticelle di vetro Aggregati <ul style="list-style-type: none"> • Sabbia e inerti microfini • Biossido di titanio • Ossidi di zinco • Nano/micro fillers 	Fibre <ul style="list-style-type: none"> • Nanotubi, nanofibre e whiskers di carbonio (maggiore rigidità) • Nanofibre di vetro e metalliche (migliore resistenza meccanica) • Nanofibre ceramiche (applicazioni ad alte temperature) • Nanofibre polimeriche (membrane flessibili) • Woollastonite • Nanotessuti

Elaborazione da Perumalsamy. N. Balaguru, "Nanotechnology and concrete: background, opportunities and challenges", in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction Materials*, Bilbao, Spagna, 13-16 novembre 2006.

6.1.3. L'apporto delle nanotecnologie all'eco-efficienza dei materiali cementizi

La ricerca nanotecnologica legata al cemento sta contribuendo da alcuni anni allo sviluppo di materiali innovativi basati su un ridotto impatto ambientale rispetto ai materiali cementizi tradizionali. Gli eco-cementi o eco-calcestruzzi che cominciano a diffondersi sul mercato sono spesso frutto di una ricerca orientata al miglioramento delle prestazioni unita ad una riduzione degli impatti ambientali. Attualmente la ricerca è orientata verso una "seconda generazione" di "nanocementi" e "nanocalcestruzzi" basati sull'introduzione di nanotecnologie per l'ottimizzazione dei consumi energetici negli stabilimenti produttivi (minori temperature di fusione, minore impiego di combustibile), sulla riduzione delle emissioni di CO₂ (oltre il 50% rispetto ai cementi convenzionali) e sulla riduzione dei costi di produzione veicolata anche da una maggiore diffusione di tali tecnologie.

Già oggi tuttavia i materiali cementizi nanostrutturati possono garantire una risposta prestazionale efficace in relazione ad alcuni parametri caratterizzanti i prodotti eco-efficienti, quali il risparmio di risorse materiali ed energetiche nell'intero ciclo di vita attraverso l'utilizzo più razionale delle materie prime, prestazioni più elevate ed affidabili in condizioni d'uso rispetto ai prodotti convenzionali, l'elevata durabilità che consente di ridurre e semplificare le operazioni di manutenzione, nonché la peculiare risposta agli stimoli esterni ambientali.

A differenza di altre tipologie di materiali, in cui l'apporto delle nanotecnologie è strettamente collegato all'impiego di nanoparticelle funzionalizzate per migliorare determinate caratteristiche, con risultati ancora incerti sui livelli di eco-efficienza espressi, nel caso dei materiali cementizi le innovazioni nanotecnologiche più promettenti riguardano la nanoingegnerizzazione del materiale finalizzata alla riduzione

di intensità nel consumo di materia ed energia soprattutto in fase di produzione (di gran lunga la più impattante se si considera il ciclo di vita dei materiali cementizi).

Tale obiettivo è raggiungibile attraverso un approccio al progetto del materiale secondo due percorsi differenti. Da un lato è possibile intervenire sulla sostituzione delle materie prime¹⁶⁴ per abbassare il livello di energia richiesta in fase di cottura del clinker, dall'altro è possibile ottenere cementi e calcestruzzi con migliori caratteristiche meccaniche che consentono di ridurre le quantità di materiale impiegate (ad esempio realizzando elementi strutturali con sezioni più sottili a parità di capacità portante), e di conseguenza l'energia consumata e le emissioni inquinanti globali.

Nel primo caso risultati promettenti sembrano poter venire ad esempio dalla sostituzione del calcio con il magnesio. Sono già presenti sul mercato (in Australia) cementi contenenti composti a base magnesio, rifiuti industriali riciclati e cemento Portland. Una volta posto in opera, durante la fase di maturazione assorbe CO₂ dall'atmosfera, che a contatto con la magnesite viene convertita in carbonato, con un processo che rimane attivo per circa un anno, contribuendo a ridurre l'inquinamento atmosferico.

Nel secondo caso attraverso l'impiego di inerti finissimi (in alcuni casi anche di dimensione nanometrica) o additivi nanostrutturati, è possibile coniugare un miglioramento delle prestazioni meccaniche, della reologia e della lavorabilità (e quindi una maggiore efficienza, anche in termini di impatti ambientali, delle fasi di cantiere), con un netto miglioramento della durabilità del materiale, grazie ad una struttura più compatta che impedisce l'attacco degli agenti chimici e atmosferici. Inoltre, la possibilità di ottenere da un lato prodotti su misura, in cui le prestazioni ricercate diventano gli input per il progetto del materiale, e dall'altro prodotti multifunzionali, adatti per applicazioni differenti (è il caso, ad esempio, di alcune malte impiegate sia per il ripristino strutturale che come rasante), si traduce nella possibilità di ottimizzare la scelta del materiale in funzione delle esigenze di progetto e di cantiere, riducendo tempi e costi di realizzazione.

¹⁶⁴ Ricercatori del MIT, Franz Josef Ulm e Georgios Constantinides, a partire dallo studio della formazione degli strati nanometrici di CSH, "blocchi elementari" costitutivi del cemento ritengono possibile la sostituzione del calcio con differenti tipologie di minerali che reagiscono a temperature più basse ma sono in grado di creare nanostrutture analoghe al CSH per densità e comportamento chimico. Il magnesio, oltre ad offrire tali caratteristiche, è anche un materiale facilmente reperibile attraverso processi di riciclaggio o recupero industriale, il che consente anche di ridurre l'impatto in fase di estrazione delle materie prime. Attualmente l'obiettivo è di raggiungere attraverso tali processi un abbattimento della CO₂ emessa in fase di produzione fino al 50%.

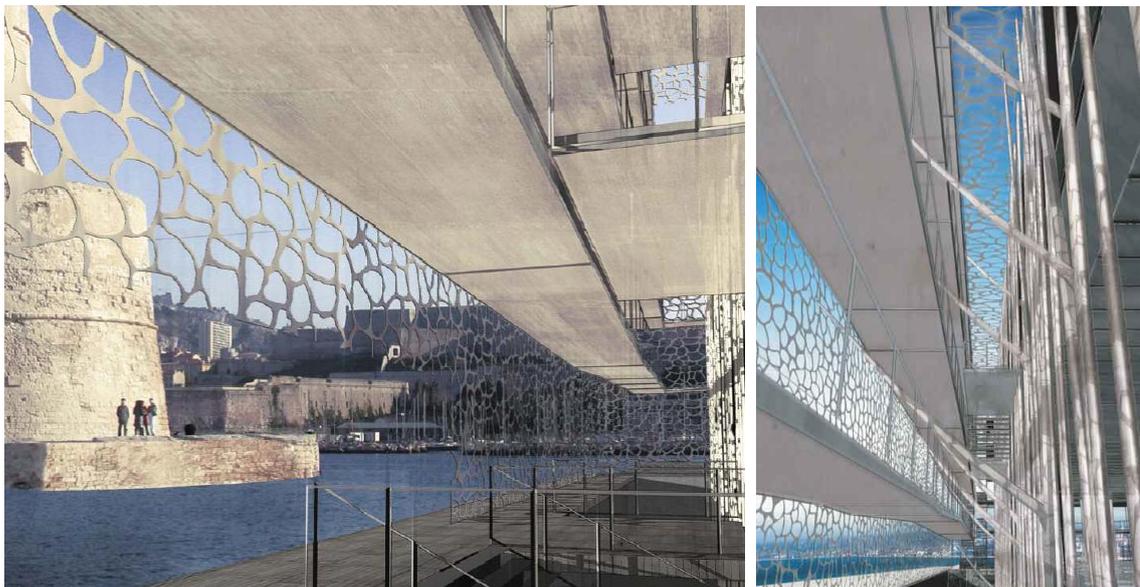
Parametri legati all'eco-efficienza ottimizzabili attraverso le nanotecnologie

- Progettabilità delle caratteristiche meccaniche e della durabilità
- Introduzione di proprietà di tipo *smart*, quali un'elevata conducibilità elettrica, la capacità di reagire a particolari sollecitazioni termiche, igrometriche o meccaniche
- Miglioramento delle modalità applicative dei materiali cementizi
- Riduzione dell'impatto ambientale in fase di produzione (in termini di impiego di materie prime, rifiuti, emissioni, ecc.)
- Riduzione dei costi nel ciclo di vita (migliore previsione nel comportamento strutturale, durabilità estetica e funzionale, riduzione e semplificazione manutenzione)
- Multifunzionalità dei prodotti e possibilità di produzione su misura
- Contributo all'impiego di residui industriali nel processo produttivo del cemento
- Abbattimento degli inquinanti atmosferici (attività fotocatalitiche)

6.1.4. Le applicazioni architettoniche: materiali cementizi nanostrutturati nella nuova edificazione e nel recupero

Materiali cementizi nanostrutturati nella nuova edificazione

L'ottimizzazione e la *customizzazione* delle prestazioni derivanti dall'approccio nanotecnologico alla progettazione di nuovi materiali cementizi ha aperto la strada ad una molteplicità di applicazioni innovative, tese a sfruttare le potenzialità offerte delle diverse tipologie di prodotti attualmente disponibili sul mercato.

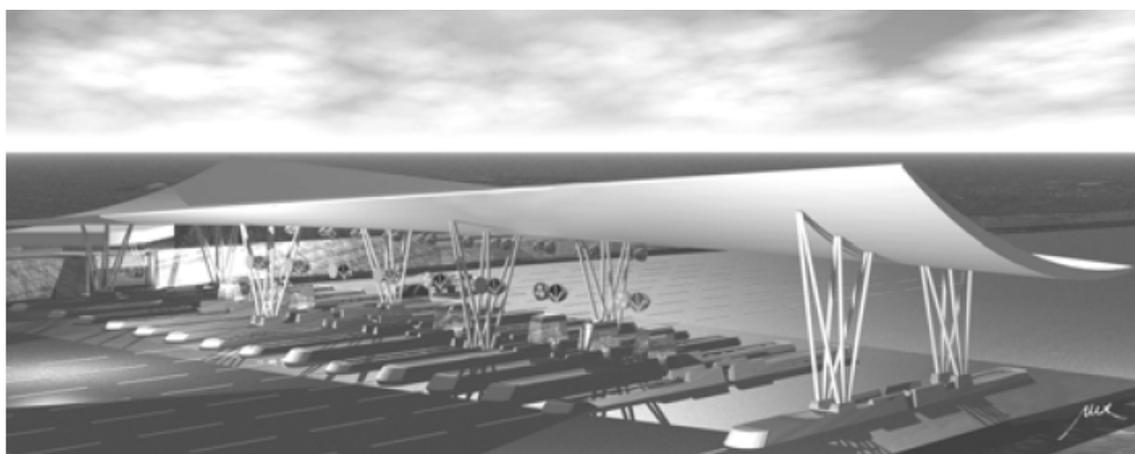


Impiego di UHPC per la realizzazione di elementi strutturali e frangisole. Rudy Ricciotti, MUCEM (*Musée national des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée*), Marsiglia.

In campo strutturale, grazie al miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche di cementi e calcestruzzi, è possibile ridurre le sezioni degli elementi portanti, avvicinandosi per l'entità degli spessori in gioco, a tipologie strutturali simili a quelle dell'acciaio. Calcestruzzi ad altissima resistenza meccanica (UHPC - *Ultra High*

Performance Concrete, calcestruzzi con nanosilice, ecc.) sono impiegati per la realizzazione di progetti caratterizzati da una notevole riduzione delle sezioni strutturali e da un'ottimizzazione della forma degli elementi volta a ridurre al minimo la necessità di ferri di armatura.

Le prime applicazioni hanno riguardato principalmente edifici industriali, ponti e opere di ingegneria civile, ma recentemente progettisti di livello internazionale (quali Jean Nouvel, Frank Gehry, Rudy Ricciotti) hanno iniziato ad esplorare le potenzialità espressive legate ad una maggiore libertà nella concezione strutturale, che si traduce nello sviluppo di progetti caratterizzati da strutture esili, ampie luci ed elementi strutturali modellati in maniera plastica, le cui superfici sono prive di imperfezioni, con *texture* personalizzabili e resistenti agli agenti atmosferici senza necessità di trattamenti superficiali aggiuntivi.

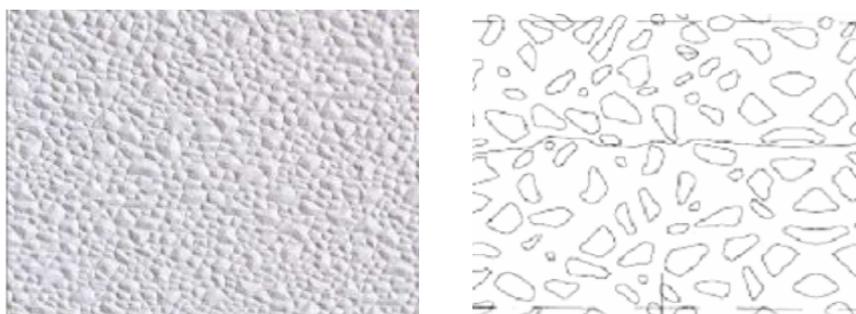


La copertura del varco di accesso al Millau Viaduct in Francia meridionale, attualmente in costruzione, è realizzata con un calcestruzzo nanostrutturato ad altissime prestazioni. Si tratta di una struttura lunga 98 m e larga 28 m, con uno spessore massimo nella parte centrale di 85 cm. Sarà realizzato con segmenti della larghezza di 2 m connessi tra loro attraverso trefoli da precompressione longitudinali.

Tecnologie sostanzialmente analoghe di nanostrutturazione del cemento, basate sull'impiego di inerti finissimi e sulla caratterizzazione nanomeccanica delle proprietà del materiale, hanno consentito di offrire soluzioni innovative per sistemi strutturali alternativi impiegando calcestruzzi tessili (TRC, *Textile Reinforced Concrete*) o gonfiabili (*Inflatable Concrete*) già sperimentati per la realizzazione di strutture temporanee e per l'emergenza, facendo rientrare a tutti gli effetti anche la leggerezza tra gli attributi propri delle strutture in calcestruzzo.

Le applicazioni non strutturali riguardano la realizzazione di facciate continue realizzate con pannelli prefabbricati in cls ad altissime prestazioni o dotati proprietà fotocatalitiche. Nel primo caso le principali opportunità riguardano la possibilità di realizzare elementi

di grandi dimensioni con spessori estremamente ridotti (nell'ordine di 1-3 cm per pannelli di 3 m di lunghezza), forati in modo da realizzare elementi frangisole, estremamente durevoli anche in ambienti aggressivi e con connotazioni estetiche superficiali estremamente variabili grazie alla finezza dell'impasto, che consente di replicare la *texture* dello stampo con una precisione nell'ordine di pochi micron. Nel caso di pannelli in cls fotocatalitici, sull'esempio della chiesa romana di Meier, sono in aumento le realizzazioni che prevedono l'impiego di pannelli autopulenti e con proprietà antinquinamento, ottenuti grazie al rivestimento superficiale fotoattivo. Tale tipologia di prodotti, insieme alle malte e alle vernici fotocatalitiche, sembra essere destinata in tempi brevi a passare dalle prime "pionieristiche" applicazioni al costruito diffuso, proprio grazie ai notevoli vantaggi prestazionali raggiungibili con ridotti incrementi di costo e una continuità con la prassi applicativa dei prodotti convenzionali a base cementizia.



A sinistra, esempio di *texture* di un calcestruzzo ultrafine ottenuta impiegando uno stampo in metacrilato. A destra stampo forato impiegato per la realizzazione dei pannelli di facciata del Musée d'Art Moderne Lille Métropole.



Manuelle Gautrand, estensione del Musée d'Art Moderne Lille Métropole, Villeneuve d'Ascq. La facciata di 1850 mq è realizzata con pannelli forati di diverse dimensioni, con lunghezze dai 3 agli 8 m con spessori particolarmente ridotti (9 cm per pannelli di 25 mq).

L'impiego di materiali cementizi nanostrutturati nella nuova edificazione investe dunque, nelle diverse possibili applicazioni, considerazioni contemporaneamente di ordine funzionale ed estetico, con ricadute significative in relazione alle diverse fasi del processo edilizio, semplificando le operazioni di posa in opera (ad esempio dando la possibilità di realizzare un numero minore di elementi, strutturali o di rivestimento, con vantaggi in fase di assemblaggio) e riducendo la necessità di manutenzione, grazie alla durabilità o al comportamento attivo nel tempo derivante dall'apporto delle nanotecnologie.



Richard Meier & Partners, ITC Lab (Innovation and Technology Central Laboratory), Bergamo. L'intero edificio è rivestito di pannelli in cls fotocatalitici con effetto antinquinamento. Per il progetto, che prevede l'impiego di diverse soluzioni per il risparmio e l'efficienza energetica, è stata richiesta la certificazione secondo il protocollo americano LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*).

Materiali cementizi nanostrutturati nel recupero

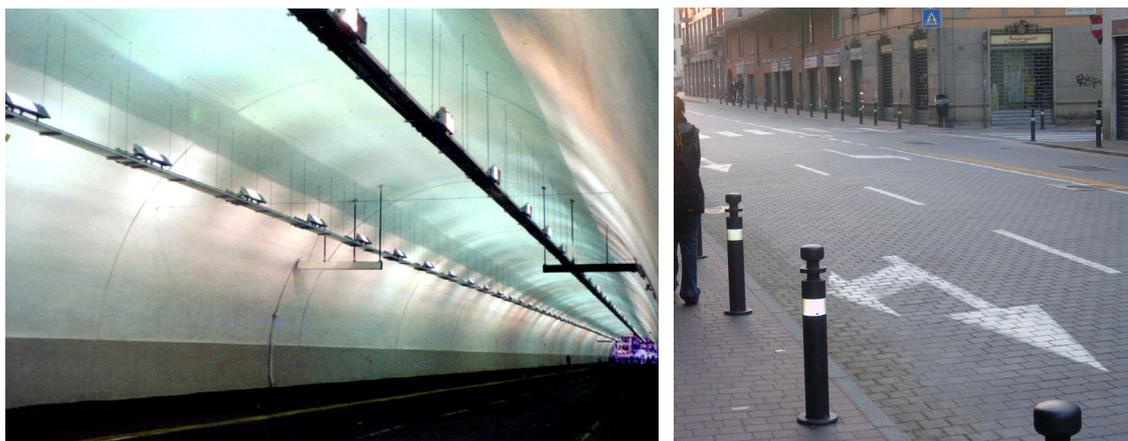
Nel panorama delle tecnologie innovative per il recupero degli edifici, quelle basate sull'impiego dei materiali cementizi nanostrutturati rappresentano un settore per cui si prevede un notevole sviluppo nei prossimi anni.

Calcestruzzi, malte e pitture nanostrutturate possono essere impiegati per il rifacimento parziale o totale di intonaci in facciata, il ripristino di parti ed elementi in calcestruzzo degradati, fino al miglioramento e all'adeguamento di strutture portanti in c.a., attraverso la sostituzione o il rinforzo degli elementi tecnici preesistenti con soluzioni che presentano elevati livelli prestazionali e un alto valore aggiunto: malte multifunzionali, calcestruzzi di ridottissimo spessore e resistenti a trazione, pitture autopulenti e antinquinamento, ecc.

Le caratteristiche innovative che differenziano tali prodotti rispetto a quelli convenzionalmente usati nel recupero riguardano, dunque, *plus* prestazionali che

soddisfano esigenze di vario tipo – dalla sicurezza, alla riconoscibilità dei caratteri tipologici, architettonici e costruttivi, all'eco-efficienza nel ciclo di vita – senza particolari implicazioni dal punto di vista operativo, data la sostanziale analogie per quanto riguarda la posa in opera con i prodotti convenzionali a base cementizia. La diffusione di tali tecnologie investe anzi importanti aspetti applicativi, riducendo i principali fattori di rischio tecnico – quali ad esempio soluzioni tecniche inadeguate, scelta di materiali non idonei in relazione al supporto, lavorazioni errate in fase di preparazione delle superfici e di posa in opera – garantendo al contempo durabilità, affidabilità e facilità di impiego.

Le principali realizzazioni fino a questo momento riguardano interventi di ripristino strutturale con malte nanostrutturate che hanno consentito di ridurre notevolmente i tempi di cantiere, gli sfridi e i consumi d'acqua, e interventi di rifacimento di intonaci, pitture e rivestimenti stradali realizzati con prodotti fotocatalitici autopulenti e antinquinamento.



A sinistra, Traforo del Tritone a Roma, la volta interna di 9000 mq è stata rivestita di vernice fotocatalitica. A destra rifacimento della pavimentazione in via Borgo Palazzo a Bergamo con masselli autobloccanti fotocatalitici (fonte: documentazione Italcementi).

Alcune recenti applicazioni hanno riguardato il rivestimento delle volte interne di gallerie¹⁶⁵ con pitture fotocatalitiche in grado di conservare il proprio colore bianco senza necessità di interventi di manutenzione e di ridurre la concentrazione di inquinanti nella galleria dal 30 al 40%¹⁶⁶. Poiché l'azione fotocatalitica ha bisogno della radiazione solare per essere attivata, il progetto ha previsto la sostituzione dell'impianto di

¹⁶⁵ Il Traforo del Tritone a Roma è stato inaugurato dopo un mese di lavori nel settembre 2007. Il progetto è stato sviluppato e sponsorizzato, grazie ad un accordo tra il Comune di Roma, da Italcementi e CIM (Calci Idrate Marcellina), per un importo complessivo di 500 mila euro.

¹⁶⁶ una realizzazione analoga per il tunnel di via Porpora a Milano ha consentito un abbattimento degli agenti inquinanti pari al 23%.

illuminazione con apparecchi realizzate con lampade a raggi UV e speciali vetri protettivi autopulenti. È stato sperimentato l'impiego di masselli autobloccanti e di malte cementizie fotocatalitiche per il rifacimento del manto stradale, ottenendo un abbattimento dei valori di NOx, specialmente ad altezza uomo, nell'ordine del 40%.¹⁶⁷

Il vantaggio in termini di impatti ambientali è accompagnato da un incremento dei costi relativamente basso. Per una facciata di cinque piani, ad esempio, l'incidenza dell'uso di pitture fotocatalitiche è nell'ordine di 100 euro, mentre nel caso di pavimentazioni con masselli autobloccanti l'aumento di costo rispetto ad un asfalto tradizionale è circa del 15%.

Il successo di tali sperimentazioni ha contribuito all'introduzione di normative nazionali e regionali (sia per quanto riguarda regolamenti edilizi che programmi di finanziamento specifici) in cui viene fatto esplicito riferimento all'opportunità di impiego di prodotti fotocatalitici, aprendo la strada ad una effettiva diffusione nei diversi ambiti applicativi.

6.2. Le tipologie di prodotti: caratteristiche e prestazioni

6.2.1. Le tipologie di prodotti attualmente sul mercato

Le possibilità offerte dallo sviluppo delle nanotecnologie applicate ai materiali cementizi aprono ad una nuova concezione del materiale stesso, che può essere modellato "su misura", a seconda delle prestazioni finali richieste per una data applicazione (elementi strutturali, malte, intonaci, vernici o rivestimenti). La maggior parte di tali prodotti sono frutto di un'attenta ricerca e caratterizzazione del materiale con strumenti ad altissima precisione, in modo da ottimizzare le proprietà richieste all'impasto cementizio, al quale però non sono aggiunti nanomateriali, ma vengono semplicemente bilanciati in maniera appropriata i diversi materiali di base costituenti l'impasto (acqua, sabbia, cemento, interti, ecc.). In tal modo la struttura cristallina alla nanoscala si presenta priva di quelle impurità che possono generare difetti alla macroscale, da cui dipendono, ad esempio, la permeabilità ai liquidi o il fenomeno dello scorrimento viscoso (*creep*). In altri casi all'impasto cementizio vengono aggiunte, in massa o superficialmente, nanoparticelle o nanocariche per incrementare le prestazioni finali.

¹⁶⁷ I dati sono stati rilevati e monitorati dal 2006 al 2007 dai tecnici di Italcementi con il contributo di ARPA Lombardia (Agenzia Regionale Prevenzione Ambiente).

Non è sempre immediato individuare se, alla base di una data tipologia di prodotto, vi sia un impiego più o meno consistente di nanoparticelle nel processo produttivo per raggiungere le proprietà finali. La maggior parte dei produttori tende a specificare ad esempio se nel proprio prodotto non viene fatto uso di nanoparticelle, ma non avviene il contrario, poiché di fatto non esistono attualmente regolamentazioni specifiche.

In ogni caso le problematiche legate all'impiego di nanoparticelle non riguardano il prodotto finito (nel quale risultano incorporate all'interno della struttura cristallina), ma principalmente le fasi produttive. La maggior parte dei nanomateriali correntemente usati all'interno di prodotti a base cementizia vengono sintetizzati tramite tecniche *bottom-up* (ad es. *Sol-Gel*) e si presentano nella forma di sospensione colloidale o di additivo, e quindi impossibile da distinguere, ad occhio nudo, da un additivo di tipo tradizionale. In altri casi le nanocariche impiegate in laboratorio per sviluppare i prodotti possono lasciare il posto a particelle di dimensioni maggiori quando si passa alla fase della produzione industriale, per difficoltà tecniche legate agli aspetti produttivi, o di immagine, per tutelare il *brand* di "prodotto sostenibile".

Le numerose ricerche condotte in ambito internazionale, spesso in maniera congiunta da aziende, centri di ricerca e università¹⁶⁸, hanno portato allo sviluppo di diverse classi di materiali cementizi nanostrutturati, tra cui è possibile individuare alcune principali tipologie.

Cemento con nanosilice.

Attraverso l'impiego delle nanotecnologie è possibile progettare in maniera ottimale la distribuzione e le dimensioni degli inerti, in modo da incrementare notevolmente le prestazioni del conglomerato riducendo la quantità di materie prime necessarie. La silice (SiO₂), ad esempio, è normalmente presente nell'impasto cementizio tradizionale, tuttavia l'impiego di particelle di silice di dimensioni nanometriche porta alla creazione di una micro e nanostruttura del materiale più densa e viscosa, che migliora la lavorabilità e la compattezza dell'impasto, nonché le caratteristiche meccaniche (resistenza a compressione da 3 a 6 volte maggiore) e permette un controllo maggiore della carbonatazione del materiale.¹⁶⁹ Le particelle di nanosilice

¹⁶⁸ Il consorzio europeo Nanocem, ad esempio, comprende 37 partners industriali e accademici interessati alla ricerca applicata su materiali cementizi nanostrutturati.

¹⁶⁹ Le nanoparticelle riempiono i vuoti tra le particelle di cemento, immobilizzando le molecole libere di acqua (filler effect), inoltre la nanosilice partecipa ad alcune reazioni chimiche fondamentali nella fase di idratazione del cemento, contribuendo alla formazione di nanocristalli che rendono più compatta la struttura del C-S-H e il legame tra cemento e

reagiscono con l'idrossido di calcio liberato durante la fase di idratazione del cemento, aumentando così la quantità di legante nella matrice cementizia.

L'aggiunta di nanosilice (1,5% del peso circa) avviene generalmente tramite additivi e comincia ad essere utilizzata per la realizzazione di calcestruzzi ad alte prestazioni, autocompattanti o malte cementizie in cui è richiesta una più elevata resistenza meccanica, lavorabilità e durabilità.

Alcuni ricercatori¹⁷⁰ hanno sperimentato l'impiego di nanosilice (diametro 5-50 nm) come VMA (*Viscosity Modifyng Agent*) all'interno di un SCC con additivi minerali (calcare macinato, cenere volante, ecc.). In questo caso l'obiettivo principale non riguardava un incremento delle proprietà meccaniche (raggiungendo comunque una resistenza a compressione di 55 MPa), quanto un comportamento specifico allo stato fresco: bassa dispersione d'acqua, ottima coesione e adeguata lavorabilità. Lo studio ha inoltre dimostrato come la presenza di nanosilice non influisca sulla durabilità del calcestruzzo.

Prodotti

Gaia (Cognoscible Technologies) – Additivo a base di nanosilice commercializzato in forma di liquido colloidale che facilita la dispersione delle particelle all'interno di malte e calcestruzzi. L'additivo combina l'effetto di riduzione d'acqua a quello plasticizzante (*slump increase*), conservando una perfetta lavorabilità e un'ottima consistenza dell'impasto. La resistenza caratteristica a 1 giorno di un provino di cls additivati con Gaia è circa 3 volte superiore a quella di un cls non additivato (68,2 MPa rispetto a 22,7 MPa), mentre a 28 giorni si arriva ad una resistenza a compressione di oltre 90 MPa.

Stabilgrout (Mapei) – Additivo a base di nanosilice per iniezioni di miscele a base cementizia in grado di conferire elevata stabilità volumetrica (riducendo il *bleeding* e la segregazione), migliori caratteristiche di impermeabilità, di resistenza agli attacchi chimici e di durabilità. Le particelle impiegate sono di dimensioni estremamente ridotte (90% inferiore ad 1 micron), ma la consistenza liquida e la base minerale rendono il prodotto non tossico, in grado di produrre un impatto ambientale ridotto rispetto alle miscele per iniezione tradizionali di tipo chimico.

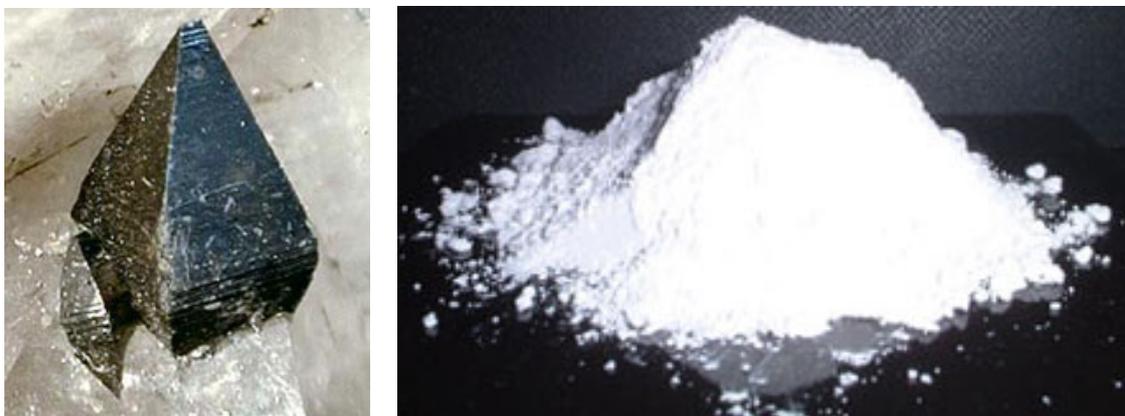
Cemento fotocatalitico.

A partire dalla metà degli anni '90 si è cominciata a studiare la possibilità di fornire un contributo alla riduzione dell'inquinamento atmosferico attraverso l'uso di materiali da costruzione contenenti fotocatalizzatori, tra cui il vetro e il cemento. Le particelle di biossido di titanio (TiO₂) sono da anni utilizzate come pigmenti per vernici per il

aggregati. Cfr. Konstantin Sobolev, Miguel Ferrada Gutiérrez, "How nanotechnology can change the concrete world", in *American Ceramic Society bulletin*, n. 84, novembre 2005, p. 18.

¹⁷⁰ Cfr. Mario Collepari et al., "Influence of amorphous colloidal silica on the properties of Self Compacting Concretes", in *Proceedings of the international conference: Challenger in Concrete Construction – Innovation and Developments in Concrete Materials and Construction*, Dundee, 2002, pp. 473-483.

caratteristico colore bianco brillante ma, da qualche anno, il loro impiego è stato esteso a varie tipologie di prodotti a base cementizia con funzione principale di rivestimento, poiché l'effetto della fotocatalisi è un fenomeno che avviene sulla base della reazione di tale sostanza con determinate gamme di radiazione solare. L'aggiunta di nanoparticelle di TiO_2 rende il materiale cementizio (tipicamente un rasante o una pittura, ma anche lo strato di finitura di elementi prefabbricati quali pannelli estrusi o masselli) idrofilico e la sua superficie autopulente. A questa particolare caratteristica si devono aggiungere le proprietà antibatteriche e la capacità di degradare numerosi agenti inquinanti presenti nell'aria. In questo senso, molti studi hanno dimostrato che il cemento rappresenta il substrato ideale per l'azione fotocatalitica del TiO_2 , proprio per la sua capacità di assorbire sostanze inquinanti.



A destra atanasio (su quarzo), minerale da cui vengono ricavate le nanoparticelle di biossido di titanio

I prodotti dell'inattivazione delle sostanze inquinanti organiche ed inorganiche sono assolutamente innocui per l'ambiente, riducendosi in ultima analisi a sali solubili come carbonati e nitrati già presenti in natura, che si depositano sulla superficie del materiale. Data la bassa quantità di sali derivante dalla trasformazione degli inquinanti atmosferici (quantificabili in PPB=parti per miliardo), essi sono facilmente, e senza danno, eliminati dal vento e dalle piogge.

Il biossido di titanio viene utilizzato nella forma cristallografica detta "anatasio", generalmente insieme ad altri additivi speciali, che potenziano le proprietà fotocatalitiche.

La scelta di impiegare particelle di dimensioni nanometriche è principalmente dovuta alla necessità di ottimizzare le proprietà superficiali in relazione alle quantità di materiale utilizzato (considerato anche il costo elevato); tuttavia, per ottenere risultati soddisfacenti, è possibile incrementare le dimensioni delle particelle fino ad alcune

centinaia di nanometri (e quindi formalmente non impiegando più nanoparticelle), riducendo alcune problematiche tecniche legate alla dispersione omogenea sulla superficie del materiale, ma anche all'immagine ecologica del prodotto, considerando come l'impiego di nanoparticelle sia spesso sinonimo di rischi per la salute umana e per l'ambiente.

Attività fotocatalitica delle nanoparticelle di TiO₂ in una matrice cementizia				
Tipologie di particelle e possibili combinazioni	Dimensione particelle (nm)	Area superficiale (m ² g ⁻¹)	Attività fotocatalitica (col. rodamina B)	Attività fotocatalitica (col. bromocresolo verde)
A	150	11	120	118
B	150	10	118	111
C	12-25	85	100	100
75% A 25% C			129	155
50% A 50% C			165	149
75% C 25% A			157	142
75% B 25% C			152	158
50% B 50% C			194	121
75% C 25% B			157	136

L'impiego combinato di nanoparticelle di differenti dimensioni aumenta l'attività fotocatalitica. Fonte: Luigi Cassar, "Nanotechnology and Photocatalysis in Cementitious Materials", in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction Materials, Bilbao, Spagna*, 13-16 novembre 2006.

Il processo avviene senza che il biossido di titanio sia degradato dalla reazione e quindi è possibile parlare di una efficacia continua e costante nel tempo. La molecola è infatti sostanzialmente un attivatore di reazioni (catalizzatore), che non partecipa direttamente al processo di trasformazione chimica, tuttavia è necessario calibrare accuratamente la composizione dell'impasto, poiché alcune sostanze normalmente presenti nei prodotti a base cementizia, quali ad esempio gli additivi a base organica, possono ridurre l'efficacia del fotocatalizzatore.

