

Università degli Studi di Napoli "Federico II"
Dipartimento di Configurazione e Attuazione dell'Architettura
Dipartimento di Progettazione Urbana e di Urbanistica

Dottorato di ricerca in Tecnologia dell'Architettura
XXIII ciclo

dottoranda: Paola Campanella

Tutor: Prof. Aldo Capasso

Co-tutor: Prof. Laura Bellia

anno accademico 2010/2011

**Involucro tessile e comfort ambientale.
Potenzialità e limiti delle chiusure a membrana pretesa**

Il coordinatore
Prof. Mario Losasso

INDICE

INTRODUZIONE

CAPITOLO 1: L'INVOLUCRO TESSILE

- 1.1 Le proprietà dell'involucro tessile per il progetto contemporaneo
 - 1.1.1 I termini chiave degli involucri tessili: classi di requisiti tecnologici di riferimento
 - 1.1.2 Lo stato della ricerca sui prodotti tessili: Università, Istituti di ricerca, Industria
 - 1.1.3 Alcune realizzazioni di involucri tessili in Italia e nel mondo
- 1.2 Integrazione Involucro-Struttura: l'impiego delle chiusure a membrana pretesa nell'involucro edilizio
 - 1.2.1 La flessibilità tecnologica delle facciate tessili
 - 1.2.2 Il sistema integrato involucro-struttura
 - 1.2.3 L' integrabilità delle facciate tessili
- 1.3 Realizzazione e Utilizzazione: l'impiego delle chiusure a membrana pretesa nelle fasi di costruzione, gestione e dismissione del processo edilizio
 - 1.3.1 La leggerezza strutturale delle membrane tessili e i requisiti tecnologici connessi
 - 1.3.2 Il ciclo di vita di prodotti e componenti tessili
 - 1.3.3 Manutenibilità e modalità di dismissione delle facciate tessili

CAPITOLO 2: INVOLUCRO TESSILE E COMFORT AMBIENTALE

- 2.1 Percezione Visiva. Il controllo della forma nelle superfici tessili
 - 2.1.1 Implicazioni della forma sulle problematiche connesse alla percezione visiva
- 2.2 Gli aspetti percettivi dell'involucro tessile e loro implicazioni sul comfort ambientale
 - 2.2.1 Controllo dei flussi luminosi: trasmissione, riflessione e assorbimento luminoso
 - 2.2.2 Le ricadute del controllo dei flussi luminosi sugli aspetti termici e acustici. Parametri prestazionali
 - 2.2.2.1 Nuove tecnologie per l'isolamento termo-acustico degli involucri tessili: sistemi adattivi, sistemi con isolanti traslucidi, tessuti interattivi, tessuti spacer
- 2.3 Classificazione e definizione delle proprietà ottiche delle membrane tessili

CAPITOLO 3: LETTURA PRESTAZIONALE DI CASI STUDIO

- 3.1 Schedatura di soluzioni progettuali per determinate applicazioni
 - 3.1.1 UNITED BAMBOO, Acconci Studio, Tokyo
 - 3.1.2 BASE OPERATIVA LUNA ROSSA, Renzo Piano Building Workshop, Valencia

- 3.1.3 WALL HOUSE, FAR frohn&rojas - Koln, Santiago del Cile
- 3.1.4 INFLATABLE TEA HOUSE, Kengo Kuma, Francoforte
- 3.1.5 AUDITORIUM ZENITH, Massimiliano e Doriana Fuksas, Strasburgo

3.2 Analisi dei risultati e individuazione delle criticità

CAPITOLO 4: SCENARI FUTURI DI RICERCA

4.1 Scenari per lo sviluppo della tecnologia tessile

4.2 Quadro di confronto: potenzialità e limiti delle chiusure a membrana pretesa

4.2.1 I prodotti selezionati per il confronto: membrana in fibra di vetro/silicone, vetro riflettente pirolitico a controllo solare, policarbonato compatto e alveolare

4.2.2 Il metodo utilizzato per il Quadro di confronto delle alternative tecniche per l'involucro traslucido

INTRODUZIONE

L'involucro tessile rientra oggi a pieno titolo in quelle componenti del sistema edilizio chiamate a rispondere alle nuove esigenze del costruire contemporaneo: salvaguardia dell'ambiente, benessere e risparmio energetico. Già da alcuni anni, infatti, come dimostrano le recenti pubblicazioni in materia, l'involucro edilizio è oggetto di numerosi studi incentrati sui temi del risparmio e dell'efficienza energetica.

Un' introduzione al tema dell'involucro tessile chiama in causa alcune delle questioni poste dallo scenario dell'architettura contemporanea. L'involucro, infatti, attraverso l'impiego di nuovi materiali o di nuovi sistemi di produzione e impiego degli stessi, di sperimentazioni e trasferimenti tecnologici da diversi settori scientifici quali l'ingegneria nautica e aerospaziale, la chimica e la medicina, ha modificato il suo aspetto e il suo ruolo, non solo in termini formali ma soprattutto in termini tecnologici, intendendo la tecnologia dell'architettura come <<un complesso di operazioni conoscitive e operative atte ad agire sulla materia per modificarla e organizzarla in opere progettate secondo una precisa intenzionalità architettonica>>¹.

L'origine tessile dell'architettura² diventa lo spunto per una linea di ricerca sulla superficie, dove alla forte componente materiale si sostituisce un orientamento teso a indagare fenomeni immateriali e antitettonici, come quelli rappresentati sempre più spesso, nell'architettura contemporanea, dalle facciate leggere e quasi effimere costituite da materiali trasparenti e sottili. L'eterogeneo panorama del progetto contemporaneo sembra dunque esprimere una sorta di complessità "superficiale", dove la tendenza alla concettualizzazione bidimensionale costituisce un ampio dispiegamento di potenzialità per l'innovazione dell'architettura, indirizzata sempre più alla interazione con l'ambiente.

La ricerca si muove perciò su una linea che indaga il tema della superficie in architettura e i fenomeni immateriali e antitettonici rappresentati dalle facciate

¹ Vittoria, Eduardo, *Argomenti per un corso di Tecnologia dell'Architettura*, Roma, 1975.

² Cfr. Fanelli Giovanni, Gargiano Roberto, *Il principio del rivestimento*, Laterza, Roma, 1994.

leggere costituite da membrane tessili. Le superfici si trasformano in interfacce, membrane osmotiche che regolano flussi complessi, da quelli ambientali (termici, luminosi, acustici ecc) a quelli materici, fino a quelli figurativi, informativi e comunicativi che caratterizzano l'immagine degli spazi contemporanei. I materiali tessili ben rappresentano questa realtà in continua trasformazione, tesa alla smaterializzazione del costruito e allo stesso tempo all'affermazione di una presenza fortemente caratterizzante lo spazio urbano.

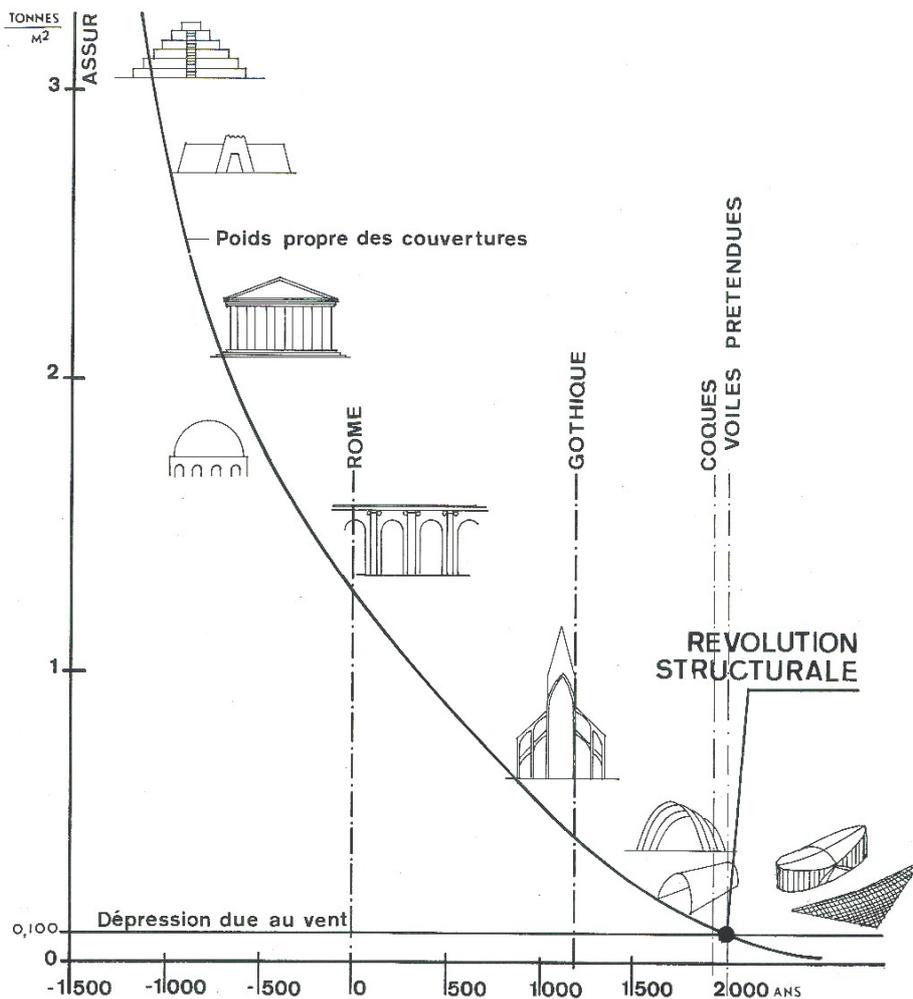


Figura 1. Diagramma dell'evoluzione del peso in architettura. (Fonte: R. Sarger, Structures nouvelles en architecture, Cahier du centre d'études architecturales, n.1, Brussels, 1967, p.43)

Tra i materiali edilizi definiti “avanzati”³ rientrano i tessili per usi tecnici (T.U.T.), i quali hanno subito negli ultimi anni un forte incremento di produzione e un notevole avanzamento delle prestazioni tecnologiche⁴. Gli involucri tessili, in particolare, caratterizzano le facciate “leggere” degli edifici con elevate prestazioni in termini di comfort visivo, e rientrano nella categoria degli involucri edilizi a secco (tipologia costruttiva di chiusura nella quale l’insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici sono assemblati con giunzioni a secco e fissati ad una struttura principale con sistemi di ancoraggio realizzati mediante bulloni, viti o saldature) e leggeri, ovvero che presentano una massa superficiale inferiore a 230 kg/mq⁵.

Le membrane tessili sono state protagoniste di numerose sperimentazioni ad opera di architetti e ingegneri di fama mondiale, tra i quali è doveroso citare Frei Otto e Buckminster Fuller, che già a partire dagli anni ’50 del secolo scorso hanno messo a punto sistemi costruttivi leggeri diventati i nuovi archetipi strutturali, come scrive Guido Nardi⁶, dell’architettura contemporanea: le tensostrutture.

³ La prima definizione di “materiale avanzato” è in *The Encyclopedia of Advanced Materials* (Elsevier, Oxford, 1994), di Michael Bever ed altri, “in cui la caratteristica principale riguarda la capacità di sintesi e di controllo della struttura del materiale al fine di ottenere un preciso insieme di proprietà su misura, finalizzate ad applicazioni su richiesta”. Carla Langella (*Nuovi paesaggi materici*, Alinea, Firenze) definisce materiali innovativi avanzati “quei materiali progettati su misura per soddisfare una o più esigenze[...]perché sono stati funzionalizzati mediante modifiche chimiche e fisiche che gli hanno conferito delle particolari proprietà che li rendono in grado di svolgere le funzioni richieste [...] grazie all’avanzamento delle ricerche sulle relazioni esistenti tra microstruttura e proprietà macroscopiche; lo sviluppo delle tecnologie di processo e di lavorazione e l’evoluzione delle tecniche sperimentali”. Perez Arroyo (*Emergency Technologies and Housing Prototypes*, EMVS – Berlage Institute Postgraduate Laboratory of Architecture, Black Dog Publishing, London 2007) stila un elenco di requisiti ambientali: “Un materiale può essere considerato avanzato per le seguenti ragioni: -Non è inquinante durante il processo di produzione -E’ realizzato con tecnologia a basso costo -E’ completamente tollerabile, riciclabile e biodegradabile -E’ facile da stoccare -E’ leggero pur mantenendo alte resistenze meccaniche -Riunisce in sé proprietà di materiali diversi (compositi e nanocompositi) -E’ ottenuto attraverso un trasferimento tecnologico da applicazioni in altri campi scientifici”.

⁴ Nel 1989 l’*Istituto Français du Textile* definisce avanzati i materiali tessili che rispondono ad alte esigenze tecnico-qualitative che conferiscono loro l’attitudine ad adattarsi a una funzione tecnica.

⁵ Il D.lgs 192/2005 “Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia” e i suoi successivi aggiornamenti definiscono i parametri prestazionali per gli involucri edilizi massivi, cioè con un massa superficiale superiore a 230 kg/mq, mentre delegano al progettista la scelta delle modalità di certificazione delle prestazioni energetiche per gli involucri leggeri.

Frei Otto è uno straordinario innovatore la cui influenza è evidente sia nell'architettura radicale del gruppo Archigram sia nei progetti di Renzo Piano che, insieme a Peter Rice, collaboratore di Frei Otto per diverso tempo, prendono come paradigmi fondanti la leggerezza e l'ottimizzazione degli elementi strutturali. Il suo forte interesse per il mondo naturale lo pone alla ricerca di costruzioni che mostrino i processi naturali di costituzione degli oggetti, alla ricerca dell'essenziale. "L'uomo domina la natura e l'ha piegata ai propri bisogni. Solo alla fine egli ha riconosciuto che la stava danneggiando e distruggendo. Perciò si è impegnato nella ricerca di modi per preservarla attraverso una tecnologia compatibile con essa"⁷. Per quanto riguarda le architetture flessibili, egli rintraccia nella ragnatela il modello naturale delle tensostrutture. Il modello per le strutture pneumatiche è invece rintracciato nelle superfici minime delle bolle di sapone, con cui sono stati elaborati i primi modelli di studio delle presso-strutture.

La ricerca di Buckminster Fuller, ricca e differenziata, è tesa a limitare il peso e a rendere portatile ogni costruzione, sia che si tratti di soluzioni abitative che di strutture pieghevoli ed espandibili. Nella progettazione dell'abitazione applica materiali, tecniche produttive e di assemblaggio, mutuati dai settori più evoluti del mondo industriale, e arriva a configurare differenti tipologie di ambienti per l'abitare ed il viaggiare definiti "Dymaxion" (Dynamic Maximum) per la loro attitudine alla dinamicità e trasformabilità. Le soluzioni abitative condividono un medesimo schema statico: la struttura è assemblata a partire da un unico elemento verticale di sostegno ed un sistema di orizzontamento con cavi in tensione, primi schemi tensostrutturali all'interno di un nucleo abitativo. Fuller conia, inoltre, il termine "tensegrity" combinando le parole "tensile" ed "integrity", per descrivere un sistema strutturale in cui gli elementi tesi costituiscono un sistema connesso, che separa ogni elemento compresso da tutti gli altri.

Dagli studi delle forme della natura alle sperimentazioni e realizzazioni diffuse in tutto il mondo, si è arrivati oggi ad avere a disposizione una vasta gamma di

⁶ Cfr. Nardi, Guido, *Le nuove radici antiche. Saggio sulla questione delle tecniche esecutive in architettura*, FrancoAngeli, Milano, 1986.

⁷ Otto, Frei, *Natürliche Konstruktionen, Deutsche Verlag-Anstalt GmbH, Stuttgart, 1982*, (trad. It. Roberta Madoi, *L'architettura della natura*, Il Saggiatore, Milano, 1984).

materiali con elevate prestazioni molto diverse tra loro: tessili per usi tecnici utilizzabili in edifici dalle più diverse funzioni.

Inoltre, la ricerca contemporanea, risultato della ricerca culturale e scientifica nata e cresciuta in seno all'architettura moderna, associa allo sviluppo e all'innovazione dei materiali per l'edilizia una nuova componente, che è stata particolarmente significativa per i maestri del Novecento: la luce intesa come materiale da costruzione che plasma l'architettura. La luce veniva sperimentata e studiata come elemento caratterizzante gli spazi, soprattutto con l'impiego, molto diffuso dopo la seconda rivoluzione industriale, del vetro negli organismi edilizi, nelle finestre a nastro o nelle facciate continue, sfruttando le proprietà di un materiale trasparente che si presta da sempre ad uno stretto rapporto con la luce, in termini di ombre e colori, riflessi e sfumature, diffusioni luminose e relazioni con gli spazi esterni. Molte ricerche sono state promosse e tutt'oggi si moltiplicano in questo campo, ottenendo prodotti sempre più efficienti in termini di qualità tecnologica ed estetica. Ma non solo il vetro presenta peculiarità così vicine al tema della luce. Le membrane, infatti, ben si accostano a prerogative quali la luminosità, la trasparenza, la visibilità, in architetture che richiedono oggi un benessere ambientale sempre più orientato al comfort visivo, nonché una componente figurativa sempre più diretta alla informazione e alla comunicazione. I tessili tecnici, particolarmente se impiegati in componenti facenti parte dell'involucro edilizio, per eccellenza la parte del sistema edilizio imputata alla relazione tra interno ed esterno e ai diversi flussi di scambio energetico che essa comporta, hanno la capacità di interagire senza ostacoli con la luce, rendendola una componente essenziale della progettazione, oltre che una grande alleata nel perseguimento di obiettivi quali il soddisfacimento del benessere ambientale degli utenti di un'architettura. Un carattere distintivo delle tensostrutture a membrana è proprio la loro capacità di consentire diversificate soluzioni "luminose", sia tramite l'uso di luce naturale diffusa, sia di illuminazione artificiale adeguatamente progettata. "Il potere comunicativo dell'architettura deriva in buona parte dal suo essere illuminata"⁸, come ci insegnano anche i maestri del movimento moderno che "si sono cimentati con ingegnosi sistemi di illuminazione naturale ed

⁸ Forcolini, Gianni, introduzione in AA.VV., *La luce. Funzione della luce sull'ambiente e sulle attività umane e progetti di illuminazione naturale-artificiale per spazi architettonici privati e pubblici*, Over, Milano, 1989, Vol.1

artistica, cercando sempre di integrarli al manufatto architettonico, assumendo cioè la luce come uno dei materiali del progetto⁹. Inoltre, i prodotti tessili impiegati negli involucri oggi, a seconda del grado di prestazioni richieste per specifici utilizzi, sono in grado di rispondere a determinati requisiti, attraverso l'incremento delle prestazioni tecniche in grado di risolvere problematiche diverse.

L'obiettivo della presente ricerca è quello di ampliare la conoscenza dei materiali tessili e del loro impiego nell'involucro, e insieme proporre un quadro di confronto delle alternative tecniche, elaborato sulla base di requisiti tecnologici connotanti gli involucri edilizi leggeri e traslucidi, indagando per il prodotto tessile, confrontato con altri prodotti consolidati nelle chiusure trasparenti, le prestazioni tecnologiche da cui ricavare considerazioni sulle potenzialità e i limiti della tecnologia studiata.

Per raggiungere tali obiettivi si rende necessario un approfondimento, non solo sugli aspetti relativi al benessere visivo, ma anche sulle problematiche del benessere termo-acustico, entrambi strettamente correlati al comfort ambientale garantito da un involucro edilizio, attraverso un quadro generale di riferimento sui sistemi migliorativi per l'isolamento di chiusure tessili, come l'impiego di isolanti traslucidi, i sistemi multilayer con isolante interposto tra gli strati, i sistemi adattivi e interattivi.

Fondamentali, in quest'ottica, sono le questioni climatiche e di contesto ambientale, strettamente correlate alle richieste di sostenibilità dei processi e dei prodotti per l'edilizia, che incidono anche sul mercato dei tessili innovativi, indagando le possibilità di incremento della produzione industriale e commerciale del settore, dai tessili ecologici, che presentano bassissimi impatti sull'ambiente, ai tessili per usi tecnici, che possiedono elevate prestazioni per usi speciali.