Tra gli agenti degradati ad opera delle sostanze fotocatalizzatrici sono da annoverarsi i principali responsabili dell'emergenza ecologica dell'aria metropolitana, tra cui biossidi e ossidi di azoto (con un abbattimento pari a 30T/anno per km²), biossido di zolfo, polveri atmosferiche (PM Secondarie) e composti organici volatili come benzene e toluene (VOC).

In condizioni ottimali di illuminazione e attività del fotocatalizzatore è stimato che 1000 m² di superficie fotocatalitica sono capaci di pulire un volume di aria di 200.000 m³ al giorno (considerando 10 ore di illuminazione/giorno). Sulla base di questi dati è possibile ipotizzare che il trattamento del 15% delle superfici esterne degli edifici e delle strade sarebbe sufficiente per abbattere in maniera significativa il livello di

inquinamento nelle grandi città. Recentemente¹⁷¹ è stata anche studiata l'efficacia dell'attività fotocatalitica in ambienti interni, dimostrando come anche luce solare indiretta che penetra nell'abitazione può essere sufficiente per attivare la fotoattività dei prodotti. La luce artificiale, opportunamente ottimizzata, può contribuire ad aumentare l'effetto ove si usino lampade specifiche, ma di comune uso commerciale tipo quelle al neon.

Prodotti

TX Arca (Italcementi) – Il principio attivo fotocatalitico a base di biossido di titanio viene impiegato in combinazione con una matrice cementizia per la realizzazione di elementi di rivestimento (intonaci e pitture), elementi di facciata (brise-soleil) o pannelli prefabbricati estrusi. Le proprietà fotocatalitiche sono stressate in favore dell'autopulibilità.

TX Aria (Italcementi) – Modulando le caratteristiche del catalizzatore utilizzato è possibile ottenere prodotti in cui le proprietà fotocatalitiche sono stressate in favore dell'assorbimento di agenti inquinanti. Dato il costo maggiore di una tale formulazione il prodotto è generalmente impiegato per prodotti di rivestimento (pitture, rasanti, ecc.).

ECOSTAR (Record) – Sfruttando il principio attivo TX, Record realizza masselli autobloccanti con proprietà fotocatalitiche in grado di coniugare proprietà autopulenti e antinquinamento.

Cemento con magnesio

Le possibilità offerte dalla nanoingegnerizzazione del cemento hanno portato allo sviluppo di cementi basati su materie prime alternative che garantissero un livello prestazionale adeguato in termini di resistenza meccanica e durabilità. Il magnesio è generalmente presente all'interno del cemento in percentuali comprese tra l'1 e il 2%. Composti a base di magnesio derivanti dal riciclaggio di prodotti industriali possono essere impiegati in percentuale maggiore (5-15%) sostituendo il calcio nella creazione dei prodotti di idratazione che determinano le proprietà del cemento. Tali reazioni chimiche danno luogo alla creazione di una microstruttura densa e compatta, in cui l'acqua in eccesso viene utilizzata per l'idratazione del magnesio, che contribuisce al processo di carbonatazione. La dimensione micrometrica delle particelle (nell'ordine dei 7-15 micron) contribuisce a creare una struttura compatta, con un aumento della resistenza meccanica, un'ottima lavorabilità, una limitazione delle fessurazioni da ritiro e un conseguente incremento della durabilità. I maggiori vantaggi nell'impiego di tali tipologie di cemento riguardano i ridotti impatti ambientali: in fase di produzione, la

¹⁷¹ Nell'ambito di una sperimentazione condotta nel 2003 dall'ARPA Lombardia (Agenzia Regionale Prevenzione Ambiente) nel Comune di Segrate in collaborazione con CTG - Italcementi Group, impiegando una pittura fotocatalitica in un appartamento e misurando l'abbattimento dei valori di NOx.

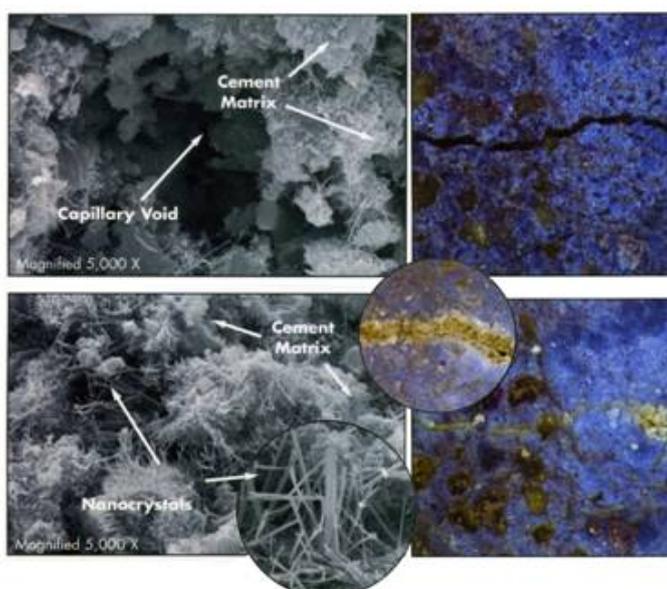
magnesite è in grado di fondere tra i 600-750°C (contro i 1500°C di un forno da cemento tradizionale), e richiede dunque minori quantità di energia, tali da poter alimentare il forno anche ad energia solare o eolica. In più tali tipologie di cemento possono prevedere un impiego maggiore di materie prime riciclate grazie alla non reattività dell'impasto a base di magnesio. Alcune tipologie di cementi a base di magnesio prevedono l'impiego di quantitativi ancora maggiori (fino al 95%), per sfruttare la capacità del magnesio di assorbire CO₂ anche dall'atmosfera una volta indurito il materiale, anche se per un periodo limitato di tempo (10-15 mesi).

Prodotti

Eco-cement (TecEco) – Ottenuto dall'impiego di magnesio reattivo unito con cementi idraulici convenzionali, l'"eco-cemento" può essere prodotto in forni con temperature particolarmente basse (circa 700°C). È caratterizzato da una bassa alcalinità che consente di realizzare calcestruzzi che utilizzano percentuali molto maggiori di materiali riciclati, quali cenere volante, scorie di altoforno, plastiche, ecc., per ottenere prestazioni specifiche, senza il rischio di reazioni ritardate che ne condizionano le proprietà finali. Se impiegato all'interno di materiali porosi, come blocchi in cls o pavimentazioni permeabili, è in grado di continuare la propria reazione di carbonatazione assorbendo CO₂ dall'atmosfera.

Calcestruzzo impermeabile

Attraverso additivi speciali è possibile conferire impermeabilità e capacità di autoriparazione agli impasti cementizi. Tali additivi si presentano sotto forma di una sospensione colloidale a base acqua di agenti inorganici, caratterizzati da una particolare forma liquida cristallina.



I nanocristalli presenti nell'additivo sono in grado di riempire i vuoti capillari presenti nel cls. A destra, è evidenziata la capacità di autoriparare microfessurazioni (Fonte: documentazione tecnica Schomburg).

Aggiunti in una percentuale del 2-3% del peso del cemento, senza particolari accorgimenti operativi, sono in grado di penetrare all'interno della struttura cristallina del calcestruzzo e di reagire nelle fasi di idratazione, riempiendo con un grande numero di nanocristalli i vuoti capillari, responsabili della porosità del materiale e della permeabilità all'acqua. Il materiale così additivato presenta inoltre una notevole resistenza agli agenti aggressivi e un incremento della resistenza ai cicli di gelo disgelo, conservando un livello adeguato di traspirabilità. Grazie alla compattezza della micro e nanostruttura del materiale è possibile aumentare fino al 25% la resistenza a compressione, mentre la reattività nel tempo dell'additivo consente di autoriparare le fessurazioni da ritiro. La realizzazione di un calcestruzzo impermeabile consente una notevole riduzione dei tempi e dei costi in fase di costruzione (imputabili alle tradizionali operazioni di impermeabilizzazione) e di esercizio (per l'abbattimento delle operazioni di manutenzione necessarie).

Prodotti

Aquafin-IC Admix (Schomburg) – Additivo per calcestruzzo a base inorganica con agenti chimici impereabilizzanti. Compatibile con fluidificanti e riduttori d'acqua e applicabile per rapporti acqua/cemento non superiori a 0,55, consente di rendere impermeabile il cls nel tempo garantendone la traspirabilità, aumentandone la resistenza a compressione fino al 25% e migliorandone la durabilità. Rimane attivo nel tempo e capace di reagire a contatto con l'acqua eventualmente penetrata nel cls in seguito a fessurazioni da ritiro, autoriparandole fino ad un'ampiezza di 0,4 mm L'elevata resistenza alla pressione idrostatica rende inoltre tale additivo particolarmente indicato per la realizzazione di strutture a contatto con l'acqua (fondazioni, serbatoi o dighe).

Calcestruzzo 3SC

Il calcestruzzo 3SC (*Self-Compacting, Self-Curing, Self-Compressive Concrete*, autocompattante, autostagionante e autocompresso, secondo una espressione coniata da alcuni ricercatori¹⁷²) rappresenta un'evoluzione dei calcestruzzi autocompattanti (SCC) che non necessitano di essere vibrati per raggiungere proprietà meccaniche ottimali, riducendo così di molto l'energia necessaria alla realizzazione di strutture in c.a. e abbattendo i costi e i tempi di realizzazione rispettivamente del 50% e dell'80%. Le tre proprietà tipiche dei calcestruzzi 3SC sono ottenute integrando additivi superfluidificanti (a base di eteri policarbossilati), viscosizzanti (*Viscosity Modifying Agent*, VMA), antiritiro (*Shrinkage Reducing Admixture*, SRA, a base di eteri poliglicoli) e agenti espansivi (a base di ossido di calcio). L'uso di superfluidificanti a base di eteri

¹⁷² Mario Collepari et al., "3-Self-Concrete (3SC): la prossima sfida", in *Enco Journal*, n. 24, 2003.

polycarbossilati (PCE) rende molto più lavorabile il conglomerato anche con bassi rapporti acqua/cemento e, a differenza dei tradizionali fluidificanti, non riduce la resistenza del cls nel breve periodo, permettendo una rapida eliminazione delle strutture di sostegno e incrementando inoltre di gran lunga la vita utile delle cassetture. Sono migliorate l'aderenza alle barre di armatura e il modulo elastico, mentre sono notevolmente ridotte le principali cause di degrado del calcestruzzo quali il ritiro igrometrico, la deformazione viscosa (*creep*) e la permeabilità all'acqua.

Ulteriori ricadute riguardano la notevole semplificazione delle operazioni di posa in opera e la possibilità di impiego in applicazioni strutturali particolarmente complesse.

Prodotti

Glenium Sky (BASF) – Additivo superfluidificante a base di eteri polycarbossilati di seconda generazione, frutto di studi legati all'interazione alla nanoscala tra polimeri disperdenti e matrice cementizia. Possiede contemporaneamente sia una eccellente capacità di riduzione d'acqua, sia un ottimo mantenimento della lavorabilità anche a temperature elevate del calcestruzzo, senza effetti secondari di ritardo nello sviluppo delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature. I polimeri che costituiscono la base di tali additivi sono progettati in modo da avere una corretta regolazione della velocità di adsorbimento delle molecole in funzione della velocità di formazione dei prodotti di idratazione del cemento ed in particolare dell'ettringite (cfr. par. 6.1.1.)

Chronolia (Lafarge) – Calcestruzzo per getti in opera frutto di anni di ricerca sulle nanotecnologie nel campo degli additivi e sulla regolazione delle modalità di sviluppo dei reticoli cristallini nelle fasi di idratazione del cemento, in grado di coniugare una elevatissima lavorabilità e fluidità con la capacità di sviluppare resistenza meccanica in tempi rapidissimi, contribuendo ad accelerare le fasi di getto e la rotazione dei casseri. Il calcestruzzo fresco è in grado di non avviare il processo di idratazione per le prime due ore dalla realizzazione dell'impasto, conservando le proprie caratteristiche di lavorabilità con ogni condizione di temperatura e umidità. Una volta posto in opera consente di rimuovere le cassetture entro 4 ore dal getto (a fronte delle 12-20 ore dei cls convenzionali) e di realizzare gli impalcati superiori dopo appena 6-8 ore con notevoli risparmi economici e di tempo in fase di cantiere. Disponibile in varie formulazioni a seconda dei tempi di maturazione (4h, 6h, 15h, 24h e 48h).

UHPC (Ultra High Performance Concrete)

L'evoluzione recente nel campo dei calcestruzzi strutturali ha consentito di ottenere conglomerati dotati di una resistenza meccanica decisamente superiore a quella dei calcestruzzi convenzionali, classificati in base alle resistenze caratteristiche¹⁷³.

Mentre i calcestruzzi ad alte prestazioni possono raggiungere resistenze a compressione comprese tra 60 e 120 MPa, gli UHPC, anche noti come RPC (*Reactive Powder Concrete*), consentono di superare i 200 MPa.

¹⁷³ *High Performance Concrete* (HPC), 60-100 MPa; *Very High Performance Concrete* (VHPC), 110-140 MPa; *Ultra High Performance Concrete* (UHPC), 150-250 MPa; *Super High Performance Concrete* (SHPC), 300-800+ MPa.
Fonte: documentazione tecnica Lafarge

Il termine *Reactive Powder Concrete* è stato utilizzato in origine per descrivere una miscela di cemento e fumo di silice, additivata con superfluidificante, fibrorinforzata, con rapporto acqua-cemento (a/c) molto basso e caratterizzata dalla presenza di una sabbia quarzosa molto fine (0.15 - 0.4 mm) al posto dell'aggregato ordinario.¹⁷⁴ In effetti «è improprio definire questo materiale un calcestruzzo poiché non contiene aggregato grosso nella miscela cementizia»,¹⁷⁵ configurandosi piuttosto come un materiale composito a matrice cementizia.



Prova di carico di una lastra in UHPC realizzata con il cemento *Nanodur*. Una lastra di spessore 1 cm con una luce di 1 m caricata con un peso di 50 kg (Fonte: documentazione tecnica Dyckerhoff).

Le caratteristiche principali degli UHPC-RPC, oltre alla eccellente resistenza meccanica a compressione, prevedono un comportamento duttile e in alcuni casi la capacità di resistere a trazione grazie alla presenza delle fibre, inoltre, grazie alla struttura particolarmente densa e all'assenza di impurità e vuoti nella matrice cementizia presentano ottime caratteristiche di durabilità e resistenza agli agenti aggressivi.

Prodotti

Ductal (Lafarge) – Calcestruzzo del tipo UHPC in grado di sviluppare resistenze a compressione da 150 a 200 Mpa e fino a 40 MPa a trazione, che consentono di limitare notevolmente l'apporto del rinforzo passivo. Impiegato prevalentemente nella realizzazione di elementi strutturali con sezioni particolarmente sottili e pannelli di facciata prefabbricati, è caratterizzato da una elevata compattezza nella nanostruttura cristallina da cui deriva una eccellente resistenza agli agenti aggressivi e una elevata durabilità che consente di ridurre le operazioni di manutenzione necessarie nel ciclo di vita. Disponibile in formulazioni differenti a seconda delle prestazioni ricercate (variando inerti e additivi), con fibre metalliche, polimeriche o con resistenza al fuoco migliorata (FM, FO, AF).

¹⁷⁴ P. Richard, M.H. Cheyrezy, "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength", *Concrete Technology: Past, Present, and Future - Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium*, Mehta, San Francisco, 1994, pp. 507- 518.

¹⁷⁵ Silvia Collepari et al., Calcestruzzi innovativi ad altissime prestazioni meccaniche, Atti delle Giornate AICAP, 23-25 Ottobre 1997, Roma, p. 63.

Nanodur (Dyckerhoff/Buzzi Unicem) – Cemento per la realizzazione UHPC di nuova concezione, basato su una miscela ottimizzata di leganti cementizi, con l'aggiunta di cementi microfini e di biossido di silicio amorfo nanostrutturato. La reazione di queste sostanze con l'idrossido di calcio liberato dalla reazione del cemento è assai più rapida e completa rispetto ai fumi di silice e richiede l'impiego di quantità sensibilmente inferiori di fumo di silice rispetto alle miscele tradizionali impiegate per RPC e UHPC.¹⁷⁶ Da ciò derivano vantaggi notevoli in fase di realizzazione del calcestruzzo: i fumi di silice, polveri estremamente fini, risultano difficili da dosare (i calcestruzzi UHPC vengono infatti impiegati prevalentemente nei cantieri dedicati alla prefabbricazione, piuttosto che nella realizzazione di calcestruzzo preconfezionato), mentre in questo caso la produzione può essere semplificata utilizzando quantità sensibilmente inferiori di legante e sfruttando una più elevata reattività, pur mantenendo lo stesso livello di efficienza (190 MPa a compressione e 20 MPa a flessione).

Malta cementizia nanostrutturata.

Le malte nanostrutturate rappresentano un'evoluzione delle malte (adesive e da ripristino) polimero-modificate, tixotropiche e a ritiro contrastato convenzionalmente impiegate. I principali limiti di queste ultime tipologie di prodotti riguardano principalmente la capacità di adesione e il rischio di distacco dovuto a spessori ridotti (tipicamente al di sotto di 1 cm) o ad una non adeguata preparazione del supporto (tramite scalpellatura, saturazione ad acqua). Le comuni malte tixotropiche inoltre, sono generalmente prodotti bicomponente, che richiedono una particolare accuratezza in fase di stoccaggio in cantiere e posa in opera, nonché la necessità di utilizzare prodotti complementari, quali passivanti e promotori di adesione.

La comprensione dei fenomeni di idratazione del cemento, dei migliori modelli di aggregazione dei leganti e l'osservazione delle nanostrutture che si creano nella fase di indurimento del materiale, unite alla possibilità di interagire con tali fenomeni attraverso un accurato dosaggio degli additivi e del rapporto acqua-cemento, hanno conferito una nuova spinta innovativa nel campo delle malte cementizie.

Le malte cementizie nanostrutturante non sono generalmente modificate con nanoparticelle, le proprietà finali sono ottenute piuttosto mediante l'impiego di inerti finissimi, la modifica della nanostruttura della matrice attraverso specifici fillers e la combinazione di diverse tipologie di additivi che possono essere "stressati" in vario modo per ottenere caratteristiche differenti.

Le principali caratteristiche che derivano dalla nano-modificazione riguardano i seguenti fattori:

¹⁷⁶ Per poter avere un'alta resistenza, i leganti vengono miscelati con un rapporto acqua/cemento molto basso, pari a 0,2, insufficiente per la completa idratazione del materiale che, generalmente, richiede un valore non inferiore a 0,25. Pertanto, parti consistenti di cemento e dei costosi fumi di silice non vengono idratate, agendo invece da aggregati.

- Eliminazione di vuoti, compattezza della struttura cristallina (da cui la possibilità di ottenere ampi spessori)
- Migliore legame con aggregati e supporto (resistenza a carbonatazione e cicli di gelo-disgelo, impermeabilità all'acqua)
- Capacità di aderire al supporto non dovuta al potere "adesivo", ma alla capacità di aggrapparsi alla superficie da ripristinare creando resistenti legami alla nanoscala
- Resistenza alle fessurazioni da ritiro igrometrico (piuttosto che espansione contrastata, tipica delle malte tixotropiche), ritiro in fase plastica contrastato dalla eventuale presenza di fibre corte polimeriche.

Le principali ricadute in fase di progetto e di esecuzione riguardano la semplificazione delle operazioni di preparazione del supporto, in quanto non è necessario bagnare le superfici con acqua in pressione fino alla saturazione (è richiesta una quantità di acqua molto minore), né la scalpellatura (tipicamente è richiesta una scabrosità del supporto di almeno 1 cm per garantire la presa), ma solo la sabbiatura delle superfici; la semplicità di posa in opera, poiché non è un prodotto bicomponente (come le malte polimero modificate) e non è richiesto l'uso di armatura con rete elettrosaldata (necessaria normalmente per spessori da 3 a 5 cm) o di prodotti complementari quali passivanti per le armature, primer o rasanti. Le malte nanostrutturate presentano inoltre una notevole flessibilità dimensionale: la possibilità di applicare spessori fino a 3 mm (a differenza delle malte tradizionali che richiedono spessori minimi di 1 cm per evitare il distacco) consente di impiegare tali malte anche come rasante, mentre la capacità di adesione e la resistenza meccanica sono garantite (a seconda della tipologia di prodotto) anche con spessori da 75 mm

Prodotti

Nanocrete (BASF) - Malta cementizia prodotta nelle tipologie R2, a bassa resistenza e a presa rapida (4 h), adatta alla realizzazione di ampi spessori (per ripristini localizzati, riprofilatura e rasante, range da 3-100 mm monostrato); R3, a basso modulo (impiegata per ripristino cls a bassa resistenza), polimeromodificata, applicabile in un ampio range dimensionale (5-75 mm); R4, strutturale, ad alta resistenza meccanica, applicabile a spruzzo o a mano fino a 50 mm senza rete elettrosaldata.

PCI Nanolight (BASF) – Adesivo cementizio per prodotti ceramici adatto ad ogni tipo di sottofondo, introdotto nel 2003 tra le prime applicazioni delle nanotecnologie alla malta cementizia. Impiegabile anche per riparazioni e livellature di pavimenti, è caratterizzato da rapidità di indurimento, mantenimento della lavorabilità (90 min.) ed elevata flessibilità per distribuire e attenuare le tensioni nel sottofondo causate da variazioni di temperatura. PCI Nanosilent, basata sulla stessa tecnologia, è invece una malta autolivellante e fonoimpedente (11 db in 10 mm).

TIPOLOGIA DI IMPIEGO	TIPOLOGIA DI PRODOTTO	PRODOTTO NANOSTRUTTURATO	PRODOTTI PRESENTI SUL MERCATO
Prodotti per applicazioni strutturali	Calcestruzzi in opera	Calcestruzzo 3SC	Chronolia (Lafarge) Gleniumsky (BASF)*
		Calcestruzzo con nanosilice	Gaia (C.Tecnologies)* Stabilgrout (Mapei)*
		Calcestruzzo impermeabile	Acquafin IC (Schomburg)*
	Calcestruzzi prefabbricati	UHPC (Ultra High Performance Concrete)	Ductal (Lafarge) Nanodur (Dyckerhoff)
	Malte da ripristino	Malta cementizia nanostrutturata per applicazioni strutturali	Nanocrete R3 (BASF) Nanocrete R4 (BASF)
Sottofondi e adesivi	Sottofondo per pavimentazioni	Malta cementizia nanostrutturata autolivellante	PCI Nanolight (BASF) PCI Nanolight (BASF)
	Adesivo per rivestimenti	Malta cementizia nanostrutturata adesiva	PCI Nanosilent (BASF)
Prodotti di rivestimento	Malte non strutturali e rasanti	Malta cementizia nanostrutturata per riprofilature	Nanocrete R2 (BASF)
		Rasante fotocatalitico	TX Arca (Italcementi)** TX Aria (Italcementi)**
	Pavimentazioni	Pavimentazione in cls fotocatalitica	TX Aria (Italcementi)**
	Pitture	Pittura fotocatalitica	TX Arca (Italcementi)** TX Aria (Italcementi)**
	Masselli	Masselli autobloccanti fotocatalitici	TX Aria (Italcementi)**
	Pannelli di facciata	Pannelli prefabbricati fotocatalitici	TX Arca (Italcementi)** TX Aria (Italcementi)**

* Additivo per calcestruzzo.

** Il principio attivo fotocatalitico TX brevettato da Italcementi è impiegato per la realizzazione di numerosi prodotti di rivestimento, premiscelati o prefabbricati, quali intonaci, pitture, pavimentazioni in cls, masselli e lastre per pavimentazioni, tamponamenti in cls. Record, Vimark, Magnetti, CIM e Prefabbricati Cividini sono solo alcuni dei partner che collaborano allo sviluppo di prodotti fotocatalitici a base cementizia.

6.2.2. Le tipologie di materiali in fase di sperimentazione

Materiali isolanti a base cementizia

Tra le diverse famiglie di materiali nanostrutturati a base cementizia, un importante settore di ricerca riguarda i compositi ibridi organici-inorganici. All'interno di questa famiglia si possono individuare sia i nanocompositi a base polimerica, in cui possono essere dispersi nanofiller inorganici (nanosilice, polvere di alluminio, ecc.) per migliorare alcune proprietà specifiche del polimero di base, sia altre tipologie di materiali che non impiegano nanoparticelle, ma che sono basati sulla combinazione delle proprietà dei polimeri e di alcuni materiali inorganici (in particolare vetro e

cemento) attraverso la creazione di legami stabili alla nanoscala, simili a catene polimeriche, pur non impiegando filler inorganici di dimensione nanometrica.

All'interno di questa seconda categoria, sembrano particolarmente promettenti le applicazioni di materiali isolanti a base di cemento e poliuretano, che tendono a coniugare le ottime proprietà isolanti del poliuretano con la massa del cemento, attraverso un processo che permette la realizzazione di una schiuma composita, che una volta indurita incorpora microcelle chiuse con all'interno anidride carbonica.

I vantaggi sono dovuti alla versatilità della composizione e al contributo delle tre fasi (polimero, inorganico, gas) che intervengono nei differenti fenomeni fisici di trasporto di vapore d'acqua, di isolamento termico ed acustico, di resistenza al fuoco, di adesione e di leggerezza.



A sinistra, l'isolante in cemento e poliuretano a bassa ed alta densità, riconoscibile dalla grandezza delle celle; a destra, pannello stratificato in cemento con fibra di legno (Celenit) con interposto lo strato isolante (Hypucem).

Il risultato è un materiale attualmente in attesa di passare dalla fase di sperimentazione ad una effettiva produzione su scala industriale, l'*Hypucem (HYbrid PolyUrethane CEMent)*.¹⁷⁷ Si tratta di una schiuma dura, resistente al fuoco e all'acqua e capace di ridurre la dispersione di calore e la diffusione di rumore; in particolare, l'ibrido presenta sia le proprietà di un calcestruzzo cellulare (traspirabilità, leggerezza, discrete resistenze meccaniche a compressione, resistenza a fuoco, buona compatibilità con

¹⁷⁷ Il prodotto in questione, realizzato da un gruppo di ricerca del CNR-IMCB di Portici è vincitore di un premio di 300mila euro all'interno della prima edizione di Polymerchallenge (2007), competizione indetta dal consorzio "Veneto Nanotech".

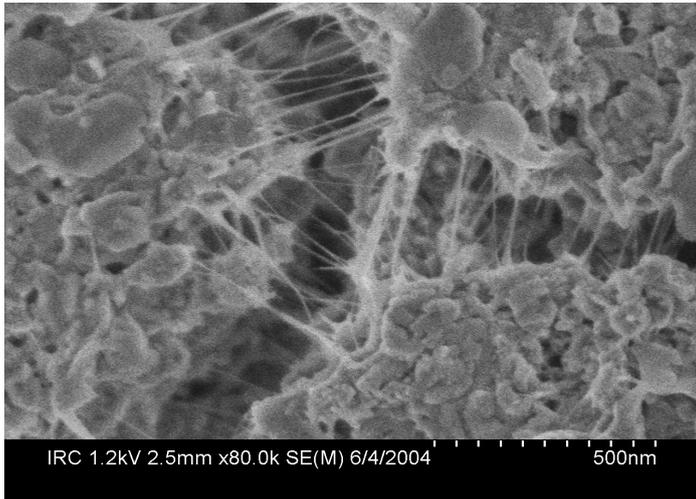
malte, intonaci e calcestruzzi), sia le proprietà di una schiuma polimerica (isolamento termico, assorbimento acustico, facilità di messa in opera e processabilità).

Il vantaggio evidente di una simile tipologia di prodotti è quella di poter coniugare, all'interno di un unico materiale per l'isolamento termico e acustico, eccellenti proprietà di isolamento termico ($\lambda = 0,025 - 0,040$) e di inerzia termica (possono essere realizzati prodotti con masse differenti: 200 - 400 - 750 kg/mc). Altri vantaggi sono legati alla versatilità di impiego: è infatti possibile realizzare il prodotto in fabbrica sotto forma di pannelli prefabbricati o semilavorati, oppure applicarlo in cantiere, spruzzandolo o iniettandolo direttamente sulle pareti. Le applicazioni includono: pannelli isolanti termo/acustici per pareti, solai, coperture e per l'eliminazione dei ponti termici (sono già in fase di sperimentazione, con l'azienda Celenit, casseri a perdere realizzati accoppiando Hypucem con pannelli in cemento e fibra di legno), elementi modulari per le costruzioni industriali, pannelli e mattoni alleggeriti con cui realizzare partizioni e chiusure isolanti e resistenti al fuoco.

Cemento con nanotubi di Carbonio

I nanotubi di carbonio costituiscono una tra le tipologie di nanomateriali più promettenti in ambito edilizio per le eccellenti proprietà elettriche e meccaniche (cfr. par. 3.2.1.). Sono stati condotti diversi studi su campioni di cemento rinforzato con nanotubi di carbonio, nell'ordine dell'1% del peso totale, che in seguito all'ossidazione causata dall'acqua presente nell'impasto e alle reazioni del processo di idratazione creano un legame stabile con la matrice cementizia, portando ad un aumento sensibile della resistenza meccanica sia a compressione (+25%), che a flessione (+8%). L'uso di un cemento rinforzato con nanotubi di carbonio consentirebbe di utilizzare sezioni estremamente ridotte per le strutture in c.a., impiegando una quantità di materiale fino a 10 volte inferiore. Il maggiore ostacolo, oltre al costo per ora molto elevato dei nanotubi, è rappresentato dalla difficoltà di disperdere in maniera omogenea e direzionata i nanotubi nell'impasto cementizio, poiché tendono ad aggregarsi formando microstrutture intrecciate, mentre per sfruttarne le proprietà meccaniche sarebbe necessario orientarli esattamente secondo la direzione delle forze (come un cavo di acciaio o un filamento in fibra di carbonio), andando contro le naturali modalità di

aggregazione “*random*” del materiale.¹⁷⁸ Applicazioni di questo tipo non sono attualmente giunte ad un livello significativo di maturazione; nei casi migliori si è arrivato a dimostrare come è possibile limitare parzialmente le fratture da ritiro attraverso l’impiego dei nanotubi,¹⁷⁹ sono tuttavia necessari ulteriori verifiche per individuare i valori ottimali nel *mix design* dell’impasto cementizio a seconda delle prestazioni ricercate.



I nanotubi di carbonio ben dispersi nella matrice cementizia sono in grado di creare una sorta di “ponte” per prevenire le microfrazture.

Altri filoni di ricerca puntano a sfruttare le particolari caratteristiche elettriche dei nanotubi di carbonio all’interno di matrici cementizie, con l’obiettivo di ottenere un materiale in grado di interagire con l’ambiente esterno attraverso segnali elettrici, ad esempio per comunicare gli stati tensionali interni o la consistenza del conglomerato, ma anche di variare il proprio aspetto attraverso l’interazione con materiali elettrocromici o elettro luminescenti. In questo caso l’orientamento dei nanotubi incide meno sulle proprietà finali, poiché è sufficiente ottenere una distribuzione uniforme all’interno della matrice, evitando addensamenti localizzati.

¹⁷⁸ Una soluzione potrebbe essere quella di realizzare una “rete di nanotubi” da inserire ad esempio in una matrice polimerica o cementizia, come viene fatto per le reti in fibra di carbonio o di vetro, in modo da ottenere dei fogli da utilizzare come membrane in tensostrutture o all’interno di sistemi per il rinforzo strutturale.

¹⁷⁹ Cfr. Jon Makar et al., *Carbon nanotube/cement composites - early results and potential applications*, 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, 22-24 agosto 2005, pp. 1-10.

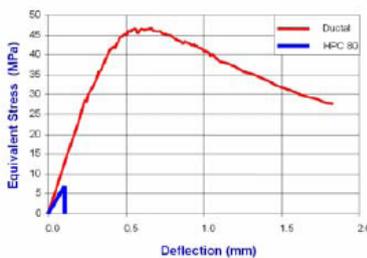
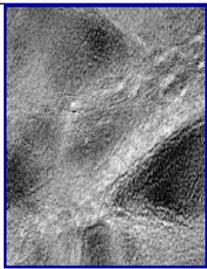
		<p>Canoa in calcestruzzo con nanotubi di carbonio realizzata dagli studenti delle facoltà di chimica, architettura e ingegneria civile dell'Università di Siegen in Germania. La formula è composta da cemento, nanotubi di carbonio, microsilice, ceneri volante, acido silicico pirogenico sintetico, solvente e acqua. I nanotubi, aggiunti nell'1% del peso del calcestruzzo, sono dispersi nell'impasto e contribuiscono ad aumentare la densità del conglomerato riempiendone i microvuoti, consentendo un aumento della resistenza meccanica nell'ordine del 40%. Per aumentare la resistenza a flessione, accanto ai nanotubi, è stata utilizzata un'armatura in fibra di vetro resistente agli alcali (inerte a contatto con il cemento).</p>
lunghezza	4,83 m	
larghezza max.	0,81 m,	
spessore medio	6 mm	
peso	100 kg	

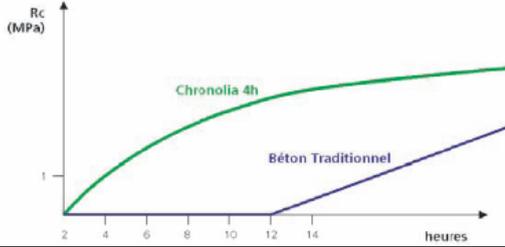
Applicazioni di NEMS (Nano Electronical Mechanical Systems) alle strutture in c.a.

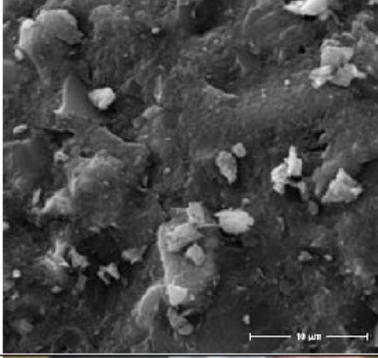
L'applicazione di NEMS alle strutture in c.a. costituisce una risorsa particolarmente interessante finalizzata ad una migliore comprensione del comportamento del calcestruzzo. I NEMS sono dispositivi di dimensioni nanometriche in grado di misurare nel tempo le caratteristiche fondamentali del materiale (densità e viscosità, ritiro, temperatura, umidità, concentrazione di cloro e di CO₂, PH) e monitorare gli sforzi di sollecitazione, la corrosione delle armature o altri danni nella struttura. Attualmente sono sperimentati come additivi nel conglomerato, ma l'obiettivo è di applicarli a posteriori tramite vernici o spray al fine di una migliore distribuzione sulle superfici da monitorare. Oltre al notevole risparmio di risorse, soprattutto in fase di esercizio, dovuto ai costi minori necessari alla manutenzione, la possibilità di un monitoraggio costante renderà possibile una sempre più completa conoscenza della distribuzione delle forze nelle strutture in c.a., permettendo così di ottimizzarne forma e sezione e di utilizzare di conseguenza minori quantità di materiale.

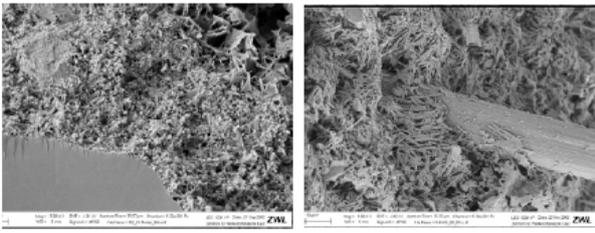
6.2.3. Schedatura di prodotti nanostrutturati a base cementizia in commercio

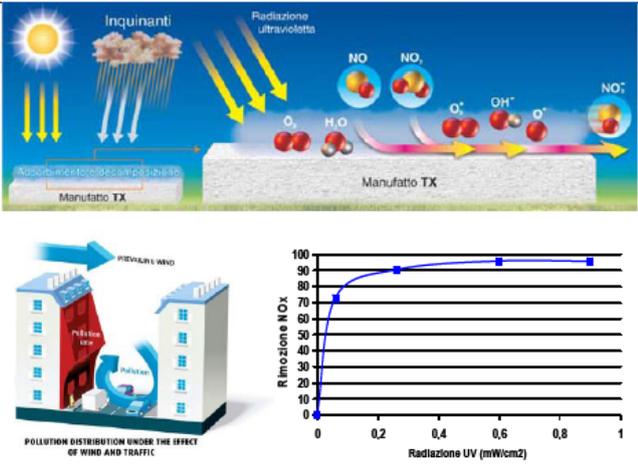
- *Ductal* – Lafarge
- *Chronolia* – Lafarge
- *Nanodur* – Dyckerhoff/Buzzi Unicem
- *Emaco Nanocrete R3* – BASF
- *TX Arca* – Italcementi
- *Tx Aria* – Italcementi

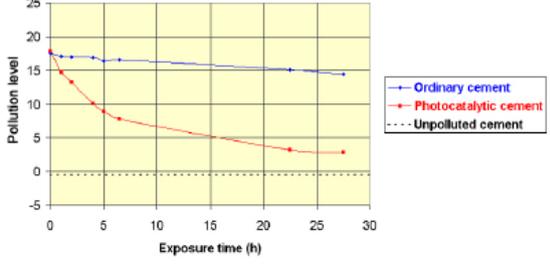
Nome prodotto	
Ductal	
Descrizione del prodotto	
<p>Materiale composito a base cementizia della categoria UHPC (<i>Ultra-High Performance Concrete</i>), con aggiunta di fibre organiche in PVA (<i>Ductal FO</i>) o inorganiche in acciaio (<i>Ductal FM</i>) di dimensione 12 mm circa (diam. 0,2 mm) e aggregati fini (<80 micron). Impiegato principalmente per elementi prefabbricati strutturali, pannelli ed elementi di facciata. La specifica composizione è adattabile a seconda delle condizioni di progetto. L'elevata resistenza meccanica permette di realizzare soluzioni con elementi con spessori ridotti che possono anche non richiedere la presenza di armature.</p>	
Dati azienda produttrice	
	<p>Denominazione: Lafarge Ciments - Ductal Sede: 61, rue des Belles Feuilles BP 40 - 75782 Paris Cedex 16, France fax: +33 1 44 34 12 00 tel: +33 1 44 34 11 11 web: www.ductal-lafarge.com e-mail: ductal@lafarge-ciments.lafarge.com</p>
Caratteristiche e proprietà	
Proprietà meccaniche	
Resistenza a compressione	130 - 230 MPa
Resistenza a flessione	15 - 45 MPa
Resistenza a trazione	3 - 11 MPa
Modulo di Young (E)	45 - 50 GPa
Modulo di Poisson	0,2
Coefficiente di creep	0,2 - 0,5
Durabilità	
Diffusione ioni cloridi (Cl)	$0,02 \times 10^{-12}$ mq/s
Profondità di carbonatazione	<0,1 mm
Permeabilità all'ossigeno	< 10^{-19} mq
Res. gelo/disgelo (300 cicli)	100%
Porosità all'acqua	2-6%
(con trattamento termico)	<1%
Salt-scaling (perdita di residui)	<10 g/mq
Resistenza abrasione I=V/V _{vetro}	1.2
Altre proprietà	
Rapporto a/c ideale	0,19 - 0,23
Densità	2350/2500 kg/mc
Contenuto di fibre	2-4%
Contenuto d'aria inglobato	2 - 4%
Coeff. di espansione termica	11,8 μ m/m°C
Reologia	
Ritiro	<10 - 550 μ m/m
Scorrimento (Cono di Abrams)	50 - 70 cm
Scorrimento (<i>ASTM shocktable</i>)	25 cm
Prestazioni caratterizzanti	
<p>Elevata resistenza meccanica e duttilità Elevata durabilità Ottima lavorabilità (quasi autocompattante) Resistenza agli agenti aggressivi Assenza di fessurazioni da ritiro</p>	
Condizioni di impiego	
Condizioni di stoccaggio	<i>Pre-mix</i> - sacchi da 20-40 kg, "big-bags".500-1,500 kg; additivi, fibre (2-4%)
Stagionatura	a 20°C: $f_c > 30$ Mpa a 24 ore; $f_c > 150$ MPa a 28 giorni trattamento termico a 90°C, 100% U.R: $f_c > 160$ Mpa a 48 h, $f_c > 230$ MPa a 28 gg.
Posa in opera	Miscelazione del <i>pre-mix</i> con additivi e fibre, consigliabile la prefabbricazione (possibilità di realizzare elementi di grandi dimensioni, fino a 30 m), <i>texture</i> estremamente variabile a seconda dei casseri impiegati (ad es. lisci o ruvidi), opportuno trattamento antimacchia per applicazioni facciavista.
Certificazioni	
Prove meccaniche e di durabilità realizzate presso il CSTB (<i>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment</i>)	
Contributo delle nanotecnologie	
<p>Il materiale viene ingegnerizzato attraverso <i>nano-indentation testing</i> (test mediante nanomisuratore di durezza) e analisi nanomeccanica, in modo da ottenere un mix design ottimale. La ridotta dimensione degli aggregati e la presenza di componenti reattivi nell'impasto conferiscono ottime proprietà meccaniche e di durabilità.</p>	
   	
Campo di applicazione	
<p>Elementi strutturali in c.a. Pannelli stampati Elementi di facciata (brise soleil e rivestimenti) Arredo e design di interni</p>	

Nome prodotto				
Chronolia				
Descrizione del prodotto				
Calcestruzzo preconfezionato per getti in opera a maturazione controllata con elevate caratteristiche di lavorabilità con ogni condizione di temperatura e umidità, resistenza caratteristica 25-45 MPa. In grado di raggiungere resistenza elevate in tempi brevi, una volta posto in opera consente di rimuovere le cassature entro 4 ore dal getto e di realizzare gli impalcati superiori dopo appena 6-8 ore, a seconda dei carichi. Viene impiegato sia per la realizzazione di getti strutturali che per realizzazioni e riparazioni pavimentazioni in cls.				
Dati azienda produttrice				
		Denominazione: Lafarge Betons Services Sede: 5, Bld Louis Loucheur - BP 302 FR-92214 Saint Cloud Cedex, France fax : +33 1 49 11 42 96 tel: +33 1 49 11 44 00 web: www.lafarge-betons.com		
Caratteristiche e proprietà		Contributo delle nanotecnologie		
Proprietà meccaniche		Il materiale basa le proprie prestazioni sulla regolazione delle modalità di sviluppo alla nanoscala dei reticoli cristallini presenti nelle fasi di idratazione del cemento; il calcestruzzo fresco è in grado di non avviare il processo di idratazione per le prime due ore dalla realizzazione dell'impasto, con vantaggi per la fase di trasporto. Sono inoltre impiegati additivi acceleranti nanostrutturati in grado di regolare le prestazioni meccaniche nelle diverse fasi di maturazione.		
Resistenza a compressione	2-3 h > 1 MPa 6 h > 5 MPa 12-24 h > 25-45 MPa			
Classe di consistenza	S4-S5			
Sviluppo resistenze (NF EN 206-1)	fmc, 2/fmc, 28 > 0,5			
T. minima per sviluppo resistenze	+5°C			
Durabilità				
Classe di esposizione	XF1 (gelo-disgelo)			
Altre proprietà				
Temperatura cemento per sfruttare le proprietà meccaniche a 2-3 ore dal getto (4-5 dall'impasto)	≥+10°C			
Temperatura ambiente per sfruttare le proprietà meccaniche a 2-3 ore dal getto (4-5 dall'impasto)	≥+5°C			
				
Prestazioni caratterizzanti		Campo di applicazione		
Eccellente reologia e lavorabilità Sviluppo controllato delle fasi di idratazione e dell'evoluzione delle resistenze meccaniche Rapidità di messa in opera Durabilità		Elementi strutturali in c.a. in opera Pavimentazioni industriali in cls Ripristino di superfici orizzontali in c.a.		
Condizioni di impiego				
Condizioni di stoccaggio	Da impiegare entro 2 ore dalla preparazione dell'impasto			
Posa in opera	Non richiede aggiunta di alcun prodotto o a additivo, la scasseratura tra le 4h e le 12h richiede un controllo preventivo in cantiere.			
Temperatura di applicazione	≥+5°C			
Stagionatura	Elementi strutturali 4-48h, pavimentazioni 8-24h (veicoli leggeri o pesanti)			
Certificazioni				
Norma NF EN 206-1:2004 (recepimento francese della norma europea sul calcestruzzo EN 206-1:2002)				

Nome prodotto		
Nanodur		
Descrizione del prodotto		
Cemento nanostrutturato a base di una miscela di leganti cementizi caratterizzati da un accurato controllo della granulometria, adatto all'impiego in calcestruzzi ad altissima resistenza (UHPC) con elevate proprietà meccaniche (resistenti anche a trazione) senza la necessità di aggiunta di fumo di silice. In tal modo la realizzazione dell'impasto dell'UHPC è notevolmente semplificata rispetto alle formulazioni tipiche, consentendo anche la realizzazione di getti in opera.		
Dati azienda produttrice		
	Denominazione: Dyckerhoff AG Hauptverwaltung Sede: Biebricher Straße 69, D-65203 Wiesbaden, Deutschland fax : +49 611 676 1040 tel: +49 611 676 1181 web: www.dyckerhoff.com email: info@dyckerhoff.com	
Caratteristiche e proprietà		Contributo delle nanotecnologie
Caratteristiche fisiche (legante)		Il legante è realizzato con particelle di cemento Portland, leganti cementizi ultra-fini e biossido di silicio amorfo nanostrutturato. Quest'ultimo è in grado di reagire con l'idrossido di calcio liberato nelle prime fasi di idratazione del cemento, contribuendo alla creazione di una struttura più densa del C-S-H., indispensabile per la realizzazione di calcestruzzi UHPC.
Tipologia (EN 197-1)	CEM II/B-S 52,5R	
Percentuale d'acqua richiesta	32,5%	
Presenza iniziale	190 min	
Proprietà meccaniche (legante)		
Resistenza a compressione	25-81 MPa	
Composizione Nanodur-UHPC		
Nanodur	609 Kg/mc	
Sabbia Ø<125 µm	402 Kg/mc	
Sabbia Ø<0,5 mm	442 Kg/mc	
Basalto frantumato	873 Kg/mc	
Fibre di acciaio l>3cm	41 Kg/mc	
Fibre di acciaio l<3cm	61 Kg/mc	
Acqua	158 Kg/mc	
Rapporto acqua cemento	0,26	
Additivo superfluidificante (PCE)	3%	
Proprietà meccaniche Nanodur-UHPC (prisma 16x4x4cm)		
Resistenza a compressione 7gg-40°C	185 MPa	
Resistenza a flessione a 7gg-40°C	21Mpa	
Resistenza a compressione 28 gg-20°C	190 MPa	
Resistenza a flessione a 28 gg-20°C	23 Mpa	
		
		
Prestazioni caratterizzanti		Campo di applicazione
Elevata resistenza meccanica Facilità di messa in opera Durabilità		Elementi strutturali in c.a. in opera o prefabbricati Pavimentazioni industriali in cls Pannelli ed elementi di facciata
Condizioni di impiego		
Posa in opera	Non sono richiesti particolari accorgimenti in cantiere	
Stagionatura	Un trattamento termico a 40°C consente di accelerare lo sviluppo delle proprietà meccaniche (oltre 180 MPa in 7 giorni)	
Certificazioni		
Norma EN 197-1:2000 "Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements".		

Nome prodotto		EMACO NanoCrete R3			
Descrizione del prodotto					
Malta cementizia monocomponente, nanomodificata e polimeromodificata, a basso modulo elastico, leggera, di tipo strutturale R3 secondo EN 1504/3, contenente fibre in poliacrilonitrile.					
Dati azienda produttrice					
		Denominazione: BASF Construction Chemicals Italia Spa Sede: Via Giovanni Garre', 9 -22100 Como (CO) Italia Fax: +39 0422 301185 Tel: +39 0422 301185 web: http://www.basf-cc.it e-mail: infomac@basf.com			
Caratteristiche e proprietà			Contributo delle nanotecnologie		
Proprietà meccaniche			La modifica alla nanoscala della struttura cristallina degli additivi impiegati nel processo di idratazione del cemento e l'utilizzo di filler polimerici leggeri di dimensioni micrometriche dispersi nella matrice consentono di ottenere una malta caratterizzata da elevata elasticità, resistente alle fessurazioni da ritiro e dotata di ottime caratteristiche meccaniche e di lavorabilità.		
Resistenza a compressione, UNI EN 12190.	1 g > 12 MPa 7 gg > 25 MPa 28 gg > 35 MPa				
Modulo elastico, UNI EN 13412.	> 15 GPa				
Adesione al calcestruzzo, UNI EN 1542	≥ 1,5 MPa				
Durabilità					
Resistenza ai cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti misurata come adesione UNI EN 1542 dopo 50 cicli UNI EN 13687/1	≥ 1,5 MPa				
Resistenza alla carbonatazione accelerata, UNI EN 13295.	≥ 2 MPa				
Resistenza ai cicli termici senza sali disgelanti misurata come adesione UNI EN 1542 dopo 50 cicli UNI EN 13687/4	≥ 1,5 MPa				
Resistenza alla carbonatazione accelerata, UNI EN 13295.	Specificata superata				
Impermeabilità all'acqua misurata come coefficiente di assorbimento capillare, UNI EN 13057.	≤ 0,5 kgm ⁻² h ^{-0,5}				
Resistenza alla fessurazione - O Ring test - Canaletta triangolare (DIN type)	Nessuna fessura dopo 180 giorni				
Altre proprietà					
Densità	1800 kg/mc		Campo di applicazione		
Prestazioni caratterizzanti			Ripristino elementi tecnici in cls travi e pilastri; solai in latero-cemento; manufatti in calcestruzzo faccia a vista muri di sostegno; pareti in c.a; Rasatura di superfici murarie		
Condizioni di impiego					
Condizioni di stoccaggio	Conservare in luogo asciutto e protetto a temperatura compresa tra 5 e 30°C				
Posa in opera	Pulizia della superficie con acqua a bassa pressione, non è richiesta la scalpellatura, ma solo la sabbatura del supporto. Non è richiesto l'uso di armatura con rete elettrosaldata (anche in caso di spessori elevati) o di prodotti complementari quali passivanti per le armature, primer o rasanti				
Temperatura di applicazione	Compresa tra 5 e 35°C (tra 5 e 10°C sviluppo delle resistenze più lento)				
Stagionatura	Nebulizzazione con acqua in condizioni di ambiente secco e ventilato				
Certificazioni					
Norma EN 1504-3:2005 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo"					

Nome prodotto			
TX Aria			
Descrizione del prodotto			
Legante a base di cemento Portland tipo I (disponibile nelle formulazioni CW e CG, a base di cemento bianco o grigio) ad altissima resistenza normalizzata. Contiene il 95-100% di clinker bianco, specifici componenti ad elevata attività fotocatalitica a base di biossido di titanio (TiO ₂) ed eventuali costituenti secondari minori. In presenza di radiazione UV si attiva un forte processo ossidativo che porta alla decomposizione di determinate sostanze organiche e inorganiche quando queste vengono a contatto con la superficie del manufatto cementizio. Le proprietà fotocatalitiche sono efficaci anche in ambienti interni.			
Dati azienda produttrice			
 Italcementi Italcementi Group		Denominazione: Italcementi S.p.A. Sede: Via G. Camozzi, 124, 24121 Bergamo, Italia Fax: +39 035 396 111 Tel: +39 035 244 905 web: www.italcementi.it e-mail: info@italcementi.it	
Caratteristiche e proprietà		Contributo delle nanotecnologie	
Caratteristiche fisiche		<p>Aggiunta di particelle di biossido di titanio di dimensioni nanometriche in grado di attivare il processo fotocatalitico. L'impiego di nanoparticelle garantisce una maggiore attività fotocatalitica grazie all'elevato rapporto superficie/volume, tuttavia le formulazioni attualmente in commercio prevedono l'utilizzo di particelle micrometriche, con risultati soddisfacenti per la fotocatalisi e un costo ridotto.</p> 	
Tipologia (EN 197-1)	CEM I-52,5 N		
Presa iniziale	≥ 45 min		
Espansione	≤ 10 mm		
Perdita al fuoco	≤ 5%		
Residuo insolubile	≤ 5%		
Solfati	≤ 4%		
Cloruri	≤ 0,1%		
Proprietà meccaniche			
Resistenza a compressione a 2 gg	≥ 30 Mpa		
Resistenza a compressione a 28 gg	≥ 52,5 Mpa		
Altre proprietà			
Attività fotocatalitica (modello teorico PICADA)	200 mc/mq		
Sostanze inquinanti abbattute dalla fotocatalisi:			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Composti inorganici (NO_x, SO_x, NH₃, CO, CH₃S, H₂S) ▪ VOC (benzene, toluene, fenolo, ecc.) ▪ Composti organici clorurati (diossine, clorofenolo, ecc.) ▪ Composti aromatici ▪ Acetaldeide ▪ Formaldeide ▪ Altri composti (batteri, virus, PM) 			
Prestazioni caratterizzanti		Campo di applicazione	
Elevata resistenza meccanica Durabilità Effetto antinquinamento Autopulibilità		Intonaci interni ed esterni Pavimentazioni in calcestruzzo e masselli autobloccanti Rivestimenti di pavimentazioni e strade in asfalto Piastrine cementizie e tegole in calcestruzzo Pitture cementizie Blocchi per muratura in calcestruzzo Pannelli ed elementi di rivestimento in calcestruzzo Barriere stradali fonoassorbenti	
Condizioni di impiego			
Condizioni di stoccaggio	A seconda dell'applicazione		
Posa in opera	Impiegato in prodotti preconfezionati o prefabbricati (strato superficiale), non sono richiesti particolari accorgimenti in fase di posa in opera		
Stagionatura	A seconda dell'applicazione		
Certificazioni			
Progetto di norma UNI per introdurre la certificazione dell'attività fotocatalitica			

Nome prodotto		TX Arca																																			
Descrizione del prodotto																																					
Legante a base di cemento Portland tipo I ad altissima resistenza normalizzata. Contiene il 95-100% di clinker bianco, specifici componenti ad elevata attività fotocatalitica a base di biossido di titanio (TiO ₂) ed eventuali costituenti secondari minori. In presenza di radiazione UV si attiva un processo ossidativo che porta alla decomposizione dei microorganismi che sporcano le superfici degli edifici, la cui crescita è favorita dall'accumulo di grassi e polveri, sfruttando la pioggia per rimuoverli una volta resi inerti.																																					
Dati azienda produttrice																																					
		Denominazione: Italcementi S.p.A. Sede: Via G. Camozzi, 124, 24121 Bergamo, Italia Fax: +39 035 396 111 Tel: +39 035 244 905 web: www.italcementi.it e-mail: info@italcementi.it																																			
Caratteristiche e proprietà			Contributo delle nanotecnologie																																		
Caratteristiche fisiche			Aggiunta di particelle di biossido di titanio di dimensioni nanometriche in grado di attivare il processo fotocatalitico. L'impiego di nanoparticelle garantisce una maggiore attività fotocatalitica grazie all'elevato rapporto superficie/volume, tuttavia le formulazioni attualmente in commercio prevedono l'utilizzo di particelle micrometriche, con risultati soddisfacenti per la fotocatalisi e un costo ridotto.																																		
Tipologia (EN 197-1)		CEM I-52,5 N																																			
Presa iniziale		≥ 45 min																																			
Espansione		≤ 10 mm																																			
Perdita al fuoco		≤ 5%																																			
Residuo insolubile		≤ 5%																																			
Solfati		≤ 4%																																			
Cloruri		≤ 0,1%																																			
Proprietà meccaniche																																					
Resistenza a compressione a 2 gg		≥ 30 Mpa																																			
Resistenza a compressione a 28 gg		≥ 52,5 Mpa																																			
Altre proprietà																																					
Sostanze rimuovibili dalla superficie in seguito all'azione fotocatalitica:																																					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Microrganismi, funghi, polveri ▪ Composti inorganici ▪ Composti organici ▪ Altri composti (batteri, virus, PM) 																																					
			 																																		
			 <table border="1"> <caption>Pollution level vs Exposure time (h)</caption> <thead> <tr> <th>Exposure time (h)</th> <th>Ordinary cement</th> <th>Photocatalytic cement</th> <th>Unpolluted cement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>14</td> <td>10</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>13</td> <td>7</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>12</td> <td>5</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>11</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>10</td> <td>3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>9</td> <td>2</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>			Exposure time (h)	Ordinary cement	Photocatalytic cement	Unpolluted cement	0	15	15	0	5	14	10	0	10	13	7	0	15	12	5	0	20	11	4	0	25	10	3	0	30	9	2	0
Exposure time (h)	Ordinary cement	Photocatalytic cement	Unpolluted cement																																		
0	15	15	0																																		
5	14	10	0																																		
10	13	7	0																																		
15	12	5	0																																		
20	11	4	0																																		
25	10	3	0																																		
30	9	2	0																																		
Prestazioni caratterizzanti			Campo di applicazione																																		
Elevata resistenza meccanica Durabilità Autopulibilità			Elementi strutturali prefabbricati o gettati in opera Getti faccia a vista Pannelli prefabbricati Pavimentazioni in cls																																		
Condizioni di impiego																																					
Condizioni di stoccaggio		A seconda dell'applicazione																																			
Posa in opera		Impiegato in prodotti preconfezionati o prefabbricati, non sono richiesti particolari accorgimenti in fase di posa in opera																																			
Stagionatura		A seconda dell'applicazione																																			
Certificazioni																																					
Norma UNI EN 197-1:2006, "Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni"																																					

7. PRODOTTI CONVENZIONALI E NANOSTRUTTURATI A CONFRONTO

7.1. Premessa metodologica: strumenti di analisi e modalità di confronto tra opzioni tecnologiche

7.1.1. Parametri di confronto tra materiali cementizi tradizionali e nanostrutturati

Gli aspetti innovativi che caratterizzano le nuove classi di prodotti per l'edilizia sviluppati con il contributo delle nanotecnologie pongono in primo piano la necessità di individuare i principali fattori che ne possono determinare il successo nei confronti di prodotti alternativi basati su tecnologie convenzionali.

I prodotti nanostrutturati tendono infatti a configurarsi generalmente come prodotti "sostitutivi" rispetto a quelli convenzionali, in grado di offrire *plus* prestazionali che restano in alcuni casi non percepibili nella connotazione fisica del materiale stesso, oppure nascosti dietro modalità applicative spesso analoghe (ciò è particolarmente evidente nel caso di alcuni vetri speciali o delle pitture e dei rasanti fotocatalitici). Molti di questi prodotti inoltre, come si è visto, sembrano essere capaci di coniugare l'offerta di prestazioni più elevate ed affidabili, o addirittura inedite, con un uso più efficiente delle risorse materiali ed energetiche nell'arco della loro vita, reso possibile da un lato dalla capacità di "nanostrutturare" la materia e dall'altro di comprendere i fenomeni che legano le caratteristiche fisico-chimiche alla nanoscala con le proprietà finali di materiali e prodotti.

Tuttavia, per comprendere effettivamente i livelli di eco-efficienza espressi da tali tipologie di prodotti, le opportunità legate ad una progressiva diffusione sul mercato, nonché gli effettivi vantaggi per progettisti, imprese e utenti finali, appare opportuno attuare un confronto tra prodotti convenzionali e "*competitors*" nanostrutturati che da un lato prenda in considerazione le principali problematiche di progetto connesse con l'impiego di prodotti generalmente ancora poco diffusi, basata su una conoscenza approfondita delle caratteristiche dei materiali e delle prestazioni espresse in condizioni d'uso (e dunque sulla definizione dei criteri di progetto che permettono di ottimizzarne l'impiego in funzione dell'applicazione prevista) e dall'altro sia in grado di individuare le ricadute ambientali lungo tutto il ciclo di vita, facendo emergere gli eventuali fattori di rischio per l'uomo e l'ambiente determinati da un aumento dei livelli produttivi su scala industriale.

7.1.2. Indicatori sintetici per valutazioni preliminari al progetto: gli indicatori di sostenibilità e la metodologia LCA

A partire dagli anni '90, la valutazione degli impatti ambientali dei prodotti industriali per l'edilizia è stata supportata da diverse tipologie di strumenti, finalizzati principalmente a desumere i dati riguardanti gli impatti nelle varie fasi del ciclo di vita, secondo un approccio noto come LCA (*Life Cycle Assessment*).¹⁸⁰ Il principale obiettivo è quello di ottenere dati quantitativi relativi ad alcuni indicatori chiave, che possano restituire indici sintetici attraverso cui valutare alternative tecnologiche da impiegare negli edifici.¹⁸¹

La presenza di numerosissime tipologie di materiali e processi produttivi differenti, ciascuno caratterizzato da diverse categorie di impatto ambientale, ha spinto ad individuare alcune categorie di impatto attraverso cui operare valutazioni e confronti, raggruppando i diversi effetti derivanti dalle varie fasi del ciclo di vita sotto alcuni indicatori chiave "aggregati", riconosciuti a livello internazionale e quindi comprensibili alle diverse tipologie di utenza. Un passaggio successivo (generalmente facoltativo) consiste nel "normalizzare" i diversi indicatori aggregati per ottenere un "punteggio unico" (*single score*) che agevoli il confronto tra prodotti differenti.¹⁸²

Indicatore	Denominazione	Unità di misura
Effetto serra	GWP (Global Warming Potential)	g di CO ₂ equivalenti
Consumo di energia	EE (Embodied Energy) GER (Gross Energy Requirement)	MJ equivalenti
Acidificazione	AP (Acidification potential)	g di SO ₂ equivalenti
Eutrofizzazione	EP (Eutrophication Potential)	g di O ₂ equivalenti g di PO ₄ equivalenti
Smog fotochimico	POCP (Photochemical Ozone Creation Potential)	g di C ₂ H ₄ equivalenti
Assottigliamento dello strato di ozono	ODP (Ozone Depletion Potential)	g di CFC ₁₁ equivalenti
Consumo di materie prime, consumo di acqua, rifiuti prodotti		g

Principali indicatori aggregati utilizzati nei diversi modelli di valutazione.

¹⁸⁰ L'LCA, introdotta nel 1990 dal SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), è un metodo di analisi sistematica che valuta gli impatti ambientali di un prodotto (compreso l'edificio), di un processo o di un servizio durante tutto il suo ciclo di vita, attraverso l'individuazione dei flussi di materia ed energia in ingresso (consumi) e in uscita (emissioni), permettendo una valutazione oggettiva basata su dati quantitativi. Cfr. Monica Lavagna, *Life Cycle Assessment in edilizia. Progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*, Hoepli, Milano, 2008, p. 124.

¹⁸¹ Nel caso della valutazione ambientale degli edifici nel loro complesso, negli anni i principali requisiti necessari a definirne i livelli di sostenibilità sono stati formalizzati fino a definire specifiche metodologie multicriterio sviluppate nei diversi contesti nazionali (ad es. BREEAM nel Regno Unito, LEED negli Stati Uniti, HQE in Francia, Protocollo Itaca in Italia, ecc.), che tendono ad attribuire un punteggio singolo frutto dell'elaborazione di differenti indicatori, senza fare riferimento necessariamente alle fasi del ciclo di vita. Tuttavia il proliferare di strumenti locali basati sulla logica del "metodo a punteggio" ha reso difficile l'armonizzazione delle norme a livello internazionale.

¹⁸² È questo il caso, ad esempio, del metodo Eco-indicator 99.

I numerosi software e strumenti di valutazione esistenti (ad es. Boustead, SimaPro, TEAM, DEAM, US BEES, LCAid, LISA, ecc.) si riferiscono sostanzialmente a questi stessi parametri di base, arrivando a definire degli indici sintetici che consentono di valutare le diverse tipologie di impatto lungo tutto il ciclo di vita.

Accanto a questi strumenti di valutazione, che permettono una valutazione del ciclo di vita del materiale basata su una filosofia “*cradle to cradle*” (dalla culla alla culla, che sostituisce la concezione “*cradle to grave*” – ossia dalla culla alla tomba – sottolineando come la massimizzazione del riciclaggio a fine vita sia strettamente collegata alle scelte progettuali effettuate a monte del processo),¹⁸³ nel campo dei prodotti per l'edilizia cominciano oggi a diffondersi le certificazioni volontarie delle stesse industrie, che attraverso strumenti come l'EPD (*Environmental Product Declaration*) pubblicano i dati relativi agli impatti ambientali *from cradle to gate*, “dalla culla al cancello” (della fabbrica), per garantire l'eco-efficienza di quella parte del ciclo di vita che ricade sotto la propria diretta responsabilità.¹⁸⁴

Generalmente le informazioni desumibili dalle dichiarazioni ambientali di prodotto si rivelano particolarmente affidabili, poiché per ottenere questo tipo di etichettature è necessaria la verifica di un organismo indipendente e gli impatti stessi devono essere valutati in conformità con le specifiche di prodotto (PCR, *Product Category Rules*,¹⁸⁵ definite su base internazionale) in modo da rendere possibile il confronto tra diversi prodotti appartenenti alla stessa categoria.

La presenza di etichettature di questo tipo consente di ottenere informazioni attendibili rispetto a categorie di impatto altrimenti difficilmente individuabili da parte dei progettisti, poiché riguardano processi industriali complessi relativi all'intera filiera produttiva, dall'escavazione e reperimento delle materie prime, al loro trasporto, fino ai processi di lavorazione in fabbrica.¹⁸⁶

Gli impatti prodotti nelle fasi successive (trasporto, messa in opera, gestione, dismissione e riciclaggio) richiedono necessariamente di essere considerati in relazione al caso specifico oggetto dello studio LCA, considerando la variabilità dei

¹⁸³ Cfr. William McDonough, Michael Braungart, *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, 2002, tr. It. *Dalla culla alla culla. Come conciliare tutela dell'ambiente, equità sociale e sviluppo*, Blu, Torino 2003.

¹⁸⁴ L'EPD appartiene alla categoria di etichette ambientali di tipo III (ISO 14025) e forniscono dati quantitativi sul profilo ambientale di un prodotto calcolato secondo le procedure di LCA così come codificate nel corpo di norme ISO 14040. Cfr. Monica Lavagna, cit. p. 142.

¹⁸⁵ La denominazione ha sostituito quella precedente di PSR, *Product Specific Requirements*, si tratta di un documento che definisce per ogni categoria di prodotto i dati da raccogliere per la realizzazione dell'LCA, la metodologia di calcolo e i risultati da presentare. I PCR sono redatti a cura dello *Swedish Environmental Management Council*, l'organismo che gestisce il sistema EPD a livello internazionale.

¹⁸⁶ Nel settore delle costruzioni è stata elaborata una norma specifica sulle EPD dei prodotti edilizi: la ISO 21930:2007, *Sustainability in building constructions. Environmental declaration of building constructions*.

fattori che concorrono a determinarli. Una volta definiti i confini del sistema (ossia le fasi del processo considerate), l'esattezza della valutazione finale dipende essenzialmente dalla correttezza dell'impostazione della fase cosiddetta di *inventory* (definita dalla norma ISO 14041), nella quale vengono quantificati i flussi in entrata e in uscita per ogni fase del processo.¹⁸⁷

Uno dei principali problemi nello sviluppo di LCA riguarda la necessità di un aggiornamento continuo, in modo da poter essere al passo con l'innovazione nel campo dei materiali. Nel caso ad esempio di materiali nanostrutturati che contengono nanoparticelle, nessun software o database potrebbe valutare con esattezza a quali impatti potrebbe produrre nel ciclo di vita, trattandosi di interrogativi scientifici ancora aperti, arrivando quindi a valutazioni sbagliate che non tengono conto di alcune "incognite" che potrebbero però avere un peso decisamente rilevante, come la pericolosità per l'uomo e per l'ambiente in fase di produzione e di esercizio.

È opinione diffusa che negli anni futuri le nanotecnologie avranno un ruolo di primo piano nello sviluppo di prodotti cementizi innovativi sempre più efficienti, sia dal punto di vista delle prestazioni espresse che degli impatti ambientali generati. Nel caso dei materiali cementizi tuttavia, l'avanzamento della ricerca ha dimostrato come l'equazione nanotecnologie=nanoparticelle sia quantomeno limitante, considerato il ruolo delle nanotecnologie per la comprensione dei fenomeni fisico-chimici responsabili delle proprietà finali dei materiali, il contributo degli strumenti di monitoraggio e *testing* alla nanoscala finalizzato all'ingegnerizzazione del cemento e del calcestruzzo.

La metodologia proposta intende affiancare, attraverso lo studio di un caso applicativo, lo sviluppo di soluzioni tecniche innovative basate sull'impiego di prodotti cementizi nanostrutturati alla definizione degli impatti ambientali lungo il ciclo di vita, comparandoli con quelli relativi a soluzioni tecniche realizzate con prodotti convenzionali.

¹⁸⁷ Tale impostazione valutativa è condivisa dal gruppo CEN TC/350, *Sustainability of construction works. Framework for assessment of buildings*, che porta avanti il progetto normativo legato all'armonizzazione degli strumenti di valutazione ambientale degli edifici (ISO/TS 21931-1:2006), in modo da definire regole comuni sovranazionali e di introdurre l'approccio al ciclo di vita basato su indicatori sintetici, integrando nella valutazione ambientale dell'edificio la certificazione EPD. Tale metodologia è preferita ad un approccio di tipo multicriterio basato su punteggi singoli (tipo Ecolabel) per la difficoltà di stabilire soglie valide a livello internazionale per le diverse tipologie di edifici e per lo scarso peso dato all'eco-compatibilità dei materiali. Cfr. Monica Lavagna, "Dall'efficienza energetica all'eco-efficienza", in *Costruire in laterizio*, n. 125, settembre/ottobre 2008, pp. XIII-XVI.