Nel capitolo 1 si elabora lo stato dell'arte sulla tecnologia del tessile, integrato con appendici relative al quadro normativo nazionale ed internazionale e all'evoluzione dei materiali tessili dalla produzione alla classificazione e definizione dei principali T.U.T. impiegati negli involucri edilizi. Lo stato della ricerca sui prodotti tessili, portato avanti da Università, Istituti scientifici e mondo industriale, evidenzia come ci sia una carenza, a livello nazionale, di sperimentazioni su materiali tessili innovativi, dei quali invece in altre parti del mondo, in particolare nel nord Europa e in America, si mettono in risalto le enormi potenzialità in termini di comfort visivo e

⁹ Forcolini, Gianni, *op.cit.*

rinnovate matrici espressive e costruttive per l'architettura contemporanea, puntando alla integrazione tra tecnologia ed ambiente. D'altro canto, si riscontra anche dallo stato delle realizzazioni nel mondo che la diffusione di tale tecnologia impiegata in facciate ultra-leggere sia molto poco estesa nel nostro paese, basti pensare ai numerosi edifici realizzati in America o in Giappone in diversi contesti climatici e per diverse tipologie di utenza. Le motivazioni di ciò, probabilmente, sono da ricercare nella ancora poco diffusa applicazione di questa tecnologia negli involucri edilizi per carenza di informazioni tecniche specifiche, che consentano, attraverso un confronto prestazionale con materiali competitors più consolidati, la conoscenza tecnica necessaria per la corretta applicazione del sistema a membrana pretesa nelle chiusure edilizie.

I termini chiave, che contraddistinguono l'evoluzione e la diffusione di sistemi tecnologici sempre più rappresentativi di una società contemporanea dinamica e in continua evoluzione, presentano un approccio tecnologico: classi di requisiti connotanti, cui prodotti e componenti del sistema edilizio sono chiamati a rispondere in termini di prestazioni in grado di garantire alti livelli di comfort. Pertanto, il metodo di lettura utilizzato per sottolineare le problematiche trattate è basato su aspetti relativi a tre categorie di studio, e con esso si tenta di implementare l'informazione tecnica attuale, con uno strumento di lettura prestazionale di confronto con altri componenti per involucri traslucidi, che garantiscono differenti prestazioni in termini di comfort ambientale.

La prima categoria, come già accennato, riguarda gli aspetti connessi alla percezione visiva, e più in generale al tema del comfort ambientale in edifici caratterizzati da involucri leggeri e traslucidi.

La seconda categoria riguarda gli aspetti connessi alla integrazione involucro-struttura, che chiamano in causa requisiti relativi all'impiego e all'integrazione con le varie parti dell'edificio e con diversi materiali, aspetto imprescindibile del progetto, traducibile in un sistema integrato di involucro-struttura che sia adattabile, integrabile, flessibile, aggregabile.

La terza categoria riguarda gli aspetti connessi alle fasi del processo edilizio relative alla realizzazione, utilizzazione e dismissione dell'edificio, che sono analizzati attraverso le varie fasi di produzione e lavorazione di un prodotto tessile e della sua

messa in opera. La leggerezza strutturale di tali prodotti chiama in causa requisiti quali l'immagazzinabilità e la facilità di montaggio/smontaggio ed altri ancora.

Infine, viene studiato anche il ciclo di vita di prodotti e componenti tessili, analizzando le fasi che vanno dalla produzione alla dismissione. In questo caso i concetti trattati sono la durabilità, la reversibilità, la riutilizzabilità, la riciclabilità e la sostituibilità.

Poiché la ricerca tiene conto di alcuni argomenti fondamentali per il progetto contemporaneo, si è ritenuto necessario approfondire anche gli aspetti connessi alla sostenibilità, ovvero le molteplici implicazioni che la tecnologia tessile comporta, in una possibile, non nociva, interazione tra ambiente e artefatti edilizi. Architettura sostenibile non significa solo riduzione dei consumi energetici ma anche scelta di tecniche costruttive e materiali prodotti con minimo impiego di risorse. I sistemi a membrana pretesa, oltre ad avere tali requisiti, rappresentano una valida alternativa a costruzioni che utilizzano sistemi tecnologici e materiali tradizionali, in quanto, grazie alla loro leggerezza strutturale, consentono di risparmiare risorse materiali, ma anche economiche, in termini di quantità di rifiuti prodotti e di tempo per il trasporto e la messa in opera. La leggerezza delle tensostrutture rimanda al linguaggio del temporaneo, nonostante molte architetture permanenti siano state realizzate in membrana pretesa, introducendo la poetica dell'effimero, della struttura in grado di mutare nel tempo la sua immagine, qualità che prende forma anche osservando il comportamento degli involucri tessili alla luce, in grado di creare un'alternanza fra la notte e il giorno che altre architetture non presentano.

Nel capitolo 2 si analizzano specificatamente gli aspetti connessi alla percezione visiva, attraverso l'esplicitazione di tematiche proprie delle tensostrutture, ovvero il controllo della forma nelle superfici tessili che presenta molteplici implicazioni sulle problematiche percettive, e le caratteristiche ottiche e termo fisiche dei tessuti tecnici, che nella loro specificità fisica influenzano il comfort ambientale dell'architettura in cui si inseriscono. Dette tematiche sono affrontate attraverso la lettura e l'interpretazione dei requisiti di progetto relativi alle specifiche esigenze richieste agli involucri traslucidi e leggeri. Fondamentale requisito è indicato nel controllo del flusso luminoso, che può essere regolato dalla traslucidità delle membrane tessili: il loro comportamento ai flussi di trasmissione, riflessione e

assorbimento luminoso varia infatti in base al coefficiente di trasmissione visiva del materiale, definibile traslucido, semiopaco o opaco, e tale grado di traslucidità presenta notevoli ricadute sugli aspetti termici e acustici di un involucro edilizio. Lo studio consente di documentare le nuove tecnologie per l'isolamento termo-acustico degli involucri tessili, in particolare quei sistemi tecnologici che sono in grado di garantire buone prestazioni isolanti pur lasciando inalterate le caratteristiche di trasmissione luminosa dei tessuti impiegati negli involucri: sistemi adattivi, interattivi e con isolanti traslucidi interposti tra più strati di membrana.

In questa fase della ricerca si è ritenuto utile selezionare sistemi e prodotti, costituiti da tessuti innovativi, che rispondano al meglio alle esigenze di comfort richieste oggi ad un involucro edilizio leggero. I prodotti selezionati, pertanto, sul mercato attuale risultano efficienti, unendo alle alte prestazioni meccaniche proprietà termo-ottiche in grado di garantire un buon comfort termo-acustico e luminoso.

Nel capitolo 3 si elabora una lettura prestazionale di casi studio, dai cui risultati si individuano alcune criticità, utili per la definizione di potenzialità e limiti della tecnologia tessile nelle chiusure edilizie.

Nella contemporaneità il progetto scopre, abbandonando le strutture "pesanti", le potenzialità create dalla trasparenza e dalla leggerezza. L'involucro degli edifici assume una configurazione più complessa di quella che tradizionalmente veniva riconosciuta nella superficie muraria contenente lo spazio architettonico. Diventa così evidente l'attuale tendenza a radicalizzare quel processo che, dal Movimento Moderno in poi, ha scisso fisicamente e concettualmente l'ossatura portante dell'edificio dalla pelle che lo separa dall'esterno. Gli edifici del nostro tempo tendono ad una mutata fisicità: più rarefatta e leggera ma capace al contempo di divenire densa e interattiva, sempre più assimilabile a quella di schermi trasmettenti e di pellicole fotosensibili.

Nel capitolo 4 si evidenziano i possibili scenari futuri di impiego di tali tecnologie leggere, proponendo come risultato finale della ricerca uno strumento di informazione tecnica, definito Quadro di confronto delle alternative tecniche per l'involucro traslucido, finalizzato alla maggiore conoscenza delle chiusure a membrana pretesa, confrontate su basi prestazionali con tecnologie più "tradizionali", che presentano un know-how decisamente più consolidato rispetto alle

membrane tessili, le quali in brevissimo tempo hanno raggiunto livelli prestazionali notevoli e meritevoli di maggiore attenzione.

Si è definito il ventunesimo secolo come il secolo della plastica, sia per l'evidente impiego di tale materiale come accessorio di finitura e di servizio, sia per l'enorme diffusione di materie plastiche impiegate come componenti basilari di membrane e film. L'innovazione, l'introduzione e la diffusione di materiali innovativi in architettura ha portato ad una tendenza che vede la materia e la forma dei componenti come elementi fondamentali per coniugare leggerezza e resistenza. È necessario, però, riuscire a stabilire in ogni progetto una relazione originale e proficua tra innovazione tecnica e prassi costruttiva consolidata, tra materiali tradizionali e innovativi, in modo da conseguire l'obiettivo di una progettazione efficiente e responsabile.

CAPITOLO 1 : L'INVOLUCRO TESSILE

L'evoluzione dell'involucro tessile trae origine fin dai tempi più remoti, quando le esigenze di mobilità dei popoli nomadi trovarono soluzione nelle tende e nelle capanne di rami o di canne, intrecciate tra loro secondo logiche flessibili e leggere. L'esigenza di provvedersi in breve tempo una dimora è legata al concetto di tenda: un'abitazione funzionale che rappresenta la forma più evoluta del riparo, con il più alto grado di *adattamento ambientale*. Studiando le tende dei popoli nomadi si può trovare una convergenza di obiettivi con le forme attuali dell'architettura e, analizzandone le relazioni tra le parti componenti e le modalità costruttive, appare evidente come ogni forma del vivere nomade sia improntata a criteri di leggerezza, reversibilità e adattabilità. Nella tipologia strutturale delle tende arabe si trovano soluzioni sviluppate poi nei circhi equestri, che si sono evolute fino ad arrivare alle attuali soluzioni per la protezione ambientale, realizzate in membrana pretesa. Ad esempio, il *tipi* indiano autoportante e la *yurta* mongola presentano elementi propri della struttura portante dei tendoni da circo, che conservano la semplice impostazione strutturale con elementi portanti puntiformi (pali) che sopportano per compressione i carichi della soprastante copertura in materiale flessibile (tessuto). Un'ulteriore origine delle odierne tensostrutture va ricercata in epoca romana, quando si mise a frutto l'abilità nel governare le vele delle imbarcazioni e nell'uso di superfici di tela, dette "velarium", per coprire le cavee di teatri ed anfiteatri.



Figura 2. Yurta mongola.

Le strutture pneumatiche, un'ulteriore classe di strutture leggere in cui la forma e la stabilità sono ottenute dalla differenza tra la pressione interna della membrana e la pressione atmosferica, costituiscono un'altra tipologia di involucro tessile, in cui non vi sono elementi di supporto strutturali rigidi: questa tipologia costruttiva potrebbe restare sospesa, come una bolla di sapone, e coprire una luce teorica infinita. Inizialmente utilizzate per risolvere il problema della copertura di ampi spazi con ridotto uso di materiale ed in modo più flessibile, le pressostrutture oggi si sono evolute grazie anche alla capacità di integrarsi con altre tipologie strutturali, rendendo possibile il loro impiego in svariate tipologie funzionali.

L'evoluzione delle tipologie costruttive e funzionali deriva in gran parte dall'innovazione tecnologica che ha interessato i materiali tessili, alcuni dei quali oggi rientrano nella categoria dei cosiddetti T.U.T. ad indicare i tessili per usi tecnici. Tali materiali, impiegati negli involucri edilizi, hanno raggiunto, infatti, un grado di innovazione tecnologica che li rende efficienti in termini prestazionali a rispondere alle esigenze di comfort ambientale richieste per l'abitabilità di spazi chiusi¹⁰. La ricerca sui tessili innovativi, dagli studi scientifici alla produzione industriale per l'edilizia, ha contribuito alla diffusione della tecnologia tessile in settori applicativi che fino a pochi anni fa non ricoprivano un ruolo significativo nell'avanzamento tecnologico di dette strutture: le chiusure orizzontali e verticali, unità tecnologiche che compongono l'involucro edilizio.

Lo stato della ricerca scientifica nazionale ed internazionale ci dimostra quanto è stato rapido, e tuttora in continua evoluzione, l'avanzamento di nuovi prodotti tessili con elevate prestazioni in termini di comfort ambientale. I progetti di ricerca più innovativi delle diverse istituzioni coinvolte nel settore, insieme alle realizzazioni diffuse in tutto il mondo di involucri tessili dalle più diversificate funzioni, saranno pertanto brevemente esposti, al fine di dare un quadro generale della crescente espansione della tecnologia tessile, in particolare nell'architettura "diffusa".

¹⁰ Nell' **Appendice 1T** sono analizzati i principali tessili tecnici impiegati in edilizia, allo scopo di restituire lo stato dell'arte dei materiali tessili, elaborato attraverso definizioni, classificazioni, processi e tecnologie di produzione. Inoltre, nell' **Appendice 1A** sono raccolte le principali proposte di classificazioni dei materiali per l'edilizia, allo scopo di illustrarne l'evoluzione tecnologica e di segnalare la posizione dei tessili rispetto ad altri materiali da costruzione.

1.1 Le proprietà dell'involucro tessile per il progetto contemporaneo

L'involucro edilizio, negli ultimi anni, è stato oggetto di numerose ricerche scientifiche, soprattutto per la sua funzione di filtro separatore tra interno ed esterno, con specifiche prestazioni richieste in termini di comfort ambientale. Infatti, tale tematica è sempre più pressante e presente nella attuale ricerca tecnologica, al fine di soddisfare le nuove esigenze contemporanee strettamente connesse alla progettazione sostenibile, in particolare la necessità di creare ambienti interni con un buon livello di comfort termico, acustico e visivo, garantito non solo da sistemi di climatizzazione meccanica, ma anche tramite l'utilizzo passivo ed attivo degli agenti atmosferici e delle risorse energetiche rigenerabili.

Il concetto di involucro, identificato nel sistema tecnologico con la Classe di Unità Tecnologica denominata Chiusura, che comprende tamponamenti esterni verticali ed orizzontali, oggi si configura come pelle dinamica, che respirando regola il passaggio dei flussi materiali e immateriali di interscambio tra interno ed esterno. La contemporanea concezione dell'involucro edilizio trae origine dall'opera di Reyner Bahnam, che introduce il concetto di "ambiente ben temperato".

Analizzando la storia dell'architettura, Bahnam individua tre principali "modelli di controllo ambientale", a ciascuno dei quali può essere associata una tipologia di involucro edilizio con specifiche caratteristiche. Il primo modello è quello *conservativo*, caratterizzato da un tipo di controllo ambientale che utilizza grandi masse murarie con poche aperture per ridurre le dispersioni termiche nei climi freddi e per attenuare gli effetti di riscaldamento dovuti alla radiazione solare diretta nei climi caldi. Il secondo modello, definito *selettivo*, è caratterizzato da principi generali analoghi a quello precedente, ma "adopera la struttura non solamente per conservare le condizioni ambientali desiderate, ma per far entrare dall'esterno queste condizioni". A tale scopo possono essere previste grandi pareti trasparenti per l'illuminazione ed il riscaldamento passivo. Il terzo modello, quello *rigenerativo*, caratterizza gli edifici tipici della tradizione costruttiva americana in cui il controllo ambientale è affidato totalmente ai sistemi impiantistici, definiti appunto come "installazioni rigenerative", mentre l'involucro è inteso solo come una barriera in grado di limitare le interazioni tra interno ed esterno¹¹.

¹¹ Cfr. Bahnam, Reyner, *The Architecture of the Well-Tempered Environment*, Architectural press, London 1969 (trad. It. Morabito, Giovanni, *Ambiente e tecnica*)

Nello specifico della presente ricerca, le prestazioni dell'involucro tessile per il progetto contemporaneo, che potrebbe rientrare nella definizione di "involucro selettivo" per le caratteristiche connotanti la tecnologia tessile applicata in facciata, sono chiamate a rispondere a requisiti tecnologici strettamente connessi alle problematiche attuali, che vedono sempre di più la smaterializzazione dell'architettura come uno dei principali paradigmi del costruire. La smaterializzazione implica concetti quali la leggerezza strutturale, la riduzione dei tempi di costruzione, la capacità di interagire con i flussi immateriali quali la luce, l'aria, l'energia, senza incidere massivamente sull'ambiente che ci circonda. In questa logica, la proposta della ricerca è quella di studiare alcuni aspetti fortemente connotanti l'involucro tessile, raggruppati in tre categorie:

- il *benessere visivo*
- l' *integrazione involucro-struttura*
- le fasi del processo edilizio relative alla *realizzazione, gestione e dismissione*.

Attraverso tale chiave di lettura ed analisi si identificano i requisiti connotanti degli involucri tessili, con l'ausilio di un sistema di riferimento, strutturato come una matrice a lettura incrociata, basato sulle classi di requisiti tecnologici precedentemente definiti, che mettono a sistema a loro volta requisiti specifici, di cui alcuni già definiti dalle norme UNI, altri ricavati dalla bibliografia di riferimento e altri ancora di nuova definizione proposta.

I progettisti scelgono sempre più spesso le membrane tessili nelle architetture contemporanee, caratterizzate da leggerezza strutturale, alte prestazioni e "forme complesse", che variano dalle "forme fluide" alla complessità dei loro componenti o alla relazione tra modello architettonico e leggi statiche di comportamento dei materiali¹², in quanto, grazie alla possibilità di esplorare innumerevoli campi di intervento, dalla scelta tra forme non convenzionali (doppia curvatura, membrana insellata, ecc.) al comportamento alla trasmissione luminosa

nell'architettura moderna, Roma-Bari, Laterza, 1995).

¹² Cfr. Paoletti, Ingrid, *Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, CLUP, Milano, 2006.

in grado di controllare e modulare la luce all'interno delle strutture, le membrane diventano determinanti per la buona riuscita di un progetto contemporaneo.

La reversibilità e l'adattabilità ai siti di intervento sono alcuni degli aspetti fortemente caratterizzanti le architetture tessili, in quanto la possibilità di riutilizzo delle strutture tessili e la loro adattabilità al contesto e al clima locale sono requisiti indispensabili per le nuove architetture, che rispondono a rinnovate esigenze di utenza.

Ma l'architettura contemporanea si trova ad affrontare un ulteriore problema, di tipo urbanistico, in relazione alle conurbazioni odierne che richiedono di escogitare metodi innovativi per ottenere condizioni di comfort ambientale, usufruendo di elementi quali la luce e l'aria, lì dove è difficile beneficiarne, come in residenze dalle dimensioni sempre più ridotte. "Le mini case rappresentano oggi il paradigma dell'esiguità dello spazio. La miniatura diventa una necessità e una realtà urbana. Le mini case infatti non sono fatte per restare in eterno, ma tagliate su misura per i committenti, cucite addosso alle esigenze della famiglia che le abita. I materiali utilizzati non dureranno per sempre, ma il loro costo sarà più abbordabile. Un esempio straordinario di questa filosofia è *Aura*, la casa costruita nel centro di Tokyo da un gruppo di 12 architetti, i F.O.B.A., fondato nel 1995 da Katsu Umabayashi. In un vicolo largo 3 metri e lungo 20 i progettisti sono riusciti a tirar fuori una casa di 77 metri con soluzioni imprevedibili. Costituita da due pareti di cemento armato dal profilo arrotondato che costeggiano il vicolo, *Aura* è sostenuta da un sistema di pilastri orizzontali cilindrici che vanno da una parete all'altra all'altezza del soffitto, creando un intrigante effetto decorativo. Ma come risolvere il problema della luce in una casa tonda, larga meno di tre metri e illuminata da una sola, piccola finestra a oblò al terzo piano? Semplice, sembra, ma radicale: collegando le due pareti di cemento con una membrana di materiale tessile lattiginoso, che lascia penetrare la luce. All'interno, pavimenti in parquet, muri bianchi, tonalità chiare contribuiscono a creare una sensazione di spazio aperto e luminoso in quest'ambiente stretto e organizzato su tre piani. Mentre all'esterno la casa spicca fra gli edifici di cemento come un corpo estraneo e misterioso, assolutamente diverso e personale".¹³ Il caso di Tokyo, così brevemente descritto, ci pone davanti alla possibilità di impiegare in molteplici soluzioni le membrane tessili, come componenti tecnologici efficaci per la

¹³ Piccoli, Cloe, "Piccoli imprevisi metropolitani", in: <http://dweb.repubblica.it/dweb/2003/01/18/attualità>.

riqualificazione o più in generale per la risoluzione di problemi funzionali, ambientali, tecnologici e tipo-morfologici in contesti consolidati o di nuova costruzione.