7.2. I materiali UHPC - Ultra High Performances Concrete

7.2.1. Il contributo degli UHPC all'eco-efficienza del processo edilizio

Prodotto nanostrutturato selezionato: *Ductal* di Lafarge, materiale composito a base cementizia per applicazioni strutturali della categoria UHPC (*Ultra High Performance Concrete*)

Obiettivo: confronto del livello di eco-efficienza nel ciclo di vita tra *Ductal* e calcestruzzo convenzionale per la realizzazione di elementi strutturali in un edificio per uso civile.

Il materiale scelto per il confronto è un calcestruzzo strutturale fibrorinforzato sviluppato a partire dalla metà degli anni novanta da un consorzio costituito da Lafarge (produttore di materiali da costruzione), Bouygues (*contractor* nel campo dell'ingegneria civile e strutturale) e Rhodia (produttore di materiali chimici), brevettato nel 1998¹⁸⁸ e successivamente commercializzato con il nome di *Ductal*. Si tratta di un UHPC¹⁸⁹ (*Ultra High Performance Concrete*) caratterizzato da prestazioni meccaniche molto elevate e ottime caratteristiche di durabilità.

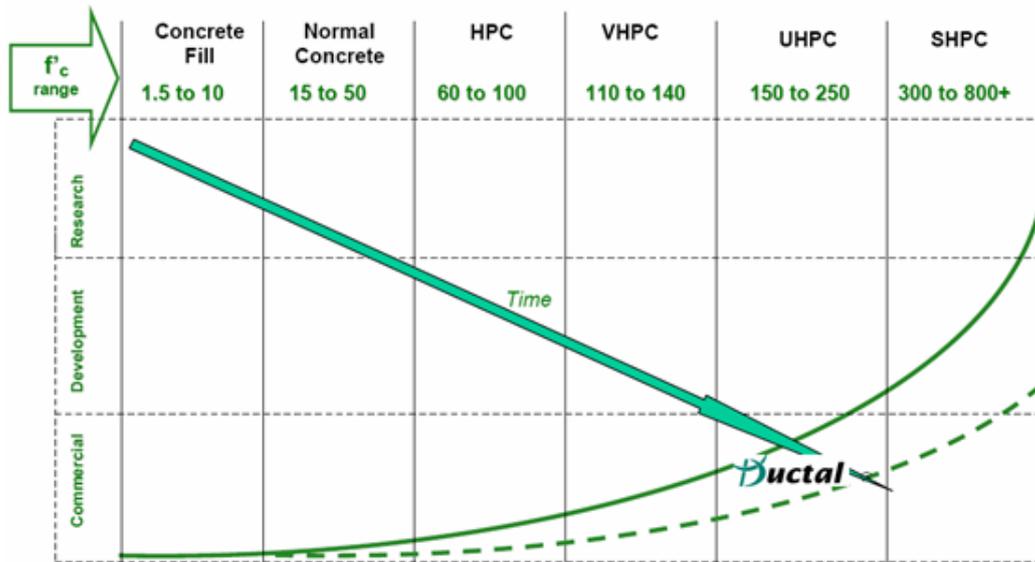
Il *Ductal* è stato selezionato tra i prodotti analizzati sia in relazione alle caratteristiche del materiale, sia agli obiettivi ultimi del confronto, ossia la verifica dei livelli prestazionali raggiungibili grazie alla nanostrutturazione di un materiale cementizio e l'eco-efficienza nel ciclo di vita, considerando i rischi collegati all'impiego di prodotti contenenti nanomateriali.

I principali fattori che hanno orientato la scelta sono i seguenti:

- Sufficiente grado di maturazione della tecnologia, che garantisce livelli di affidabilità accettabili in seguito alle numerose applicazioni realizzate in Francia, Stati Uniti, Giappone, Canada e Corea del Sud
- Assenza di nanoparticelle aggiunte, materiale ottenuto attraverso la selezione e la nano-ingegnerizzazione del mix-design del cemento
- Capacità di incidere sui parametri legati all'eco-efficienza per le prestazioni esibite (riduzione del contenuto materico a parità di prestazioni, elevata durabilità)
- Prodotto non ancora commercializzato in Italia, con possibilità di sviluppo di diverse linee di ricerca future

¹⁸⁸ La ricerca partiva dal miglioramento delle caratteristiche proprie degli RPC (*Reactive Powder Concrete*).

¹⁸⁹ In Francia BFUP (*Betons Fibres a Ultra-hautes Performances*).



Livelli di sviluppo delle tipologie di calcestruzzi in funzione della resistenza meccanica (fonte: documentazione tecnica Lafarge)

Obiettivi alla base dello sviluppo degli UHPC

- Miglioramento dell'omogeneità dell'impasto attraverso l'eliminazione degli aggregati grossi
- Miglioramento della densità attraverso l'ottimizzazione del mix granulometrico
- Miglioramento della microstruttura attraverso un trattamento termico successivo alla posa
- Miglioramento della duttilità attraverso l'impiego di fibre di adeguate dimensioni
- Massima analogia con le tecnologie convenzionali in fase di mix e di getto

Principali ambiti di ricerca coinvolti

- Ingegnerizzazione del materiale (strumenti di analisi e misurazione: caratterizzazione aspetti meccanici tramite nanoindenter, modifica delle nanostrutture per il controllo della durabilità)
- Studio di e dosaggio di specifici componenti attivi (additivi fluidificanti e acceleranti)
- Mix-design e aspetti applicativi (sviluppo di processi produttivi *ad hoc* per ottenere mix-design specifici in funzione delle prestazioni ricercate)

Le problematiche legate all'eco-efficienza, ma anche alla competitività economica degli UHPC rispetto alle tecnologie convenzionali del cemento armato sono da qualche anno oggetto di studio da parte degli stessi produttori, finalizzato da un lato all'ottenimento di un EPD (*Environmental Product Declaration*) che certifichi il consumo di risorse materiali, energia e i livelli di emissioni in fase di produzione¹⁹⁰ e dall'altro alla necessità di offrire una risposta efficace ai vari *competitors*, dato il costo molto alto del materiale per unità di prodotto.¹⁹¹

¹⁹⁰ Considerando cioè le fasi di lavorazione dall'estrazione delle materie prime alla produzione dei diversi componenti di base del prodotto. Risulterebbe complesso includere le successive fasi del ciclo di vita che dipendono in maniera significativa dalle condizioni applicative, essendo il cemento un materiale impiegato nella realizzazione di numerosi elementi costruttivi. Cfr. nel caso del cls convenzionale, EPD. Bilancio di Sostenibilità, Buzzi Unicem, 2004; per il *Ductal*, Rapport Ecobilan, Lafarge, 2005.

¹⁹¹ Il primo studio è stato realizzato confrontando le diverse tecnologie convenzionali impiegate nella costruzione di ponti e passerelle, con soluzioni innovative realizzate in *Ductal*, dimostrando non solo la convenienza di queste ultime dal punto di vista degli impatti ambientali, ma anche la possibilità di essere competitivi dal punto di vista economico.

L'obiettivo della valutazione degli impatti ambientali e delle ricadute economiche lungo l'intero ciclo di vita è strettamente connesso alla capacità da parte dei progettisti di realizzare soluzioni tecniche in grado di ottimizzare le prestazioni espresse dal materiale, che si discostano in maniera significativa da quelle dei calcestruzzi convenzionali, e che richiedono un approccio progettuale completamente differente.¹⁹² D'altra parte, la valutazione degli impatti prodotti lungo l'intero ciclo di vita, essenziale per una corretta valutazione dell'eco-efficienza degli UHPC rispetto alle tecnologie convenzionali del c.a., può avvalersi solo in parte dei tradizionali strumenti propri dell'LCA, data la mancanza di database appropriati, ad esempio per gli scenari di fine vita (le prime applicazioni risalgono infatti alla seconda metà degli anni '90), nonché il carattere sperimentale delle applicazioni strutturali su edifici civili (la realizzazione di elementi strutturali in UHPC è finora limitata a ponti, passerelle e alcuni edifici ad uso industriale), che impedisce ad esempio una esatta valutazione delle operazioni cantieristiche necessarie (in termini di numero di addetti, macchinari, lavorazioni specifiche, ecc.)¹⁹³ e richiede di essere supportata da casi applicativi concreti. Inoltre, l'attuale diffusione del materiale (commercializzato finora solo in Francia, Stati Uniti e Giappone, ma con un ridotto numero di stabilimenti produttivi), non permette di effettuare valutazioni realistiche sull'incidenza delle fasi di trasporto (sia in fase di pre-produzione che di trasporto in cantiere degli elementi finiti) che risulterebbero non significative dei vantaggi espressi dal materiale in sé, ma piuttosto condizionate dalle elevate distanze dai siti di approvvigionamento.

Nel caso del *Ductal*, a partire dal 2002 sono state realizzate le prime applicazioni in Francia e negli Stati Uniti, impiegandolo in elementi strutturali prefabbricati (*Ductal FM*), in pannelli di facciata ed elementi di schermatura (*Ductal FO*).

Le sperimentazioni e le prove effettuate hanno consentito a tali paesi "pionieri" di costituire un *know-how* di base necessario allo sviluppo di soluzioni tecniche e progetti sempre più innovativi. In Francia, in particolare, un lavoro congiunto tra Lafarge, Bouygues, CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*), AFGC, (*Association Française de Génie Civil*) e Setra (*Service d'études techniques des routes et*

ottimizzando al massimo le proprietà del materiale in fase di progetto. Cfr. Mouloud Behloul et al., *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete: A Material for Green Buildings*, Proceedings of 7th International Congress "Concrete: Construction's Sustainable Option", Dundee, Scozia, 8-10 luglio 2008.

¹⁹² Ricercatori del MIT hanno cominciato ad elaborare un software in grado di calcolare le variabili sensibili nel progetto con calcestruzzi UHPC, in modo da sfruttarli al massimo delle loro potenzialità.

¹⁹³ Si tratta peraltro di parametri spesso non considerati nell'LCA degli edifici poiché estremamente variabili in funzione del caso specifico e quindi difficilmente applicabili a valutazioni di carattere più generale.

autoroutes), ha portato alle prime linee guida¹⁹⁴ per la progettazione con calcestruzzi UHPC, consentendo un notevole passo in avanti verso una standardizzazione e una maggiore conoscenza di questa tipologia di prodotti innovativi, individuando le caratteristiche e le proprietà del materiale, consigli per la progettazione, e fornendo istruzioni dettagliate per la preparazione degli impasti, le prove di laboratorio, le modalità di trasporto e posa in opera. Da questo punto di vista, emerge la necessità di finalizzare lo studio principalmente secondo due direzioni:

- Definizione dei principali *criteri di progetto* per la realizzazione di elementi strutturali in costruzioni ad uso civile, volti all'ottimizzazione delle caratteristiche degli UHPC e delle fasi applicative in cantiere, attraverso una simulazione progettuale supportata dai dati desumibili dalle pubblicazioni scientifiche esistenti e dall'applicazione di software per il calcolo strutturale.¹⁹⁵
- Analisi degli *impatti ambientali* e dei *vantaggi attesi* nelle varie fasi del ciclo di vita, esprimendo, laddove possibile, dati quantitativi desunti da indicatori sintetici che possano mettere a confronto le diverse alternative tecniche ipotizzabili e facendo emergere i principali dati di controllo utili alla definizione di uno studio LCA specifico relativo agli UHPC.

7.2.2. Definizioni ed elementi costitutivi

Dal punto di vista definitorio, è possibile considerare l' UHPC un materiale composito, costituito da una matrice cementizia e un rinforzo a fibra corta in fibre polimeriche o metalliche non orientate, che contribuiscono al miglioramento delle proprietà meccaniche e della durabilità. Lo sviluppo di calcestruzzi ad altissime prestazioni è stato reso possibile, oltre che dall'evoluzione nel campo degli additivi, principalmente dalla possibilità di osservare con precisione il comportamento delle nanostrutture responsabili del processo di idratazione del cemento e di selezionare un *mix-design* specifico bilanciando la tipologia e la dimensione degli inerti, il rapporto acqua-cemento e gli additivi da impiegare. Il rapporto acqua-cemento molto basso (0,19 - 0,21, a fronte dei rapporti convenzionali da 0,45 a 0,60) consente di raggiungere particolari classi di resistenza, ma senza un controllo della tipologia e dimensione degli inerti (particolarmente fini: fumo di silice, quarzo macinato e sabbia del diametro massimo di

¹⁹⁴ Setra, AFGC, *Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations provisoires*, Setra, Gennaio 2002.

¹⁹⁵ Lo studio attraverso software e fogli di calcolo specifici è stato effettuato con la collaborazione del centro studi PLINIVS dell'Università di Napoli Federico II.

60 micron) e delle fasi di idratazione (in particolare del comportamento volumetrico del C-S-H), non sarebbe stato possibile raggiungere l'insieme delle proprietà finali.

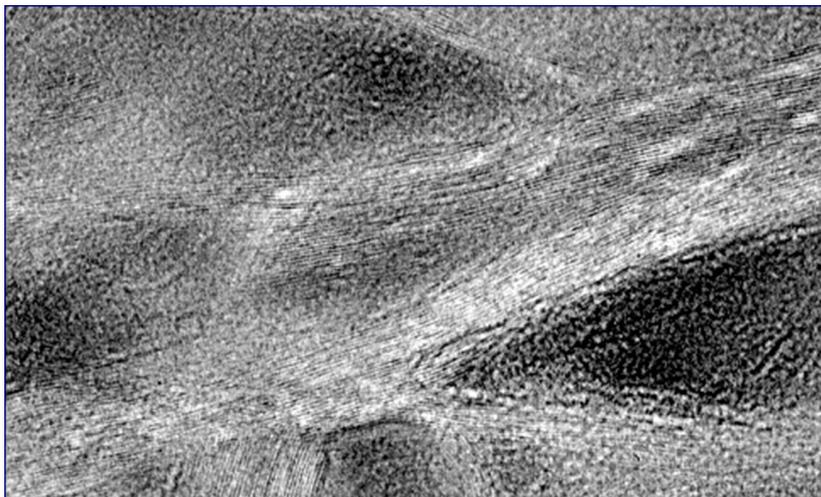


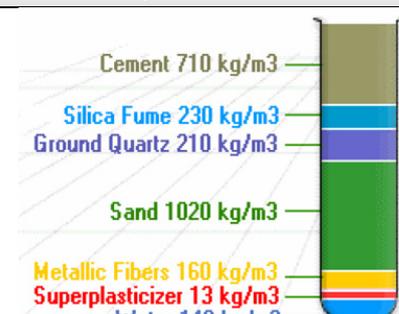
Immagine della struttura del C-S-H nel Ductal ottenuta mediante un microscopio elettronico a trasmissione (TEM). Si nota l'estrema compattezza della struttura cristallina, da cui dipendono il comportamento in fase di ritiro e le proprietà meccaniche.

La ricerca ha spinto le potenzialità del materiale fino a raggiungere resistenze meccaniche elevatissime: oltre 800 Mpa a fronte di 55-60 Mpa di un calcestruzzo convenzionale ad alta resistenza.¹⁹⁶ A queste pressioni le prove a rottura determinano una vera e propria esplosione del provino, rendendo particolarmente complesse le sperimentazioni. Nel caso del *Ductal*, le fibre sono state inizialmente aggiunte proprio per limitare i rischi durante le prove meccaniche, calibrando successivamente la quantità di fibre in relazione alla dimensione degli inerti, avendo come valori di riferimento il rapporto convenzionalmente impiegato nel cemento armato tra inerti grossi e armatura metallica.

La composizione finale dell'impasto differisce in maniera sensibile da quella di un calcestruzzo convenzionale, si tratta di un materiale ad altissima densità, grazie al ridotto spessore degli inerti, con proprietà personalizzabili in base agli impieghi finali.

	Cls ordinario	Cls ad alta resistenza	<i>Ductal</i>
Rapporto a/c	0,65	0,38	0,19
Contenuto iniziale di cemento (kg/m ³)	300	475	720
Contenuto iniziale d'aria (valore caratt.)	20	20	30
Frazione di clinker consumata	0,9	0,8	0,44

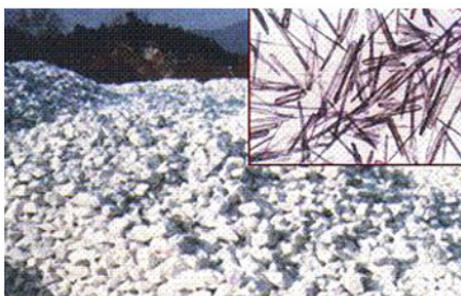
¹⁹⁶ E dei circa 30 MPa di un calcestruzzo convenzionale, non ad alta resistenza.

Composizione media di un metro cubo di Ductal FM (con fibre metalliche)	
710 kg di cemento	
230 kg di fumo di silice	
210 kg di quarzo macinato	
1020 kg di sabbia	
160 kg di fibre metalliche	
13 kg di superfluidificante	
140 kg di acqua	

Il pre-mix

Attualmente sono realizzate diverse formulazioni che differiscono sostanzialmente nella composizione del pre-mix a base di cemento, fumo di silice, quarzo macinato e sabbia (al quale poi vengono aggiunti acqua, fibre e additivi)

La dimensione degli inerti particolarmente fine (max. 60 micron) contribuisce a rendere omogeneo e compatto l'impasto, mentre il fumo di silice consente una riduzione della porosità, un miglioramento della impermeabilità e un incremento delle resistenze meccaniche. La percentuale di fumo di silice impiegata è tale che non tutta viene coinvolta nel processo di idratazione del calcestruzzo e si comporta come di fatto come un inerte microfine, che insieme alla parte di cemento non idratata comunque presente nell'impasto può reagire anche nel tempo se a contatto con liquidi.



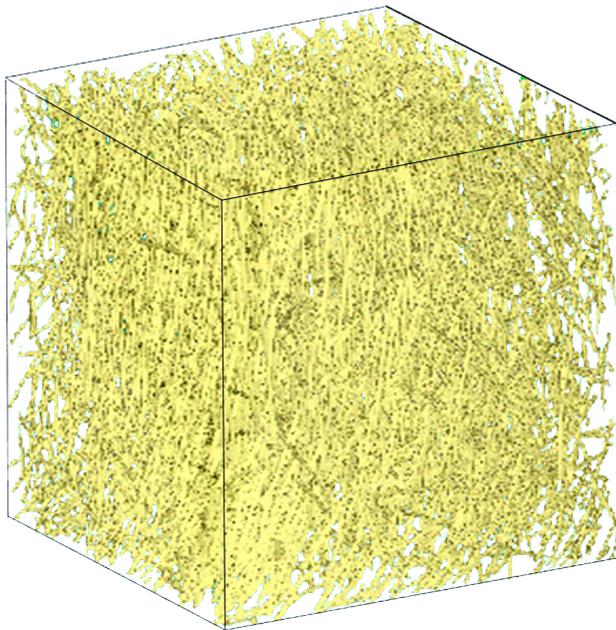
Microfibre di wollastonite.

Le diverse formulazioni del pre-mix differiscono nella tipologia di cemento impiegato, che conferisce all'impasto le due colorazioni caratteristiche, bianco oppure grigio. Oltre ai materiali di base citati, per raggiungere particolari prestazioni di durabilità e resistenza meccanica, alcune formulazioni prevedono l'aggiunta di wollastonite, un minerale fibroso a base silicea di origine naturale.¹⁹⁷

¹⁹⁷ Le fibre di wollastonite si presentano piuttosto simili per forma, lunghezza e diametro a quelle di amianto, ma hanno una differente origine mineralogica. Numerosi studi, a partire dagli anni '90, hanno messo a confronto le caratteristiche

Le fibre

Le fibre rappresentano un componente essenziale per gli UHPC poiché contribuiscono in maniera determinante al raggiungimento della resistenza meccanica e della duttilità, caratteristiche principali del materiale, insieme alla durabilità. Non a caso le due principali linee di prodotto attualmente sul mercato sono denominate con l'acronimo delle fibre impiegate: *Ductal FM (Fibres Métalliques)* e *Ductal FO (Fibres Organiques)*. Nel primo caso si tratta di fibre metalliche (tipicamente 2% del peso del composito) in acciaio ad alto tenore di carbonio dello spessore di 0,2 mm e di lunghezza media di 13 mm che conferiscono eccellenti proprietà meccaniche, ma che richiedono precauzioni in fase di produzione (tipicamente guanti pesanti) poiché possono facilmente penetrare nella pelle dato il ridotto spessore. La colorazione delle fibre non rende inoltre conveniente l'utilizzo di cemento bianco poiché restano visibili sulla superficie del materiale.



Distribuzione densità delle fibre di acciaio (2% del peso) all'interno di un campione di *Ductal* delle dimensioni di 40x40x40 cm, ottenuta attraverso una scansione a raggi x

Nel secondo caso si tratta di fibre di polivinilalcol (PVA, tipicamente 4% del peso del composito), che conferiscono una minore resistenza meccanica ma comunque un'eccellente duttilità, e sono impiegate nelle applicazioni non strutturali, oppure dove il

e la tossicità di wollastonite e amianto. La wollastonite è classificata come non cancerogena e, essendo presente in natura, non presenta particolari rischi in fase di dismissione. È da segnalare comunque la presenza di studi medici che hanno evidenziato patologie gravi in operai delle cave di wollastonite, simili a quelle dei lavoratori esposti all'amianto (fibrosi polmonare, tumori).

fattore “estetico” è predominante, quali pannelli ed elementi di facciata, che possono essere a base di cemento bianco, ma anche colorati successivamente.

Oltre a queste due tipologie di fibre è possibile aggiungere all'impasto fibre in polipropilene per ottenere una resistenza al fuoco maggiorata. Come tutti i materiali cementizi, anche gli UHPC possiedono un'ottima resistenza al fuoco, tuttavia l'altissima densità del materiale non permette, in caso d'incendio, la dissipazione del vapore presente all'interno del materiale, con il rischio di “esplosione” dello stesso, dopo un lungo periodo di esposizione al fuoco.

Per questo motivo, in applicazioni che richiedono una particolare risposta al fuoco (ad es. centrali atomiche o elettriche, silos e depositi di sostanze pericolose, ecc.), è prevista l'integrazione con fibre in PP che, fondendo a circa 120°C, permettono la dissipazione del vapore in caso di incendio.



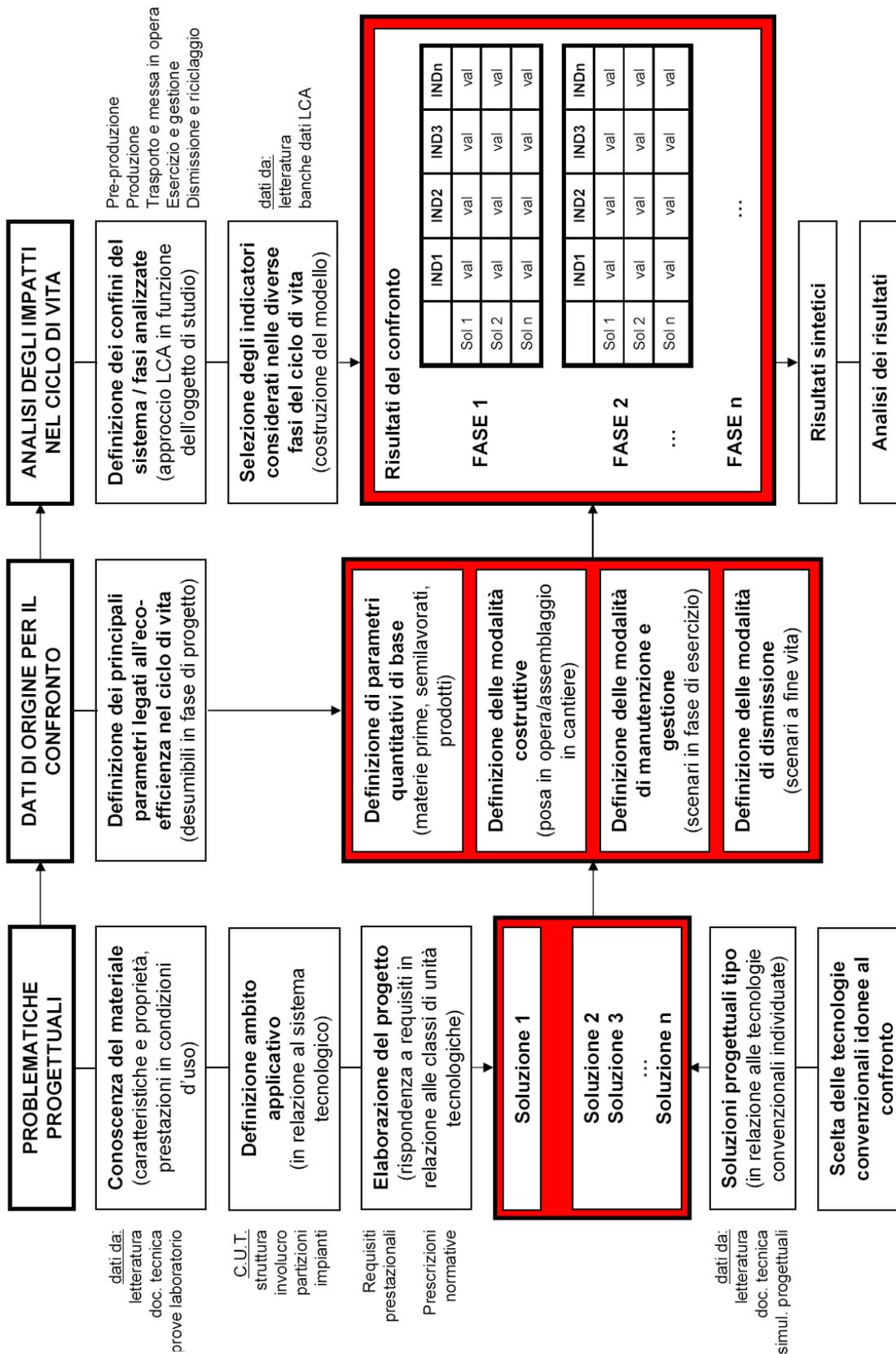
A sinistra, contenitori di *pre-mix* di *Ductal*, prodotto in confezioni da 25 e 50 kg. A destra le fibre di PVA utilizzate per realizzare il *Ductal FO*.

Additivi

A differenza di altre tipologie di calcestruzzi ad alte prestazioni (come alcuni SCC o i vari calcestruzzi impermeabili e autoriparanti), gli UHPC non prevedono l'impiego di additivi particolarmente innovativi. Generalmente, poiché gli inerti utilizzati, a causa della ridotta dimensione, tendono ad aggregarsi durante la lavorazione dell'impasto, è previsto l'impiego di un superfluidificante di terza generazione per deflocculare i grumi presenti. In alcuni casi è previsto anche l'utilizzo di un'accelerante in grado di portare da 16 a 12 ore il tempo necessario all'indurimento del materiale.



Elementi costitutivi e preparazione del *Ductal*. 1. Acqua, superfluidificante e accelerante; 2. *Pre-mix*; 3. Fibre di acciaio; 4. Le fibre vengono mescolate all'impasto dopo una prima fase di mix (circa 5 min.); 5. La fase di mixaggio; 6. Misura della fluidità dell'impasto; 7. Colatura nello stampo.

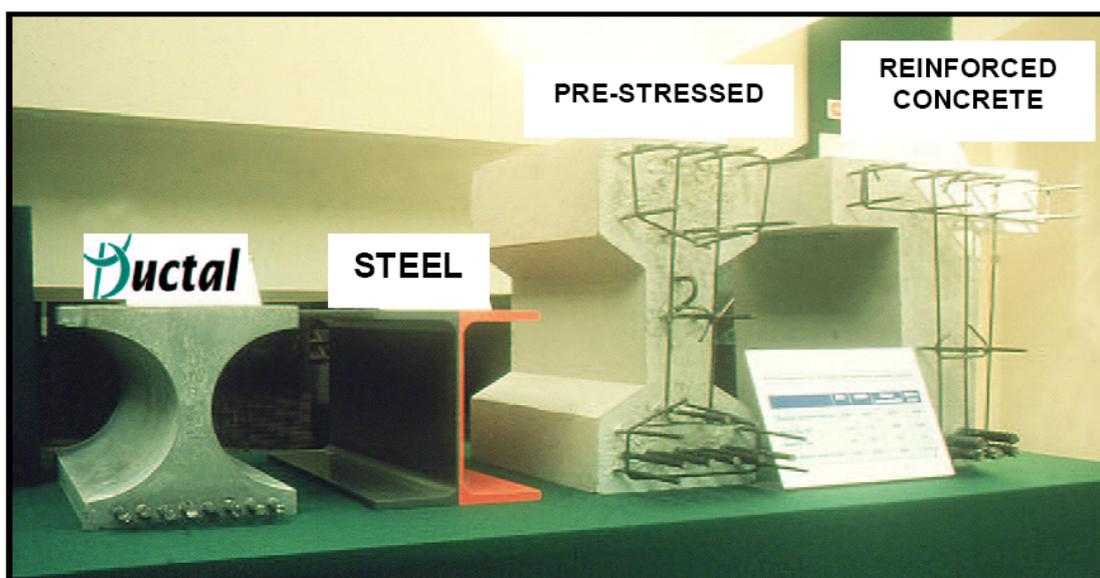


Fasi operative per lo studio di un caso applicativo.

7.2.3. Caratteristiche e proprietà

Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche sono senza dubbio il principale punto di forza degli UHPC. Per avere un'idea dei valori in gioco, basti pensare che a parità di capacità portante, le dimensioni e il peso di un elemento strutturale in *Ductal* sono più vicine a quelle dell'acciaio che a quelle del c.a. fibrorinforzato o precompresso.



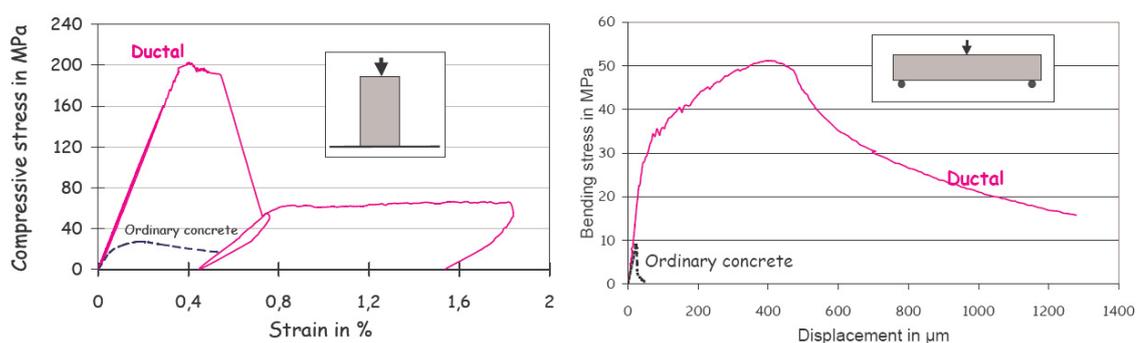
Confronto tra le dimensioni delle sezioni a parità di capacità portante. La sezione in *Ductal* è armata unicamente a flessione con trefoli da precompressione, ha la stessa altezza di un profilo HE in acciaio ed è circa la metà dei cementi armati convenzionali. Il peso delle travi è pari a 14 kg/ml per il *Ductal*, 112 kg/ml per l'acciaio, 467 kg/ml per il c.a. precompresso e 530 kg/ml per il c.a. convenzionale.

La resistenza a compressione varia da un minimo di 150 MPa per il *Ductal FO*, fino a un massimo di 200 MPa per il *Ductal FM*.¹⁹⁸ Tali valori sono ulteriormente implementabili applicando un trattamento termico a circa 90°C durante la fase di maturazione, coprendo gli elementi tecnici realizzati con teli in plastica ed eventualmente insufflando all'interno vapore acqueo, raggiungendo così valori di resistenza a compressione fino a 230 Mpa, la totale assenza di ritiro e la limitazione dei fenomeni di *creep*.

¹⁹⁸ L'impiego di un calcestruzzo con tali caratteristiche non è previsto dalle attuali Norme Tecniche per le costruzioni in cemento armato e non può essere neanche incluso tra i calcestruzzi fibrorinforzati, le cui regole di progettazioni sono recentemente state approfondite con le linee guida con tenute nel CNR-DT 203/2004. La diffusione di UHPC per impieghi strutturali richiederà necessariamente un'opportuna revisione normativa accompagnata da studi specifici, come è avvenuto in Francia con le linee guida sui BFUP (Beton Fibrés à Ultra Haute Performances) pubblicate nel 2005.

Il materiale presenta inoltre una resistenza a flessione (35 - 45 MPa per FM e 15 - 20 MPa per FO) che lo rende completamente diverso da ogni altro tipo di calcestruzzo, consentendo di realizzare elementi portanti particolarmente sottili che non necessitano di rinforzo passivo. La resistenza a flessione comporta inoltre un notevole innalzamento della resistenza a taglio delle sezioni strutturali realizzate in UHPC, rendendo superflua in molti casi la presenza di staffe e rinforzi a taglio.

Accanto alla resistenza meccanica, la presenza di fibre unita alla compattezza della struttura chimico-fisica conferiscono al materiale una elevata duttilità, che determina un diagramma sforzo-deformazione caratterizzato da una fase plastica, simile a quello dell'acciaio. Le prove a rottura di una trave inflessa evidenziano oltre il limite elastico, al posto del comportamento fragile tipico del calcestruzzo, la presenza di una serie di microfessurazioni che consentono di raggiungere una deformazione molto elevata prima della rottura. Il materiale presenta anche un'ottima resistenza all'impatto: negli Stati Uniti l'esercito ha testato l'impiego di UHPC nei bunker antiaerei, evidenziando la capacità del materiale di assorbire l'energia dissipata nelle esplosioni di bombe.¹⁹⁹



Comportamento a compressione e a flessione (provino 4x4x16 cm) del *Ductal* a confronto con un calcestruzzo convenzionale. Prove eseguite presso il CSTB, Parigi.

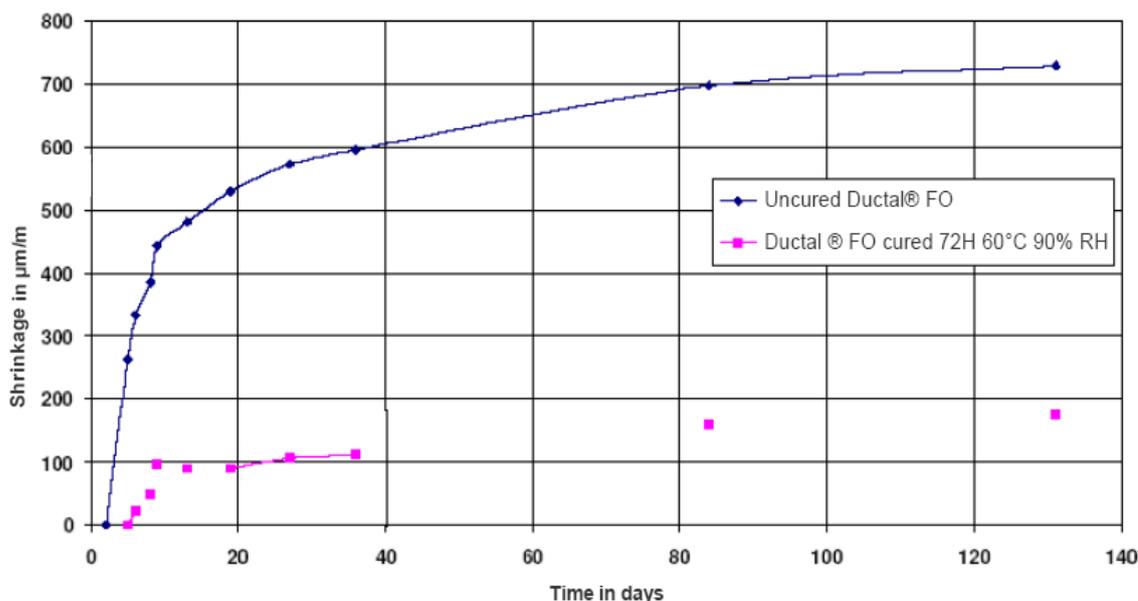


Provino di Ductal sottoposto a flessione portato a rottura, le microfessurazioni non sono visibili ad occhio nudo, occorre bagnare la superficie con alcol; l'unica fessura visibile coincide con la posizione del carico concentrato.

¹⁹⁹ I risultati di queste prove hanno portato anche alla realizzazione di casermette con rivestimento esterno in UHPC.

		Ductal FM o Ductal AF, con trattamento termico	Ductal FO, senza trattamento termico
Densità		2500 kg/mc	2350 kg/mc
Coefficiente di espansione termica		11,8 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	11,8 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$
Resistenza a compressione	Valore medio	180 - 200 MPa	130 - 160 MPa
	Valore caratteristico	150 - 180 MPa	100 - 140 MPa
Resistenza a flessione (4x4x16 cm)	Valore medio	40 - 45 MPa	18 - 25 MPa
	Valore caratteristico	30 - 40 MPa	15 - 20 MPa
Resistenza a trazione	Valore medio	11 MPa	8 MPa
	Valore caratteristico	8 MPa	3 MPa
Modulo di Young		50 GPa	45 GPa
Modulo di Poisson		0,2	0,2
Ritiro		< 10 $\mu\text{m}/\text{m}$	550 $\mu\text{m}/\text{m}$
Fattore di <i>creep</i>		0,3	0,8

Principali caratteristiche fisiche e proprietà meccaniche del *Ductal* con fibre metalliche (FM), organiche (FO) e resistenti al fuoco (AF).

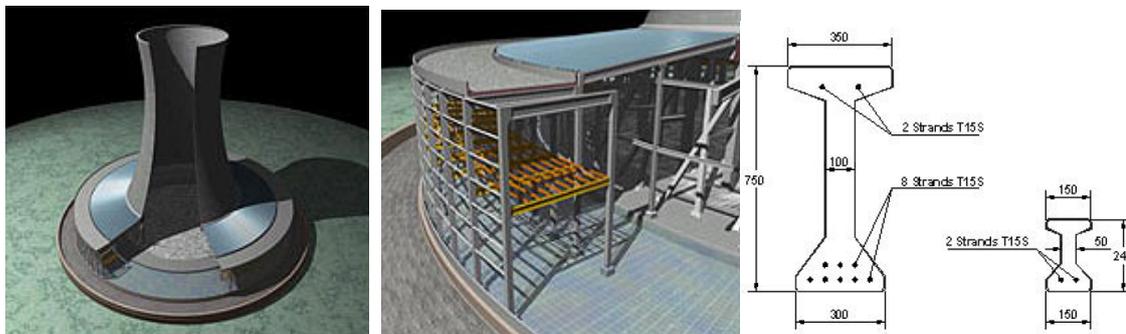


Influenza del trattamento termico sul ritiro del conglomerato.

Durabilità

Le ottime caratteristiche di durabilità degli UHPC sono dovute principalmente alla compattezza della microstruttura e rendono il materiale particolarmente idoneo per applicazioni in ambiente aggressivo. A titolo di esempio, basti pensare che una delle prime applicazioni ha riguardato la sostituzione di più di duemila tra travi e travetti all'interno della torre di raffreddamento della centrale atomica di Cattenom, in Francia.

Si tratta di elementi strutturali soggetti a ciclo continuo al contatto con acqua a 35°C per la refrigerazione del reattore e con i prodotti chimici impiegati per la pulizia delle pareti interne. Saggi effettuati dopo 10 anni hanno mostrato che le fibre metalliche, posta circa 1 mm sotto la superficie del materiale non presentano fenomeni di corrosione, e la resistenza a compressione delle travi è ancora pari a 200 MPa.



Torre di raffreddamento della centrale atomica di Cattenom. Le travi, lunghe 15 m circa, hanno una sezione a doppio T di dimensioni 30x75 cm e un'armatura a trazione con 8Ø15, i travetti, 6 m di lunghezza, hanno invece una sezione di 15x24 cm e un'armatura a trazione con 2 Ø15.

Le prove di durabilità, condotte in Francia con la collaborazione del CSTB hanno una bassissima permeabilità ai liquidi e allo scambio gassoso: immerso continuamente otto mesi in un liquido (pari a circa trecento anni di intemperie), ha presentato un degrado superficiale dello spessore di 600 micron, il che potrebbe anche consentire di ridurre le dimensioni di eventuali copriferrì; le eccellenti proprietà impermeabili garantiscono inoltre un'ottima resistenza ai cicli di gelo-disgelo. Il contatto con acqua in presenza di microfessurazioni sulla superficie, in più, anziché degradare ulteriormente il materiale, consente l'autoriparazione delle fessure, grazie alla porosità a celle chiuse che evita la diffusione dell'acqua, e alla presenza di una percentuale di cemento non ancora idratata che, reagendo con l'acqua, è in grado di compattare nuovamente la superficie. Ulteriori prove all'abrasione, condotte con l'EDF (l'agenzia elettrica francese) per la realizzazione di condotti elettrici, hanno dimostrato una capacità di resistenza all'abrasione (1,3) equiparabile a quella di un materiale ceramico (1,2).

Le proprietà di durabilità espresse dagli UHPC li rendono particolarmente idonei per applicazioni strutturali, poiché sono limitati i fenomeni di degrado legati alla carbonatazione, all'attacco di agenti aggressivi o ai cicli di gelo-disgelo. Tali tipologie di materiali si prestano in maniera ottimale ad applicazioni a facciavista, con caratteristiche estetiche particolarmente interessanti, grazie all'estrema finezza degli

inerti e alla fluidità dell'impasto che consentono di ottenere particolari effetti superficiali a seconda delle casseformi, in legno o in lamiera, impiegate.



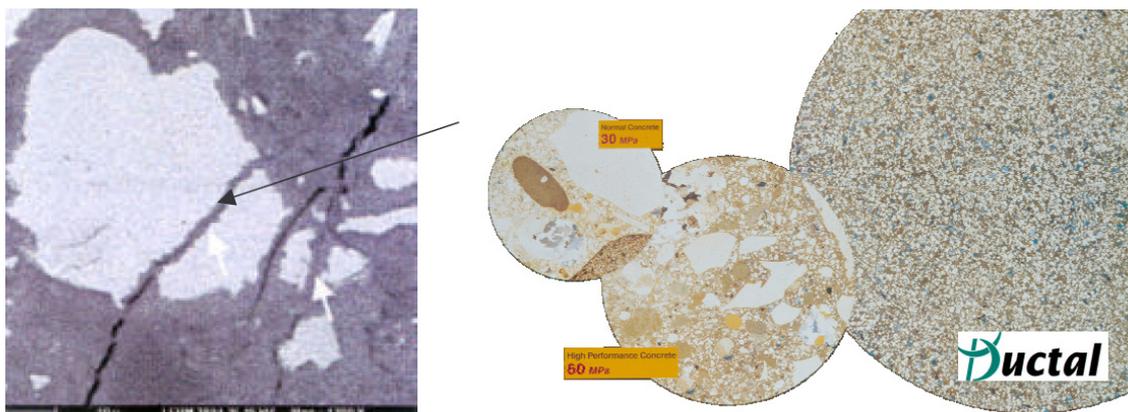
L'impiego di stampi e casseformi differenti consente di variare le finiture superficiali, riproducendo con estrema precisione la *texture* dello stampo grazie alla finezza degli inerti.

Nonostante gli eventuali fenomeni di degrado siano difficilmente in grado di incidere sulle prestazioni meccaniche, trattandosi unicamente di fenomeni superficiali, per applicazioni in cui è richiesta una particolare connotazione estetica è comunque necessario considerare la necessità di un trattamento antimacchia successivo.²⁰⁰

Indicatore di durabilità	Calcestruzzo ordinario	HPC	Ductal FM
Porosità all'acqua (%)	12-16	9-12	2-6
Permeabilità all'ossigeno (mq)	10^{-13} - 10^{-16}	10^{-17}	$<10^{-19}$
Profondità di carbonatazione dopo un mese di test accelerato (mm)	10	2	<0,1
Test di abrasione $I=V/V_{\text{vetro}}$	4	2,8	1,3-1,7

Confronto tra le principali proprietà collegate alla durabilità nei calcestruzzi convenzionali e nel *Ductal*

²⁰⁰ Da questo punto di vista sarebbe interessante sperimentare trattamenti superficiali fotocatalitici a base di biossido di titanio (come nel caso dei cementi TX di Italcementi), che risulterebbero particolarmente efficaci proprio per la compattezza della superficie dell' UHPC.



A destra, microfrattura autoriparata grazie alla idratazione della porzione di clinker non ancora idratata a contatto con l'acqua. A sinistra la compattezza della microstruttura del *Ductal* a confronto con il cls convenzionale (30 e 60 MPa).

Proprietà meccaniche	Oltre 200 Mpa a compressione Fino a 40 Mpa a trazione Assenza fessurazioni (max. 3 micron) Presenza di fase plastica (microfessurazioni progressive) Elevata duttilità e stabilità dimensionale Autocompattante
Durabilità	Ritiro minimo o nullo Resistenza alla carbonatazione Resistenza ai cicli di gelo-disgelo Resistenza all' abrasione Resistenza a impatto ed esplosione Resistenza al fuoco migliorata (con fibre in polipropilene) Permeabilità superficiale molto bassa (max 600 micron, autoriparante)
Caratteristiche estetiche	Elevata regolarità superficiale Possibilità di colorazioni (per impieghi non strutturali)
Altre caratteristiche (confronto con c.a. convenzionale)	Leggerezza dovuta alla riduzione di spessore Riduzione di tempi di realizzazione e costi accessori (armature, impermeabilizzazioni, isolamento) Risparmio di risorse materiali ed energetiche a parità di prestazioni meccaniche

Riepilogo delle principali caratteristiche e proprietà degli UHPC

7.3. I progetti realizzati con UHPC

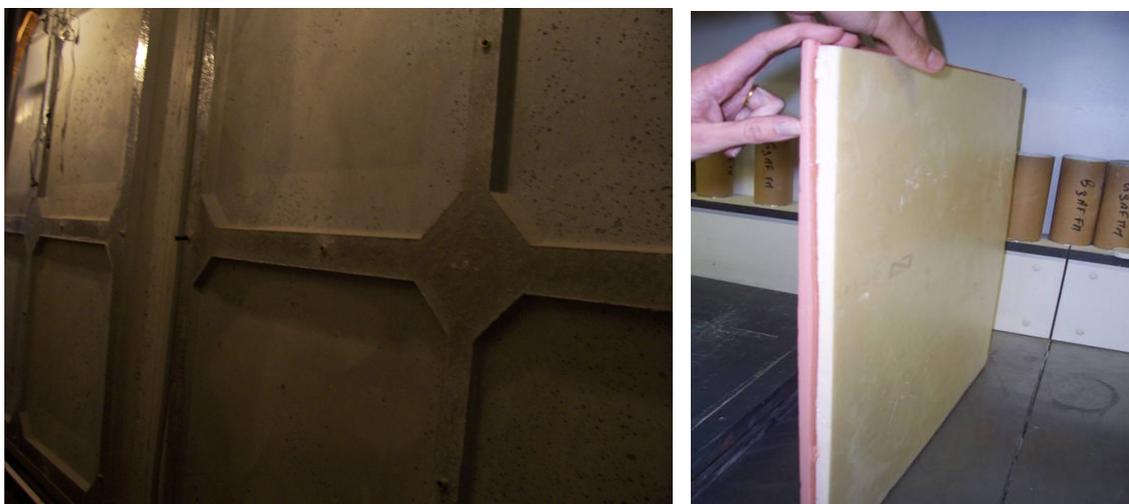
7.3.1. Problematiche progettuali e prestazioni meccaniche

Fino ad ora gli UHPC sono stati impiegati per applicazioni strutturali principalmente nel campo dei ponti e delle passerelle, in edifici industriali o in elementi di ancoraggio. Le applicazioni su edifici civili sono limitate per il momento a pannelli di facciata di vario tipo (lisci, bugnati, traforati, ecc.), pensiline o coperture, ma non ancora come struttura principale, ad eccezione di alcuni progetti allo studio (LVMH, Hypergreen), che prevedono l'impiego di elementi sottili poco armati.

Per sfruttare nel miglior modo le caratteristiche del materiale nella realizzazione di elementi portanti occorre partire da una concezione strutturale completamente diversa da quella del tradizionale cemento armato, che si avvicina molto di più a quella dell'acciaio.

La scelta di impiegare l'UHPC per le strutture di elevazione comporta, soprattutto nel caso di luci elevate, di verificarne l'opportunità di impiego anche nella realizzazione dei solai (ad esempio con tegole a T prefabbricati). I vantaggi della struttura in UHPC, infatti, possono essere vanificati da un sovraccarico eccessivo degli elementi strutturali determinato da soluzioni tecniche convenzionali in c.a. Un'alternativa è rappresentata dalla possibilità di realizzare impalcati leggeri con lamiera grecata, come avviene comunemente per le strutture in acciaio.

Nel caso di pannelli per l'involucro ed elementi di facciata, quali aggetti e schermature, gli UHPC garantiscono la massima libertà progettuale consentendo nella maggior parte dei casi di evitare l'impiego di rinforzi passivi anche con dimensioni elevate e spessori particolarmente ridotti (1-3 cm). Nel caso di applicazioni su superfici orizzontali come pavimento galleggiante, è possibile prevedere la presenza di nervature non armate in modo da fornire un maggior apporto in termini di resistenza a flessione nelle zone maggiormente sollecitate.



A sinistra, le nervature all'interno dei pannelli possono essere sfruttate per il posizionamento degli elementi di ancoraggio; a destra, pannello stratificato in *Ductal* e poliuretano espanso.

Prefabbricazione

La forte dipendenza delle prestazioni finali degli UHPC dall'accuratezza del *mix-design*, ha portato a concentrarsi inizialmente sull'impiego di elementi prefabbricati, che garantiscono un controllo del prodotto finale molto importante in termini di sicurezza,

considerando gli stati tensionali sviluppati all'interno di strutture realizzate con un materiale in grado di resistere a sollecitazioni così elevate.²⁰¹

Nonostante alcune sperimentazioni su elementi realizzati in opera (il caso più celebre riguarda il riempimento delle colonne in acciaio dei nuovi ascensori del Museo Reina Sofia a Madrid, di Jean Nouvel), essendo stato concepito per la realizzazione di travi e solette da ponte, in questa fase la maggiore competitività del materiale si esprime nei confronti di elementi prefabbricati, che possono essere realizzati con luci maggiori e minori spessori, semplificando notevolmente le operazioni di trasporto e di assemblaggio in cantiere.

Ottimizzazione della sezione

Le proprietà meccaniche dell'UHPC suggeriscono la necessità di realizzare strutture quanto più possibile resistenti per forma, ottimizzando l'apporto dell'elevatissima resistenza a compressione del materiale, che, unita alla discreta resistenza a trazione, consente di limitare al massimo l'uso di armature, proprio grazie ad una concezione strutturale di questo tipo è stato possibile rendere la tecnologia degli UHPC molto conveniente nella realizzazione di ponti e passerelle.

Nel caso di sezioni strutturali di travi e pilastri, sebbene l'obiettivo sia comunque quello di massimizzare gli apporti a trazione e compressione dell'UHPC, risulta difficile realizzare sezioni non parzializzate (che richiederebbero quantità minime di ferri), soprattutto in caso di elementi particolarmente snelli, sottoposti a tensioni più elevate. Il progetto della sezione dovrà dunque tenere conto che se in zona compressa la quantità di materiale può essere drasticamente ridotta, così come il numero e il diametro dei ferri, in zona tesa occorre bilanciare bene l'apporto in termini di resistenza a trazione (e a flessione) dell'UHPC, valutando la posizione dell'asse neutro e aumentando l'area di sezione reagente al fine di ridurre l'impiego di armatura.

La tipica sezione per travi e travetti è dunque a doppio T, simile a quella impiegata per elementi prefabbricati in calcestruzzo fibrorinforzato ordinario o precompresso, ma con lo spessore dell'anima molto ridotto e l'ala superiore molto più sottile di quella inferiore. Per i pilastri invece, ipotizzando una maggiore snellezza degli elementi strutturali, è

²⁰¹ L'interesse dei produttori in questo caso è duplice: da un lato si garantisce la qualità del prodotto finale, limitando rischi di applicazioni fallimentari che, in fase di lancio del prodotto, ne scoraggerebbero in parte l'uso. Dall'altro si stringe il rapporto con i prefabbricatori e con i cantieri, che permette di migliorare continuamente il prodotto sulla base delle esigenze espresse in condizioni d'uso, realizzando uno scambio continuo tra la ricerca e le applicazioni reali. Recentemente sono state sperimentate tipologie innovative di UHPC che non necessitano dell'aggiunta di fumo di silice, idonee ad applicazioni con getti in opera.

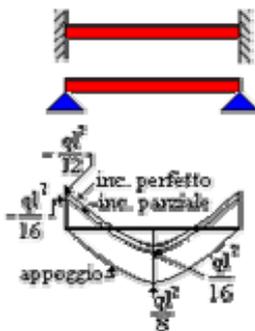
comunque consigliabile prevedere sezioni rettangolari, al fine di aumentare la rigidezza degli elementi e limitare i movimenti della struttura, in particolare in condizioni di rischio sismico.

Cinematismi della struttura

Sempre ipotizzando la progettazione di strutture a telaio, occorre considerare che, soprattutto in zona sismica, la presenza di luci ampie e sezioni ridotte induce cinematismi all'intera struttura che occorre limitare come per l'acciaio, attraverso controventature o nuclei irrigidenti. Nonostante infatti l'elevata resistenza e duttilità dell'UHPC limiti comunque i rischi di fessurazioni degli elementi strutturali anche con movimenti nell'ordine dei 15-20 mm, il trasferimento dei cinematismi alle tamponature o agli elementi di facciata ne provocherebbe l'immediata rottura.

Problemi di ancoraggio

Mentre per le tradizionali strutture prefabbricate in cemento armato il problema dell'incastro nei nodi può essere facilmente risolto con getti integrativi, che permettono di considerare le aste incastrate tra loro, l'efficacia di tale soluzione non è ancora stata sufficientemente verificata nel caso degli UHPC, dati gli attuali limiti applicativi per la realizzazione di getti in opera. Le soluzioni per ovviare a questo problema sono molteplici, e possono prevedere l'inserimento di piatti in acciaio negli elementi prefabbricati, la modifica della sezione delle travi nella parte terminale, o la realizzazione di ancoraggi supplementari in opera, tuttavia, ai fini del calcolo delle strutture, potrebbe risultare conveniente considerare i nodi come un semi-incastro, con una conseguente riduzione del valore del momento alle estremità con un conseguente incremento in mezzera.



Il momento massimo negativo della trave incastrata assoggettata ad un carico uniforme è pari a $-\frac{ql^2}{12}$ uguale ai due terzi di quello della trave appoggiata.

In alcuni casi, se l'incastro non è perfetto la convenienza può risultare maggiore: in particolare, con un'efficienza dell'incastro del 67% il momento in mezzera ha un valore minimo di $\frac{ql^2}{12}$, ovvero metà del valore della trave semplicemente appoggiata.

7.3.2. Schedatura di progetti e realizzazioni

L'analisi dei progetti realizzati negli ultimi anni consente di individuare i principi progettuali e le opportunità di impiego legate agli UHPC ed in particolare al *Ductal*, nonché le principali prestazioni offerte a seconda della tipologia di progetto. Gli interventi realizzati vanno dalla realizzazione di elementi strutturali sottili in grado di competere nel rapporto leggerezza-resistenza con l'alluminio che sembrano poter assecondare la richiesta di rendere sempre meno visibile la struttura per esaltare i giochi di trasparenza e di leggerezza, come nel caso della Fondation LVMH a Parigi, di Frank Gehry, dove è attualmente allo studio la possibilità di impiegare UHPC per la realizzazione della maglia strutturale irregolare.



Frank Gehry, Fondation LVMH a Parigi.

Dall'analisi dei progetti emergono alcune interessanti considerazioni: attraverso l'impiego di UHPC è possibile realizzare elementi prefabbricati in grado di sopportare sbalzi fino a 7 m con ridottissime quantità di armatura (Villa Navarra a Le Muy, di Rudy Ricciotti), pannelli larghi fino a 30 m (Louvre di Abu Dhabi, di Jean Nouvel, con elementi forati lunghi anche 28 m) o con una finitura che riprende la texture dei mattoncini "lego" (Gare RATP, Thiais) passerelle di spessori ridottissimi (il "tappeto volante" a Strasburgo, 25 mm; il Footbridge of Peace a Seul di Rudy Ricciotti, 30 mm). In Giappone il *Ductal* è stato utilizzato per la pista di atterraggio dell'aeroporto Haneda a Tokyo con un notevole risparmio in termini di peso, aspetto particolarmente vantaggioso considerato che l'intera struttura è realizzata su un'isola artificiale.

Il *Ductal* non è tuttavia impiegato unicamente per le sue caratteristiche meccaniche: l'elevata durabilità e le caratteristiche estetiche, inclusa la possibilità di variare la finitura superficiale in funzione dello stampo impiegato, lo rendono particolarmente

idoneo per la realizzazione di pannelli ed elementi schermanti in facciata, ma anche di elementi decorativi, di arredo urbano o per interni.

SCHEDE PROGETTI

- *Footbridge of peace*, Rudy Ricciotti, Seul, Corea del Sud, 2002
- *Sherbrooke bridge*, Pomerleau (contractor), Sherbrooke, Canada, 1998
- *FHWA Bridge*, Massachusetts Institute of Technology, McLean, Virginia US, 2004
- *Shawnessy Light Rail Transit Station*, Stantec Architecture, Calgary, Canada, 2004
- *Hypergreen Tower*, Jacques Ferrier, 2005 (progetto)
- *Villa Navarra*, Rudy Ricciotti, Le Muy, Francia, 2002
- *Museo Reina Sofia*, Jean Nouvel - Julio Medem, Madrid, Spagna, 2003
- *Classical Museum*, Jean Nouvel, Abu Dhabi, Emirati Arabi, 2007 (progetto)
- *RATP Bus Center*, ECDM, Thiais, Francia, 2007
- *Pavillon de l'Arsenal*, Finn Geiple - Giulia Andi, Parigi, Francia, 2004
- *Scuola materna*, Duncan Lewis, Ornans, Francia, 2001
- *Zac Paris Rive Gauche*, Badia-Berger Architectes, Parigi, Francia, 2007
- *Université DOUA*, Enri Chabal Lione, Francia, 2003
- *Piscine de Clichy* Mathieu Chazel - ENIA, Clichy la Garenne, Francia, 2006
- *Passerelle Ungerer* Marrec et Combaret Strasburgo, Francia, 2007
- *Oggetti di arredo*, Gigi Rossi, 2007-2008



A destra, ponte autostradale a S. Pierre La Cour, Francia (unica travata da 20 m); a destra scala "Décors" realizzata interamente in *Ductal* (Cogitech, Lafarge).

Footbridge of peace

Progettista: Rudy Ricciotti
Anno: 2002
Luogo: Seul, Corea del Sud

La "passerella della pace" collega le sponde urbane del fiume Han e l'isola di Sunyudo; è stata costruita come simbolo della cooperazione e dell'amicizia tra Francia e Corea del Sud.

La struttura ad arco e della passerella superiore sono realizzate interamente in *Ductal*. Oltre che per l'aspetto estetico, caratterizzato dall'assoluta assenza di imperfezioni, il prodotto è stato scelto a causa delle estreme variazioni climatiche dell'area di Seul per la sue caratteristiche meccaniche, la flessibilità dimensionale e la durabilità.

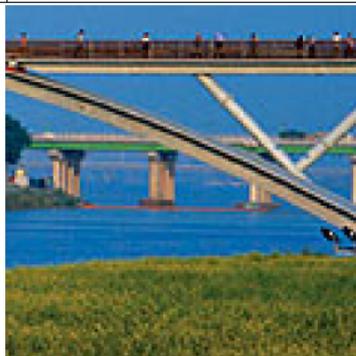
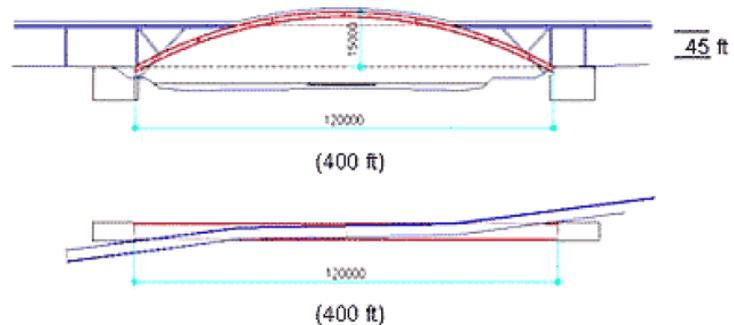
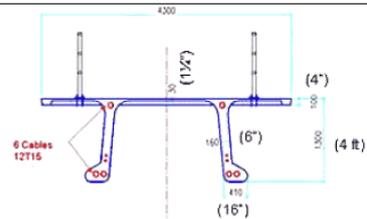
La lunghezza della struttura ad arco della passerella pedonale è di 120 m, senza supporti intermedi, mentre lo spessore della piattaforma è di soli 3 cm.

Grazie alle proprietà meccaniche del *Ductal* è stato possibile realizzare una specifica sezione che impiega elementi di rinforzo passivo solo nelle nervature, con una passerella superiore di 3 cm di spessore che non necessita di armatura aggiuntiva. La struttura della passerella, composta unicamente di 3 conci prefabbricati di dimensioni variabili è stata realizzata in 1 mese, con notevoli risparmi sulle fasi di trasporto e di posa in opera, considerando anche la leggerezza dei conci dovuta agli spessori ridotti, che ha consentito l'impieghi di mezzi ordinari.



Dati dimensionali

Ampiezza	120 m
Altezza	15 m
Spessore piattaforma	3 cm
Larghezza piattaforma	4,3 m
Larghezza sez. trasvers.	1,1 m
Massa totale di <i>Ductal</i>	220 t
Rinforzo passivo	0
Rinf. di presollecitazione	12 t



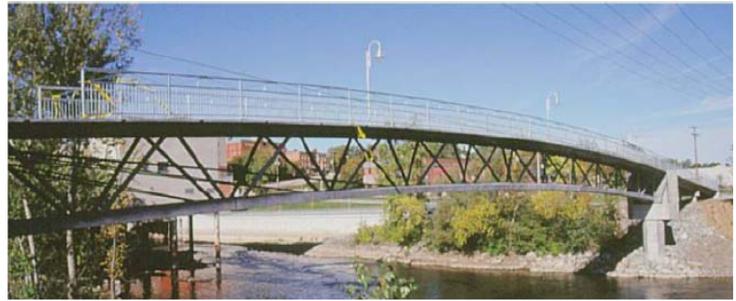
Sherbrooke bridge

Progettista: Pomerleau (contractor)
Anno: 1998
Luogo: Sherbrooke, Canada

La passerella pedonale di Sherbrooke è la prima in assoluto realizzata in *Ductal*. Prevede l'impiego di una tecnica mista in cui il prodotto viene impiegato sia per la realizzazione della passerella dello spessore di 3 cm senza rinforzo (la formulazione prevista prevedeva fibre metalliche e 200 MPa di resistenza a compressione), sia come riempimento all'interno della travata reticolare in acciaio, composta da diagonali cavi del diametro di 15 cm (in questo caso la formulazione impiegata presentava una resistenza caratteristica a compressione di ben 350 MPa), sia per la realizzazione dei correnti inferiori a sezione quadrata (38x38 cm), precompressi.

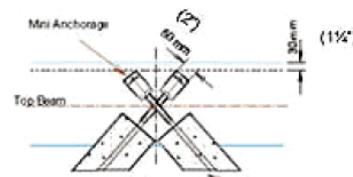
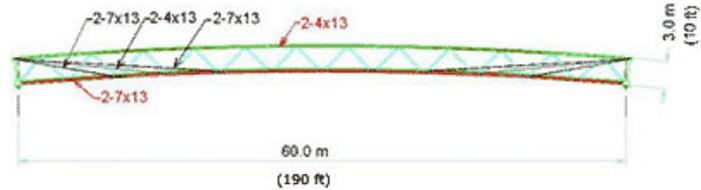
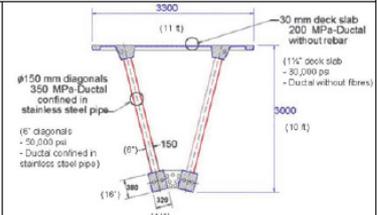
La realizzazione dell'intera struttura ha richiesto una settimana in fase di posa. Sono stati realizzati 6 tronconi da 10 m ciascuno in officina e assemblati in opera, garantendo leggerezza e facilità di trasporto.

L'impiego del *Ductal* unito all'acciaio inossidabile degli elementi reticolari garantisce un'ottima durabilità e resistenza nel tempo agli agenti atmosferici. Successivamente la sezione tipo prevista per Sherbrooke ha lasciato il posto a soluzioni che prevedono l'impiego di una sezione unica in *Ductal* senza il ricorso ad elementi in acciaio.

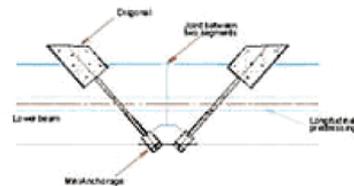


Dati dimensionali

Ampiezza 60 m
 Spessore piattaforma 3 cm
 Larghezza piattaforma 3,3 m
 Massa totale di *Ductal* 105 t
 Rinforzo passivo 0
 Rinf. di presollecitazione 3 t

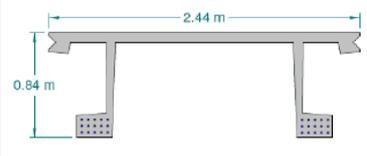


Connection of the diagonals in the top beams



Connection of the diagonals in the lower beams



<h2 style="margin: 0;">FHWA Bridge</h2>		
<p>Progettista: M.I.T. Anno: 2004 Luogo: McLean, Virginia US</p>	<p>Dati dimensionali</p>	
<p>La US Federal Highway Administration (FHWA), con l'obiettivo di sostituire significativamente il numero di ponti obsoleti e a rischio nei prossimi 5 anni, ha effettuato una serie di studi su soluzioni basate su materiali ad alte prestazioni, scegliendo il <i>Ductal</i> dopo numerose ricerche e test. Le motivazioni principali della scelta riguardano le eccellenti proprietà meccaniche, l'elevata durabilità e i ridotti costi di manutenzione necessari. Il primo ponte sperimentale è stato costruito nel 2004 alle porte di Washington. È realizzato con due solette (tipo tegoli pi greco) lunghe 21,3 e larghe 2,44 m, armate unicamente nella parte inferiore con trefoli da precompressione. Il progetto della sezione del ponte è il risultato di approfonditi studi condotti presso il M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) di Boston, che hanno portato anche allo sviluppo di un software specifico per il calcolo di strutture realizzate con UHPC. Ulteriori studi condotti hanno dimostrato come questa specifica soluzione, a confronto con una realizzata in c.a. prefabbricato convenzionale e una mista acciaio-c.a. consenta un risparmio di materie prime e di energia per essere realizzato, con una conseguente riduzione delle emissioni di CO₂.</p>	<p>Lunghezza Larghezza Altezza</p>	<p>21,3 m 4,88 m 84 cm</p> 
		
		

Shawnessy Light Rail Transit Station

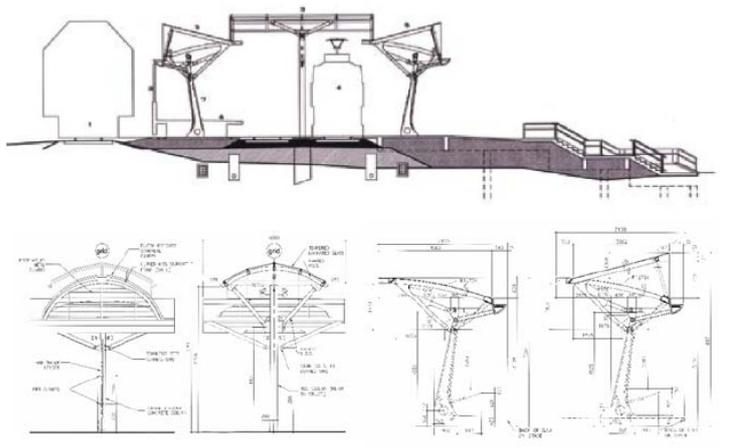
Progettista: Stantec Architecture
Anno: 2004
Luogo: Calgary, Canada

Originariamente concepita in acciaio, la copertura per la stazione di Shawnessy, a Calgary, rappresenta una delle applicazioni strutturali del *Ductal* più interessanti dal punto di vista della concezione architettonica. Ciascun elemento prefabbricato assolve una specifica funzione strutturale ed è ottimizzato nella forma e nelle dimensioni per ridurre le quantità di materiale necessarie. Il pilone centrale di sostegno (30 x 30 cm) è svuotato internamente per far passare i cavi elettrici, la trave di collegamento perimetrale sagomata per fungere da grondaia (6m di lunghezza per uno spessore di 2 cm). Gli elementi più significativi sono i gusci di copertura, delle dimensioni di 5 x 6 m con uno spessore massimo di soli 2 cm, realizzati in officina con stampi appositamente disegnati (per realizzare mezzo guscio alla volta) in modo da consentire una distribuzione uniforme del materiale, e progettati per resistere alle condizioni di esercizio critiche della zona (soprattutto rispetto ai carichi da neve). Il prototipo del guscio, nonché dello stampo sperimentale, è stato realizzato in collaborazione con il Centre for Innovative Technology dell'Università di Calgary.



Dati dimensionali

Lunghezza copertura	76 m
Larghezza guscio	5 m
Lunghezza guscio	6 m
Spessore guscio	2 cm
Numero gusci	9
Massa totale di <i>Ductal</i>	200 t
Rinforzo passivo	0



Hypergreen Tower

Progettista: Jacques Ferrier
Anno: 2005
Luogo: -

Pur essendo un progetto dimostrativo, la Hypergreen Tower, presentata da Jacques Ferrier all'interno di un concorso per un grattacielo a basso impatto ambientale, risulta particolarmente interessante dal punto di vista della concezione strutturale. Lo scheletro esterno, realizzato in *Ductal*, si configura come una rete con la dimensione delle maglie variabile in funzione delle linee di forza delle sollecitazioni, ma anche dell'esposizione, consentendo il passaggio dei raggi solari dal lato nord e infittendosi fino a diventare una schermatura frangisole lungo il lato sud ovest.