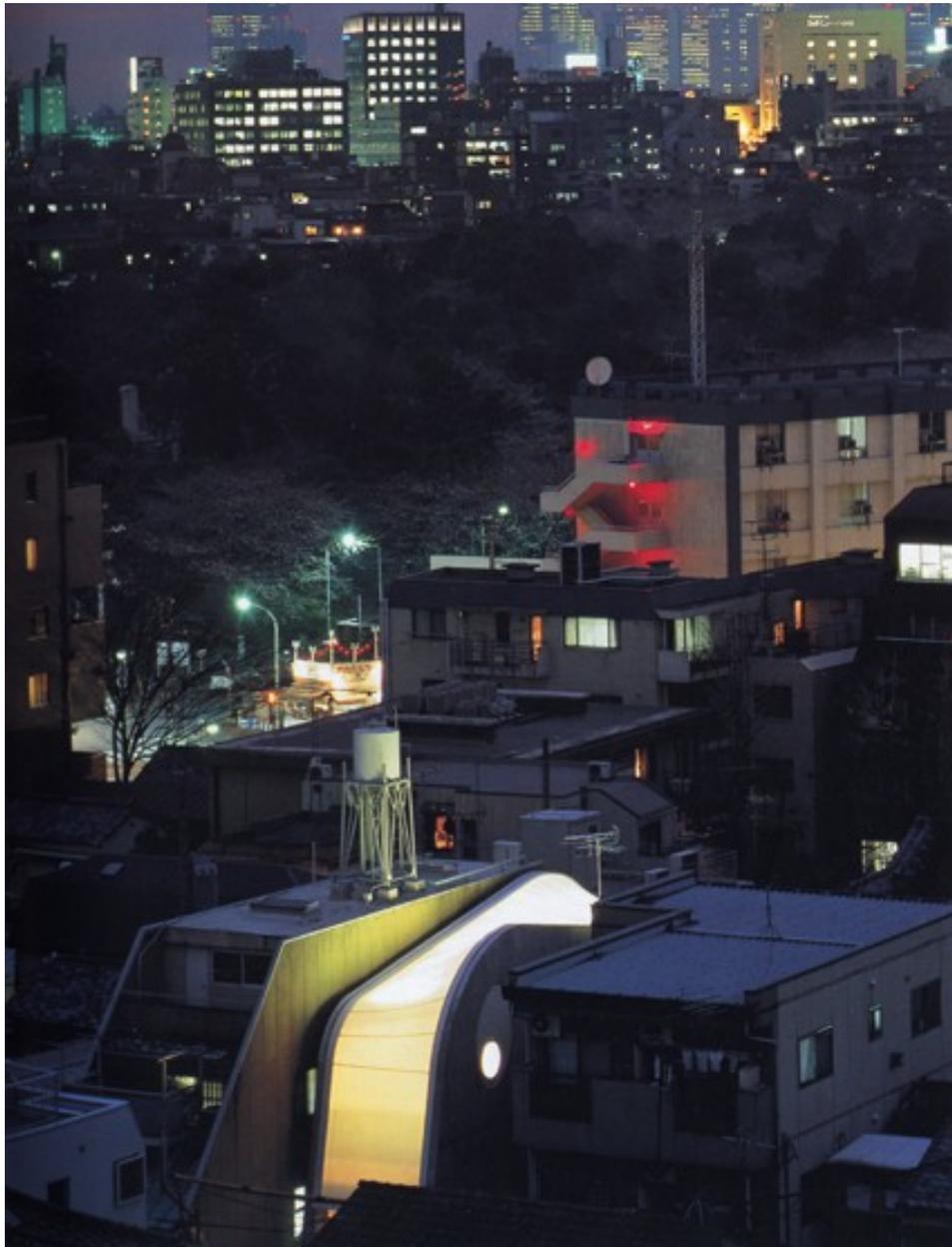


Figura 3. Casa Aura, progetto dei F.O.B.A. a Tokyo. (Fonte: *Detail* n.6, 2000)

Si tratta di interpretare i paradigmi del costruire contemporaneo e tradurli in architetture attente alle logiche della sostenibilità, alle nuove e sempre più pressanti richieste di leggerezza, traslucidità, smaterializzazione del costruito. L'innovazione con grande velocità si è fatta strada nel campo edilizio, attraverso un maggiore rapporto tra le potenzialità dell'industria e il progetto, nonché tra le diverse figure coinvolte nel processo edilizio, come specialisti strutturali, ambientali, impiantistici. I

meccanismi attraverso cui l'innovazione si introduce nel settore edilizio sono dati dalla ricerca di nuovi materiali e tecnologie, dal trasferimento di questi ultimi da altri settori disciplinari, nonché dalla relazione con l'evoluzione informatica.

Inoltre, un'ulteriore linea di ricerca sui tessili tecnici è rappresentata dai tessili cosiddetti "ecologici", che si accostano alle problematiche relative alla sostenibilità. Come rilevato da una ricerca svolta presso il Politecnico di Milano, "intraprendere un approfondimento scientifico relativo al risparmio energetico risulta essere particolarmente complicato per due principali motivi: da un lato per la mancanza di dati specifici, dall'altro per la complessità del prodotto finito, soprattutto quando l'attenzione è rivolta alle membrane multistrato. L'aspetto energetico legato a un prodotto può essere affrontato considerando le prestazioni energetiche del prodotto finito, ovvero la capacità di far risparmiare energia durante la fase di vita utile, ma anche valutando i consumi energetici durante tutto l'arco di vita del prodotto, iniziando dalla sua produzione. Quando si valutano le prestazioni energetiche di un involucro a membrana, immediato è il riferimento ai requisiti di isolamento termico, di inerzia termica, di controllo solare, di ventilazione: più elevate sono le prestazioni, minore è il ricorso agli impianti meccanici per garantire un ottimale microclima interno allo spazio racchiuso dalla membrana e, di conseguenza, maggiore è il risparmio energetico. Altre considerazioni possono essere avviate quando si affronta la questione relativa all'energia incorporata di un materiale, che corrisponde al totale dell'energia incorporata di un materiale, utilizzata per la fabbricazione, il trasporto, la manutenzione di un prodotto e l'eliminazione dello stesso alla fine della vita utile [...] Sono disponibili dei dati specifici relativi ad alcune materie plastiche, tuttavia non consentono di condurre un discorso esaustivo da allargare alle membrane tessili".¹⁴

Un breve approfondimento sui tessili ecologici è stato affrontato allo scopo di rilevare gli sviluppi presenti e futuri nel campo del risparmio energetico, in particolare sottolineando l'aspetto relativo al ciclo produttivo delle materie prime¹⁵.

¹⁴ Campioli, Andrea, Zanelli, Alessandra, (a cura di), *Architettura tessile. Progettare e costruire membrane e scocche*, Il Sole24ore, Milano, 2009, p. 174.

¹⁵ Si riporta in **Appendice 1B** uno studio dei principali prodotti tessili ecologici sul mercato.

Infine, altra tematica relativa alla sostenibilità ambientale è il tema della riciclabilità e recuperabilità del materiale e del prodotto edilizio. In questi ultimi anni, infatti, il problema dello smaltimento dei rifiuti è sempre più stringente, anche a seguito del progressivo esaurimento delle aree disponibili per l'ubicazione di discariche. Risulta evidente, quindi, come il riciclaggio dei materiali da demolizione possa costituire una valida alternativa al consumo di risorse naturali non rinnovabili, considerando che già da alcuni anni si è ormai affermato il concetto di sviluppo sostenibile nei riguardi di tutti i processi produttivi, che devono necessariamente rispettare criteri di risparmio energetico e di controllo della produzione di scorie e rifiuti, prevedendone un riutilizzo o smaltimento senza provocare danni all'ambiente. Ecco perché, anche nel settore degli involucri in membrana tessile, necessari sono i requisiti relativi alle suddette questioni. Un aspetto interessante di tali tecnologie è che il volume dei rifiuti da esse prodotto è trascurabile se confrontato con quello degli edifici convenzionali, tuttavia gli investimenti nella ricerca non mancano in questo campo, soprattutto riguardo alla riciclabilità di materiali derivati dal petrolio. In particolare, un lavoro condotto nel 1998 dal gruppo francese Ferrari insieme a Solvay ha brevettato un processo che permette il riciclaggio separato della resina di pvc e delle fibre di poliestere, attraverso la dissolvenza chimica selettiva, che permette di riutilizzare sia il poliestere che il pvc riciclati, come materia prima seconda. L'iniziativa è denominata *Texyloop*, tecnologia basata sul processo Vinyloop, che si svolge in sei fasi a ciclo chiuso: pretrattamento, dissoluzione, separazione, precipitazione, essiccazione, recupero del solvente¹⁶. Accanto al riciclo di tipo meccanico vi è anche la possibilità di reimpiego delle membrane tessili dismesse: una volta terminata la fase di vita utile nel manufatto per cui erano state prodotte, infatti, dopo un semplice processo di pulizia possono essere utilizzate nuovamente senza che i materiali di cui sono composte subiscano trasformazioni.

¹⁶ Cfr. sito web: www.texyloop.com.

1.1.1 I termini chiave degli involucri tessili: classi di requisiti tecnologici di riferimento

L' involucri tessile rientra nella categoria degli involucri edilizi a secco, una tipologia costruttiva di chiusura nella quale l'insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici sono assemblati con giunzioni a secco e fissati ad una struttura principale mediante bullonature o saldature. I sistemi di facciata tessile presentano una serie di peculiarità, che possiedono alte potenzialità e diventano materia di sfida ai paradigmi del costruire contemporaneo, quali la sostenibilità ambientale, la leggerezza strutturale, la flessibilità tecnologica e la traslucidità delle facciate, che portano con sé una serie di problematiche da risolvere, in particolare per quel che riguarda il benessere termo-luminoso relativo a spazi confinati da chiusure a membrana pretesa, caratterizzati da ridotti spessori di separazione tra ambiente interno ed esterno.

L'involucro tessile, nelle chiusure a membrana pretesa, caratterizza l'edificio con un sistema di facciata continua o con un sistema di facciata a doppia pelle. La norma EN 13119 descrive la facciata continua come "una facciata esterna prodotta con intelaiatura di metallo, legno o PVC, solitamente costituita da elementi strutturali verticali ed orizzontali, collegati insieme e ancorati alla struttura portante dell'edificio", caratterizzata dalla continuità dell'involucro rispetto alla struttura portante dell'edificio, arretrata sul piano della facciata¹⁷.

Le facciate a doppia pelle invece formano un contenitore continuo lungo tutto il perimetro dell'edificio: la pelle esterna è fissa ed ha la funzione di protezione dagli agenti atmosferici, mentre la seconda, posta verso l'interno, è quasi sempre dotata di serramenti per ventilare i locali interni. Per migliorare il comfort all'interno dell'edificio, talora, viene prevista una ventilazione naturale o forzata dell'intercapedine definita dalle due pelli, in cui si possono inserire dispositivi di oscuramento.

Come osserva Aldo Capasso, "le strutture a membrana pretesa sono sistemi costruttivi versatili che, se pur complessi nella loro geometria, consentono rapidità e facilità esecutiva e di montaggio, con un'attrezzatura di cantiere minima e semovente, grazie all'esigua carpenteria metallica di supporto; sono inoltre strutture

¹⁷ Per un approfondimento dello stato dell'arte della normativa nel settore delle tensostrutture a membrana e delle problematiche del benessere ambientale, si veda l' **Appendice 1N**.

immagazzinabili per la riducibilità degli elementi componenti, per cui il ridotto rapporto volume/peso del materiale consente un facile ed economico trasporto con la possibilità di molteplici riutilizzazioni, garantendo una riduzione di tempi e costi. Tali sistemi, inoltre, sfruttano al massimo il materiale per l'elevato rapporto resistenza/peso, conseguenza del fatto che la tensostruttura è sottoposta esclusivamente a sforzi di trazione, e garantiscono sicurezza contro l'incendio dato il lento collasso della membrana alle alte temperature"¹⁸.

Il materiale tessile, leggero e flessibile, è impiegato nella realizzazione dell'involucro edilizio ricorrendo ai tessili innovativi, che presentano migliorate qualità di durabilità e resistenza agli agenti atmosferici. Come già ricordato, tra i più utilizzati oggi vi sono le fibre di vetro rivestite in carbonio o PTFE, l' ETFE, le fibre di carbonio, il PTFE e i film di poliestere coestrusi con cristalli liquidi.

L'involucro tessile si differenzia in base alla modalità di impiego del materiale che viene utilizzato, pertanto possiamo intenderlo come pelle resistente (*tensile envelope*), filtro luminoso (*translucent filter*), scocca sottile (*thin shell*), secondo le definizioni fornite dal Politecnico di Milano nella classificazione dei tessili tecnici per l'architettura¹⁹. Volendo interpretare le suddette definizioni, la pelle resistente è la tipologia di involucro che impiega la membrana come tessuto strutturale, con proprietà meccaniche che la rendono struttura e involucro ad un tempo; il filtro luminoso è la tipologia di involucro che impiega membrane traslucide con particolari proprietà ottiche che lasciano passare la luce, generalmente, in maniera diffusa nell'ambiente interno; la scocca sottile è la tipologia di involucro che impiega materiali plastici, quindi rigidi e perciò non classificabili come membrane, che hanno traslucenza minima, o in alcuni casi nulla.

Poiché una delle funzioni principali dell'involucro edilizio è quella di proteggere dagli agenti atmosferici e garantire un buon livello di comfort ambientale, è bene ricordare che il problema dell'isolamento termico, acustico e visivo è fondamentale nelle chiusure tessili, che presentano spessori minimi di separazione tra interno ed esterno. Oggi, a seguito di una serie di studi, esperimenti e prove di laboratorio, vari sistemi di isolamento sono in grado di incrementare la capacità di

¹⁸ Capasso, Aldo, (a cura di), *Le tensostrutture a membrana per l'architettura*, Maggioli, Rimini, 1993, p.38.

¹⁹ Cfr. sito web del Politecnico di Milano: www.architetturatessile.polimi.it.

assorbimento acustico e termico di una superficie tessile con funzione di chiusura. Tra i sistemi di isolamento termico ed acustico i più conosciuti ed applicati sono i sistemi a doppia membrana, che permettono un isolamento naturale grazie all'intercapedine formata dai due strati tessili che funge da camera d'aria; i materiali isolanti interposti tra due strati di membrane, che permettono un maggiore isolamento dalle condizioni esterne ma riducono le proprietà di traslucenza delle membrane; le membrane multilayers, che presentano una buona trasmittanza termica grazie ad un isolamento tra i vari strati tessili realizzato in poliestere a fibra corta.

Per quanto riguarda poi il comportamento alla luce, i tessili, in generale, riflettono circa il 70% della radiazione solare incidente sulla superficie e ne assorbono circa il 15%, la restante parte viene trasmessa e diffusa uniformemente. Le membrane presentano un carattere distintivo, effimero ed ampiamente adattabile, con ampie possibilità di creare soluzioni di illuminazione sia tramite l'uso di luce naturale diffusa, sia tramite illuminazione artificiale adeguatamente progettata. Il livello di traslucenza di una tensostruttura dipende dai materiali tessili utilizzati, che permettono la trasmissione luminosa per un'aliquota che va dal 5 al 20%, in alcuni casi arrivando al 40% del flusso luminoso, in dipendenza del grado di trasparenza, della tessitura e del colore della membrana.

Il comportamento delle membrane alla luce naturale ed artificiale è regolato da prove di laboratorio che riguardano le proprietà di radiazione termo-luminosa dei materiali, ovvero la quantità di luce assorbita, trasmessa o riflessa dalla loro superficie, fattori dell'incidenza solare. Altre prove fotometriche sono eseguite sulla trasmissione dei raggi ultravioletti, importanti per la resistenza all'invecchiamento e la durabilità della membrana, utilizzando apparecchiature che tendono a riprodurre gli effetti, nonché sull'emissività ai raggi infrarossi, utilizzata soprattutto in campo militare.

Le classi di requisiti scelti come riferimento per la ricerca sono relativi, come già accennato, alla *percezione visiva*, alla *integrazione tra involucro e struttura* e alla *realizzazione gestione e dismissione* dell'organismo edilizio, i cui requisiti tecnologici rilevano interessanti potenzialità di sviluppo nel campo della progettazione eco-orientata e dell'incremento della tecnologia tessile come applicazione

nell'architettura permanente e diffusa. Gli aspetti brevemente descritti fanno riferimento alle classi di requisiti più generali elaborate e definite dalla norma²⁰ come di seguito riportato, e vanno ad implementarle sulla base degli obiettivi della presente ricerca:

- VISIVI (Attitudine dell'edificio a mantenere stabile il livello di illuminazione mediante sorgenti luminose naturali o artificiali ed elementi per l'oscuramento)
- DI INTEGRABILITA' DEGLI ELEMENTI TECNICI (Adeguamento delle unità tecnologiche nonché degli elementi tecnici ad una funzionale integrazione)
- DI MANUTENIBILITA' (Attitudine del sistema edilizio a mantenere in condizioni di integrità le capacità di fornire prestazioni di tutti i suoi elementi tecnici durante tutto il periodo di vita programmata).

1.1.2 Lo stato della ricerca sui prodotti tessili: Università, Istituti di ricerca, Industria

La ricerca scientifica nel settore delle membrane tessili per involucri edilizi è condotta prevalentemente da associazioni internazionali, che raccolgono istituzioni accademiche, enti pubblici o privati, e aziende industriali, che grazie a sperimentazioni ed applicazioni in tutto il mondo contribuiscono alla diffusione della tecnologia tessile in ambiti ancora poco esplorati. Si tenta, pertanto, di dare un quadro sintetico delle istituzioni che hanno contribuito anche alla stesura della presente ricerca, per definire lo stato dell'arte in questo specifico settore tecnologico, distinguendo le Associazioni, gli Istituti di ricerca, le Aziende e le Istituzioni accademiche, che lavorano insieme ad un livello internazionale²¹.

Associazioni

Le associazioni più attive nella ricerca sui tessili per l'architettura sono rappresentative di altrettanti Paesi in cui la tecnologia tessile si è diffusa ampiamente fino ai nostri giorni. Ad avere un ruolo preponderante sono Paesi quali gli Stati Uniti e il Giappone, grazie anche al notevole numero di opere realizzate sperimentando le membrane nei numerosi campi di applicazione indagati. Anche

²⁰ Cfr. Norma UNI 7867 e 8289:1981

²¹ Per un elenco completo degli organi di ricerca nel settore tessile, si rimanda alla bibliografia, in cui sono riportate tutte le associazioni, aziende ed enti di vario tipo che partecipano ai diversi consorzi di ricerca.

alcune associazioni europee, tuttavia, si dimostrano molto attive nella diffusione del tessile nel settore edilizio, grazie a numerose ricerche scientifiche su materiali e sistemi innovativi ad alte prestazioni tecnologiche, presentate in convegni internazionali, pubblicazioni ed eventi di ampio respiro, nonché alla creazione di reti interattive tra protagonisti del settore, come la Tensinet promossa dall'Università belga di Bruxelles. Di seguito si riportano le associazioni citate:

- ASCE (American Society of Civil Engineers - USA)
- MSJA (Membrane Structures Association of Japan - Giappone)
- IASS (International Association of Shell and Spatial Structures - Spagna)
- IFAI (Associazione internazionale di industriali tessili)
- TENSINET (Bruxelles, Belgio)

Istituti di ricerca scientifica

Gli istituti di ricerca nell'ambito della tecnologia tessile sono stati individuati grazie anche ad un progetto denominato Contex-T, che sta per "Costruzione e tessile", finanziato dall'Unione Europea, che coinvolge trenta partner provenienti da dieci paesi europei (Belgio, Germania, Francia, Spagna, Svezia, Romania, Italia, Regno Unito, Grecia e Polonia), di cui quindici piccole e medie imprese, sette grandi aziende e otto università e istituti di ricerca, con l'obiettivo di stimolare la produzione di tecnologie e prodotti tessili che consentano la costruzione di edifici con un'aspettativa di vita che raggiunge i sessant'anni, con incrementate prestazioni di sicurezza meccanica, salubrità ed economicità, e con un'ancora più facile e veloce messa in opera dei manufatti. Tra i partner coinvolti, molto attivi sono i seguenti istituti europei:

- Centexbel (*Belgian Textile Research Centre*)
- Labor Blum (*Laboratorio di ricerche, Stoccarda*)
- Messe Frankfurt / Techtextil (*International Trade Fair, Francoforte*)
- ITV (*Institute of Textile Technology and Process Engineering, Denkendorf*).