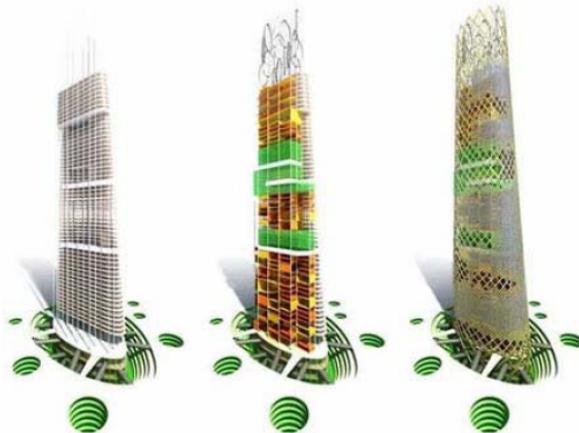
La realizzazione di tale maglia consente di avere una struttura interna (realizzata in c.a. prefabbricato) quasi totalmente priva di elementi di sostegno, con evidenti vantaggi dal punto di vista dell'organizzazione funzionale. I singoli elementi costituenti la rete, essendo sottoposti principalmente a compressione, esaltano le caratteristiche meccaniche del materiale e richiedono un impiego minimo di armature.

La struttura a rete è pensata anche per favorire la ventilazione naturale nei diversi piani della torre nonché i moti d'aria ascensionali che contribuiscono ad alimentare le pale eoliche poste alla sommità della torre.



Dati dimensionali

Altezza torre	250 m	
Numero piani	60	
Superficie utile	99.000 mq	



Villa Navarra

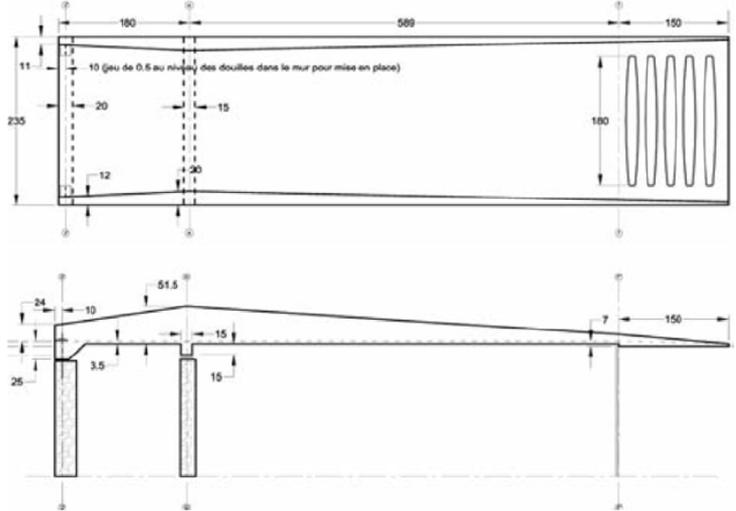
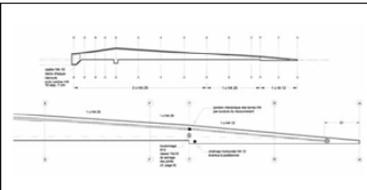
Progettista: Rudy Ricciotti
Anno: 2002
Luogo: Le Muy, Francia

Villa Navarra rappresenta una delle opere più emblematiche delle elevate prestazioni meccaniche offerte dal *Ductal*. L'unico elemento visibile della casa è la grande copertura a sbalzo, lunga circa 40 m per 10 m di profondità. Questa è composta da 17 pannelli di 9,25 x 2,35 m giustapposti tra loro e appoggiati su due setti murari distanti tra loro 1,5 m, che realizzano uno sbalzo di 7,80 m. Le connessioni sono realizzate con barre d'acciaio inserite nel setto di sostegno (collegate con i trefoli precompressi presenti nelle nervature dei pannelli) e sigillate con resina, mentre il setto intermedio funge da semplice appoggio con cuscinetto in neoprene. Lo spessore di ogni modulo è di soli 3,5 cm mentre le nervature (la sola parte provvista di armature) varia da un minimo di 7 cm a un massimo di 51,5 cm. Come si evince dalla sezione trasversale la forma delle nervature ricalca la distribuzione degli sforzi nella struttura. Per realizzare i singoli moduli è stato impiegato un particolare tipo di stampo realizzato da un'azienda che rifornisce l'industria aeronautica. La scelta di uno stampo in acciaio, necessaria per la complessità della forma e per il ridotto spessore fornisce all'elemento finito una finitura particolarmente compatta e levigata



Dati dimensionali

Lunghezza modulo	9,25 m
Larghezza modulo	2,35 m
Spessore modulo	6 m
Spessore nervatura	7-51,5 cm
Numero moduli	17
Peso di un modulo	3 t
Lunghezza sbalzo	7,8 m



Museo Reina Sofia

Progettisti: Jean Nouvel
Julio Medem

Anno: 2003

Luogo: Madrid, Spagna

L'ampliamento del Museo Reina Sofia a Madrid ha previsto la realizzazione di tre nuovi volumi, agganciati alla struttura muraria esistente e sistemati attorno alla corte centrale.

Il *Ductal* è stato scelto nella sua formulazione AF (Anti-Fire), per rinforzare e rendere resistenti al fuoco le strutture cave in acciaio. Il diametro particolarmente ridotto delle colonne (15-32 cm) impediva una soluzione convenzionale in cemento armato per l'impossibilità di posizionare le barre di armatura. Le prestazioni meccaniche del *Ductal* hanno permesso di ottenere pilastri in grado di resistere a 1000 t di peso eliminando la necessità di armatura aggiuntiva.

L'intervento al Museo Reina Sofia rappresenta per il *Ductal* una innovazione assoluta, essendo stato impiegato per la prima volta con getti in opera. Sono stati eseguiti test di ottimizzazione per ottenere la reologia adatta che consentisse un getto in opera per semplice gravità, senza vibrazione o trattamento termico. La centrale di betonaggio distava 30 km dal sito di cantiere ed è stato possibile gettare il *Ductal* all'interno dei pilastri della struttura principale, alti 16 m, senza la necessità di accorgimenti specifici in fase di getto.



Dati dimensionali

Diametro pilastri	15-32 cm
Altezza pilastri	16 m
Volume totale <i>Ductal</i>	32 mc
Rinforzo passivo	0



Classical Museum

Progettista: Jean Nouvel
Anno: 2007 (progetto)
Luogo: Abu Dhabi, Emirati Arabi

Il Classical Museum di Abu Dhabi (che potrà sfruttare il nome *Louvre* grazie ad un accordo tra Francia ed Emirati Arabi), è concepito come una "città dell'arte" al di sotto di una enorme cupola (circa 175 m di diametro), con diversi volumi in cui si alternano spazi espositivi, biblioteche, auditorium, servizi, negozi e ristoranti, il tutto costruito su di un'isola artificiale. Per il progetto del nuovo "Louvre" Jean Nouvel sfrutta le caratteristiche del *Ductal* sia dal punto di vista delle potenzialità estetiche, con i pannelli traforati che rievocano la tradizione costruttiva araba delle cupole forate attraverso cui passa la luce zenitale, sia dal punto di vista delle prestazioni meccaniche, andando a realizzare pannelli di dimensioni fino a 32 m con soli 4 cm di spessore massimo. Il peso complessivo dei singoli pannelli è ridotto proprio grazie alla presenza dei fori, che permettono un notevole risparmio anche sul costo del materiale. È stata studiata una geometria per la cupole e per i pannelli che la compongono tale da razionalizzare l'impiego degli enormi stampi previsti in modo da non incidere in maniera eccessiva sui costi di costruzione. La presenza dei fori contribuisce alla regolazione del microclima degli spazi aperti e degli edifici sottostanti l'ampia cupola, grazie anche alla ventilazione naturale favorita dalla presenza dell'acqua.



Dati dimensionali

Diametro cupola	175 m
Superficie coperta	25000 mq
Larghezza pannelli	32 m
Spessore pannelli	4 cm
Rinforzo passivo	0



RATP Bus Center

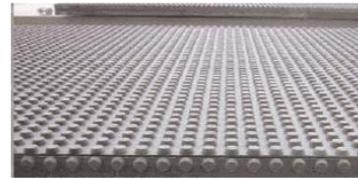
Progettista: ECDM
Anno: 2007
Luogo: Thiais (Parigi), Francia

La stazione RATP (la società dei trasporti francese) a Thiais, progettata dai parigini Emanuel Combarel e Dominique Marrec (ECDM), rappresenta un interessante esempio di "gioco" plastico reso possibile dall'impiego del *Ductal*. L'effetto dei pannelli di facciata è simile ad una superficie composta di *Legó*, i celebri mattoncini giocattolo. Si tratta di pannelli di dimensioni 1,70 x 3x60 m per 4 cm di spessore (3 cm di pannello piano e 1 cm di "mini-bugnato"). Un simile effetto plastico risulta pressoché irrealizzabile con dei pannelli di calcestruzzo tradizionali, per l'impossibilità di colare in stampi tanto complessi (in particolare gli elementi angolari, che oltre al bugnato presentano anche una doppia curvatura), ma soprattutto per la difficoltà a staccare il pannello dallo stampo una volta indurito senza danneggiarlo, data la dimensione ridottissima dei piccoli rilievi che riproducono l'effetto-*legó*. Il *Ductal*, grazie alla consistenza estremamente fluida e alla granulometria molto fine dell'impasto, ha permesso di realizzare con questa texture ben 1300 mq di facciata, con un ridotto numero di sfridi. Lo studio dei moduli di facciata ha reso infatti possibile la realizzazione dei 50 formati differenti impiegando unicamente 6 stampi, con notevoli risparmi sui costi globali.



Dati dimensionali

Superficie facciata	1300 mq
N. formati differenti	50
N. stampi differenti	6
Larghezza pannelli	1,70 m
Altezza pannelli	3,60 m
Spessore pannelli	3 cm
Spessore bugnato	1 cm



Pavillon de l'Arsenal

Progettista: Finn Geiple
Giulia Andi

Anno: 2004

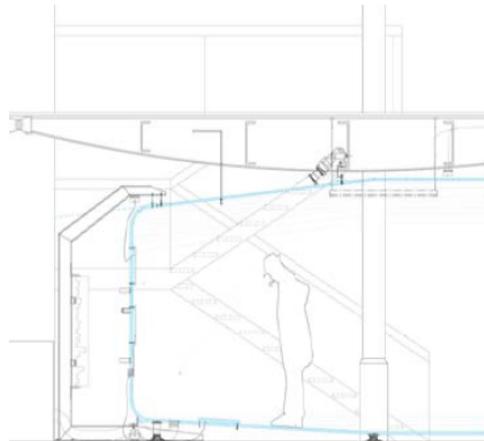
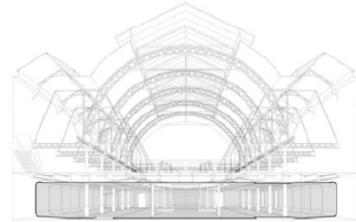
Luogo: Parigi, Francia

L'intervento al Pavillon de l'Arsenal, sede del Centre d'information, de documentation et d'exposition d'Urbanisme et d'Architecture de la ville de Paris, riguarda la riorganizzazione dello spazio espositivo attraverso una "scatola" sospesa all'interno dell'edificio storico, in cui suolo e pareti sono in continuità tra loro attraverso un sistema di sostegno in acciaio. I pannelli e i principi di assemblaggio sono stati testati in officina prima del montaggio. Di tratta di lastre dello spessore di 1 cm con alcuni ispessimenti fino a 4 cm per limitare il numero dei punti di appoggio e di ancoraggio, in modo da favorire l'assemblaggio e il passaggio di impianti. La dimensione standard è di 2,5 x 2,5 m, con elementi più piccoli curvi di raccordo con le lastre orizzontali del pavimento e del controsoffitto. Particolarmente complessa è la geometria di alcuni elementi curvi, in particolare quelli angolari. Alcune lastre sono state successivamente forate per alloggiare gli elementi di illuminazione e per creare dei tavolini attraverso dei "tasselli" staccati dal pannello originale.



Dati dimensionali

Superficie totale	1100 mq
Lunghezza lastre	2,5 m
Larghezza lastre	50 - 250cm
Spessore lastre	1 + 3 cm
N. lastre piane	150
N. lastre curve	50



Scuola materna Pierre Vernier

Progettista: Duncan Lewis
Anno: 2001
Luogo: Ornans, Francia

I pannelli forati realizzati per la scuola materna a Ornans dall'architetto Duncan Lewis rappresentano un esempio dell'estrema lavorabilità del *Ductal*. Gli stampi sono caratterizzati fori a forma di foglie di dimensione variabile fino ad incisioni nell'ordine dei 10 mm. Sono state realizzate sette forme differenti che nei pannelli più densi formano fino a 100 fori.

I pannelli sono applicati sulla superficie esterna vetrata dell'edificio in modo da formare schermature frangisole, variando l'illuminazione interna delle aule e creando effetti d'ombra decorativi. I pannelli sono fissati alla struttura esistente in maniera puntuale con barre filettate.



Dati dimensionali

Superficie totale	124 mq
Larghezza pannelli	1,7 m
Altezza pannelli	3,6 - 5,6 m
Spessore pannelli	3,5 cm



Zac Paris Rive Gauche

Progettista: Badia-Berger Arch.
Anno: 2007
Luogo: Parigi, Francia

I 44 pannelli di facciata realizzati sui tre lati di un edificio della ZAC Paris Rive Gauche rappresentano un ulteriore possibile impiego del *Ductal*. I pannelli forati, della dimensione di 2,3 x 6,6 m, si sviluppano lungo gli 8 piani dell'edificio con l'obiettivo di schermare l'interno delle abitazioni dall'introspezione e dai raggi solari, ma anche per permettere alle piante di edera predisposte all'interno delle logge di arrampicarsi lungo le facciate dell'edificio. L'impiego del *Ductal* al posto del cls convenzionale si è rivelato idoneo non solo alla crescita di tale tipologia di rampicante senza rischio di degrado del supporto, ma anche per le dimensioni e la tipologia stessa dei pannelli, con una superficie di circa 15 mq e una percentuale di vuoti del 70%.



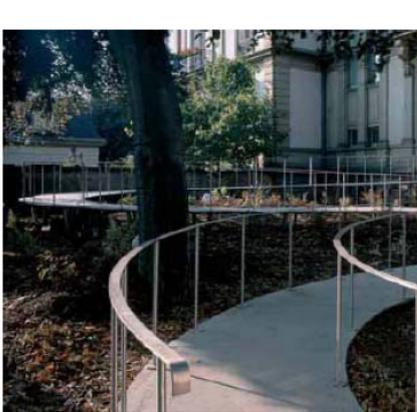
Dati dimensionali

Larghezza pannelli	2,5 m
Altezza pannelli	6,6 m
Spessore pannelli	7 - 9 cm
Percentuale di vuoti	70%
Peso dei pannelli	1,8 t



Università DOUA			
Progettista: Enri Chabal Anno: 2003 Luogo: Lione, Francia	Dati dimensionali		
Intervento di integrazione di <i>brise-soleil</i> in facciata, con attento studio delle casseforme, trattate in modo da ottenere volontariamente impurità superficiali, per avvicinarsi alla <i>texture</i> degli elementi in c.a. esistenti.	Lunghezza lamelle Larghezza lamelle Spessore	2,5 m 45 cm 2 - 4 cm	

Piscine de Clichy			
Progettista: Mathieu Chazel, ENIA Anno: 2006 Luogo: Clichy la Garenne, Francia	Dati dimensionali		
Nell'ambito dell'intervento di riqualificazione dell'edificio esistente degli anni '60 è stato integrato un sistema di frangisole sulla facciata sud-est. Le lamelle sono collegate ai montanti della grande vetrata retrostante mediante degli elementi metallici.	Lunghezza lamelle Larghezza lamelle Spessore Superficie facciata	2,5 m 45 cm 4 cm 350 mq	

Passerelle Ungerer			
Progettista: Marrec et Combaret Anno: 2007 Luogo: Strasbourg, Francia	Dati dimensionali		
Soprannominata dagli abitanti del quartiere "il tappeto volante", la passerella di accesso al Centre d'illustration Tomi Ungerer è realizzata con 32 moduli di lunghezza variabile e larghezza 1,5 m, fissati al suolo con puntoni di sostegno metallici, in modo da assecondare le diverse inclinazioni del percorso che si snoda all'interno del giardino.. Lo spessore ridottissimo (appena 2,5 cm) la rende quasi invisibile nel profilo. Per la realizzazione dell'intera passerella è stata impiegato un unico stampo in lamiera curva.	Lunghezza passerella N. moduli Larghezza moduli Spessore passerella	49 m 32 1,5 m 2,5 cm	

<p>Oggetti di arredo</p>	 											
<p>Progettista: Gigi Rossi Anno: 2008 Luogo: -</p>												
<p>Gli oggetti di design realizzati dall'azienda IlCantiere sono le prime opere in <i>Ductal</i> realizzate in Italia. A partire dal 2006 sono state prodotte diverse tipologie di elementi, tra cui elementi di illuminazione, pannelli radianti e rivestimenti superficiali in genere.</p>												
<p>Tavolo</p>	  <table border="1" data-bbox="667 869 1082 1003"> <tr> <td colspan="2">Dati dimensionali</td> </tr> <tr> <td>Lunghezza piano</td> <td>2 m</td> </tr> <tr> <td>Larghezza piano</td> <td>2 m</td> </tr> <tr> <td>Interasse appoggi</td> <td>1,8 m</td> </tr> <tr> <td>Spessore piano</td> <td>31 mm</td> </tr> </table>		Dati dimensionali		Lunghezza piano	2 m	Larghezza piano	2 m	Interasse appoggi	1,8 m	Spessore piano	31 mm
Dati dimensionali												
Lunghezza piano	2 m											
Larghezza piano	2 m											
Interasse appoggi	1,8 m											
Spessore piano	31 mm											
<p>Il tavolo in <i>Ductal</i> sfrutta al massimo le potenzialità del materiale: gli appoggi metallici distano tra loro 1,8 m e il piano può reggere oltre 150 kg. Per ridurre il peso, il piano è stato pensato come un sandwich con strati superiore e inferiore in <i>Ductal</i> (10 e 6 mm) e uno strato intermedio di policarbonato alveolare (15 mm). Per limitare l'assorbimento di liquidi il piano è stato trattato con tre mani di cera protettiva.</p>												
<p>Panchina</p>	  <table border="1" data-bbox="667 1328 1082 1417"> <tr> <td colspan="2">Dati dimensionali</td> </tr> <tr> <td>Lunghezza</td> <td>1,5 m</td> </tr> <tr> <td>Profondità</td> <td>40 cm</td> </tr> </table>		Dati dimensionali		Lunghezza	1,5 m	Profondità	40 cm				
Dati dimensionali												
Lunghezza	1,5 m											
Profondità	40 cm											
<p>La panchina è pensata per sfruttare al massimo la resistenza a compressione del <i>Ductal</i> attraverso una linea strutturale resistente per forma. È stato realizzato un unico stampo, le due metà simmetriche, di lunghezza 1,5 m e spessore interno massimo di 30 mm, sono fissate tra loro con bulloni metallici. L'impiego di uno stampo in lamiera d'acciaio rende la superficie estremamente levigata e priva di imperfezioni.</p>												
<p>Cucina</p>	  <table border="1" data-bbox="667 1720 1082 1841"> <tr> <td colspan="2">Dati dimensionali</td> </tr> <tr> <td>Lunghezza</td> <td>3 m</td> </tr> <tr> <td>Profondità</td> <td>1,2 m</td> </tr> </table>		Dati dimensionali		Lunghezza	3 m	Profondità	1,2 m				
Dati dimensionali												
Lunghezza	3 m											
Profondità	1,2 m											
<p>La cucina in <i>Ductal</i>, realizzata in collaborazione con Comprex, è stata presentata per la prima volta al Fuorisalone 2008 a Milano. I grandi cassetti-contenitori sono rivestiti esternamente con uno strato di <i>Ductal</i> di appena 5 mm in modo da limitarne il peso all'apertura. Lo stesso rivestimento viene applicato sulla cappa, mentre il piano di lavoro e le superfici interne dei contenitori e della cappa sono in acciaio inox.</p>												

7.4. La valutazione delle opzioni tecnologiche: UHPC vs C.A.

7.4.1. Un caso applicativo per una struttura a telaio

Dall'analisi dei progetti realizzati emerge come il *Ductal* può essere impiegato con diverse finalità, principalmente nella realizzazione di elementi prefabbricati che garantiscono in questa fase di sviluppo del prodotto una maggiore affidabilità delle prestazioni in condizioni d'uso. Per il futuro è facile ipotizzare che insieme ad una maggiore diffusione e conoscenza da parte degli operatori si comincino a sperimentare anche soluzioni con getti in opera, per sfruttare in maniera ancora più versatile le caratteristiche del materiale. In relazione alle classi di unità tecnologiche è possibile individuare i seguenti impieghi prevalenti:

Classi di Unità Tecnologiche	Unità Tecnologiche	Classi di Elementi Tecnici	
Strutture	Strutture di elevazione	Strutture di elevazione verticali	
		Strutture di elevazione orizzontali e inclinate	
		Strutture di elevazione spaziali	
	Strutture di contenimento	Strutture di contenimento verticali	
		Strutture di contenimento orizzontali	
Chiusure	Chiusure orizz. su spazi aperti	Solai su spazi aperti	
	Chiusure orizzontali superiori	Coperture	
Partizioni interne	Partizioni interne verticali	Pareti interne verticali	
		Elementi di protezione	
	Partizioni interne orizzontali	Solai	
		Soppalchi	
	Partizioni interne inclinate	Scale interne	
		Rampe interne	
Partizioni esterne	Partizioni esterne verticali	Elementi di protezione	
		Elementi di separazione	
	Partizioni esterne orizzontali	Solai	
	Partizioni esterne inclinate	Scale esterne	
		Rampe esterne	
Attrezzature interne	Arredi domestici	Vari	
Attrezzature esterne	Strutture esterne di contenimento terreno	Opere verticali esterne di contenimento	
		Opere inclinate esterne di contenimento	
	Elementi di collegamento in aree esterne	Scale esterne	
		Rampe gradonate esterne	
		Rampe non gradonate esterne	
		Passaggi pedonali sospesi	
	Elementi di partizione di aree esterne	Recinzioni opache	
		Elementi di protezione	
		Barriere di protezione	
			Dissuasori
	Elementi di copertura di aree esterne	Pensiline e tettoie	
Portici			
Oggetti di arredo e di servizio	Vari		

Impieghi degli UHPC in relazione allo schema di classificazione del Sistema Tecnologico.

(Elaborazione da: norma UNI 8290 e Franco Landini, Riccardo Roda, a cura di, *Costruire a regola d'arte*, BE-MA, Milano, 1989).

Per il caso applicativo oggetto dello studio si è scelto di impiegare il prodotto come struttura di elevazione (verticale e orizzontale) in un edificio per uso civile. Il sistema strutturale è a telaio, realizzato con elementi prefabbricati.

Si tratta di un'applicazione finora inedita, poiché le applicazioni strutturali più diffuse riguardano ponti, passerelle sospese e pensiline, mentre la realizzazione di telai strutturali in UHPC è limitata ad alcuni edifici industriali di grandi dimensioni, dove il prodotto si configura come tecnologia sostitutiva delle tipologie strutturali con elementi prefabbricati in c.a. convenzionalmente impiegate.

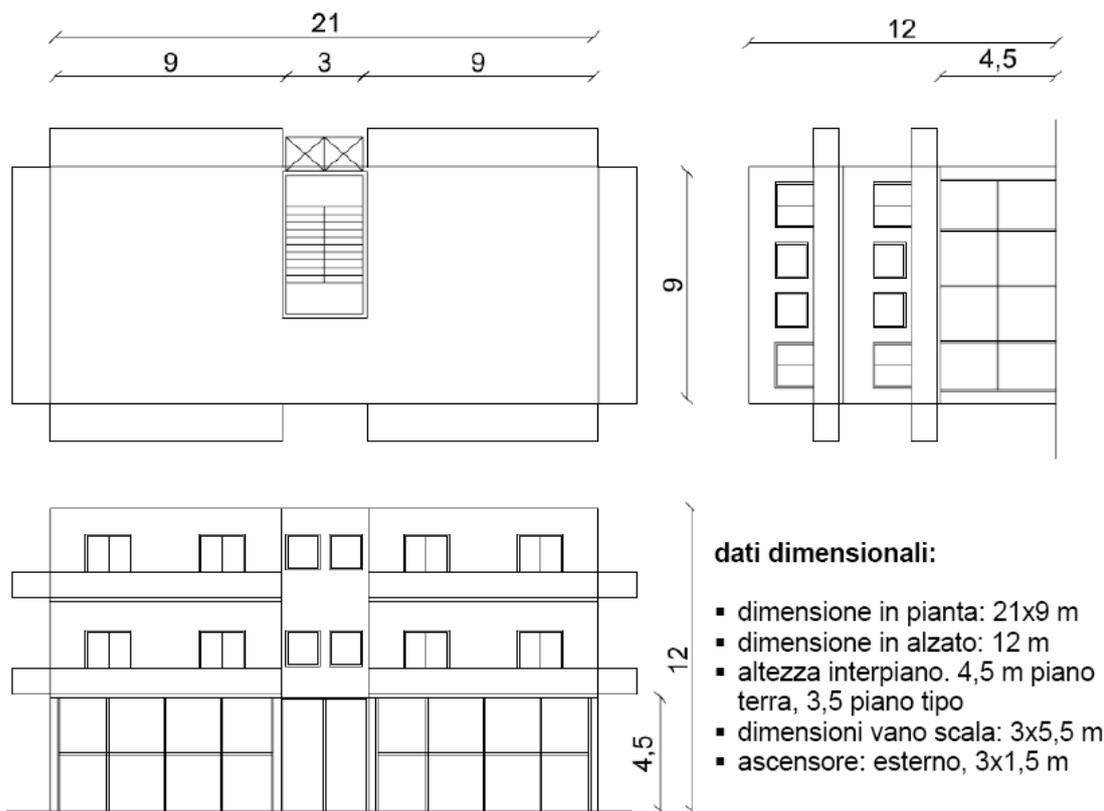
La verifica delle potenzialità applicative degli UHPC nelle costruzioni civili (edifici per abitazioni, uffici, commercio, spazi espositivi, ecc.) rappresenta un'opportunità per estendere i vantaggi del c.a. prefabbricato (qualità dei prodotti, riduzione dei costi e dei tempi di realizzazione, ecc.) ad ambiti applicativi finora ritenuti non convenienti per tale tecnologia, soprattutto entro certi limiti dimensionali degli elementi strutturali, che rendono preferibile (in Italia in particolare) l'impiego di soluzioni tecniche con c.a. gettato in opera.

7.4.2. Elaborazione del "prototipo virtuale"

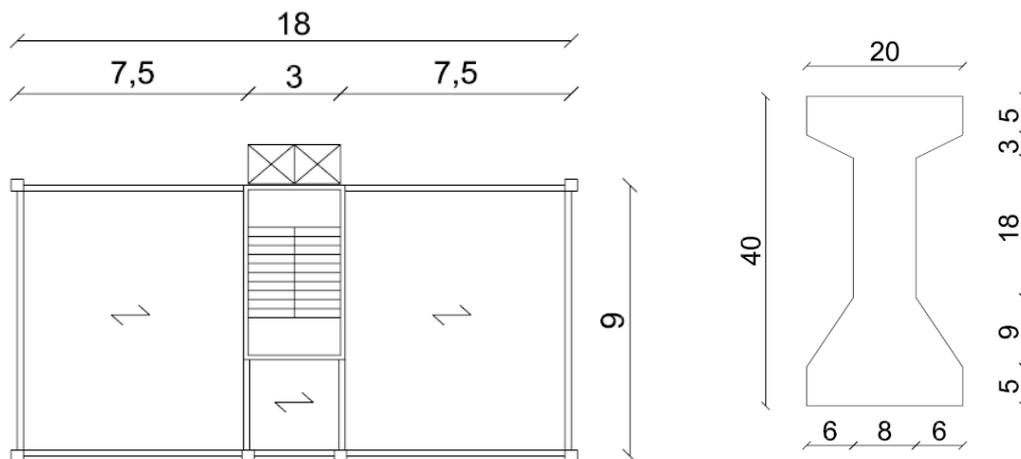
Per procedere allo sviluppo del confronto tra una soluzione costruttiva realizzata con tecnologie convenzionali ed una realizzata in *Ductal* occorre definire dei parametri dimensionali di base che consentano di restituire due organismi edilizi analoghi, che differiscono solo nel passo e nella dimensione degli elementi strutturali.

È possibile effettuare un predimensionamento della maglia strutturale sulla base delle soluzioni realizzate, che garantisce la correttezza (seppure in via preliminare) dei parametri di base.

Lo schema prevede che la struttura sia realizzata lasciando a vista gli elementi strutturali del piano terra, dedicato ad attività commerciali o terziarie, la cui chiusura, ipotizzata interamente trasparente ad eccezione del blocco scala, è arretrata rispetto al filo dei pilastri. È prevista inoltre la presenza di balconi aggettanti di 1,5 m oltre il perimetro dell'edificio.



Trasferendo i parametri dimensionali al progetto della struttura in Ductal, viene ipotizzata la possibilità realizzare un'unica campata di 9 m, riducendo il numero di elementi strutturali e le relative sezioni. La maglia strutturale è di 9x9 m più la campata del vano scala (3m), la sezione dei pilastri quadrata (30x30 cm)²⁰², quella delle travi a doppio T (20x40 cm).



²⁰² Nonostante con l'impiego di UHPC sia possibile ipotizzare dimensioni dei pilastri ancora minori, la sezione dei pilastri è stata dimensionata tenendo conto dei limiti normativi imposti dalle Norme Tecniche 2005, che impongono una dimensione minima dei pilastri pari a 30x30 cm, in modo da agevolare le operazioni di verifica tramite software che impongono il rispetto di tali standard.



Esempi di trave a doppio T in *Ductal* per ponti autostradali (luce 20 m): a sinistra, Shepherds Creek bridge, Australia; a destra, S. Pierre La Cour, Francia.

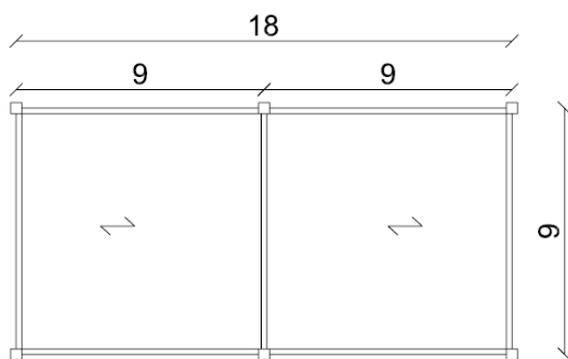
Verifica delle strutture

La fase di verifica, effettuata con i comuni software per il calcolo strutturale,²⁰³ risulta di particolare complessità nel caso del *Ductal*. Nella maggior parte dei software per il calcolo delle strutture in c.a. presenti in commercio, pur essendo possibile imputare dati di resistenza a compressione molto elevati, non è possibile specificare il contributo del calcestruzzo in termini di resistenza a trazione, convenzionalmente trascurato. Rispetto al comportamento “reale” della struttura in *Ductal*, sarà dunque sovrastimata la quantità di armatura prevista, in particolar modo il rinforzo a taglio e a flessione. Occorre dunque considerare un doppio passaggio, in cui dopo aver verificato il calcolo delle aste e definito i valori di momento massimo in diversi punti della struttura, si procede alla verifica delle singole sezioni in maniera analitica, includendo nel calcolo il contributo a trazione del *Ductal* e un diverso coefficiente di omogeneizzazione.²⁰⁴

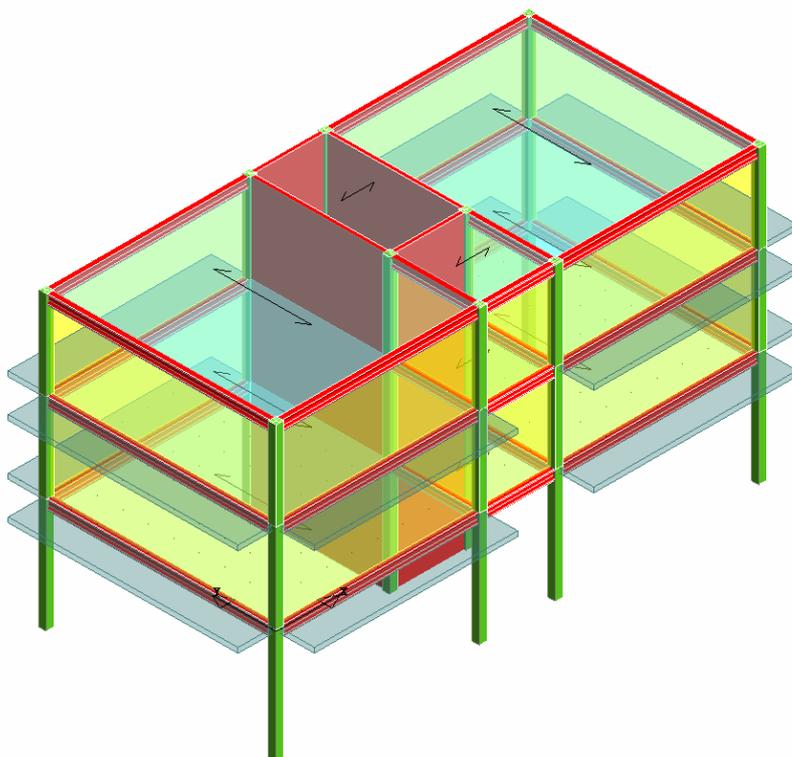
È interessante notare come nel primo schema testato, che non prevede l’inserimento preventivo del vano scala, la struttura risulta verificata con le sezioni ipotizzate in fase di predimensionamento, richiedendo unicamente un aumento dell’inerzia della sezione della trave di lunghezza 9 m posta al centro della maglia, maggiormente sollecitata (portandola a 50 cm in altezza). I problemi derivano appunto dallo spostamento delle singole campate, difficilmente risolvibile tramite controventature, che andrebbero a condizionare la posizione delle aperture in facciata, trattandosi di un’unica campata molto ampia.

²⁰³ In particolare è stato utilizzato il software STS-CDSwin 2008, particolarmente efficace per il calcolo delle strutture in zona sismica.

²⁰⁴ In alternativa, è possibile fare riferimento ai dati desunti da applicazioni realizzate, che vedono l’impiego di un’armatura a flessione realizzata con trefoli da precompressione nella quantità di circa 60-70 kg/mc.



Lo schema con il nucleo irrigidente centrale costituito dal vano scala (realizzato con c.a. convenzionale) si presenta molto più idoneo, consentendo di non incrementare l'altezza delle travi e garantendo la stabilità della struttura in caso di sisma.



Modello per il calcolo della struttura realizzato con il software STS-CDSwin 2008.

I vantaggi della struttura in UHPC

Al di là degli aspetti riguardanti il risparmio di risorse materiali ed energetiche lungo il ciclo di vita, oggetto del presente studio, la struttura in UHPC presenta altri interessanti vantaggi.

Innanzitutto una maggior flessibilità funzionale, determinata dalla totale assenza di elementi di sostegno intermedi, che consente di attrezzare gli spazi interni in maniera

versatile, con la possibilità di adottare configurazioni differenti degli spazio in relazione alle esigenze degli utenti. Le caratteristiche del materiale consentono inoltre di ridurre la necessità di materiali complementari, come pannelli isolanti per correggere il ponte termico o strati impermeabilizzanti, qualora impiegato anche nella realizzazione di impalcati di copertura o degli aggetti, con solette nervate di ridotto spessore.

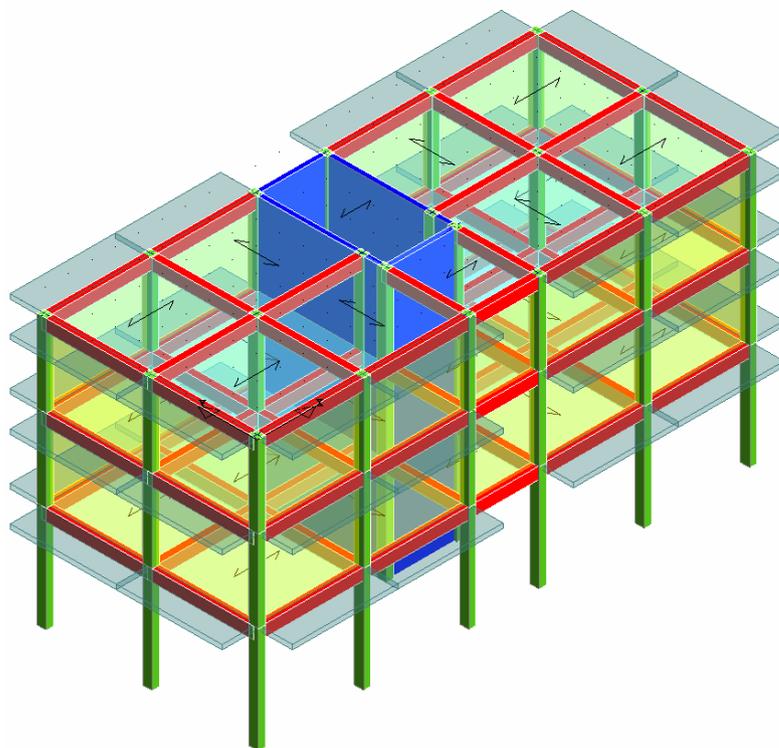
Infine sono da tenere presente i vantaggi in fase di costruzione, legati alla leggerezza e al minor numero di elementi da assemblare, con conseguenti ricadute positive sul costo della manodopera e sui tempi di cantiere.

7.4.2. Soluzioni progettuali elaborate per il confronto

c.a. convenzionale gettato in opera

In relazione ai parametri dimensionali ipotizzati, la tecnologia del c.a. in opera risulta senza dubbio quella più diffusa, ma non consente di soddisfare la richiesta di ottenere luci particolarmente ampie, determinando un maggior ingombro degli elementi strutturali all'interno e sul perimetro dell'edificio, con conseguenti ricadute sull'organizzazione funzionale degli ambienti e sull'aspetto complessivo dell'edificio.

È stata ipotizzata una maglia strutturale di 4,5x4,5 m, con pilastri a sezione rettangolare (40x40) cm e travi in altezza (30x50 cm).

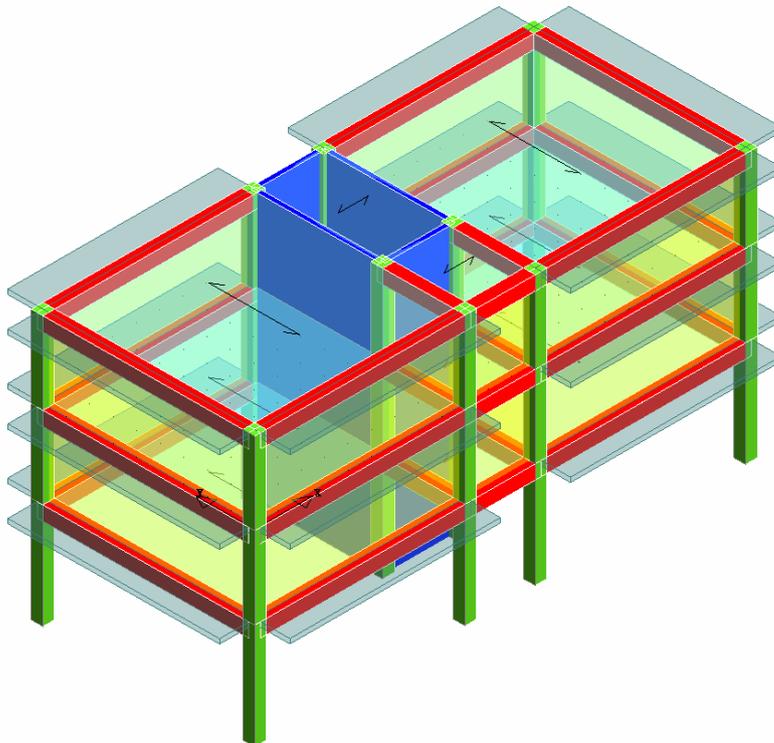


La struttura in c.a. gettato in opera verificata con il software STS-CDSwin 2008.

c.a. prefabbricato

Per realizzare luci di 9 m con le tecnologie convenzionali del c.a. è necessario ipotizzare l'impiego di elementi prefabbricati.

La scelta del c.a. prefabbricato consente inoltre di operare confronti più significativi nelle diverse fasi del ciclo di vita per la sostanziale analogia con la tecnologia dell'UHPC (in termini di modalità di produzione, trasporto e messa in opera). Sono ipotizzati pilastri a sezione quadrata (50x50 cm) e travi a L e T rovescia (50x60 cm).²⁰⁵



La struttura in c.a. prefabbricato verificata con il software STS-CDSwin 2008.

²⁰⁵ Per il predimensionamento degli elementi strutturali si è fatto riferimento alla documentazione tecnica dell'azienda RDB.

I dati quantitativi di base, uniti alle prestazioni in condizioni d'uso espresse dai singoli prodotti e alle indicazioni di progetto relative ai tre diversi sistemi, sono elaborati con l'obiettivo di ottenere parametri confrontabili rispetto ad alcuni indicatori selezionati.²⁰⁶

- **Consumo di risorse materiali - t, m3**
- **Consumo di energia primaria non rinnovabile (EE) - GJeq**
- **Emissioni di gas serra (GWP) - kgCO2eq**

Lo studio LCA proposto si riferisce ai carichi ambientali nel ciclo di vita della specifica soluzione tecnica adottata per l'edificio oggetto dello studio in relazione al subsistema tecnologico delle strutture di elevazione verticali e orizzontali, piuttosto che l'edificio nel suo complesso (si escludono quindi non solo gli elementi tecnici che compongono l'involucro edilizio e gli impianti, ma anche le strutture secondarie dei solai e dei balconi), esaminando parametri chiave che permettono il confronto tra gli impatti prodotti dalle diverse alternative tecniche ipotizzate. È da considerare come nelle diverse fasi del ciclo di vita incidono parametri strettamente legati a specifiche condizioni geografiche (distanze dal cantiere dei siti di produzione e di smaltimento e riciclaggio) e produttive (grado di diffusione del materiale, mix energetici locali, filiere di riciclaggio esistenti). Per una maggiore significatività dello studio, si è ipotizzato di realizzare l'edificio tipo in Francia, in modo da poter equiparare alcuni dati fondamentali tra le diverse soluzioni (realizzando ad esempio l'edificio a Roma il sito di prefabbricazione *Ductal* più vicino si troverebbe a circa 850 km, con una conseguente incidenza eccessiva della fase di trasporto) e in modo da poter sfruttare i dati raccolti sul *Ductal* nel corso della ricerca che riguardano studi precedenti condotti in Francia (in particolare per quanto riguarda le dichiarazioni ambientali di prodotto).

7.5.2. Dati di origine per il confronto

I dati risultanti dalla simulazione utili ai fini della valutazione dell'eco-efficienza, riguardano le quantità necessarie di calcestruzzo e armatura nei tre sistemi individuati. Sulla base di questi valori, è possibile risalire, considerando la composizione media delle tre tipologie di conglomerato, alle singole quantità delle materie prime impiegate.

²⁰⁶ I dati non desunti direttamente da studi precedenti sono stati ottenuti attraverso l'elaborazione con il software LCA Simapro, utilizzando come metodo di armonizzazione l'EPD 2007.

Tale passaggio consente, in assenza di etichettature ambientali specifiche, di realizzare la fase di *inventory* relativa alle fasi di pre-produzione e produzione, individuando gli impatti prodotti dalle diverse materie prime, dalla fase di estrazione alle lavorazioni in stabilimento.

	Soluzione A c.a. in opera	Soluzione B c.a. prefabbricato	Soluzione C <i>Ductal</i>
Cls ordinario (30 Mpa)	61,40 mc	-	-
Cls ordinario (60 Mpa)	-	81,86 mc	-
Ductal	-	-	15,72 mc
Acciaio armature	9409,48 kg	3876,84 kg	-
Acciaio trefoli precomp	-	2584,56 kg	1100,25 kg

Dati quantitativi risultanti dal progetto delle tre soluzioni.

	Materia prima	Quantità (kg/mc)
Cls ordinario (30 Mpa)	Cemento	300
	Sabbia	580
	Ghiaia	1240
	Acqua	180
Cls ordinario (60 Mpa)	Cemento	350
	Sabbia	1075
	Inerti fini	200
	Inerti grossi	700
	Additivi	11
Ductal (200 MPa)	Acqua	158
	Cemento	710
	Inerti fini	210
	Fumo di silice	230
	Sabbia	1020
	Fibre metalliche	160
	Additivi	13
Acqua	140	

Materie prime impiegate nei tre sistemi per unità di prodotto.

La presenza di una dichiarazione ambientale di prodotto per il *Ductal* realizzata in Francia (Ecobilan, 2005) consente di impiegare tali dati nell'impostazione dello studio LCA, confrontandoli con gli EPD francesi relativi ai calcestruzzi convenzionali.

7.5.3. Risultati del confronto

Pre-produzione e produzione analisi degli impatti ambientali prodotti dall'industria del cemento

I carichi ambientali relativi alle fasi di pre-produzione e produzione rappresentano generalmente la quota più rilevante di impatti all'interno del ciclo di vita dei prodotti edilizi. La presenza di dichiarazioni ambientali di prodotto consente di evitare una fase di *inventory* particolarmente complessa che potrebbe risultare inattendibile per l'incompletezza dei dati a disposizione.

Nel caso oggetto di studio si è scelto di considerare i dati pubblicati in Francia relativi agli impatti in fase di produzione delle diverse tipologie di calcestruzzo, dell'acciaio primario (trefoli da precompressione) e secondario (barre di armatura) e quelli desunti dalla dichiarazione ambientale di prodotto del *Ductal*.

Materiale	Densità (Kg/m3)	EE (GJeq/m3)	GWP (KgCO2eq/m3)
Cls ordinario 30 MPa	2300	1,80	206,7
Cls ordinario 60 MPa	2400	2,07	237,7
Ductal FM	2500	11,48	950
Acciaio primario	7800	148,20	13260
Acciaio secondario	7800	62,40	3120

Come si può notare gli impatti per unità di prodotto del *Ductal* sono nettamente più elevati rispetto ai calcestruzzi ordinari,²⁰⁷ per cui i vantaggi in termini di eco-efficienza dipendono strettamente dall'ottimizzazione delle proprietà meccaniche in fase di progetto, in modo da poter ridurre significativamente le quantità di prodotto impiegate. Sulla base degli input di progetto gli impatti prodotti in questa fase sono i seguenti:

Impatti in fase di produzione						
	materia (t cls)	materia (t acc.)	materia (t tot)	materia (mc tot)	EE (GJeq)	GWP (KgCO2eq)
Ductal	39,30*	1,10	40,40	15,72	201,35	16,80
C.a. prefabbricato	194,83	7,11	201,94	81,86	254,75	25,66
C.a. in opera	141,21	9,41	150,62	61,40	306,42	16,45

* di cui 2,5 t circa fibre di acciaio.

A questi impatti vanno aggiunti quelli relativi alla fase di post-produzione che porta alla realizzazione del prodotto che successivamente verrà trasportato in cantiere. Nel caso

²⁰⁷ Ciò è dovuto in massima parte alla presenza delle fibre di acciaio che richiedono all'origine un processo produttivo fortemente impattante.

del *Ductal* e del c.a. prefabbricato si considerano gli impatti prodotti nell'impianto di prefabbricazione per la realizzazione dei singoli elementi strutturali, mentre nel caso del c.a. in opera si considerano gli impatti prodotti nella centrale di betonaggio per la realizzazione del calcestruzzo *ready-mix*.²⁰⁸

Impatti aggiuntivi in fase di produzione		
	EE (GJ _{eq})	GWP (KgCO _{2eq})
Ductal	12,28	0,39
C.a. prefabbricato	63,94	2,05
C.a. in opera	2,03	0,04

Trasporto

analisi degli impatti ambientali prodotti dalle fasi di trasporto in cantiere

In fase di trasporto dei prodotti in cantiere sono stati considerati nel caso del *Ductal* e del c.a. prefabbricato gli impatti prodotti da un autoarticolato di capacità massima 40 t (83 mc), con un container delle dimensioni standard 12x2,5x2,75 m, in grado quindi di trasportare anche gli elementi di maggiori dimensioni (in questo caso i pilastri prefabbricati di lunghezza 11,5 m). Nel caso del c.a. in opera è stata considerata un'autobetoniera con capacità 4,5 m³ e gli impatti conseguenti dal numero complessivo di viaggi da compiere.²⁰⁹

Le distanze dal cantiere sono state considerate ipotizzando che l'impianto di prefabbricazione del c.a. convenzionali produca anche gli elementi strutturali in *Ductal*; nel caso del c.a. in opera si valuta la distanza dalla centrale di betonaggio, supposta per semplicità uguale alla distanza del cantiere dall'azienda produttrice dei ferri d'armatura.

Distanze dal cantiere	
	km
Ductal	75
C.a. prefabbricato	
C.a. in opera	25
Ferri di armatura	

²⁰⁸ I dati di inventario per questa fase sono stati desunti dallo studio di Medgar L. Marceau, Michael A. Nisbet, Martha G. VanGeem, *Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete*, Portland Cement Association, 2007.

²⁰⁹ I dati di inventario per questa fase sono stati desunti dallo studio di Kenji Kawai et al., *Inventory data and case studies for environmental performance evaluation of concrete structure construction*, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 3, n. 3, ottobre 2005, pp. 435-456.

Impatti totali in fase di trasporto		
	EE (GJ _{eq})	GWP (KgCO _{2eq})
Ductal	3,94	0,29
C.a. prefabbricato	19,69	1,47
C.a. in opera	13,36	0,92

Costruzione

analisi degli impatti ambientali prodotti in fase di messa in opera

In fase di messa in opera e assemblaggio in cantiere gli impatti prodotti dalla soluzione con c.a. in opera risulta notevolmente più impattante delle due soluzioni prefabbricate. Questo valore va in parte a compensare gli impatti aggiuntivi in fase di produzione che risultano più elevati nel caso del *Ductal* e del c.a. prefabbricato, che una volta trasportati in cantiere richiedono unicamente il sollevamento in quota e l'assemblaggio degli elementi.

Nel caso delle soluzioni prefabbricate sono stati considerati gli impatti prodotti da una gru di cantiere di capacità massima 8 t, alimentata a diesel.²¹⁰ Sono stati trascurati gli impatti prodotti dalla connessione dei singoli elementi tramite getto integrativo o fissaggio meccanico. Per la soluzione con c.a. in opera sono state considerate gli impatti prodotti dalla betoniera e dalla pompa elettrica in relazione alle ore effettive di getto,²¹¹ trascurando gli impatti prodotti dalla vibrazione del cls e dall'approvvigionamento di acqua necessaria a mantenere fluido il getto.

Impatti totali in fase di costruzione		
	EE (GJ _{eq})	GWP (KgCO _{2eq})
Ductal	0,01	0,00*
C.a. prefabbricato	0,03	0,0023
C.a. in opera	4,13	0,28

*impatti trascurabili

Esercizio e gestione

analisi degli impatti ambientali prodotti nella fase di vita utile della struttura

Gli impatti prodotti in fase di gestione riguardano gli interventi di ripristino strutturale necessari a garantire il mantenimento delle prestazioni meccaniche nel tempo degli

²¹⁰ Per desumere gli impatti effettivi prodotti dalla gru in relazione al peso effettivamente sollevato e alle altezze di progetto si è fatto riferimento al metodo impiegato nella ricerca condotta da ANDIL e Università degli Studi di Firenze sulla valutazione LCA dei prodotti in laterizio, cit. in Caterina Gargari, Elisabetta Palumbo "Le strategie operative per la valutazione di impatto ambientale dei prodotti da costruzione", in Paolo Neri (a cura di), *Verso la valutazione ambientale degli edifici: Life Cycle Assessment a supporto della progettazione Eco-Sostenibile*, Alinea, Firenze, 2008.

²¹¹ Dati di inventario desunti da Kenji Kawai, cit., p. 441.

elementi soggetti a degrado. Nel caso dell'edificio in esame si è ipotizzato che i pilastri del piano terra e le travi perimetrali del primo livello siano a faccia vista, considerando una chiusura trasparente posta sul filo interno dei pilastri. La superficie considerata da mantenere è posta pari al 50% della superficie esposta agli agenti atmosferici e si ipotizza un intervento di ripristino con malta cementizia e rasante per gli elementi strutturali esposti agli agenti atmosferici (pilastri piano terra e travi primo piano), escludendo nel calcolo degli impatti prodotti il passivante per le armature e la tinteggiatura finale. La quantità di materiale da ripristino necessaria è di circa 40 kg/mq. Nel caso del *Ductal* le prove di invecchiamento e gli interventi sperimentali realizzati hanno dimostrato una elevata durabilità, che dovrebbe garantire l'affidabilità degli elementi strutturali fino a 300 anni senza interventi di manutenzione.

Nel modello in esame si è scelto di considerare in via prudenziale una vita utile di 150 anni, considerando interventi di manutenzione ogni 15 anni nel caso del c.a. in opera e 20 anni nel caso del c.a. prefabbricato, data la maggiore qualità nel confezionamento dell'impasto.

Gli impatti considerati in fase di gestione riguardano dunque la produzione e il trasporto in cantiere del materiale da ripristino (distanza fissata 15 km), sono trascurati gli impatti in fase di messa in opera.

Impatti totali in fase di gestione				
	materia (t tot)	materia (mc tot)	EE (GJ_{eq})	GWP (KgCO_{2eq})
Ductal	0	0	0	0
C.a. prefabbricato	13,16	17,11	15,05	2,64
C.a. in opera	18,40	23,92	21,04	3,69

Dismissione e riciclaggio

analisi degli impatti ambientali prodotti in fase di demolizione della struttura e nella filiera del riciclaggio

In fase di dismissione e riciclaggio si è ritenuto opportuno valutare sia gli impatti prodotti dalla demolizione della struttura sia gli impatti e i benefici ambientali derivanti dal riciclaggio, ipotizzando uno scenario di fine vita che massimizzi l'efficienza della filiera del riciclaggio.²¹²

²¹² I dati di inventario per questa fase sono stati desunti dal rapporto di ricerca di Gian Andrea Bigini et al., *Valutazione della sostenibilità ambientale di una casa a basso consumo energetico con metodologia LCA*, DITAG – Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie, Politecnico di Torino, ottobre 2007.

Il cemento armato rientra nella categoria di dismissione “rifiuti da demolizione”, idealmente riciclabili al 100%, recuperati in seguito alla demolizione controllata dell'edificio e riprocessati per ottenere aggregati da riciclo.

Per quanto riguarda i ferri di armatura il 70% viene recuperato in fase di demolizione, il 30% in seguito al riciclaggio degli cls in un frantoio dotato di deferrizzatore (il che implica la necessità di prevedere una fase successiva di trasporto verso l'impianto di riciclaggio dell'acciaio).²¹³

Le distanze dal cantiere e tra i diversi stabilimenti coinvolti nella filiera del riciclaggio è ipotizzata per semplicità sempre pari a 20 km.²¹⁴

Per la fase di dismissione viene adottato il metodo LCA noto come “*avoided products*”, in base al quale ai processi di riciclaggio viene scalata l'evitata produzione dei corrispondenti prodotti vergini e dei conseguenti carichi ambientali, in modo da poter valutare i benefici netti derivanti dalla differenza tra impatti evitati e impatti causati.²¹⁵

Processi in fase di dismissione

- abbattimento in cantiere con attrezzatura meccanica
- carico materie su autoarticolato
- trasporto materiale da demolizione (riciclaggio + scarti)
- carico macerie su tramoggia
- trattamento macerie (frantoio riciclo aggregati)

Impatti totali in fase di dismissione		
	EE (GJ _{eq})	GWP (KgCO _{2eq})
Ductal	1,81	0,23
C.a. prefabbricato	9,12	1,17
C.a. in opera	7,03	0,89

Avoided products

- Aggregati
- Rottami di acciaio

²¹³ Dati desunti da uno studio LCA dell'International Iron and Steel Institute, Louis Brimacombe, Paul Shonfield, *Sustainability and Steel Recycling*, New Steel Construction, n. 9, 2001, pp. 19-21.

²¹⁴ La distanza dei siti riciclaggio dal cantiere è di notevole importanza soprattutto nel caso degli aggregati. Infatti, «alcuni recenti studi LCA hanno messo in evidenza che, a causa degli impatti dovuti ai trasporti degli inerti riciclati e all'aumento della percentuale di cemento necessaria come legante, il calcestruzzo con aggregati riciclati determina maggiori impatti ambientali, rispetto al calcestruzzo con aggregati non di riciclo, in termini di energia utilizzata ed emissioni inquinanti, mentre assicura un minor impatto ambientale in termini di consumo di risorse materiali». . Cfr. Monica Lavagna, “Dall'efficienza energetica all'eco-efficienza”, cit., p. XVI.

²¹⁵ Si noti che tale impostazione tende a favorire in questo caso le tecnologie convenzionali. Ipotizzando infatti uno scenario “100% riciclaggio” è possibile ammortizzare nel fine vita gli elevati carichi ambientali legati alla fase di produzione, che generalmente sono di molti ordini di grandezza superiori a quelli della fase di dismissione e riciclaggio. In questo modo vengono per così dire “premiati” maggiormente quei processi che impiegano elevate quantità di materia in fase di produzione, poiché viene loro sottratta una quota rilevante di impatti nel fine vita.

Impatti totali evitati		
	EE (GJeq)	GWP (KgCO ₂ eq)
Ductal	-17,77	-1,21
C.a. prefabbricato	-88,81	-4,56
C.a. in opera	-66,21	-4,49

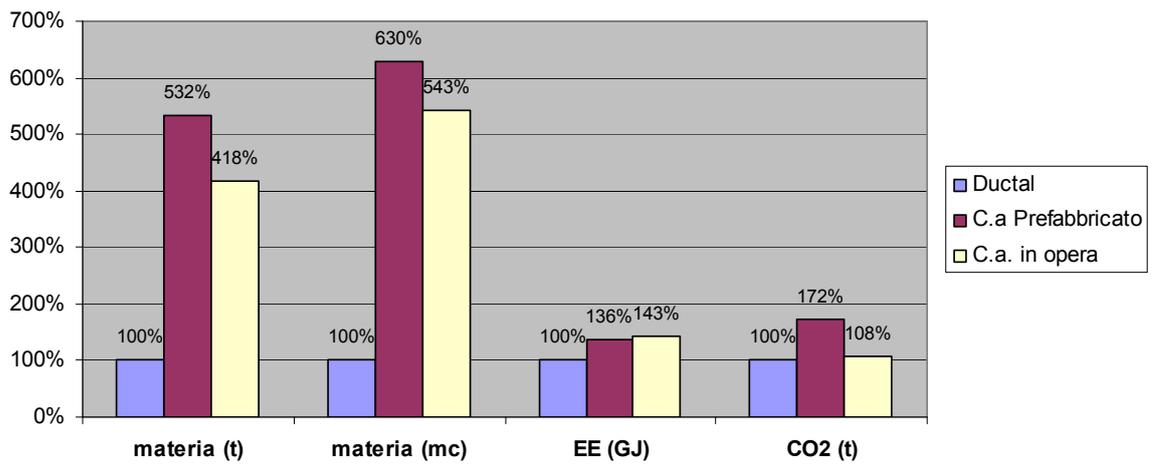
7.5.4. Risultati sintetici del confronto

Fasi LCA

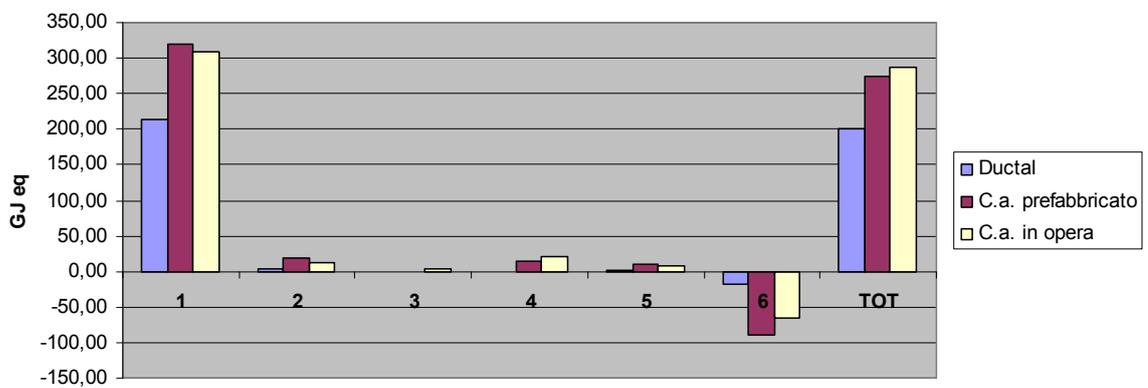
1. Pre-produzione e produzione
2. Trasporto
3. Messa in opera
4. Esercizio e gestione
5. Dismissione e riciclaggio
6. Impatti evitati

Indicatori	Soluzioni	Fasi LCA						TOT
		1	2	3	4	5	6	
Materia (t)	Ductal	40,40	-	-	0	-	-	40,40
	C.a. prefabbricato	201,94	-	-	13,16	-	-	215,10
	C.a. in opera	150,62	-	-	18,40	-	-	169,02
Materia (m3)	Ductal	15,72	-	-	0	-	-	15,72
	C.a. prefabbricato	81,86	-	-	17,11	-	-	69,97
	C.a. in opera	61,40	-	-	23,92	-	-	85,32
EE (GJeq)	Ductal	213,63	3,94	0,01	0,00	1,81	-17,77	201,62
	C.a. prefabbricato	318,69	19,69	0,03	15,05	9,12	-88,81	273,77
	C.a. in opera	308,45	13,36	4,13	21,04	7,03	-66,21	287,80
GWP (tCO ₂ eq)	Ductal	17,19	0,29	-*	-*	0,23	-1,21	16,50
	C.a. prefabbricato	27,71	1,47	-*	2,64	1,17	-4,56	28,43
	C.a. in opera	16,49	0,92	0,28	3,69	0,89	-4,49	17,78

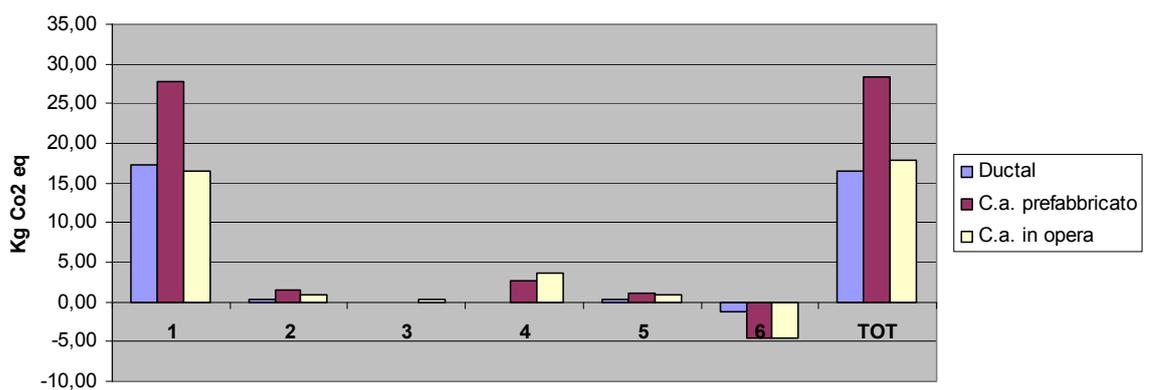
* Trascurabile



Confronto degli impatti prodotti dalle tre soluzioni nel ciclo di vita (Ductal base 100)



Confronto dell'energia richiesta (EE, GJeq) nel ciclo di vita per le tre soluzioni

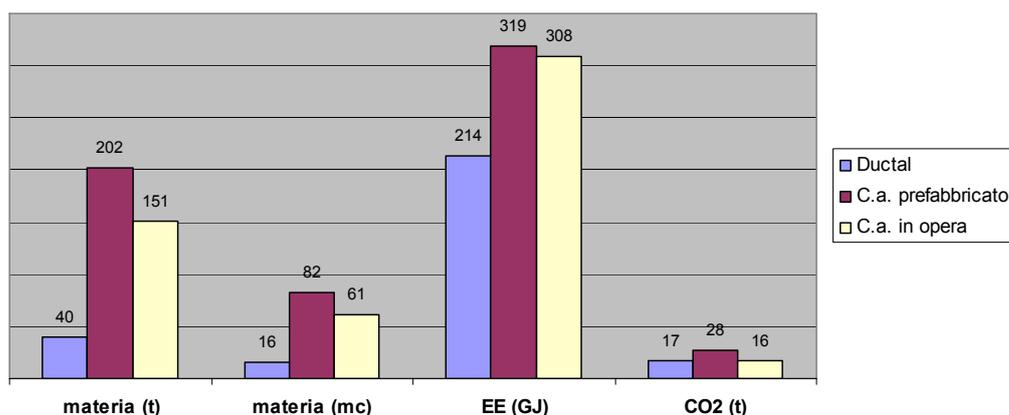


Confronto delle emissioni di gas serra (GWP, tCO2eq) nel ciclo di vita per le tre soluzioni

7.5.5. Analisi dei risultati

Dal confronto effettuato si evince chiaramente come, secondo i parametri considerati nel modello LCA, la soluzione realizzata in UHPC offre notevoli risparmi nel ciclo di vita sia dal punto di vista dell'impiego di risorse materiali ed energetiche che rispetto alle emissioni di agenti inquinanti. In particolare, dal punto di vista dell'intensità materiale, le soluzioni convenzionali richiedono quantitativi decisamente superiori (5,4 volte la soluzione in opera e 6,3 volte quella in c.a. prefabbricato). I consumi di energia sono più elevati del 36% nel caso del c.a. prefabbricato e del 43% nel caso del c.a. in opera, mentre le emissioni di gas serra sono superiori rispettivamente del 72% e dell'8%.

La fase di produzione è quella in assoluto più impattante in tutte le soluzioni considerate, cui segue la fase di trasporto dei materiali in cantiere,²¹⁶ mentre sono in proporzione trascurabili gli impatti prodotti in fase di messa in opera. Un vantaggio ulteriore della soluzione in UHPC è dovuto all'assenza di impatti in fase di gestione, non richiedendo operazioni di manutenzione che innescano una nuova filiera produttiva e nuove fasi di trasporto che producono impatti significativi se osservati nell'arco della vita utile dell'edificio.



Impatti in fase di produzione

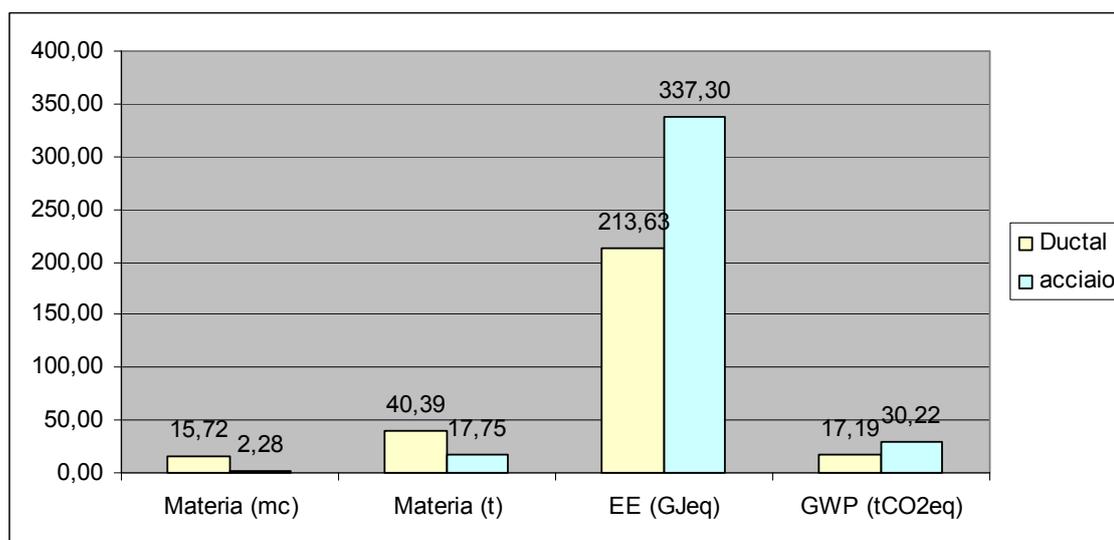
Considerando le quantità specifiche di materia impiegata, si evince come una progettazione tesa ad ottimizzare la morfologia degli elementi strutturali in funzione delle sollecitazioni consenta di ridurre ulteriormente le quantità necessarie sia di UHPC che di armatura e, di conseguenza, gli impatti ambientali prodotti.²¹⁷

²¹⁶ La fase di trasporto produce i maggiori impatti energetici nella soluzione con c.a. prefabbricato, tuttavia occorre considerare come l'ipotesi assunta sia che l'impianto di prefabbricazione dell' UHPC si trovi alla stessa distanza dal cantiere, e che dunque ci si trovi in contesto in cui il prodotto è già ampiamente diffuso.

²¹⁷ In questo senso la struttura a telaio non si rivela particolarmente idonea all'impiego dell' UHPC poiché per ottenere luci elevate è richiesta una discreta quantità di acciaio da precompressione. Soluzioni più idonee possono essere realizzate impiegando elementi sottili in strutture resistenti per forma.