L'istituto ITV di Denkendorf, in particolare, fa parte di un gruppo di istituti tedeschi di ricerca sul tessile denominato DITF, che rappresenta il centro di ricerca più grande in Europa. Gli altri istituti facenti parte del gruppo sono l'ITCF, per la ricerca sulle

fibre chimiche, e il DITF-MR, centro di ricerca e gestione. Il DITF è il solo centro di ricerca sul tessile in tutto il mondo ad abbracciare l'intero processo produttivo dei tessuti: dalla molecola al prodotto, dall'idea alla soluzione "market-friendly", essendo al contempo un affidabile partner commerciale. Inoltre, conduce ricerche interdisciplinari e progetti di sviluppo che coinvolgono diversi settori disciplinari, come la chimica, la scienza dei materiali, la tecnologia dei materiali e dei processi, l'ingegneria meccanica, l'economia gestionale.

Aziende

Il settore dei tessuti tecnici per l'architettura vede protagoniste numerose aziende specializzate non solo nella produzione, ma anche nella progettazione, nel confezionamento e nell'installazione dei prodotti. Alcune di queste, selezionate per dare un quadro generale della diffusione e delle diverse competenze tecniche nel settore, sono anche in grado di affiancare il progettista fin dalle fasi decisionali della messa a punto di una tensostruttura, favorendo lo scambio di know-how tra soggetti diversi, tra le competenze dei professionisti e quelle dei produttori. E' utile, per questo motivo, citare alcune aziende che sono all'avanguardia nella ricerca e nello sviluppo di nuovi materiali tessili per impieghi tecnologici di tipo innovativo, come facciate flessibili e traslucide con elevate prestazioni termo-ottiche.

Tra le aziende operanti nel settore, sono state individuate, anche per la loro partecipazione nella realizzazione di edifici analizzati come casi-studio per la presente ricerca, le seguenti:

- *Canobbio (azienda di produzione e installazione di tessuti, Alessandria)*
- *Ferrari (azienda di produzione e installazione di tessuti, Lione)*
- *Goretex (azienda produttrice di tessuti, Verona)*
- *Hightex (azienda di produzione e installazione di tessuti, USA)*
- *Naizil (azienda produttrice di tessuti, Padova)*
- *Tensoforma (azienda di progettazione, produzione e installazione di tessuti, Bergamo).*

Istituzioni accademiche

Lo stato dell'arte sulla ricerca scientifica nel settore del tessile per l'edilizia non può prescindere dal riportare le istituzioni accademiche che sono diventate promotrici di un forte sviluppo dell'impiego dei tessuti in architettura, e che hanno consentito un avanzamento di conoscenza, sia dal punto di vista teorico (si pensi agli studi sui comportamenti meccanici delle tensostrutture) sia dal punto di vista pratico (si pensi alle innumerevoli sperimentazioni attuate tramite modelli fisici, simulazioni computerizzate ecc...).

Gli istituti di ricerca universitaria sono numerosi, ma alcuni più di altri hanno puntato alla ricerca nel settore delle tecnologie tessili, in particolare, in ambito nazionale, si segnalano, per il contributo dato alla presente ricerca, il *Laboratorio di Tecnologie Leggere per l'ambiente costruito* dell'Università "Federico II" di Napoli, e il Dipartimento Best del Politecnico di Milano.

Le attività di ricerca e di didattica e le realizzazioni sulle tecnologie leggere svolte presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Napoli prendono l'avvio con l'installazione delle vele di copertura della sala della Sezione italiana della XV Triennale di Milano del 1973, in cui ha inizio l'avventura nel mondo delle tensostrutture a membrana e della leggerezza in Italia, con il richiamo agli studi di Frei Otto, la guida del professore Eduardo Vittoria e la collaborazione dell'ingegnere Massimo Majowieki. La ricerca scientifica e didattica si sviluppa poi per vent'anni, ottenendo importanti traguardi come la pubblicazione del primo libro di tipo manualistico sull'argomento in Europa, "*Le tensostrutture a membrana per l'architettura*" (1993), e il convegno internazionale "*Architettura e leggerezza*" del 1999, in cui parteciparono prestigiosi architetti e docenti, con ospite d'onore Frei Otto. Un evento di grande respiro in cui furono coinvolti gli italiani Renzo Piano, Massimo Majowieki, Eduardo Vittoria e Salvatore Di Pasquale, i tedeschi Bodo Rasch e Herald Mühlberger, l'inglese Michael Hopkins, il francese Giles Perraudin, lo spagnolo Marc Malinowki e gli americani Nicholas Goldsmith e Matthys Levy. In seguito è stato istituito nel 2000 il *Laboratorio di Tecnologie leggere per la costruzione dell'ambiente* presso l'Università di Napoli, che ha come obiettivo la continuazione delle attività didattiche e di ricerca sulle tecnologie leggere, attraverso tesi di studio e ricerche insieme alla realizzazione di opere emblematiche legate a

manifestazioni e convegni pubblici, sviluppando le varie possibilità funzionali e ambientali della tecnologia tessile.

Il Politecnico di Milano, nei settori dei tessili per applicazioni strutturali, delle nanotecnologie, dell'analisi chimica, strutturale e meccanica di nuovi materiali tessuti e non tessuti, dell'analisi del ciclo di vita e della valutazione del profilo ambientale di prodotti tessili, accorpa diversi dipartimenti²² e istituzioni scientifiche nazionali e internazionali operanti nei seguenti ambiti:

- sperimentazione di nuovi mix materiali iperleggeri per applicazioni architettoniche e strutturali, a partire dalla realizzazione di specifici prototipi da sottoporre a test di resistenza meccanica, comportamento al fuoco, durabilità e resistenza agli agenti inquinanti, traslucenza, ecc.;

- valutazione delle prestazioni meccaniche, termo-igrometriche, visive-tattili-acustiche, di durata dei tessili innovativi applicabili nell'architettura, negli interni e nel design;

- analisi del profilo ambientale di membrane e film mono e multicomponente finalizzate al perseguimento delle migliori strategie di uso, riuso e riciclo dei componenti tessili;

- trasferimento tecnologico di materiali tessili dai settori avanzati (chimico, biomedico, nautico) al settore edilizio, attraverso l'analisi delle prestazioni e delle potenzialità di applicazione nel sistema edificio.

Le competenze del Laboratorio di Chimica e Caratterizzazione dei Tessuti Innovativi (ChIT) nell'ambito della chimica macromolecolare si avvalgono di moderne tecniche di funzionalizzazione di tessuti, su scala macro, micro o nanometrica allo scopo di progettare filati e tessuti con proprietà specifiche, impiegando un approccio progettuale biomimetico in grado di coniugare elevate prestazioni e sostenibilità ambientale. Le competenze del Polymer Engineering Laboratory sul comportamento fisico-meccanico dei polimeri costituiscono un apporto allo sviluppo di applicazioni innovative nel campo dei materiali tessili.

Ai fini della presente ricerca, si vuole mettere in evidenza un settore prevalentemente diretto alle prestazioni dei tessili innovativi in relazione alla loro

²² Il dipartimento BEST del Politecnico di Milano ha realizzato un sito di informazione tecnica sui tessuti e non tessuti impiegabili in involucri con membrane e scocche: www.architetturatessile.polimi.it.

capacità di interagire con i flussi luminosi. Pertanto, le ricerche in atto qui raccolte e presentate sono selezionate con l'obiettivo di comprendere come le peculiarità delle chiusure a membrana pretesa possano essere sempre più incrementate in termini di comfort luminoso.

In abito internazionale, numerose ricerche sono portate avanti dai paesi del centro Europa, in particolare presso le seguenti sedi di ricerca scientifica:

- IMS e.V., Institute for Membrane and Shell Technology - Anhalt, Germania
- Technical University of Berlin (TUB) - Germania
- University of Stuttgart - Germania
- Nottingham Trent University - Regno Unito
- Vrije Universiteit Brussel - Belgio
- School of Architecture, Barcellona – Spagna.

1.1.3 Alcune realizzazioni di involucri tessili in Italia e nel mondo

La tecnologia tessile è utilizzata in tutto il mondo in edifici dalle più diverse funzioni e dimensioni. Inizialmente, le membrane nelle costruzioni erano impiegate come elementi di protezione ambientale, per manifestazioni transitorie e successivamente per coperture di spazi di grandi dimensioni, passando da un uso prevalentemente temporaneo ad uno permanente, grazie all'incremento di durabilità dei materiali impiegati. La presenza sul mercato di materiali altamente innovativi, sia da un punto di vista di costituzione del materiale di base, sia da quello relativo al processo di formazione e costruzione della membrana, con strati di rivestimento e finitura, ha introdotto il loro uso anche quali coibenti termici e acustici, rinforzi strutturali, sistemi di involucro con buone prestazioni ambientali. A questo proposito, è interessante sottolineare la capacità delle strutture tessili di adeguarsi facilmente alle più diverse condizioni climatiche, si pensi a casi dove le membrane si adattano, rispondendo in maniera ottimale a requisiti di sicurezza e resistenza, a condizioni climatiche difficili come quelle nel Gran Canyon in Colorado, con temperature fino a 50°C e venti con velocità che raggiungono i 160 km/h, o nel Kazakistan, con neve per 150 giorni all'anno, venti sino a 140 km/h e temperatura di -30°C, o ancora in zone tropicali, con temperature e tassi di umidità elevatissimi e precipitazioni di oltre

3 m all'anno, e per le strutture installate vicino al mare, con presenza di salsedine e temperature che raggiungono i 40 °C.

Nel riferirci a condizioni climatiche differenti, il richiamo è alle *zone climatiche terrestri*, distinte in tre tipologie, che si riferiscono ad aree dell'emisfero terrestre. La zona torrida, compresa tra il Tropico del Cancro a Nord ed il Tropico del Capricorno a Sud, caratterizzata da un clima costantemente caldo e da giorni e notti sempre prossime alle 12 ore; la zona temperata, suddivisa in due zone comprese tra il Circolo polare artico ed il Tropico del Cancro e tra il Tropico del Capricorno ed il Circolo polare antartico, caratterizzata da una netta suddivisione delle stagioni ed una durata del giorno e della notte variabile durante l'arco dell'anno; infine la zona glaciale, suddivisa in due zone, l'una sopra il Circolo Polare Artico e l'altra sotto il Circolo Polare Antartico, caratterizzata da un clima molto rigido e dalla presenza di ghiacci perenni a tutte le quote, dove il sole non tramonta per sei mesi consecutivi (giorno polare), mentre nei successivi sei non sorge mai (notte polare). Inoltre, il clima è definito dai *fattori climatici* – “intesi come i processi e le condizioni che determinano il clima in una specifica area geografica” - e dai *dati climatici* - cioè “le grandezze che si riferiscono a caratteristiche misurabili del sistema climatico”. I dati climatici di gran parte del territorio italiano, valori medi elaborati su un arco di tempo di almeno venti o trenta anni, possono essere tratti dalla norma UNI 10349:1994 *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici dati climatici*, dal *Profilo climatico d'Italia* curato dall'ENEA e dai dati climatici europei raccolti da Eurometeo e dalla Società Italiana Meteorologi. Per quanto riguarda invece i dati a livello mondiale, strumenti particolarmente utili sono l'*Handbook of Fundamentals* redatto dall'ASHRAE, i dati raccolti dal NREL e dal NOAA. Il microclima, poi, “*descrive le condizioni meteorologiche dello stato atmosferico prossimo alla superficie e non oltre i 2 metri di altezza di luoghi specifici e delle loro immediate vicinanze*”. Nel microclima vanno considerate variabili come la conformazione del terreno, la posizione su pendio, a valle o in pianura, la presenza di vegetazione ed edifici circostanti e le condizioni d'ombra.

In dipendenza delle condizioni geografiche e climatiche del sito di intervento, le membrane si sono dimostrate capaci di resistere e durare nel tempo senza particolari problemi.

Alcune realizzazioni emblematiche di involucri tessili sono di seguito brevemente descritte per documentare le molteplici possibilità di applicazione delle membrane nel realizzare superfici ed involucri contemporanei, dai rivestimenti di manufatti temporanei alle chiusure resistenti di edifici permanenti. Le prime realizzazioni di edifici che impiegano chiusure verticali a membrana pretesa già sono da tempo conosciute, come il centro di ricerche Schlumberger di Michael Hopkins a Cambridge, realizzato in due fasi dal 1982 al 1992, diventato un riferimento importante per gli edifici realizzati con chiusure verticali a membrana pretesa. In questo edificio, infatti, è stato efficacemente risolto il problema della coniugazione di una struttura a doppia curvatura con una geometria piana, nel passaggio da struttura di copertura a chiusura verticale. In ogni punto il limite della membrana è definito da un'intelaiatura rettilinea separata dalla struttura principale mediante pannelli vetrati. Le travi reticolari che definiscono lo spazio e separano le membrane sono vetrate, così da consentire una combinazione di luce diretta e diffusa, difficile da ottenere in una struttura coperta in maniera tradizionale.

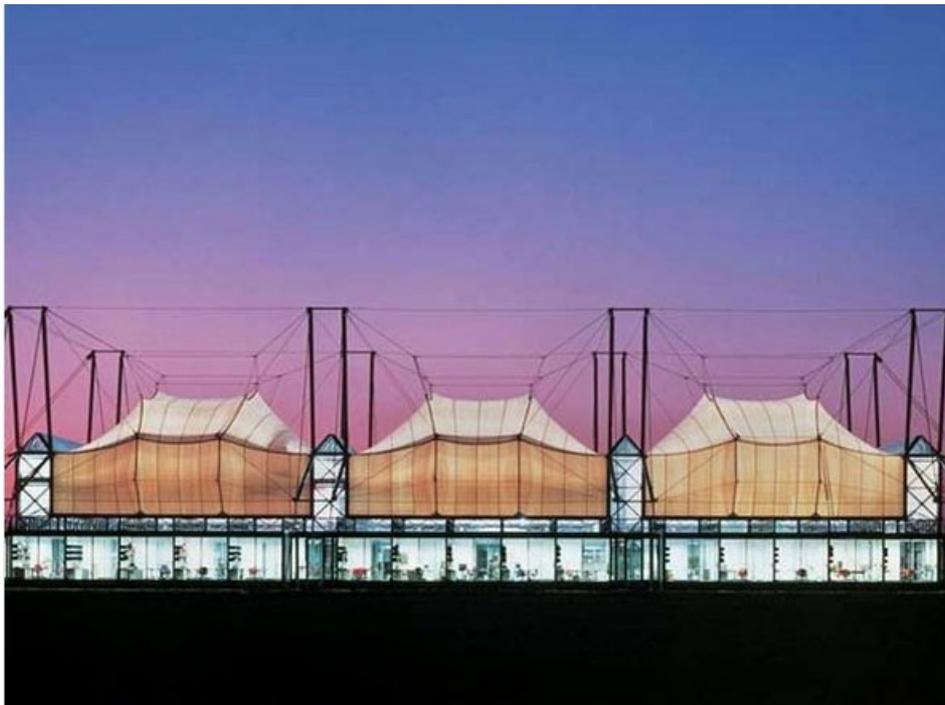


Figura 4. Centro di ricerche Schlumberger, progetto di Michael Hopkins. Uno dei primi esempi di applicazione delle membrane in chiusure verticali. (Fonte: <http://www.hopkins.co.uk/projects>)

E' da evidenziare, poi, il gran numero di realizzazioni che hanno interpretato sotto diverse luci il materiale tessile come superficie avvolgente degli edifici.

Un esempio particolarmente significativo, realizzato in Italia, è il padiglione di Massimo Majowiecki a Bologna, costruito nel 1999 impiegando una membrana a singolo strato in fibre di vetro rivestita in PTFE (prodotto VERSEIDAG B18089). Il sistema strutturale dell'edificio è costituito da sette telai spaziali staticamente indipendenti orditi trasversalmente ad interasse costante di ventiquattro metri. La chiusura sul lato corto esposto a Nord è realizzata utilizzando un sistema strutturale leggero costituito da una membrana, un sistema di funi contrapposte a doppio effetto ordinate verticalmente, un telaio di sostegno di pannelli in vetro strutturale tipo *planar system*. La membrana copre una superficie di 64x12 metri circa ed è fissata alle strutture portanti mediante profili metallici di interfacciamento: in alto il collegamento è con la struttura metallica di copertura, lateralmente con le pareti interne in c.a. delle torri-scale, mentre in basso l'ancoraggio avviene con il profilo tubolare di coronamento della parete vetrata. Il telo è composto da sagome saldate ad alta frequenza, con dimensioni trasversali di due metri, e acquisisce capacità strutturali per l'azione congiunta esercitata da montanti realizzati impiegando travi di funi tese, collegate alla membrana per mezzo di attacchi distribuiti ogni metro e distanti quattro metri l'una dall'altra. Il padiglione espositivo non richiede particolari prestazioni in termini di comfort termo-igrometrico, acustico o visivo, bensì la parte significativa del progetto è relativa alla messa in opera della membrana di chiusura. La complessità del sistema deriva dall'esigenza di raggiungere lo stato di sollecitazione che permetterà alla membrana di acquisire capacità strutturali, pertanto i collegamenti sono dati da ferri angolari, puntoni a piramide rovescia, montanti realizzati con travi di funi, tiranti orizzontali collegati ai sostegni in muratura laterali. Inoltre, la membrana ha sviluppo nel piano, e ciò permette di superare la classica forma a doppia curvatura tipica delle tensostrutture per assumere la forma di una facciata piana, con le difficoltà derivate per garantire la rigidità alle singole parti dei teli. Per la complessità della soluzione strutturale il progetto ha ricevuto il premio ECCS Steel Design Award 1999 per l'Italia.



Figura 5. Facciata tessile del Padiglione di Bologna, progetto di Massimo Majowiecki, 1999

Tra i numerosi interventi, sono stati scelti tre esempi applicativi, differenti per tipologie funzionali, materiali impiegati e dimensioni, che ben rappresentano le potenzialità espressive delle membrane impiegate come superfici di pareti verticali. Gli esempi brevemente citati sono realizzati in contesti ambientali molto diversi tra loro, dall'Arabia Saudita all'Austria alla Florida, e nell'ultimo decennio, dal 1999 al 2008. Ciò consente di riflettere sulla diffusione della tecnologia tessile nel campo delle chiusure verticali, capace di renderle sempre più schermi che si adattano al paesaggio e ne inventano nuovi linguaggi, imitando forme ed elementi naturali o viceversa contrapponendosi volutamente alla natura in cui sono compresi.

Il Burj Al Arab (“Torre degli arabi”), un lussuoso hotel di Dubai realizzato nel 1999, incorpora una facciata tessile nella struttura di involucro ed è la più alta al mondo in questa categoria. Il progetto è dell’ architetto inglese Atkins ed è stato concepito con l’obiettivo di rievocare la vela di un dhow (tipica imbarcazione araba) ed intenzionalmente posizionato in modo che la sua ombra non copra la spiaggia antistante. Il lato aperto della pianta a forma di V è avvolto con una membrana bianca traslucida di altezza pari a 200 metri e superficie di 14.000 metri quadrati. La facciata, esposta a nord, è realizzata con un doppio strato di membrana, formato da 12 singoli pannelli in tensione, che racchiudono il vasto atrio di 18 piani. Di sera la facciata, rivestita in fibra di vetro spalmata in PTFE, viene utilizzata come schermo di proiezione. Il materiale utilizzato ha un peso specifico pari 1550g/m^2 e presenta un’eccellente resistenza alle radiazioni UV, alle alte variazioni di temperatura, alle tempeste di sabbia e al fuoco.