D'altra parte risulta evidente come una soluzione convenzionale in c.a. prefabbricato risulti sconveniente per una struttura di ridotte dimensioni come quella oggetto di studio, poiché per ottenere le luci richieste sono comunque necessarie quantità notevoli di materiale che producono impatti particolarmente elevati, rendendo preferibile da questo punto di vista la soluzione in opera.

Unicamente per la fase di produzione, è stato operato un confronto supplementare prendendo come modello di riferimento una struttura in acciaio analoga per dimensioni e numero di elementi strutturali a quella in UHPC oggetto di studio, ottenuta impiegando per i pilastri dei profili HEA 240 e per le travi delle IPE 360.²¹⁸ I risultati mostrano come mentre dal punto di vista del consumo di materie prime la soluzione in acciaio risulta sicuramente più conveniente (-85% circa in termini di volume, -56% in termini di peso), la soluzione in UHPC produce minori impatti ambientali (-37% in termini di EE, -43% in termini di GWP). Tale risultato capovolge la concezione tradizionale che individua nell'acciaio una tecnologia strutturale più eco-efficiente del calcestruzzo, almeno per quanto riguarda gli impatti prodotti dall'estrazione delle materie prime alla produzione in stabilimento.



Confronto degli impatti in fase di produzione tra la struttura in *Ductal* e quella in acciaio.

Lo studio LCA realizzato consente anche di evidenziare come ai significativi vantaggi dal punto di vista ambientale derivanti da un impiego consapevole degli UHPC, sia possibile aggiungere anche una convenienza economica, soprattutto in seguito ad una maggiore diffusione di tali tipologie di prodotti.

²¹⁸ La struttura così realizzata impiega 17,75 mc di acciaio primario, pari a 2,28 t.

Attualmente il costo del *Ductal* (in Francia e Stati Uniti) è pari a circa 7-8 volte quello del calcestruzzo ordinario e 5-6 volte quello ad alta resistenza. Le quantità di progetto richieste sono circa 4 volte superiori nel caso del c.a. in opera e circa 5 volte superiori per il c.a. prefabbricato. Se a questi costi si aggiungono i maggiori oneri in fase di trasporto per il numero di viaggi necessari e gli interventi di manutenzione nel tempo, è possibile ipotizzare una spesa equivalente, se non addirittura minore, anche considerando una vita utile di progetto inferiore ai 100 anni.

L'efficienza economica proviene inoltre dai risparmi sulla manodopera e sui tempi di realizzazione, ottimizzati rispetto alle soluzioni prefabbricate convenzionali grazie al minor peso ed ingombro degli elementi tecnici, mentre ulteriori risparmi derivano dalla minore incidenza di eventuali materiali complementari (quali pannelli isolanti per correggere i ponti termici), grazie alla ridotta superficie degli elementi stessi.

Da un punto di vista più generale, lo studio LCA realizzato può rivelarsi uno strumento idoneo, una volta sottoposto a processi di verifica e integrazione (ad esempio con un approccio che consideri i *Life Cycle Costs* in maniera più strutturata), per valutare allo stesso tempo i livelli di efficienza ambientale ed economica raggiungibili da nuove classi di calcestruzzi strutturali sviluppati con il contributo delle nanotecnologie. Modificando i dati di *inventory* relativi al prodotto, prestando particolare attenzione alla definizione degli impatti quando nel processo produttivo è previsto l'impiego di nanomateriali (sia in forma solida che come additivi), nonché i dati quantitativi di base, è possibile aprire la strada ad una maggiore diffusione di quei prodotti nanostrutturati che oggettivamente non producono rischi per l'uomo e l'ambiente, ma anzi garantiscono impatti minori anche rispetto alle tecnologie convenzionali.

APPENDICE A - Fogli di calcolo fase di produzione

DUCTAL						
Pilastrini 30x30						
area sez.	h	n. pilastrini	mc	kg		
0,9	11,5	6	6,21	15525		
Travi I 20x40						
area sez.	ml/liv.	n. livelli	mc	kg		
0,0512	61,9	3	9,51	23769,6		
TOTALE UHPC			Materia mc	Materia kg	EE (1mc=11,48GJeq)	GWP (1mc=850kgCO2eq)
			15,72	39294,6	180,44 GJeq	14931,95 kgCO2eq
Armatura - trefoli da precompressione (dati da documentazione Ductal, ca 70 kg/mc)						
TOTALE ACCIAIO PRIMARIO			Materia mc	Materia kg	EE (1mc=148,2GJeq)	GWP (1mc=13260kgCO2eq)
			0,14	1100,25	20,90 GJeq	1870,42 kgCO2eq
TOTALE IMPATTI			Materia (mc)	Materia (t)	EE (GJeq)	GWP (tCO2eq)
			15,72	40,39	201,35	16,80

C.A. PREFABBRICATO						
Pilastrini 50x50						
area sez.	h	n. pilastrini	mc	kg		
0,25	11,5	6	17,25	41055		
Travi L 60/28						
area sez.	ml/liv.	n. livelli	mc	kg		
0,356	60,5	3	64,614	153781,3		
TOTALE CLS 60 MPa			Materia mc	Materia kg	EE (1mc=2,07GJeq)	GWP (1mc=237,7kgCO2eq)
			81,86	194836,3	169,46 GJeq	19459,07 kgCO2eq
Armatura pilastrini - valori medi per h. 10-12 m, sovraccarico standard, acciaio Feb 44k, 6Φ16						
TOTALE ACCIAIO PRIMARIO			Materia mc	Materia kg	EE (1mc=148,2GJeq)	GWP (1mc=13260kgCO2eq)
			0,14	1100,25	20,90 GJeq	1870,42 kgCO2eq
Armatura travi - valori medi trefoli da precomp. (0,5') 40 kg/mc; acciaio Feb 44k 60 kg/mc						
TOTALE ACCIAIO PRIMARIO			Materia mc	Materia kg	EE (1mc=148,2GJeq)	GWP (1mc=13260kgCO2eq)
			0,33	2584,56	49,11	4393,75
TOTALE ACCIAIO Feb 44k			Materia mc	Materia kg	EE (1mc=62,4GJeq)	GWP (1mc=3120kgCO2eq)
			0,50	3876,84	31,01	1550,74
TOTALE IMPATTI			Materia (mc)	Materia (t)	EE (GJeq)	GWP (kgCO2eq)
			81,86	201,94	254,75	25,66

C.A. IN OPERA						
Pilastrini 30x40						
area sez.	h	n. pilastrini	mc	kg		
0,12	4,5	14	7,56	17388		
0,12	3,5	28	5,88	27048		
Travi I 30x50						
area sez.	ml/liv.	n. livelli	mc	kg		
0,15	93,5	3	42,075	96772,5		
TOTALE CLS 30 Mpa			Materia mc	Materia kg	EE (1mc=1,8GJeq)	GWP (1mc=206,7kgCO2eq)
			61,40	141208,5	110,51 GJeq	12690,35 kgCO2eq
Armatura - (da calcolo)						
TOTALE ACCIAIO Feb 44k			Materia mc	Materia kg	EE (1mc=62,4GJeq)	GWP (1mc=3128kgCO2eq)
			1,21	9409,48	195,91 GJeq	3763,79 kgCO2eq
TOTALE IMPATTI			Materia (mc)	Materia (t)	EE (GJeq)	GWP (tCO2eq)
			61,40	150,62	306,42	16,45

	materia (t cls)	materia (t acc.)	materia (t tot)	materia (mc tot)	EE (GJ)	CO2 (t)
Ductal	39,30	1,10	40,40	15,72	201,35	16,80
Prefab	194,83	7,11	201,94	81,86	254,75	25,66
In opera	141,21	9,41	150,62	61,40	306,42	16,45

Riepilogo quantità e impatti prodotti

Impatti aggiuntivi in fase di produzione

Impianto di prefabbricazione e centrale di betonaggio

Energia impiegata ed emissioni impianto di prefabbricazione

	EE (GJeq)	GWP (KgCO2eq)	
1 mc	0,781	25,1	Fonte: Medgar L. Marceau, Michael A. Nisbet, Martha G. VanGeem, <i>Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete</i> , Portland Cement Association, 2007, p. 31, dati elaborati in Simapro.
Ductal	63,94	2054,79	
C.a. prefabbricato	12,28	394,52	

Energia impiegata ed emissioni centrale di betonaggio

	EE (GJeq)	GWP (KgCO2eq)	
1 mc	0,033	0,61	Fonte: Medgar L. Marceau, Michael A. Nisbet, Martha G. VanGeem, <i>Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete</i> , Portland Cement Association, 2007, p. 13, dati elaborati in Simapro.
C.a. in opera	2,03	37,45	

APPENDICE B - Fogli di calcolo fase di trasporto

Trasporto con autoarticolato (40 t)

	Distanze dal cantiere (km)	Incidenza materiale (tkm)
Ductal	75	3030
C.a. prefabbricato	75	15145
C.a. in opera (armatura)	25	235,25

Impatti autoarticolato

	EE (GJeq)	GWP (tCO ₂ eq)	
1 tkm	1,3	0,097	Fonte: Banca dati Buwal 250 (Truck 40 t B250).
Ductal	3,94	0,29	
C.a. prefabbricato	19,69	1,47	
C.a. in opera (arm.)	0,31	0,02	

Impatti autobetoniera (4,5 t)

	EE (GJeq)	GWP (tCO ₂ eq)	
1 h	0,554	0,038	Fonte: Kenji Kawai et al., <i>Inventory data and case studies for environmental performance evaluation of concrete structure construction</i> , Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 3, n. 3, ottobre 2005, p. 441.
1 viaggio (45 min)	0,416	0,029	
C.a. in opera (31 viaggi)	13,05	0,90	

APPENDICE C - Fogli di calcolo fase di costruzione

Caratteristiche gru tipo "topless" (capacità 8 t)

	m/min 360°/min	Potenza (kW)
Velocità sollevamento a pieno carico (m/min)	14	25
Velocità sbraccio (m/min)	30	5,5
Velocità rotazione (360°/min)	0,7	6,4

Ipotesi di progetto

	min gradi	Velocità (h)	Consumo (kWh)
Sollevamento medio (m)	8	0,01	0,24
Sbraccio medio (m)	10	0,01	0,03
Rotazione media (°)	90	0,003	0,02
Totale consumi (carico max)			0,29

Dati progetto Ductal

	peso elemento (kg)	% carico	consumo medio per elemento (kwh)	n. elementi	consumo medio tot. (kwh)
pilastrini	2587,5	32,34%	0,09	6	0,56
travi int. 9m	1132,8	14,16%	0,04	18	0,73
travi int. 3,5m	384	4,80%	0,01	9	0,12
Totale consumi					1,41

Dati progetto c.a. prefabbricato

	peso elemento (kg)	% carico	consumo medio per elemento (kwh)	n. elementi	consumo medio tot. (kwh)
pilastrini	7187,5	89,84%	0,26	6	1,55
travi int. 9m	7565	94,56%	0,27	18	4,89
travi int. 3,5m	1845	23,06%	0,07	9	0,60
Totale consumi					7,04

Impatti gru di cantiere

	EE (GJeq)	GWP (tCO2eq)	
1 kWh	4,45	0,323	Fonte: Banca dati ETH-ESU 96 (Diesel in building equipment).
Ductal	6,29	0,46	
C.a. prefabbricato	31,31	2,27	

Impatti pompa collegata ad autobetoniera

	EE (GJeq)	GWP (tCO₂eq)	Fonte: Kenji Kawai et al., <i>Inventory data and case studies for environmental performance evaluation of concrete structure construction</i> , Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 3, n. 3, ottobre 2005, p. 441.
1 mc	7,09	0,46	
C.a. in opera	1001,18	64,96	

Impatti autobetoniera (4,5 t, frequenza di getto netta 25 mc/h)

	EE (GJeq)	GWP (tCO₂eq)	Fonte: Kenji Kawai et al., <i>Inventory data and case studies for environmental performance evaluation of concrete structure construction</i> , Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 3, n. 3, ottobre 2005, p. 441.
1 h	554	38,4	
C.a. in opera (durata getto 5,65 h)	3130,10	216,96	

APPENDICE D - Fogli di calcolo fase di gestione

Interventi di manutenzione

	n. interventi in 150 anni	superficie da ripristinare (mq)	materiale da ripristino (t)
Ductal	0	0	0
C.a. prefabbricato	7	47	13,16
C.a. in opera	10	46	18,40

Impatti produzione materiale da ripristino

	EE (GJeq)	GWP (tCO ₂ eq)	
1 kg	1,03	0,192	Fonte: Banca dati Ecoinvent (<i>Cement mortar, at plant</i>).
Ductal	0	0	
C.a. prefabbricato	13554,80	2526,72	
C.a. in opera	18952,00	3532,80	

Impatti trasporto materiale da ripristino (distanza dal cantiere 15 km)

	EE (GJeq)	GWP (tCO ₂ eq)	
1 tkm	7,57	0,578	Fonte: Banca dati ETH-ESU 96 (<i>Delivery van<3,5 t</i>)..
Ductal	0	0	
C.a. prefabbricato	1494,32	114,10	
C.a. in opera	2089,32	159,53	

N.B. gli impatti in fase di messa in opera sono trascurati

APPENDICE E - Fogli di calcolo fase di dismissione

Impatti abbattimento con attrezzatura meccanica

	EE (GJ _{eq})	GWP (tCO _{2eq})	
1 mc	0,44	6,1	Fonte: Banca dati ETH-ESU 96 (<i>Excavation hydraulic digger</i>).
Ductal	6,92	95,89	
C.a. prefabbricato	36,02	499,35	
C.a. in opera	27,02	374,54	

Impatti carico macerie su autoarticolato (pala meccanica 6 MJ/t)

	EE (GJ _{eq})	GWP (tCO _{2eq})	
1 t	7,42	0,539	Fonte: Banca dati ETH-ESU 96 (<i>Diesel in building equipment</i>).
Ductal	299,77	21,78	
C.a. prefabbricato	1498,39	108,85	
C.a. in opera	1117,60	81,18	

Impatti trasporto materiale da demolizione con autoarticolato* (40t, dist. 20 km)

	EE (GJ _{eq})	GWP (tCO _{2eq})	
1 tkm	1,3	0,097	Fonte: Banca dati Buwal 250 (<i>Truck 40 t B250</i>).
Ductal	1030,38	76,88	
C.a. prefabbricato	5121,04	382,11	
C.a. in opera	3744,86	279,42	

* trasporto cls e 30% acciaio in macerie verso riciclo aggregati

Impatti trasporto materiale da demolizione con autocarro* (3,5-16t, dist. 20 km)

	EE (GJ _{eq})	GWP (tCO _{2eq})	
1 tkm	3,77	0,275	Fonte: Banca dati Ecoinvent (<i>Lorry 3,5-16 t, fleet average</i>).
Ductal	88,75	6,47	
C.a. prefabbricato	573,62	41,84	
C.a. in opera	759,18	55,38	

* trasporto acciaio verso riciclo e discarica

Impatti carico macerie su tramoggia (pala meccanica 6 MJ/t)

	EE (GJ _{eq})	GWP (tCO _{2eq})	
1 t	7,42	0,539	Fonte: Banca dati ETH-ESU 96 (<i>Diesel in building equipment</i>).
Ductal	294,05	21,36	
C.a. prefabbricato	1461,44	106,16	
C.a. in opera	1068,70	77,63	

Impatti trattamento macerie in frantoio per riciclo aggregati con frantumatore a mascelle e separatore magnetico, alimentazione elettrica (4,84MJ/t)

	EE (GJeq)	GWP (tCO₂eq)	
1 t	2,17	0,18	Fonte: Banca dati Buwal 250 (<i>Electricity France B250</i>).
Ductal	86,00	6,97	
C.a. prefabbricato	427,40	34,66	
C.a. in opera	312,55	25,35	

Impatti evitati – rottami di ferro

	EE (GJeq)	GWP (tCO₂eq)	
1 kg	0,467	0,0293	Fonte: Banca dati Ecoinvent (<i>Iron scrap, at plant</i>).
Ductal	482,08	30,25	
C.a. prefabbricato	3087,94	139,24	
C.a. in opera	4082,51	256,14	

Impatti evitati – aggregati

	EE (GJeq)	GWP (tCO₂eq)	
1 kg	0,44	0,03	Fonte: Banca dati Ecoinvent (<i>Gravel, crushed, at mine</i>).
Ductal	17292,00	1179,00	
C.a. prefabbricato	85725,20	4417,80	
C.a. in opera	62128,00	4236,00	

Ringrazio Laurence Jacques, direttore tecnico di Ductal-Lafarge Francia, l'ing. Jeffrey Chen e i ricercatori del Pole Technologique de l'Isle d'Abeau per la disponibilità con cui mi hanno accolto nei loro laboratori, nonché per la consulenza e il materiale documentativo che hanno arricchito lo sviluppo della parte applicativa della ricerca. Un grazie anche a Cinzia Palazzetti e Gino Rossi de IlCantiere che con il loro approccio "artigianale" e gli utili suggerimenti mi hanno permesso l'approfondimento di alcune problematiche progettuali e operative relative all'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni.

Desidero inoltre ringraziare il prof. arch. Giulio Zuccaro e l'arch. Francesco Cacace del Centro Studi PLINIVS dell'Università di Napoli Federico II, per gli efficaci consigli e il supporto operativo nella fase di elaborazione e di verifica dei modelli strutturali.

Un ringraziamento particolare va infine al dott. Marino Lavorgna e allo staff dei ricercatori del CNR-IMBC di Portici, la cui passione per la ricerca mi ha avvicinato ad una migliore comprensione del mondo "infinitamente piccolo" che ci circonda.

BIBLIOGRAFIA

Introduzione I materiali avanzati per l'architettura

- AA.VV., *Tecnologia dei materiali. Ceramiche, polimeri e compositi*, CittàStudi, Milano, 2001.
- ADDINGTON, Michelle, SCHODEK, Daniel, *Smart materials and technologies*, Elsevier, Oxford, 2005.
- BEYLERIAN, George M., DENT, Andrew, *Material ConneXion: the global resource of new innovative materials for architects, artists and designers*, Thames & Hudson, Londra, 2005.
- CALIGIANA, Gianni, CESARI, Francesco, *I Materiali Compositi*, Pitagora, Bologna, 2002.
- CAROTTI, Attilio, BENETTI, Paolo, *Materiali avanzati e compositi*, Pitagora, Bologna, 1999.
- CATURANO, Umberto (a cura di), *Le tecnologie dei materiali tra progetto e innovazione*, FrancoAngeli, Milano, 1996.
- ECTP (European Construction Technology Platform), *Strategic Research Agenda for the European Construction Sector. Achieving a Sustainable and Competitive Construction Sector by 2030*, Bruxelles, 2005.
- GASTALDI, Matteo, PEDEFERRI, Pietro, *Introduzione ai materiali per architettura*, UTET, Torino, 2005.
- HANNA Sean, "Responsive Material/Responsive Structure", *Subtle Technologies*, University of Toronto, Toronto, 1 giugno 2006.
- HEGGER, Martin et al., *Atlante dei materiali*, UTET Scienze Tecniche, Torino, 2006.
- LANGELLA, Carla, *Nuovi paesaggi materici: design e tecnologia dei materiali*, Alinea, Firenze, 2003.
- LATOUCHE, Serge, *Breve trattato per una decrescita serena*, Bollati Boringhieri, Torino, 2008.
- MANZINI, Ezio, *La materia dell'invenzione*, Milano, Arcadia, 1986.
- MANZINI, Ezio, VEZZOLI, Carlo, *Lo sviluppo di prodotti sostenibili. I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Maggioli, Rimini, 1998.
- NARDI, Guido, "Tecnica e cultura: considerazioni sparse", in BERTOLDINI, M. e ZANELLI, A. (a cura di), *Tecnica, progetto e scienze umane*, Libreria Clup, Milano, 2003.

- NICOLAIS Luigi, "Dalla natura ai materiali", *Come alla corte di Federico II*, Centro Congressi Federico II, Napoli, 15 maggio 2008.
- RANZO, Patrizia, LANGELLA, Carla, "Building materials for cities of tomorrow towards new materials biological qualities", in *Proceedings of 3rd European Conference REBUILD Rebuilding the city of tomorrow*, Barcellona, 2000.
- SINOPOLI, Nicola, "L'invenzione di nuovi materiali per l'architettura", in *Rassegna - L'architetto inventore*, n. 80, 2005, pp. 102-111.
- STATTMANN, Nicola, *Ultra light - super strong. A new generation of design materials*, Birkhauser, Basel 2003.
- TAGLIAGAMBE, Silvano, *L'albero flessibile. La cultura della progettualità*, Zanichelli, Bologna, 1998.
- TATANO, Valeria (a cura di), *Materiali naturartificiali. Tendenze innovative nel progetto di architettura*, officina edizioni, Roma, 2006.

Parte prima

Le nanotecnologie nel settore delle costruzioni: ricerca, innovazione e mercato

- AA. VV., *Atti del convegno Nanoweeek*, Verona, 15-20 gennaio 2007
- AA.VV., "Edilizia", in *Rapporto "Industria e Sostenibilità" - Seconda parte*, ISSI (Istituto Sviluppo Sostenibile Italia), Roma, 2005.
- ARNALL Alexander H. *Future Technologies, Today's Choices. Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; a technical, political and institutional map of emerging technologies*, Greenpeace Environmental Trust, Londra, 2003.
- AA.VV., *Proceedings of 1st International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Paisley, 23-25 giugno 2003.
- AA.VV., *Proceedings of 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Bilbao, 13-16 novembre 2006.
- ANTONINI, Ernesto, "Materiali complessi", in *Materia*, n. 58, giugno-agosto 2008, pp. 144-155.
- BONCINELLI, Edoardo, *L'anima della tecnica*, Rizzoli, Milano, 2006, p.102.
- BUTTI, Luciano, DE BIASE, Luca, *Nanotecnologie, ambiente e percezione del rischio*, Giuffrè, Milano, 2005.
- CIRIBINI, Giuseppe, *Tecnologia e progetto. Argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, CELID, Torino, 1984.
- CLAUDI DE SAINT MIHIEL, Claudio (a cura di), *Le forme dell'innovazione*, Pinelli, Milano, 1998.
- COCHET, Yves, *Pétrole apocalypse*, Fayard, Paris, 2005, p.132.

- COMMISSIONE EUROPEA, *Commission Recommendation on a code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research*, Bruxelles, febbraio 2008.
- COMMISSIONE EUROPEA, *Proceedings of NanoEuroForum 2007. Nanotechnology in Industrial Applications*, Düsseldorf, 19-21 giugno 2007.
- COMMISSIONE EUROPEA, *Nanoscienze e nanotecnologie: un piano di azione per l'Europa 2005-2009. Prima relazione sull'attuazione, 2005-2007*, Bruxelles, 2007.
- COMMISSIONE EUROPEA, *Regolamento n. 1907/2006 concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH)*, Bruxelles, luglio 2007.
- COMMISSIONE EUROPEA, *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) on The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies*, Bruxelles, marzo 2006.
- DREXLER, Eric, PHOENIX, Chris, "Safe exponential manufacturing", in *Nanotechnology*, n. 15, 2004, pp. 869-872.
- DREXLER, Eric, *The engines of creation. The coming era of nanotechnology*, Anchor Books, New York, 1986.
- DUPUY, Jean-Pierre, *Complexity and uncertainty: a prudential approach to nanotechnology*, Commissione Europea, marzo 2004.
- ELVIN, George, "NanoBioBuilding: nanotechnology, biotechnology, and the future of building", in *Proceedings of 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Bilbao, 13-16 novembre 2006.
- ELVIN, George, *The Nano Revolution. A science that works on the molecular scale is set to transform the way we build*, Architect Magazine, maggio 2007.
- EPA (Environmental Protection Agency), *TSCA Inventory Status of Nanoscale Substances - General Approach*, Washington, gennaio 2008.
- EPIFANI, Stefano et al., *Decidere l'innovazione*, Sperling & Kupfer, Milano, 2006.
- ESPOSTI, Valter et al., "L'evoluzione normativa europea nel campo della costruzione: la Direttiva 89/106", in AA.VV., *Abitare il futuro. Innovazione, tecnologia, architettura*, BE-MA, Bologna, 2003.
- FECHT, Hans-Jörg et al., *Nanotechnology Market and Company Report - Finding Hidden Pearls*, WMtech Center of Excellence Micro and Nanomaterials, Ulm, 2003.
- FEYNMAN Richard P., "There's Plenty of Room at the Bottom", *Engineering and Science*, California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, 3 febbraio 1960.
- GALLINO, Luciano, *Tecnologia e democrazia*, Einaudi, Torino, 2007.
- GIALLOCOSTA, Giorgio, *Riflessioni sull'innovazione*, Alinea, Firenze, 2004.

- HULLMANN, Angela, *The economic development of nanotechnology. An indicators based analysis*, Commissione Europea, Bruxelles, 2006.
- JANTSCH, Erich, *The Self-Organizing Universe*, Pergamon, Oxford 1980.
- LATOUCHE, Serge, *La scommessa della decrescita*, Feltrinelli, Milano, 2007.
- LAVAGNA, Monica, "Il contesto produttivo: industria e tecnologie evolute", in *Temie interpretazioni del costruire contemporaneo*, Libreria Clup, Milano, 2002, pp. 103-128.
- LEVY, Pierre, *L'intelligenza collettiva. Per un'antropologia del cyberspazio*, Feltrinelli, Milano, 2002.
- LOSASSO, Mario (a cura di), *Innovazione e progetto. Nuovi scenari per la costruzione e la sostenibilità del progetto architettonico*, CLEAN, Napoli, 2005.
- MANGIAROTTI, Anna, "La questione del trasferimento: il discorso intorno all'architettura", in Guido Nardi, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica*, FrancoAngeli, Milano, 1991, pp. 63-102.
- MANN, Surinder, *Nanoforum report: nanotechnology and construction*, Institute of Nanotechnology, Nanoforum, 2006.
- MNYUSIWALLA, Anisa et al., "Mind the gap: science & ethics", in *Nanotechnology*, n. 14, febbraio 2003.
- PAOLETTI, Ingrid, *Una finestra sul trasferimento. Tecnologie innovative per l'architettura*, Libreria Clup, Milano, 2003.
- PAWLEY, Martin, "Technology transfer", in *Architectural Review*, n. 1087, settembre 1987, pp. 31-39.
- RIFKIN, Jeremy, *Il secolo biotech*, Baldini & Castaldi, Milano, 1998.
- SCHMIDT-BLEEK, Friedrich, *The MIPS-Concept: Bridging Ecological, Economic, and Social Dimensions with Sustainability Indicators*, Wuppertal Institute, Wuppertal, 1999.
- ŞENGÜL, Hatice, et al., "Toward Sustainable Nanoproducts An Overview of Nanomanufacturing Methods", in *Journal of industrial ecology*, vol. 12 issue 3, giugno 2008.
- SEVERINO, Emanuele, *Tecnica e architettura*, Raffaello Cortina Editore, Milano 2003.
- SINOPOLI, Nicola, TATANO Valeria (a cura di), *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2002.
- SIRILLI, Giorgio, *Ricerca & Sviluppo*, Il Mulino, Bologna, 2005.
- SIMPLES CITOYENS, *Minime introduction aux nanotechnologies*, Grenoble, 2006. Tr. It. *Nano Tecnologia Mega Dominio*, Nautilus, Torino, 2007.

TANIGUCHI, Norio, "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'", *Proceedings of International Conference on Product Engineering*, Part II, Japan Society of Precision Engineering, 1974.

TONELLI Chiara, *Innovazione tecnologica in architettura e qualità dello spazio*, Gangemi, Roma 2003.

VEGETI, Mario, *Sviluppare innovazioni radicali*, ETAS, Milano, 2007.

Parte seconda

Materiali cementizi nanostrutturati

AA. VV., *Manuale dei Materiali per l'ingegneria*, McGraw Hill, Milano, 1996.

ATECAP, Presidenza del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Servizio Tecnico Centrale, *Linee guida sul calcestruzzo preconfezionato*, La Fiaccola, Milano, 2003.

BALAGURU, Perumalsamy. N., "Nanotechnology and concrete: background, opportunities and challenges", in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction Materials*, Bilbao, Spagna, 13-16 novembre 2006.

BERTOLINI, Luca, PEDEFERRI Pietro, *Tecnologia dei Materiali. Leganti e calcestruzzo*, Città Studi, Milano, 2000.

BREHM, Denise, "Nanoengineered concrete could cut carbon dioxide emissions", in *TechTalk*, vol. 51, n. 57, MIT (Massachusetts Institute of Technology), febbraio 2007.

BURLAMACCHI, Leo, *Capire il calcestruzzo*, Hoepli, Milano, 1994.

CASSAR, Luigi, *Photocatalysis of cementitious materials: clean buildings and clean air*, MRS Bulletin, maggio 2004.

COHEN, Jean-Louis, MOELLER Martin G., *Liquid Stone: New Architecture in Concrete*, Princeton Architectural Press, New York, 2006.

COLLEPARDI, Mario, *Il nuovo calcestruzzo*, IV edizione, Tintoretto, Villorba (TV), 2006.

COLLEPARDI, Mario et al., "Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC", in *Proceedings of the 6th international congress: Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities*, Dundee, 5-7 luglio 2005.

COLLEPARDI, Mario et al., "3-Self-Concrete (3SC): la prossima sfida", in *Enco Journal*, n. 24, 2003.

GOTTFRIED, Arie, "Informazione tecnica", in: AA.VV., *Manuale di progettazione edilizia*, vol. III, Hoepli, Milano, 1995.

LANNUTTI, Carlo, "L'informazione tecnica per il progettista", in *Ponte*, n° 4, aprile 2005.

MAKAR, Jon et al., "Carbon nanotube/cement composites - early results and potential applications", *Proceedings of 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*, Vancouver, 22-24 agosto 2005, pp. 1-10.

MARINO, Roberto (a cura di), *La durabilità delle strutture. Calcestruzzo e normativa*, La fiaccola, Milano 2007, e gli Atti del Convegno SaieConcrete, 2008

RICHARD, Pierre, CHEYREZY Marcel H., "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength", *Concrete Technology: Past, Present, and Future - Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium*, Mehta, San Francisco, 1994, pp. 507- 518.

ROCO, Michael C., *National Nanotechnology Initiative: past, present and future?*, NNI, 2006.

SCHNEIDER, Hartwig N. et al., "Lightweight Concrete Structures", in *Detail - Roof Structures*, n. 7/8, 2004, pp. 844-854.

SOBOLEV, Konstantin et al., "Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites", *Proceedings of ACI Session on: "Nanotechnology of concrete: recent developments and future perspectives"*, Denver, 7 novembre 2006.

SOBOLEV, Kostantin e FERRADA GUTIERREZ Miguel, "How nanotechnology can change the concrete world", in *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 84, n. 10, ottobre 2005, pp. 14-18.

THE ROYAL SOCIETY AND THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING, *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, Londra, 2004.

TONGINI FOLLI, Roberta, "Fotocatalisi antismog", in *Modulo*, n. 330, aprile 2007, pp. 325-329.

ULM, Franz-Josef, "What's the matter with concrete?", in *Proceedings Pollution Prevention through Nanotechnology Conference*, Arlington, 25 Settembre, 2007.

Documentazione tecnica aziende BASF e Italcementi

UHPC (Ultra High Performance Concrete)

ACKER, Paul, BEHLOUL Mouloud, "Ductal Technology: A Large Spectrum of Properties, A Wide Range of Applications," *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, September 13–15, 2004, pp. 11–23.

BEHLOUL, Mouloud et al., *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete: A Material for Green Buildings*, Proceedings of 7th International Congress "Concrete: Construction's Sustainable Option", Dundee, Scozia, 8-10 luglio 2008.

CNR/DT 204/2006, *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato*, Roma - CNR, rev. 2008.

D.M. 14/01/2008, *Norme Tecniche per le costruzioni 2008*.

SETRA, AFGC, *Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations provisoires*, Setra, Bagnaux, gennaio 2002.

Documentazione tecnica azienda Lafarge

LCA (Life Cycle Assessment)

ANDIL Assolaterizi, *Secondo rapporto ambientale sull'industria italiana dei laterizi*, Edigraf, Formello (RM), 2005.

BIRKELAND, Janis, *Design for sustainability. A sourcebook of integrated ecological solutions*, Earthscan, Londra 2002.

KAWAI, Kenji et al., "Inventory data and case studies for environmental performance evaluation of concrete structure construction", in *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 3, n. 3, ottobre 2005, pp. 435-456.

KAWAI, Kenji et al., *A proposal of concrete structure design methods considering environmental performance*, in *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 3, n. 1, febbraio 2005, pp. 41-51.

LAVAGNA, Monica, *Life Cycle Assessment in edilizia. Progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*, Hoepli, Milano, 2008.

LAVAGNA, Monica, "Dall'efficienza energetica all'eco-efficienza", in *Costruire in laterizio*, n. 125, settembre/ottobre 2008, pp. XIII-XVI.

MARCEAU, Medgar L. et al., *Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete*, Portland Cement Association, 2007.

MCDONOUGH, William, BRAUNGART Michael, *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, 2002, tr. It. *Dalla culla alla culla. Come conciliare tutela dell'ambiente, equità sociale e sviluppo*, Blu edizioni, Torino 2003.

NERI, Paolo (a cura di), *Verso la valutazione ambientale degli edifici: Life Cycle Assessment a supporto della progettazione Eco-Sostenibile*, Alinea, Firenze, 2008.

The Swedish Environmental Management Council, *Product Specific Requirements (PSR) for preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for product group "Cement"*, Stockholm, 2004.

Bilancio di Sostenibilità, Buzzi Unicem, 2004

Ductal, Rapport Ecobilan, Lafarge, 2005.

Tutorial

Manuale software SDS-CDSwin 2008.

Manuale software *SimaPro 7.1*.

SITOGRAFIA

www.materialconnexion.com/ - Database di materiali avanzati

<http://www.azom.com/> - The A to Z of Materials

<http://www.wupperinst.org/> - Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy

<http://cordis.europa.eu/nanotechnology/> - Commissione Europea, Nanotecnologie

<http://www.nanoforum.org/> - European Nanotechnology Gateway

<http://www.venetonanotech.it/> - Distretto Italiano delle Nanotecnologie

<http://www.nanotec.it/> - Centro Italiano per le Nanotecnologie

<http://www.azonano.com/> - The A to Z of Nanotechnology

<http://www.crnano.org/> - Center for Responsible Nanotechnology

<http://www.nanowerk.com/> - Nanotechnology and nanoscience

www.nano.gov - NNI, National Nanotechnology Initiative

<http://www.nanotechbuzz.com/> - Nanotech news

<http://www.greentechforum.net/> - Nanotechnology for Green Buildings

<http://www.nanoarchitecture.net/> - Architectural implications of nanotechnology

<http://nanotecnologiayarquitectura.blogspot.com/>.- Ernesto Ocampo Ruiz,

Nanotecnología y Arquitectura

<http://lca.jrc.ec.europa.eu/EPLCA/> - European Platform for Life Cycle Assessment

www.environdec.com/ - EPD, Swedish Environmental Management Council