Figura 6. Facciata del Burj Al Arab, 1999. (Fonte: http://it.wikipedia.org/wiki/File:Burj_Al_Arab.jpg)

L'edificio della Walch's Event Catering, progettato da Dietrich & Untertrifaller a Lustenau, adotta una soluzione di facciata di grande impatto per quanto riguarda la relazione con il contesto di grande bellezza, circoscrivendo l'edificio ai volumi puri avvolti da una tela stampata. L'impatto dell'edificio sul paesaggio è strettamente legato alla sensazione data dal motivo stampato, riprodotto sul telo impermeabile dall'artista Peter Walcher, che con effetti di falsa tridimensionalità evoca tanto l'immaginario organico quanto il minimale. La scelta di questo tipo di schermo presenta due aspetti in contrasto fra loro: totale chiusura dall'esterno verso l'interno e totale apertura dall'interno verso l'esterno. Il tessuto ha l'aspetto di uno schermo quasi opaco, che invece risulta essere appena percettibile dall'interno, ed abbina all'effetto esteti-

co di riconoscibilità dell'edificio quello funzionale di protezione della privacy. Inoltre la protezione dal vento e dal sole, ottenuta attraverso lo schermo, ha permesso l'utilizzo di superfici vetrate molto estese. L'assenza di giunti e la continuità delle linee oltre i limiti della costruzione danno alle facciate l'aspetto di un'opera d'arte. La finezza dell'elemento di conclusione del prospetto permette la raccolta delle acque e chiude l'intercapedine, così come i ballatoi in grigliato che evitano la caduta nell'intercapedine e facilitano la manutenzione e la pulizia delle vetrate. Lo schermo è fissato utilizzando una struttura in acciaio posta ad una distanza di 50 cm dal prospetto dell'edificio, il cui compito è di tendere il telo, superiormente e inferiormente, attraverso semplici viti regolate per equilibrarne il tensionamento. Dietro al telo si alternano superfici vetrate e superfici opache, rivestite da pannelli in legno con isolante a vista, approfittando della protezione offerta dal telo.



Figura 7. Involucro tessile della Walch's Event Catering, Austria. (Fonte: Frederickson S., "It's a wrap!", *Fabric ARCHITECTURE*, gennaio/febbraio 2006)

Il padiglione per il festival del Design a Miami del 2008 ha una forma insolita che "sfida le leggi della tentologia"²³. Il progetto è di un giovane studio di architettura di New York, Aranda/Lasch, che dichiarano il loro desiderio di dimostrare e

²³ Baymiller, Joanna, "Inside the big tent", *Fabric ARCHITECTURE*, marzo/aprile 2009.

celebrare le possibilità di una struttura temporanea, realizzandone l'involucro col materiale con cui si fanno le tende. Gli architetti hanno trattato l'involucro sospendendone delle porzioni in aria, sfogliandolo ai bordi e tagliando, su un modello elaborato in fase progettuale, le forme disegnate sulla superficie, ritagli vagamente geometrici e naturalistici che creano disegni di ombre e permettono alla brezza di penetrare attraverso le pareti, lasciata cadere ai bordi della struttura come un vestito sottile consumato a metà. Il 90% della struttura è una tenda di tessuto vinilico opaco supportato da snelli pilastri di alluminio. Il progetto e la costruzione della facciata "a merletto" accosta la struttura a tenda col design del tessuto, strutturalmente resistente da rimanere montato per due settimane. Questa struttura è una combinazione di diverse tipologie. La facciata è di 12 metri, con grandi campate a sbalzo di 15 metri di larghezza per ottenere il richiesto spazio interno e il colonnato esterno, che crea un corridoio protetto dal sole e una sottile transizione tra lo spazio interno ed esterno, che estende l'edificio nel suo paesaggio urbano e lo rende "eco-compatibile". La luce attraversa l'interno, dando al padiglione l'aspetto seducente di uno spazio contemporaneo ed antico allo stesso tempo. La struttura può essere smantellata, immagazzinata, riasssemblata in altre configurazioni.



Figura 8. Involucro tessile del padiglione per il festival del Design a Miami, 2008. (Fonte: *Fabric ARCHITECTURE*, marzo/aprile 2009)

1.2 Integrazione Involucro-Struttura: l'impiego delle chiusure a membrana pretesa nell'involucro edilizio

L'integrazione involucro – struttura è un aspetto fondamentale da affrontare dettagliatamente sia in fase di progettazione che di esecuzione, in quanto le facciate tessili offrono numerosi spunti per un innovativo impiego di materiali avanzati e non, diversi tra loro ma facilmente integrabili, efficienti dal punto di vista funzionale e tecnologico. I requisiti connessi alla problematica della integrazione tra le diverse parti del sistema tecnologico sono tra quelli che maggiormente rappresentano le potenzialità dei tessili tecnici nell'impiego in involucri edilizi. Nello specifico si intende perciò indagare sull'impiego delle chiusure a membrana pretesa attraverso la definizione di parametri di controllo utili per verificare la rispondenza di dette strutture ai requisiti di progetto, a loro volta riferiti a materiali, prodotti o componenti, a seconda del livello di impiego e della rispondenza del sistema alle esigenze da soddisfare.

La fase costruttiva dei sistemi a membrana pretesa impiegabili per involucri chiusi è connotata dalle tecniche di assemblaggio a secco dei vari componenti, ma anche dalle eventuali integrazioni con sistemi e tecniche materiali differenti. Tra i sistemi concepiti per una migliore integrazione dei tessili nelle facciate, il sistema strutturale *Texo*, brevettato da *Tensoforma*, è un innovativo concetto di involucro che grazie alle sue componenti – un elastomero interposto tra un telaio in profilato estruso di alluminio e una membrana tessile – risulta altamente versatile e performante. *Texo* trova un'applicazione ottimale nel settore delle schermature solari, accostato a vetrate o superfici opache, nel campo della riqualificazione, come pelle di facciata, e infine come involucro vero e proprio, con elevate prestazioni di tenuta all'acqua e all'aria garantite da un sistema di guarnizioni e di resistenza termica. I pannelli di tamponamento del sistema di facciata giungono in cantiere già pre-assemblati e pretesi mediante un sistema a martinetti idraulici, quindi sono inseriti in un sistema di facciata continua a montanti e traversi vincolato a una sottostruttura mediante staffe. L'ampia disponibilità di tessuti tecnici, dai microforati alle reti fino a quelli altamente traslucidi, unita alle possibilità di alleggerire gli elementi costruttivi, ridurre le opere di manutenzione, consentire una rapida

sostituibilità, personalizzare le superfici e realizzare chiusure ad assetto variabile, rendono gli involucri tessili altamente efficienti in ordine al comfort ambientale.

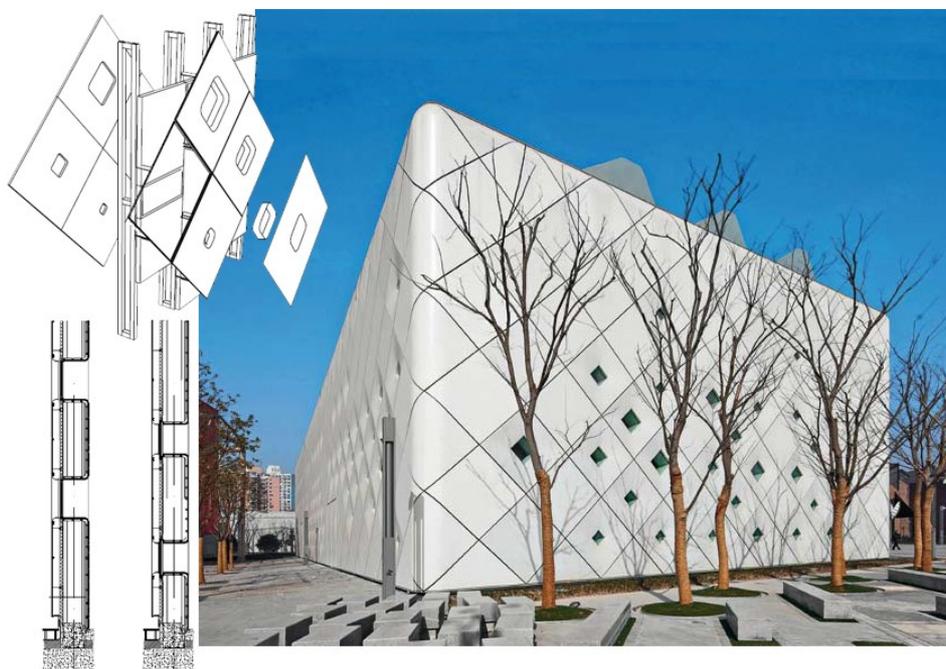


Figura 9. Applicazione dei pannelli *Texo* nel padiglione di Shanghai 2010. (Fonte: www.tensoforma.it/statico/sistematexo)

Altro sistema di integrazione dei tessili in facciata, brevettato a Bordeaux, è il *Profil Tension System*, un innovativo sistema di tensionamento che impiega tutti i tipi di pellicole e membrane. L'efficienza del sistema Profil TS si è dimostrata già nel settore pubblicitario, realizzando installazioni luminose, acustiche, banner, pannelli tessili di chiusura di diverse misure. Nel settore edilizio il sistema si presta a varie applicazioni, come le facciate tessili, la protezione solare realizzata con schermi tessuti, i pannelli acustici per partizioni interne, ed ogni tipo di copertura con superficie dai 5 ai 1000 mq circa. Il sistema si basa sull'adozione di profili in alluminio e in acciaio dalle diverse forme e tipologie, in cui il telo viene inserito e teso secondo le necessità. L'azienda offre tutte le istruzioni per la corretta posa in opera del sistema, dalle indicazioni geometriche sulla posa dei profili, che devono essere perfettamente complanari e perpendicolari, agli attrezzi da adoperare, cui bisogna prestare attenzione evitando strumenti aggressivi come martelli di metallo preferendo quelli in gomma, fino alle modalità di assemblaggio, che possono avvenire tramite viti e "gripp". Per ogni profilo, bisogna applicare punti di colla per impostare correttamente il telaio in facciata e migliorare l'impermeabilizzazione. La gripp tiene in posizione

serrata il telo nel canale di alluminio, consentendo un'eccezionale resistenza alla lacerazione, inoltre protegge contro gli agenti esterni. Il sistema è impiegato sia per gli esterni che per gli interni, per teli dai 250 ai 650 g/m². La lunghezza delle barre è di 3050 mm e il peso di 130 g/ml.



Figura 10. Applicazione *Profil Tension System* in edifici pubblici. (Fonte: www.profil-ts.com)

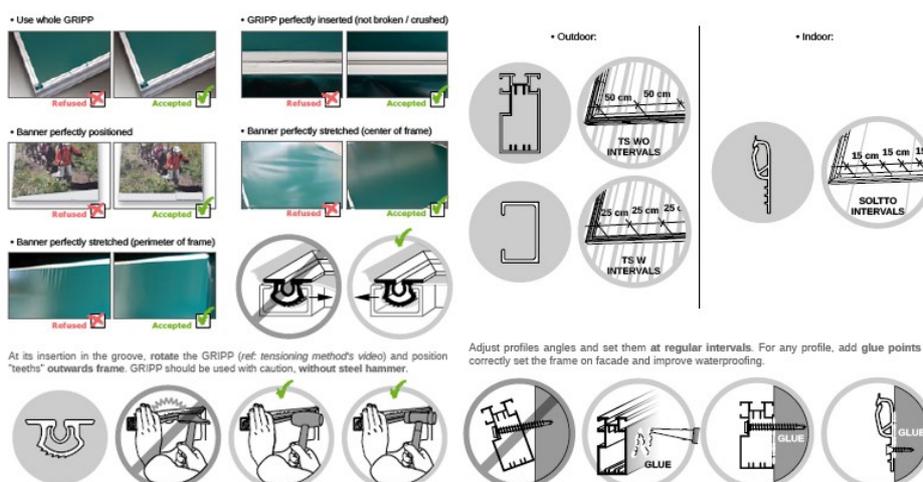


Figura 11. Elementi tecnici del *Profil Tension System*. (Fonte: www.profil-ts.com)

Le ultime tendenze tipologico-funzionali, nate già a partire dalla fine degli anni '80 del secolo scorso, assumono membrane modulari ad elementi discreti e ripetitivi che consentono una maggiore integrazione del tessile nelle architetture convenzionali. I supporti formano un sistema strutturale chiuso, con l'uso delle membrane limitato a singoli sub-sistemi in integrazione con altri sistemi costruttivi, e ciò comporta la necessità di migliorare le prestazioni di comfort termo-acustico e luminoso.

I tessuti prendono forma per diventare rivestimenti leggeri di facciata, sistemi mobili di ombreggiamento, strutture temporanee o permanenti di chiusura, grandi coperture traslucenti. Le modalità d'uso dei più innovativi tessili tecnici prefigurano originali configurazioni e impieghi insoliti, sia nel campo delle nuove costruzioni che negli interventi sul patrimonio edilizio esistente.

Per il recupero ed il riuso del tessuto edilizio minore della città, infatti, le membrane tessili possono "ricucire" le parti smembrate, conferendo nuova identità e funzioni a spazi secondari o di risulta. Ad esempio, nell'edificio della *Imagination* di Londra del 1988, l'obiettivo di ristrutturare l'edificio preesistente, eliminando una serie di strutture di servizio tra i due blocchi principali costituenti l'edificio, è realizzato con la creazione di un'ampia galleria interna coperta da una membrana in poliestere/PVC (con superficie di circa 590 mq), che consente la luce diffusa richiesta per lo spazio interno.



Figura 12. Intervento di riqualificazione nell'edificio *Imagination Headquarters* di Londra, progetto di Architen Landrell Associates. (Fonte: www.architen.com/projects/imagination-headquarters)

I sistemi di facciata nel progetto contemporaneo dovrebbero essere più versatili e più orientati secondo una logica che, partendo dalla fase progettuale, mira a delineare le prestazioni dei materiali e la flessibilità dei sistemi di impiego. I tessuti sono materiali in grado di ottenere tali obiettivi grazie alla loro versatilità funzionale e tecnologica, in particolare nella integrabilità con altri sistemi costruttivi e materiali più "convenzionali", che consente di impiegarli come involucri esterni totalmente o parzialmente tessili o come schermature per la protezione solare. Più dettagliatamente, è possibile considerare gli schermi tessili come *complementi* dell'edificio, che modificano le prestazioni, l'aspetto esteriore e in alcuni casi le relazioni interno-esterno.

Negli ultimi anni, grazie alla ricerca scientifica, le prestazioni dei materiali hanno raggiunto eccellenti risultati per il controllo del fattore solare e della trasmissione luminosa. Il progetto di uno schermo tessile implica un'attenta scelta del tessuto più adatto alle richieste degli utenti, e considera fattori influenzanti il benessere termico e visivo il *coefficiente di riflessione solare*, che cambia a seconda del colore della membrana, e il *coefficiente di trasmissione luminosa*, che dipende invece dalla tessitura. In particolare, per una *schermatura solare* è importante avere un alto coefficiente di riflessione solare, scegliendo un tessuto leggero colorato, con una bassa trasmissione luminosa visibile. Se invece progettiamo una *schermatura luminosa*, è appropriato scegliere un tessuto con basso coefficiente di trasparenza, fondamentale per la definizione del grado di visibilità all'esterno. Uno schermo tessile è permeabile all'aria, all'acqua e alla luce e permette di avere elementi traslucidi in facciata, conferendo leggerezza e resistenza all'involucro. Lo schermo, poi, crea uno spazio di filtro "reversibile", determinato dalla capacità di controllare la trasformazione di alcune caratteristiche dello spazio, come le relazioni tra interno ed esterno. I sistemi di fissaggio e le soluzioni di tensionamento delle schermature tessili possono essere realizzati con tenditori a vincolo elastico e a vincolo rigido (non permette agli elementi giuntati gli spostamenti e le rotazioni). Nei tenditori rigidi le distanze tra gli elementi rimangono costanti sotto le azioni delle forze, mentre nei tenditori elastici le mutue distanze cambiano in modo lineare, ma ritornano nella loro

forma iniziale quando le forze sono rimosse dal sistema. Di seguito si riporta una sintetica tabella di alcune soluzioni adottate nella integrazione di tessuti in facciata²⁴.

SOLUZIONE DI FISSAGGIO	SOLUZIONE DI TENSIONAMENTO
Puntiforme con occhielli	Con tenditore a vincolo rigido: anelli Con tenditore a vincolo elastico: molle
Lineare con asole, tubolare o rotolante	Con tenditore a vincolo rigido: guide, cavi e staffe Con tenditore a vincolo elastico: molle
Continuo con telaio	Con tenditore a vincolo rigido: profilati vari

Esempio di tale logica progettuale, che punta sulla integrazione tra differenti tecnologie, è il lavoro del gruppo tedesco OX2Architekten di Aachen per un edificio multifamiliare caratterizzato da una facciata tessile. Dalla riflessione sullo stile di vita moderno, in cui ognuno è “trasparente” per gli altri e il vero lusso sta nel decidere quali cose della propria vita sono pubbliche e quali no, nasce l’idea della facciata, che diventa un elemento dell’architettura che può mostrare o nascondere ciò che c’è sotto, come un vestito. Per fare ciò, il progetto prevede strisce di tessuto come rivestimento fisso al centro dei fronti, ma che diventano schermature a lamelle negli angoli, dove si aprono fessure per consentire la visibilità all’esterno e per gestire la luce naturale durante il giorno. Il tessuto consente alla luce di variare il suo passaggio attraverso le chiusure, modificando i fattori di riflessione, rifrazione o trasmissione del flusso luminoso, che incide sulla superficie leggera e flessuosa della membrana. Infatti il movimento costante del vento e il sistema a lamelle, insieme al modo in cui i singoli utenti utilizzano le schermature, danno all’edificio un aspetto esterno vitale e “vibrante”. I componenti di facciata scelti dai progettisti sono pannelli rinforzati con fibre di vetro prodotti da *Okalux*, in grado di fornire anche buon isolamento termico e acustico. Inoltre, la membrana *Stamisol FT*, prodotta dalla Ferrari, concepita proprio per l’uso in facciata, è in grado di limitare il guadagno termico esterno di circa il 25%, in dipendenza del colore. Ciò può comportare un risparmio di costi energetici, aumentando l’isolamento e riducendo al contempo la massa dell’edificio²⁵.

²⁴ Cfr. Lamacchia, Alba, “Facades Tressees: Building facades redevelopment as the means of textile-screens”, in: Atti del Tensinet Symposium, CLUP, Milano, 2007.

²⁵ Cfr. Zeh, Mark, “Dressing the apartment from outside in”, in *Fabric Architecture*, nov./dic. 2010, pp. 6-7.



Figura 13. Schermature e involucro tessile per un edificio multifamiliare in Germania, rendering di OX2Architekten. (Fonte: *Fabric ARCHITECTURE*, novembre/dicembre 2010)

1.2.1 La flessibilità tecnologica delle facciate tessili

L'adattabilità di un'architettura, intesa come attitudine a conformarsi secondo diverse forme e geometrie ma anche ad adattarsi alla propria destinazione d'uso, la rende in grado di modificare il proprio aspetto. Si potrebbe parlare anche di "trasformabilità", intesa come possibilità di variare l'assetto iniziale a vantaggio di una configurazione diversa per necessità di adeguarsi a differenti condizioni climatiche (per esempio con cambiamenti di assetto delle coperture o degli involucri più in generale). Da tali premesse scaturisce la possibilità di indicare come nuovo requisito tecnologico per i componenti di facciata tessile l' *adattabilità tecnologica e morfologica*, intesa come attitudine a conformarsi secondo diverse forme e geometrie e mediante differenti modalità costruttive.

La leggerezza dei materiali impiegati nell'involucro tessile chiama in causa altri requisiti tecnologici, in particolare garantisce la *reversibilità* delle tecniche costruttive, in grado di assicurare *rapidità di assemblaggio e disassemblaggio* e la *temporaneità* in termini di permanenza limitata in un dato contesto o in un medesimo assetto. Le operazioni di assemblaggio sono a carico di pochi uomini, ogni elemento del sistema risulta esser maneggevole, i materiali facilmente reperibili. Inoltre, è importante sottolineare, relativamente agli aspetti cantieristici appena citati, che nella contemporaneità del settore edilizio, i limiti dimensionali e di peso dei componenti utilizzati sono fissati non più in rapporto alle possibilità umane, quanto in rapporto alle potenzialità offerte da sistemi di sollevamento e trasporto motorizzati. Molte rea-

lizzazioni odierne altamente tecnologiche in realtà sono nate da modalità di assemblaggio e disassemblaggio ispirate all'esperienza dei popoli nomadi. Laddove, infatti, si prevedono parti trasformabili, queste ultime vengono progettate secondo una sequenza di movimento reversibile e ripetibile, in relazione ai cambiamenti climatici o alla modificazione delle esigenze d'uso. La temporaneità di assetto può essere intesa in due modi: tempo d'esercizio limitato in un determinato luogo o possibilità di modificare in tempi successivi la configurazione della costruzione in relazione al contesto. Nelle unità trasformabili l'obiettivo primario è quello di alleggerire il più possibile gli elementi coinvolti nel movimento.

Altro aspetto connotante la tecnologia tessile concerne la pluralità relativa sia ai sistemi costruttivi che ai processi lavorativi, e costituisce un fattore non trascurabile nell'ambito della produzione edilizia, in particolare riguardo a problematiche come la rapidità costruttiva e la possibilità di coinvolgimento di strutture differenti nel grado di organizzazione della catena produttiva. Come sappiamo, la scelta del materiale condiziona le soluzioni costruttive e ne caratterizza l'espressione formale. Le membrane possono essere impiegate secondo una pluralità di sistemi costruttivi, e le tipologie costruttive vengono definite principalmente in funzione della superficie di involucro e delle caratteristiche funzionali delle strutture d'ancoraggio. Schematicamente è possibile suddividere i sistemi piani in sistemi a singola curvatura (travi di funi, con grigliati a doppio strato, paralleli/radiali, "tensegrity" ovvero multi direzionale), a doppia curvatura (membrane con bordi rigidi o flessibili, a supporti lineari o puntiformi, metalliche o in tessuto), o a nessuna curvatura (membrane piane da cui deriverebbe uno sforzo infinito, bisogna perciò che si deformino dopo il carico). Inoltre, la pluralità dei sistemi consente una scelta diversificata in relazione a condizioni specifiche degli interventi, che possono riferirsi a diverse tipologie funzionali. Le possibilità produttive, poi, unite all'agevole trasportabilità dei componenti, rendono l'impiego dei sistemi tessili adatto per interventi di dimensioni variabili. La pluralità rientra nel concetto più generale della *flessibilità tecnologica*, intesa come flessibilità di produzione e di impiego dei sistemi strutturali. Infatti, la produzione può essere di tipo industriale, ma anche di piccola impresa o artigianale. Ciò comporta un'ampia varietà di soluzioni tecniche adottabili in differenti tipologie funzionali, variabili per dimensioni, forme, modalità di impiego. Una prestazione fondamentale da sottolineare

re, che distingue i sistemi di facciata tessile, di natura plastica, da quelli realizzati con materiali rigidi come il vetro o il policarbonato, è legata alle dimensioni fisiche dell'involucro, inteso come parete verticale dell'edificio. Infatti, una volta ingegnerizzato il dettaglio, l'involucro realizzato con membrane flessibili può avere qualsiasi dimensione, in quanto non presenta nessun problema di ordine costruttivo né strutturale, a differenza del vetro, che invece ha bisogno di dimensioni limitate o comunque ben ponderate, per evitare problemi di messa in opera, per questioni di maneggevolezza, manovrabilità o facilità di impiego. Inoltre, nella realizzazione di una parete verticale con elementi traslucidi, di fondamentale importanza è il peso del componente scelto per l'impiego nel sistema di chiusura. Dal confronto tra il vetro, il policarbonato e le membrane plastiche, utilizzati per le pareti leggere e traslucide, si ricava che il ridotto peso delle ultime (circa 20 volte inferiore rispetto a quello del vetro e del policarbonato) diventa un vantaggio considerevole in termini di manovrabilità e facilità di impiego.

La flessibilità tecnologica può suddividersi in due aspetti, costruttiva e prestazionale. Come osserva Pedrotti, le caratteristiche della *flessibilità costruttiva* dei componenti dipendono dalle caratteristiche di assemblaggio. Oggi, con la bassa complessità del componente industrializzato, la diffusione dell'assemblaggio a secco amplia la possibilità di integrare i componenti all'interno della costruzione. La condizione tecnica della flessibilità costruttiva è rappresentata dalla diffusione dei sistemi di assemblaggio a secco e dalla versatilità dei sistemi di fissaggio, che rendono indipendente il rivestimento dal supporto strutturale²⁶. Le scocche e le membrane si possono fissare direttamente per punti al supporto strutturale o mediante strutture di aggancio. E' inoltre possibile combinare le due tecniche, per esempio fissando per punti i bordi orizzontali della scocca o membrana e con profili di alluminio o legno i bordi verticali, in quanto la tecnologia dei materiali plastici permette di progettare la prestazione di resistenza meccanica e di resistenza al vento in funzione del sistema di fissaggio adottato. I metodi di fissaggio influenzano poi le prestazioni: un pannello fissato solo lungo i bordi flette in misura maggiore per l'azione del vento rispetto ad un pannello provvisto anche di un fissaggio centrale. Le scocche, infine, dotate di elementi di fis-

²⁶ Cfr. Pedrotti, Laura, *La flessibilità tecnologica dei sistemi di facciata. Evoluzione delle tecniche di produzione e di assemblaggio*, Ed. Angeli, Milano, 1995, p. 118-133.

saggio già predisposti, possono essere inserite in scanalature praticate su appositi profili verticali a U, che consentono punti di montaggio non visibili all'esterno.

La *flessibilità prestazionale*, invece, è data dalla diffusione di componenti industrializzati, che consente al progettista di variare le relazioni tra gli elementi che costituiscono il componente di facciata per soddisfare le richieste prestazionali di ogni singolo progetto. L'industrializzazione del sub componente facilita la diffusione dei componenti a catalogo caratterizzati dalla variazione delle dimensioni e delle forme, da diverse possibilità di integrazione all'interno della costruzione e dalla variazione delle prestazioni. La flessibilità costruttiva dei prodotti per l'edilizia trasforma la progettazione su misura, da dimensionale e formale a prestazionale. La flessibilità prestazionale indica la capacità delle facciate di variare le prestazioni ambientali al variare delle richieste di prestazioni specifiche di ogni unità ambientale dell'edificio e amplia la flessibilità di impiego dei componenti. Il progettista può quindi richiedere al componente diversi valori dell'isolamento acustico, termico, di resistenza al fuoco²⁷.

Un primo livello di flessibilità costruttiva è determinato dalla possibilità di produrre componenti industrializzati con forme, dimensioni e finiture diverse, un secondo dalla possibilità di variare le relazioni tra gli elementi della facciata e un terzo livello dalla possibilità di variare le relazioni tra la facciata e gli altri sottosistemi tecnologici e può essere definito di interfaccia. La flessibilità interna al sistema dipende dalle tecniche di produzione, dalle caratteristiche dei materiali, dalle tecniche di assemblaggio, mentre quella esterna dipende unicamente dalle tecniche di assemblaggio²⁸.

Le sperimentazioni high tech hanno dimostrato che in una progettazione per componenti l'uso dello spazio è condizionato dalle tecniche di assemblaggio dei componenti stessi. Questa tendenza ha assunto la flessibilità a paradigma progettuale e ha reso esplicito il rapporto biunivoco tra le scelte tecniche e la possibilità di fruire in modo dinamico dello spazio, in modo da soddisfare la variazione delle modalità d'uso degli spazi e le esigenze di adattabilità dell'edificio.

²⁷ Cfr. Pedrotti L., *op. cit.*

²⁸ Cfr. Pedrotti L., *op. cit.*

Tali aspetti sono, in molti casi, ampiamente soddisfatti dai componenti utilizzati nelle chiusure a membrana pretesa.

1.2.2 Il sistema integrato involucro-struttura

In questi ultimi tempi, la scelta delle membrane pre-tese come materiale impiegabile in architettura coinvolge anche gli edifici di tipo “convenzionale”, sia all'esterno che all'interno, ampliando il loro ruolo da struttura di copertura a quello di chiusura, fino ad impieghi come componenti di partizioni interne ed esterne. Gli aspetti funzionali di tali strutture hanno certamente dei limiti intrinseci, anche se oggi con i TUT, è possibile potenziarne le prestazioni, anche grazie al loro coinvolgimento con altri sistemi strutturali.

Avere a disposizione mezzi che garantiscano una maggiore integrazione tecnologica vuol dire fare integrare il componente di facciata con diverse tecniche costruttive, tecnologie e modalità costruttive delle strutture portanti o delle chiusure, e far accostare componenti tecnologici di diversa origine produttiva, al fine di ottenere migliori prestazioni. In quest'ottica, il tema della flessibilità tecnologica è di fondamentale importanza. Infatti, la diversificazione dei sistemi di fissaggio – dalle viti alle graffe ai rivetti ai fissaggi nascosti costituiti da collanti o inserti – amplia per il progettista la possibilità di integrare i componenti all'interno delle costruzioni. Sistemi di ancoraggio a catalogo flessibili possono sostenere rivestimenti di materiali con peso e spessore diverso, consentendo al progetto del componente di ampliarsi e focalizzare maggiore attenzione al progetto delle relazioni a diverse scale tra i sub - componenti, tra i diversi componenti di facciata e tra questi e la struttura portante. Oggi è possibile ed auspicabile, soprattutto con l'impiego di sistemi leggeri ed innovativi, una progettazione tra sub componenti diversamente integrabili in funzione delle richieste determinate dal contesto e dai fruitori degli spazi.

Poiché la facciata tessile si configura generalmente come una facciata continua, si può pensare di analizzarla in base al suo impiego, ovvero attraverso la scomposizione, suggerita da Pedrotti²⁹, in:

- Facciate continue totali (le membrane rivestono completamente la struttura)

²⁹ Cfr. Pedrotti L., *op. cit.*

- Facciate continue orizzontali (le membrane vengono inserite nella struttura tra i piani, interrotte dai solai)
- Facciate continue verticali (le membrane vengono inserite nella struttura in senso verticale).

I disegni di assemblaggio per gli accessori di chiusura e di collegamento tra la membrana e la struttura di supporto dovrebbero includere l'insieme dei componenti strutturali e il loro posizionamento e fissaggio, oltre che le dimensioni necessarie ad assicurare la compatibilità con la struttura di supporto e con i modelli di taglio.

I principali sistemi di integrazione involucro – struttura che interessano le facciate tessili sono sintetizzabili attraverso le seguenti semplificazioni, che si basano sull'utilizzo della membrana in modalità esecutive diverse, integrata a strutture a loro volta differenti per materiali e tecniche costruttive:

α –Modellazione del tessuto su una sotto-struttura, che può essere realizzata in cemento armato acciaio o legno, assimilabile al tipo di *facciata continua totale*, in quanto la membrana avvolge completamente l'involucro, connotando l'aspetto esterno dell'edificio attraverso le sue forme curve e resistenti.



Figura 14. RAF Museum. (Fonte: Armijos, Samuel J., *Fabric architecture*, Norton, Londra, 2008)

β –Montaggio di pannelli tessili su una sotto-struttura, che può essere assimilato al tipo di *facciata continua verticale o orizzontale*, a seconda che i pannelli siano montati in una direzione piuttosto che in un'altra. Nel caso delle facciate tessili, la suddetta classificazione è alquanto libera, poiché il materiale plastico si presta al

montaggio secondo le più diverse direzioni, rispettando le condizioni poste in fase di progettazione, consentendo il taglio delle porzioni di tessuto secondo forme che seguono la linea degli sforzi a cui è sottoposta la membrana, in modo da assicurare la rispondenza a requisiti di sicurezza.

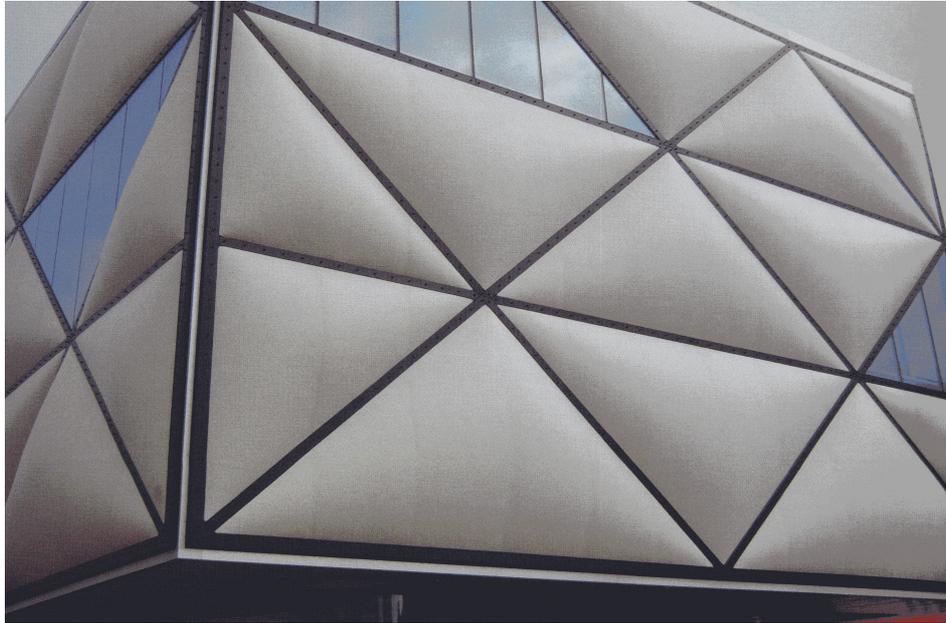


Figura 15. Facciata realizzata con membrana di fibre di vetro spalmata in PTFE della Miroiterie-FlonLosanna. (Fonte: www.hightexworld.com)

c- Montaggio di una protezione tessile su un sottostante involucro multistrato e multicomponente, che può essere assimilato al tipo di *facciata continua "parziale"*, in quanto la membrana può fungere da protezione totale dell'organismo edilizio o solo da filtro parziale, teso a proteggere alcuni punti strategici dell'edificio. In questo caso, quindi, la membrana non avvolge completamente l'involucro edilizio ma lo protegge, come una seconda pelle staccata dall'ossatura portante, che funge da schermo e non da elemento strutturale.



Figura 16. Edificio LA Farmers Market. (Fonte: (Fonte: Armijos, Samuel J., *Fabric architecture*, Norton, Londra, 2008, p. 146)

d- Installazione di una struttura pneumatica, costituita da doppia membrana con interposto strato di aria ad alta pressione, in grado di conferirle la resistenza meccanica necessaria a renderla una struttura portante ed autonoma. In questo caso, l'integrazione con altre tecnologie è minima, in quanto le strutture pneumatiche prevedono generalmente solo l'attacco a terra come parte del montaggio da integrarsi con sistemi di fondazione o ancoraggio. Potremmo parlare di *facciate continue totali*, sebbene il termine facciata risulti in questo caso improprio, mentre più corretto sarebbe parlare di involucro in senso più ampio, considerandolo come l'insieme di chiusure verticali ed orizzontali che racchiudono l'organismo edilizio nella sua completezza.



Figura 17. Padiglione della Finmeccanica al Farnborough Airshow 2006 di Londra, progetto dello Studio GRIS, realizzato in cuscini pneumatici da Canobbio S.p.A. e formTL. (Fonte: www.architetturatessile.polimi.it)

e- Installazione di un doppia pelle realizzata montando la membrana su una sottostruttura, in genere metallica, collegata a sua volta ad un nucleo portante centrale, in

cemento armato acciaio o legno. Questa tipologia può essere assimilata al tipo di *facciata continua totale*, in quanto l'aspetto esterno dell'edificio risulta caratterizzato da un'unica superficie tessile che racchiude il manufatto, prevedendo però aperture e spazi liberi, ad esempio per la collocazione di impianti di vario tipo, all'interno dell'intercapedine formata dai due strati involucro.

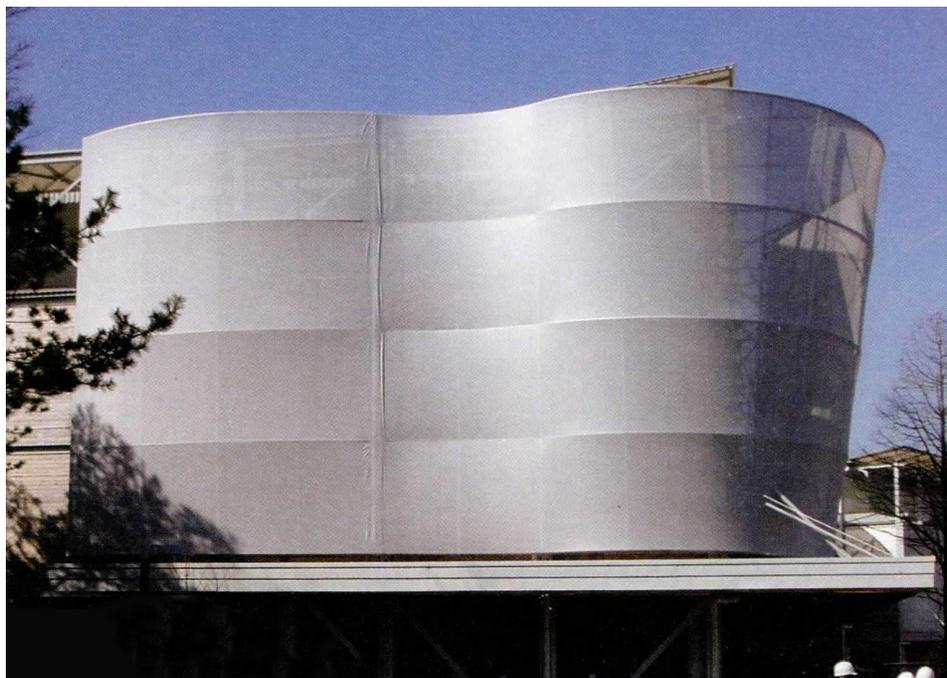


Figura 18. Facciata tessile per un edificio in Messico. (Fonte:)

Nella definizione dell'involucro edilizio leggero, è possibile definire il "muro" attraverso l'applicazione di più strati, destinati ad assolvere funzioni diverse: sostenere, schermare, isolare. Il muro acquista una consistenza tessile. La natura tessile del muro consente di declinare infinite variazioni dei suoi gradi di trasparenza

³⁰

In effetti, sappiamo che negli ultimi anni si è sviluppata una tendenza alla separazione programmatica tra struttura e chiusura dell'edificio, in cui è stata recentemente riletta una origine "tessile" dell'architettura. Le chiusure, infatti, da unità opache e massive in cui le aperture sono dei "fori" per catturare luce ed aria, si trasformano in unità traslucide, caratterizzate da diaframmi sottili ed ultraleggeri. Innovazioni tecnologiche sui materiali, sui processi e metodi di produzione, costruzione e ottimizzazione delle prestazioni in ordine al comfort ambientale e al

³⁰ Cfr. Beccu, Michele, Spartacu, Paris, *L'involucro architettonico contemporaneo tra linguaggio e costruzione*, Design Press, Roma, 2008.

risparmio energetico hanno portato ad una nuova definizione della facciata come sistema integrato di elementi costruttivi eterogenei, che in un insieme assemblato delimitano e definiscono gli spazi confinati e ne soddisfano le esigenze, ma anche come elemento di "rappresentazione", in cui la distinzione ed alternanza tra opacità e trasparenza tendono a confondersi ed integrarsi, per assolvere, in spessori sottilissimi, tutte le funzioni e prestazioni richieste, grazie alla multifunzionalità degli strati componenti.

1.2.3 L' integrabilità delle facciate tessili

L'*integrabilità* è intesa come adeguamento delle unità tecnologiche nonché degli elementi tecnici ad una funzionale integrazione, che a sua volta significa attitudine dei componenti alle connessioni senza necessità di adattamenti. Nel caso delle facciate tessili, diverse sono le modalità di connessione della membrana con la struttura portante, quasi sempre in acciaio. Come riportato nella figura 19 le varianti esecutive di *giunti piani* in facciate a membrana pretesa possono essere:

- a- saldatura discontinua PVC/tessuto in poliestere.
- b- saldatura discontinua PTFE/tessuto in fibra di vetro con interposto film di PTFE.
- c- saldatura a cucitura con nastro di tenuta, tessuto in PVC/poliestere.
- d- giunto a morsetto.

Varianti esecutive di *rinforzi* in facciate a membrana pretesa possono essere:

- a- raddoppio in presenza di sollecitazioni limitate.
- b- raddoppio in presenza di sollecitazioni elevate.
- c- tasca con cavo.
- d- tasca con cinghia.

Varianti esecutive di *giunti perimetrali* in facciate a membrana pretesa possono essere:

- a- cinghia di bordo cucita.
- b- tasca con cavo.
- c- cavo di bordo e cinghia.
- d- tasca con tubolare.
- e- bordo fissato con morsetti senza perforazione della membrana, senza possibilità di tensionamento.
- f- bordo fissato con morsetti senza perforazione della membrana, con possibilità di tensionamento.
- g- bordo fissato con morsetti con alette.
- h- bordo legato con corda³¹.

E' importante sottolineare come, al fine di garantire un corretto funzionamento del sistema di controllo ambientale dell'edificio, si renda necessaria una *integrazione* tra

³¹ Cfr. Herzog, Thomas, Krippner, Roland, Lang, Werner, *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005, p. 217.

tutti i componenti e gli elementi tecnici, in grado di influenzare le caratteristiche ambientali degli spazi, soprattutto quando essa è prevista sin dalle fasi decisionali a monte del progetto.

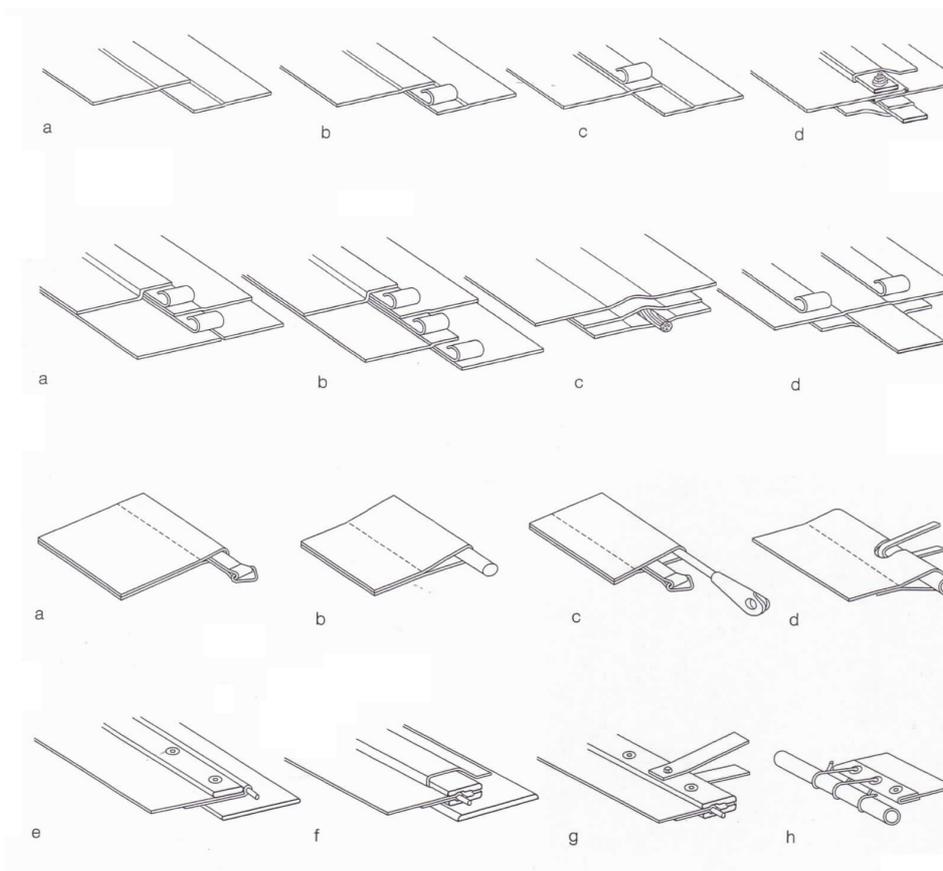


Figura 19. Varianti esecutive di giunti e rinforzi. (Fonte: Herzog, Thomas, Krippner, Roland, Lang, Werner, *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005)

La *stabilità morfologica* è intesa come attitudine di un elemento tecnico di mantenere invariata nel tempo la sua forma. Per le tensostrutture è però più corretto parlare di *stabilità morfologica/dimensionale*, ovvero l'attitudine a mantenere variabile entro un range di valori la forma e lo stato tensionale nel tempo. La resistenza è determinata dalla configurazione geometrica e tensionale, anche in assenza di carico: la stabilità è legata perciò anche al grado di *regolabilità* delle tensioni che "governano" l'assetto formale delle strutture tessili. In genere, lungo il bordo perimetrale della membrana, vengono inseriti elementi di rinforzo quali piastre o cavi in asola o fissati alla marinara. Essi contribuiscono allo stato tensionale della membrana e, in particolare, ad assestare la forma degli orli dei teli e al contempo costituire punti per l'ancoraggio ai supporti. In essi si assiste alla massima concentrazione delle forze dell'intero impalcato tensionale. Nei punti di attacco della membrana con le piastre di

ancoraggio, è necessario che il flusso delle tensioni proveniente dalla superficie della membrana sia convogliato in modo da non uscire dal piano, pena l'effetto torsionale della membrana. Gli involucri tessili impiegati in integrazione con altri organismi costruttivi necessitano di una particolare attenzione al rapporto tra strutture "curve" e strutture rigide; infatti i punti di passaggio tra un volume curvo e articolato a uno rettilineo e rigido (*integrazione morfologica*) pongono complessi problemi di attacco, sia in termini tecnici e funzionali che di qualità morfologica/spaziale.

Nel concetto di stabilità morfologico/dimensionale appena esposto rientra anche la *regolabilità*, intesa come attitudine a subire variazioni, indotte intenzionalmente da un operatore attraverso dispositivi tecnici, di un valore o di una funzione. Dalle viti per l'ancoraggio allo sviluppo di strutture secondarie, regolabili e capaci di assicurare la planarità di rivestimenti di grande dimensione con fissaggio nascosto, si è avuta una sempre più rapida e corretta posa in opera delle facciate tessili, a volte senza l'impiego di posatori specializzati, se già esperti nel settore delle tensostrutture. Inoltre, poiché la tela si deforma sottoposta a sforzi di trazione, sia per il cosiddetto "cambiamento di curvatura" che produce una prima deformazione di costruzione, sia per la deformabilità delle fibre precedente alla tensione di rottura, è importante una revisione periodica dello stato tensionale della membrana per il funzionamento strutturale dell'insieme. I tessuti intrecciati di poliestere hanno bisogno di una "post-tensione" prima dei 6 mesi dal montaggio, mentre quelli in fibra di vetro si revisionano almeno una volta l'anno, presentando una minore deformazione alle sollecitazioni. Il controllo dei livelli di tensionamento può essere effettuato con ispezioni manuali, sentendo la resistenza allo spostamento laterale dei tiranti, oppure misurando in loco la tensione con tensiometro, celle di carico, perizie geometriche. In relazione alla strategia di manutenzione si dovrebbe determinare il valore-soglia per il quale attivare il ritensionamento, ma solo se il progetto esecutivo include adatti dispositivi di regolazione (tenditore a mulinello lungo il cavo, sezioni telescopiche all'interno del palo ecc). La definizione dei nodi costruttivi, sia strutturali che integrativi, è fondamentale nel più generale contesto dell'opera, proprio per la natura della tecnologia tessile che vede nelle *connessioni* quei punti visibili del manufatto che restituiscono la percezione visiva delle problematiche costruttive, dove i vari

elementi si relazionano per configurare l'invaso spaziale e incidono anche sull'aspetto morfologico. Le problematiche progettuali delle connessioni per le membrane riguardano:

-la *dimensione e la forma dei giunti* e degli elementi di trasmissione delle tensioni, realizzati attraverso dispositivi di tensione (tenditori) che devono essere facilmente raggiungibili per regolare, quando è necessario, la tensione da imprimere alla membrana;

-il *rapporto tra le chiusure a membrana e le chiusure rigide*, nei casi in cui la facciata tessile è integrata con altri materiali, problematiche legate agli aspetti della integrazione morfologica;

-le percezione visiva delle *connessioni*, punti chiave della fase costruttiva.

Dall'analisi dei requisiti tecnologici fin qui svolta è scaturita l'elaborazione di schede di lettura esigenziale-prestazionale per ognuno dei requisiti selezionati, utili per la predisposizione del quadro di confronto finale, risultato della presenta ricerca. Le schede così elaborate sono riferite ai requisiti indicati come connotanti i sistemi chiusi a membrana pretesa, pertanto sono relative ai tre aspetti individuati per l'analisi di tali tecnologie, ovvero l'integrazione involucro-struttura, la realizzazione e utilizzazione e la percezione visiva con le sue ricadute sul benessere ambientale, come di seguito riportato:

Scheda 1.a	INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA
CLASSE DI ESIGENZA	FRUIBILITA' Insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività
CLASSI DI REQUISITI	DI ADATTABILITÀ DELLE FINITURE E DEGLI ORGANI MECCANICI Attitudine delle finiture e degli organi meccanici propri dell'edificio ad adattarsi alla loro destinazione d'uso
REQUISITO	ADATTABILITÀ (TECNOLOGICA E MORFOLOGICA) ¹ Attitudine di conformarsi secondo diverse forme e geometrie mediante differenti modalità costruttive ¹ (nuova definizione proposta)
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile è caratterizzata da alta adattabilità, in quanto è in grado di conformarsi secondo diverse forme e geometrie e di modificare il proprio aspetto in relazione alle esigenze funzionali degli spazi confinati da essa, grazie alla natura plastica del materiale tessile e alla sua leggerezza, che garantisce parti trasformabili secondo una sequenza di movimento reversibile e ripetibile
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 1.b	INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA
CLASSE DI ESIGENZA	FRUIBILITA' Insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività
CLASSI DI REQUISITI	DI ADATTABILITÀ DELLE FINITURE E DEGLI ORGANI MECCANICI Attitudine delle finiture e degli organi meccanici propri dell'edificio ad adattarsi alla loro destinazione d'uso
REQUISITO	STABILITÀ MORFOLOGICO-DIMENSIONALE ² Attitudine di un elemento tecnico di mantenere variabile entro un range di valori la sua forma nel tempo e di regolare gli stati di sforzo tensionale ² (nuova definizione proposta)
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile presenta una resistenza meccanica determinata dalla configurazione geometrica e tensionale, pertanto la stabilità è legata al grado di regolabilità delle tensioni che "governano" l'assetto formale delle strutture. In genere, lungo il bordo perimetrale della membrana vengono inseriti elementi di rinforzo che contribuiscono ad assestare la forma degli orli dei teli e a costituire punti per l'ancoraggio ai supporti. La tela si deforma sottoposta a trazione, sia per il "cambiamento di curvatura" sia per la deformabilità delle fibre precedente alla tensione di rottura. Questa deformazione è importante nel funzionamento strutturale

	dell'insieme e obbliga a una revisione periodica dello stato tensionale della membrana. I tessuti di poliestere hanno bisogno di una "post-tensione" prima dei 6 mesi dal montaggio, mentre quelli in fibra di vetro si revisionano una volta l'anno, dato che hanno una minore deformazione. Il controllo dei livelli di tensionamento può essere effettuato con ispezioni manuali, o misurando la tensione con tensiometri, celle di carico, perizie geometriche. In relazione alla strategia di manutenzione si determina il valore-soglia per cui attivare il ritensionamento
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 1.c	INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA
CLASSE DI ESIGENZA	FRUIBILITA' Insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività
CLASSI DI REQUISITI	DI INTEGRABILITÀ DEGLI ELEMENTI TECNICI Adeguamento delle unità tecnologiche nonché degli elementi tecnici ad una funzionale integrazione
REQUISITO	FLESSIBILITÀ TECNOLOGICA (DI PRODUZIONE E DI IMPIEGO) DEI SISTEMI STRUTTURALI ³ Attitudine all'impiego dei sistemi di assemblaggio a secco e versatilità dei sistemi di fissaggio, con possibilità di variazione delle dimensioni e delle forme, delle possibilità di integrazione nella costruzione e delle prestazioni ³ (nuova definizione proposta)
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile consente una produzione diversificata delle sue componenti, di tipo industriale, di piccola impresa o artigianale, e richiede manodopera a bassa specializzazione, se realizzata con sistemi di pannelli, mentre se realizzata come unica superficie la manodopera deve essere altamente specializzata. Una prestazione importante è legata alle dimensioni fisiche. Infatti, una volta ingegnerizzato il dettaglio, l'involucro realizzato con membrane flessibili può avere qualsiasi dimensione, in quanto non presenta nessun problema di ordine costruttivo né strutturale. La flessibilità costruttiva dei componenti dipende dalle caratteristiche di assemblaggio a secco e dei sistemi di fissaggio. Le membrane si possono fissare direttamente per punti al supporto strutturale o mediante strutture di aggancio, o combinando le due tecniche. I componenti a catalogo, variabili per dimensioni, forme e possibilità di integrazione, permettono un'ampia flessibilità prestazionale
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 1.d	INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA
------------	----------------------------------

CLASSE DI ESIGENZA	FRUIBILITA' Insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività
CLASSI DI REQUISITI	DI INTEGRABILITÀ DEGLI ELEMENTI TECNICI Adeguamento delle unità tecnologiche nonché degli elementi tecnici ad una funzionale integrazione
REQUISITO	INTEGRAZIONE Attitudine alla connessione senza adattamenti
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile è costituita da materiali e componenti che garantiscono la facile integrazione con altre tecnologie costruttive. Infatti, le membrane sono facilmente integrabili con strutture realizzate in acciaio, legno, cemento armato o materiali compositi, ed in base alla tecnologia con la quale sono integrate, variano i sistemi di ancoraggio e assemblaggio delle membrane tra di loro, con le strutture di supporto, o tra i diversi prodotti componenti la facciata, come pannelli (o parti di chiusure) opachi, traslucidi o trasparenti
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 8290-2:1983

1.3 Realizzazione e Utilizzazione: l'impiego delle chiusure a membrana pretesa nelle fasi di costruzione, gestione e dismissione del processo edilizio

I sistemi chiusi a membrana pretesa, applicabili nell'involucro edilizio, sono caratterizzati da una serie di prerogative particolarmente attente alla fase di gestione e dismissione del manufatto edilizio. Infatti, tali sistemi tecnologici prevedono la possibilità di programmare la durata dei componenti, di scegliere tecniche di assemblaggio reversibili in funzione del periodo di vita dei prodotti e componenti utilizzati, di costituirsi di parti facilmente sostituibili, smontabili ed intercambiabili per facilitare la manutenzione o la dismissione, infine di integrarsi con pannelli opachi semiopachi o trasparenti, in funzione delle variabili modalità di fruizione dello spazio. Inoltre, la variazione delle relazioni tra le parti della facciata consente di modificare la funzione del componente nel tempo; oltre a ciò, le facciate tessili sono sempre più spesso costituite da componenti per cui il recupero differenziato permette la riutilizzazione o il riciclo della materia di base, possibile solo se l'edificio è formato da un insieme di componenti disassemblabili, come in una costruzione meccanica. Di conseguenza, altre peculiarità delle facciate tessili sono date dalla *combinabilità*

dei sub componenti della facciata, che misura, insieme ad altri parametri già discussi, il grado di flessibilità prestazionale del sistema, e l' *accostabilità* di prodotti e componenti, che misura il grado di integrazione della facciata con strutture di diverse tecnologie, in legno, acciaio, cemento armato, con componenti prefabbricati o realizzati in opera.

La *realizzabilità* dei sistemi a membrana per l'involucro tessile è principalmente basata sulle modalità di *giunzione* tra componenti. Le giunzioni hanno il compito di assicurare la continuità delle caratteristiche meccaniche fisiche e chimiche proprie dell'involucro. I giunti vengono realizzati con tecniche diverse a seconda del materiale usato per l'involucro e del livello di sforzo che i componenti di facciata sono in grado di sopportare. In particolare, le giunzioni si suddividono in permanenti e temporanee. Le *cuciture*, i *collanti* e le *saldature* ad alta frequenza sono giunzioni permanenti, mentre le *cerniere lampo* sono giunzioni temporanee.

La cucitura è il sistema più antico ma presenta delle limitazioni, sia per i livelli di sforzo che la facciata così confezionata può sopportare, sia perché questa tecnica di assemblaggio provoca la perforazione del tessuto permettendo infiltrazioni e disomogeneità locale nelle caratteristiche di resistenza ad azioni esterne. Allo stesso tempo però la cucitura è una tecnica la cui qualità è controllabile visivamente dall'utente ed è spesso impiegata in strutture di ridotte dimensioni. Nei casi in cui i tessuti da unire sono sottoposti ad alti carichi di esercizio, è utile impiegare un filo di ptf, resistente ai raggi UV e alla fiamma, in grado di conferire maggiore resistenza meccanica alla membrana. Inoltre, è importante sottolineare che il processo di cucitura è molto costoso, poiché richiede una manodopera esperta che impiega macchine da cucire industriali complesse. I parametri che influenzano la resistenza delle giunzioni cucite sono il numero di punti di cucitura per centimetro, la tensione del filo e il tipo di punto (a zig zag o diritto).

I tessuti spalmati con rivestimenti protettivi in materiali termoplastici, come PVC o PTFE, possono essere saldati, presentando numerosi vantaggi in termini di impermeabilità, motivo per cui la saldatura è diventata il metodo più diffuso di giunzione nella costruzione di tensostrutture a membrana. I principali tipi di saldatura sono ad aria calda, ad alta frequenza (HF) e a cuneo caldo, e sono effettuati sullo strato di rivestimento del tessuto, non sulla fibra del materiale di base,

infatti il livello di adesione tra i due elementi è fondamentale per definire la resistenza della saldatura. In questo caso il tipo di connessione non è meccanico ma chimico, ed è considerato più resistente a sollecitazioni meccaniche. La giunzione saldata più comune prevede l'accostamento di due ferze di tessuto e la sovrapposizione di una striscia di tessuto per il collegamento lineare della membrana. E' da sottolineare, però, che tale tipo di giunzione prevede consumi energetici elevati, per cui sarebbe da evitare nei casi in cui può impiegarsi un'alternativa soddisfacente.

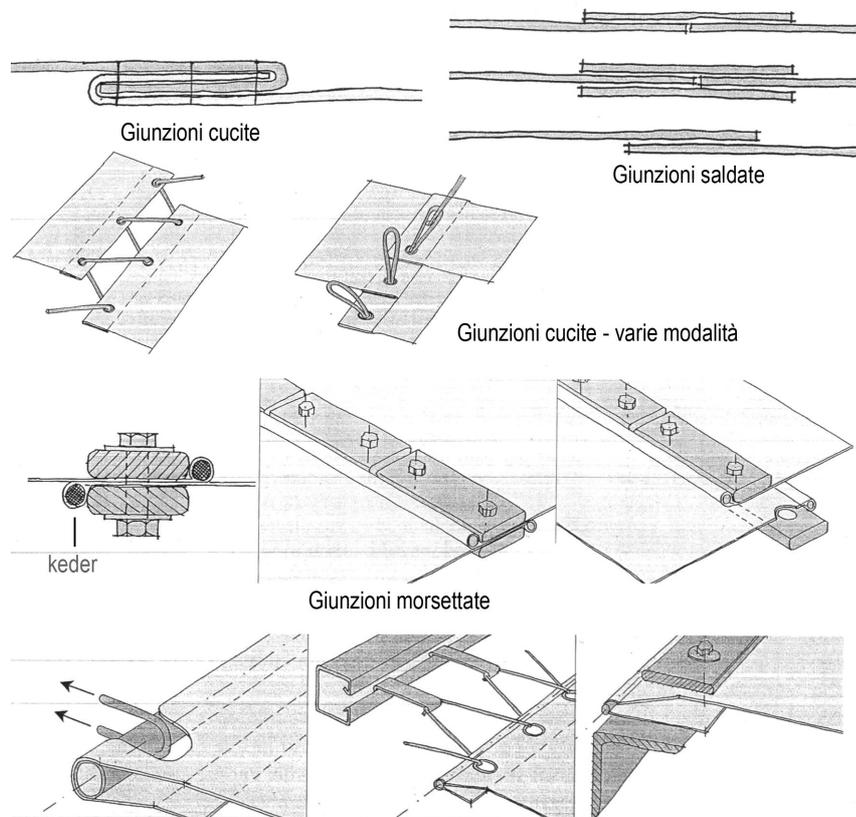
Le giunzioni, poi, possono anche essere miste, saldate e cucite, per ottenere un maggior livello di sicurezza e resistenza meccanica.

Tessuti rivestiti da materiali non termoplastici, come il silicone, non possono essere saldati ma devono essere incollati. Recentemente è stato sviluppato uno speciale nastro biadesivo che, una volta applicato, viene attivato per mezzo del calore (circa 200 °C) e della pressione. Inoltre l'incollaggio è utilizzato anche per riparare, tramite toppe in tessuto, le membrane in poliestere/PVC nei punti in cui è danneggiata.

Infine vi sono le connessioni meccaniche tra pezzi di tessuto strutturale, che avvengono con ausilio di corde, incastri, ganci, occhielli, morsetti, applicati per effettuare l'unione di due o più ferze di membrana in cantieri in cui la cucitura o la saldatura non possono essere controllate. Un fattore importante per la rifinitura del collegamento è la realizzazione di una protezione sul bordo poiché, una volta tagliate, le ferze presentano la fibra di base a contatto con l'ambiente, provocando un alto rischio di degrado del materiale, che viene risolto con il taglio a caldo, che contemporaneamente taglia il tessuto e riscalda lo strato di rivestimento chiudendo l'apertura.

I *bordi* delle strutture a membrana, che si caratterizzano per la loro possibilità di assumere forme curve resistenti, possono essere flessibili o rigidi, ovvero curvi (quando vi è il pretensionamento della membrana con una sollecitazione di trazione sui singoli elementi di bordo) e chiusi (quando vi è una struttura di supporto continua con rigidità laterale più elevata di quella della membrana). Nel caso degli involucri chiusi, le membrane sono realizzate con bordi rigidi che possono essere costituiti da tubi inseriti in tasche di tessuto o profilati a C legati al bordo della membrana fornito di occhielli, o ancora da giunti morsettati con uno strato di tessuto dotato di keder

(cordone di imbullonatura) e una delle superfici metalliche a contatto con il bordo realizzata con profilo metallico continuo e rigido.



Bordi rigidi: tubo in tasca di tessuto, legatura tra profilato a C e membrana con occhielli, piastra morsettata
 Figura 20. Tipologie di giunzione per tensostrutture a membrana. (Fonte: Forster B. et al., *Progettare con le membrane*, Maggioli, Rimini, 2007, p. 154)

Il *processo costruttivo* delle strutture a membrana è sostanzialmente un processo di montaggio di elementi prodotti in fabbrica, ma pur essendo un sistema prefabbricato industrializzato si differenzia da quelli delle strutture convenzionali in quanto l'intero involucro non costituisce un assemblaggio di componenti ripetitivi e modulari, ma di svariati elementi dalle molteplici forme, pesi ed articolazioni: il telo, le funi, i supporti e le carpenterie di attacco (laddove necessari). Nello specifico, per i "sistemi a geometria chiusa", con membrane ancorate in forma continua/lineare alle strutture di supporto, prevalentemente autoportanti, vi sono griglie reticolari in acciaio o telai in c.a. o legno che fungono da supporto.

L'*organizzazione di cantiere* e il *montaggio* non impongono opere provvisorie impegnative o laboriose come per le strutture convenzionali, essendo in presenza di un organismo edilizio percorso da prevalenti sollecitazioni di trazione, ma richiede un

certa precisione nella produzione degli elementi e nel montaggio. Il sollevamento della membrana e dei supporti per il tiro, la messa in tensione e quindi l'aggiustaggio sono operazioni delicate che sollecitano attenzione nello stabilire l'entità e il criterio dei tiri. Se l'involucro tessile è realizzabile in un unico pezzo o a moduli aggregabili, le operazioni di cantiere e di montaggio risulteranno di volta in volta più agevoli e veloci. Il cantiere si configura come luogo di sperimentazione tecnica e costruttiva, rappresentando una componente fondamentale del processo di definizione delle modalità esecutive e realizzative di una struttura tessile. Imprescindibile è la relazione che nel processo di realizzazione di una struttura a membrana si instaura tra progetto e cantiere: molti progetti sono stati concepiti o addirittura modificati in funzione del montaggio, che diventa necessario progettare. Il momento ideativo e quello attuativo devono trovare soddisfacenti livelli di comunicazione: il progetto deve essere pensato come azione costruttiva e il cantiere come il luogo in cui si sperimenta la coerenza tecnica del progetto.

Semplicità e rapidità di montaggio sono aspetti rilevanti nella realizzazione di organismi tessili, traducibili in una serie di scelte tecniche:

- preferenza di materiali resistenti e leggeri, facilmente immagazzinabili senza rischi di danneggiamenti;
- ripartizione delle tensioni attraverso l'individuazione di un numero di punti di ancoraggio sufficienti ad assicurare la distribuzione del carico, garantendo in tal modo la maneggevolezza e la facilità di installazione senza l'uso di macchinari complessi;
- uso di supporti interni per facilitare le operazioni di montaggio.

Inoltre, i componenti tessili richiedono manodopera a bassa specializzazione, se si impiegano sistemi costituiti da pannelli. Nei casi in cui la facciata tessile è invece realizzata come unica superficie avvolgente, la manodopera deve essere altamente specializzata, poiché esiste un problema di conoscenza tecnica non ancora completamente superato, pertanto un più diffuso impiego dei componenti tessili potrebbe potenziare lo sviluppo di un settore già dotato di un notevole apparato produttivo, offrendo la possibilità alle aziende impegnate nella produzione di tali manufatti di estendere il proprio ambito produttivo.

Molti sono i fattori che caratterizzano le operazioni di montaggio, influenzando modalità, tempi, costi e complessità della fase costruttiva. Un aspetto molto importante è rappresentato dalle *caratteristiche fisiche del luogo*, in particolare del fondo dell'area di cantiere. I mezzi di sollevamento di tipo tradizionale richiedono infatti condizioni di fondo ottimali, in caso di fondi non livellati è necessario ricorrere ad esempio a macchine speciali leggere come i ragni, che si muovono su cingoli in gomma e che presentano degli stabilizzatori di autolivellamento, raggiungendo altezze fino ai 20 metri.

Il *tipo di materiale* è un altro parametro che influenza le operazioni di montaggio. Alcuni materiali particolarmente delicati, come ad esempio la fibra di vetro, richiedono particolare attenzione nelle operazioni di svolgimento e di innalzamento del telo per non danneggiare la fragile struttura della membrana.

Altro problema per la messa in opera è rappresentato dalle *condizioni climatiche*, in particolare dalla presenza del vento, sia per l'efficacia del montaggio che per questioni di sicurezza. La *rapidità del montaggio* assume dunque un carattere di priorità anche al fine di anticipare l'insorgere di condizioni ambientali impreviste, e ciò comporta un'opportuna organizzazione di cantiere per evitare che la celerità giochi a sfavore della correttezza dell'intervento. L'organizzazione tecnico-logistica e l'adeguato impianto del cantiere prevedono l'opportuna disposizione degli spazi per le lavorazioni, l'accessibilità, il transito e la manovra dei mezzi di sollevamento.

Lo *svolgimento del telo* è una fase particolarmente delicata, che richiede attenzione ai dettagli. Il telo è steso su uno strato protettivo per evitare lacerazioni dovute alla presenza di asperità sul fondo, utilizzando allo scopo membrane dismesse, moquettes, teli di nylon. Un importante riferimento in questa fase del montaggio è rappresentato dal disegno di svolgimento, un grafico, posto sull'imballaggio del telo, che riproduce l'area di cantiere e individua al suo interno l'esatta posizione in cui deve essere scaricata la balla. In esso vengono inoltre suggerite la direzione e la successione delle operazioni di svolgimento della membrana.

La giunzione dei teli, l'inserimento del cavo di bordo, l'assemblaggio delle piastre di bordo, il sollevamento della membrana, costituiscono la sequenza delle principali *operazioni di montaggio*, che si conclude con il rilevamento delle tensioni, attraverso

l'uso di martinetti idraulici collegati ad una centralina oleodinamica in corrispondenza delle funi e degli ancoraggi, ricavando per deduzione il valore della tensione sul telo.

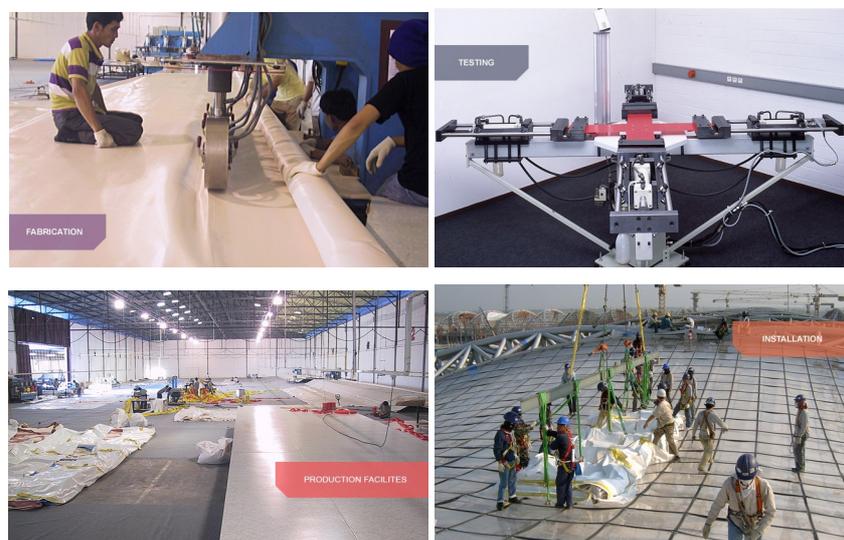


Figura 21. Fasi del processo costruttivo di una struttura a membrana.

1.3.1 La leggerezza strutturale delle membrane tessili e i requisiti tecnologici connessi

“La *leggerezza* in architettura va intesa come approccio progettuale volto a trasformare le risorse materiali e immateriali, finalizzato alla ricerca e alla costruzione di spazi e di modalità dell’abitare innovativi e sostenibili [...] s’intende riferirsi ad una attenzione progettuale verso la compatibilità ambientale, la costruzione programmata, l’adattabilità ai luoghi, la reversibilità e la riduzione del materiale, cioè verso i tre aforismi dell’architettura moderna e contemporanea: *Less is more/ Biology and building/ More with less*³².”

Un ulteriore aspetto legato alla leggerezza delle strutture tessili viene acquisito in funzione della luce. Come osserva Nicholas Goldsmith, il termine leggerezza che si associa all’architettura tessile, in inglese, oltre a riferirsi alla mancanza di peso, significa anche luminosità. L’involucro edilizio delle tensostrutture a membrana, infatti, caratterizzato da un alto coefficiente di trasmittanza, è in grado

³² Capasso, Aldo, “Da less is more a more with less. Dalla leggerezza alla sostenibilità in architettura”, in: Losasso, Mario, (a cura di), *Progetto e innovazione, CLEAN*, Napoli, 2005, p. 67.

di offrire effetti spaziali, formali e luminosi sfumati e morbidi, in cui i contrasti si dissolvono a favore di una omogenea luminosità, che inonda l'interno dell'edificio filtrando attraverso la membrana dell'involucro ed enfatizzando ulteriormente la leggerezza dell'opera.

La leggerezza, scrive Majowiecki, scaturisce dalla naturale associazione di materiali ad alta resistenza ed il meccanismo resistente delle tipologie tensostrutturali. Ciò consente di minimizzare i pesi propri, cento volte minori di una struttura di cemento armato e dieci volte minori di una struttura in acciaio³³.

La leggerezza strutturale dei componenti tessili influisce anche sul processo costruttivo delle tensostrutture a membrana, che è sostanzialmente un processo di montaggio a secco di elementi prodotti in fabbrica, risultato di un assemblaggio di svariati componenti, semicomponenti e dispositivi dalle molteplici forme, pesi ed articolazioni: il telo, le funi, i tenditori, i supporti e le carpenterie di attacco. I "sistemi a geometria chiusa" sono realizzati con membrane ancorate in forma continua/lineare alle strutture di supporto, e sono prevalentemente autoportanti. Nel caso che le membrane s'integrino con altri sistemi costruttivi, i punti di connessione si traducono in ancoraggio, utilizzando opportuni dispositivi di attacco secondo il tipo di materiale che li riceve.

Le strutture a membrana richiedono una procedura costruttiva che consente una rapida messa in opera attraverso attrezzature semplici, quali gru, puntoni e carrucole ausiliari, oppure con mezzi meccanizzati a braccio semoventi più complessi e articolati, per strutture di dimensioni maggiori. Il sollevamento della membrana e dei supporti per il tiro e la messa in tensione della membrana stessa sono tutte operazioni delicate che richiedono attenzione nello stabilire l'entità e il criterio dei tiri (la pretensione non deve superare le tensioni ammissibili) e nello stesso tempo nella definizione delle aree di movimentazione delle attrezzature di cantiere.

Le tensostrutture a membrana sono sistemi costruttivi versatili che consentono di realizzare opere di diverse dimensioni con *rapidità* e *facilità di montaggio* e con un'attrezzatura di cantiere minima, determinando una riduzione di tempi e di costi. Particolarmente adatte nelle zone sismiche, le tensostrutture hanno

³³ Cfr. Capasso, Aldo, "Light of lightness. Lightness to light", in Atti del Tensinet Symposium, *Ephemeral Architecture. Time and textiles*, CLUP, Milano, 2007, pp. 227-236.

pari affidabilità delle strutture in c.a. e in acciaio, ed hanno un buon comportamento in presenza di cedimenti differenziali dei sostegni; sono inoltre strutture *immagazzinabili* per la riducibilità degli elementi componenti, per cui il ridotto rapporto volume/peso della membrana consente un facile ed economico trasporto.

Come osserva Majowiecki, con le tensostrutture a membrana è possibile ottenere anche una limitazione sulle spese di trasporto, infatti le funi di acciaio e le membrane, non presentando discontinuità nel materiale e grazie alle loro caratteristiche di flessibilità, possono essere avvolte in rulli per una lunghezza fino a 200 m, inoltre è possibile trasportare, grazie al loro peso non eccessivo, con un solo autocarro il materiale occorrente per 2.500 mq di copertura³⁴. Prima dell'imballaggio per il trasporto in cantiere, dovrebbero essere controllati alcuni aspetti sul confezionamento della membrana, per garantire la qualità del prodotto e facilitare l'ispezione finale di controllo, ovvero: le dimensioni minime dei pannelli, la lunghezza delle giunzioni e dei bordi, l'ingombro di trasporto. Infatti, poiché il materiale tessile tende a dilatarsi e restringersi, occorre considerare alcune tolleranze sulla superficie dei lembi saldati (0,5 – 1% della lunghezza totale), sui lembi bloccati (0,25 – 0,5 %) e sulle tasche passacavo (0,5%)³⁵. Altri accorgimenti riguardano lo sfregamento durante il trasporto, che può essere evitato con un rivestimento protettivo (in genere in poliestere/PVC) per ogni componente preassemblato, imballato con un marchio distintivo per facilitare l'identificazione dei componenti in cantiere, mentre per il disimballaggio è previsto un telo protettivo posato a terra, su cui va appoggiata la membrana da dispiegare secondo le indicazioni.

Per quanto riguarda l'organizzazione del *cantiere*, i nodi problematici della movimentazione, dell'impiego di strutture provvisorie, di strumenti e procedure di montaggio / assemblaggio, sono decisamente semplificati nel caso di impiego di tecnologie tessili. Il cantiere si presenta, infatti, privo di lavorazioni ad umido, con la conseguente possibilità di lavorare contestualmente varie fasi di lavorazioni differenti, riduce le attrezzature di cantiere nonché i *tempi di lavorazione* e di montaggio rispetto alle tecniche convenzionali, ecco perché si può definire cantiere

³⁴ Cfr. Majowiecki, Massimo, *Tensostrutture: progetto e verifica*, CISIA, Milano, 1985, p. 10.

³⁵ Cfr. Forster, B., Mollaert, M., Zanelli, A., *Progettare con le membrane*, Maggioli, Rimini, 2007, p. 263.

“leggero”. Nel campo dell’applicazione degli involucri tessili le implicazioni cantieristiche possono entrare in gioco come uno dei parametri di scelta della tecnologia, poiché intervengono considerazioni di tipo logistico, organizzativo e tecnico, che possono rivelarsi particolarmente vantaggiose. L’allestimento di cantieri sani e puliti presuppone un limitato ingombro nello stoccaggio dei materiali e della loro movimentazione, modalità di assemblaggio per connessione meccanica o per incollaggio, drastica riduzione delle attrezzature, spesso infatti non sono necessarie grandi impalcature, facile *immagazzinabilità* dei prodotti e componenti ed infine un rapido *smontaggio / disassemblaggio* del manufatto, nella fase di dismissione.

Un’ ultima considerazione è relativa all’impresa di costruzione che, per le tensostrutture a membrana, può essere organizzata in modo diverso rispetto alle aziende tradizionali. Le imprese che realizzano queste tipologie costruttive sono strutturate secondo vari modelli organizzativi, da quelle che prevedono la costruzione completa dell’opera, compresa la progettazione (*impresa a ciclo completo*), a quelle che comprendono solo la realizzazione, servendosi di varie ditte che costruiscono e assemblano le parti e i componenti della tensostruttura (*impresa di coordinamento*), alle aziende specializzate che si occupano del confezionamento ma anche delle carpenterie di attacco, delle opere murarie e di supporto e delle modalità di montaggio³⁶.

Da quanto fin qui esposto scaturisce un’osservazione sul concetto di *cantierabilità*, intesa come “attitudine del progetto esecutivo ad identificare per forma, dimensione, caratteristiche tecniche ed economiche, ogni elemento dell’edificio, nonché a precisare le modalità operative in fase di costruzione”³⁷. Tale concetto, in effetti, potrebbe essere assunto come nuovo requisito tecnologico relativo alla fase costruttiva del processo edilizio, includendo tutte le problematiche fin qui sviscerate sulle questioni cantieristiche, dal confezionamento del prodotto al suo imballaggio, trasporto, disimballaggio e montaggio in loco; l’obiettivo

³⁶ Cfr. Capasso, Aldo, (a cura di), *Le tensostrutture a membrana per l’architettura*, Maggioli, Rimini, 1993 p.43.

³⁷ Cfr. Scalse Daniela, “Qualità totale. La ricerca di una metodologia di valutazione nell’intervento di riqualificazione dell’ex monastero di Salemme a Sanza (SA)”, Tesi di laurea in Cultura Tecnologica della Progettazione, a.a. 2008/2009, relatore: Falotico Antonella.

strettamente connesso a tale questione è relativo alla congruenza tra progetto esecutivo e costruzione, attraverso una serie di azioni necessarie per la corretta messa in opera di un manufatto edilizio, riferite alle parti del sistema tecnologico classificate come Classi di Unità Tecnologica (strutture, chiusure, partizioni, impianti)³⁸. La verifica della corrispondenza di tali azioni alle indicazioni di progetto risulta utile alla valutazione successiva, sulla base di indicatori qualitativi, della realizzazione finale.

Tali osservazioni saranno utili alla costruzione del Quadro di confronto delle alternative tecniche, risultato finale della presente ricerca.

³⁸ Cfr. Norma UNI 8290:1981

1.3.2 Il ciclo di vita di prodotti e componenti tessili

L'allungamento del ciclo di vita dei prodotti rappresenta uno dei più importanti concetti fondanti della progettazione sostenibile delle membrane, basandosi sulla riduzione degli impatti sia sull'ambiente che sulle collettività. La richiesta di diminuzione dell'intensità di materiali e di energia nei processi di produzione e consumo dovrebbe, infatti, promuovere la capacità di soddisfare la domanda sociale di benessere. La valutazione del ciclo di vita (LCA - Life Cycle Assessment), valutazione dell'impatto ambientale di un prodotto nella sua durata di vita, ha come obiettivo quello di confrontare le prestazioni ambientali dei prodotti per essere in grado di scegliere quelli meno gravosi sull'ambiente. Per "ciclo di vita" si intende tutto il processo che va dalla produzione alla fabbricazione, distribuzione, utilizzo ed eliminazione di un prodotto, il quale necessita di una valutazione ambientale. Le norme che regolano questi aspetti sono la UNI EN ISO 14040:2006 *"Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento"*, che fornisce in un quadro generale le pratiche, le applicazioni e le limitazioni dell' LCA, e la UNI EN ISO 14044:2006 *"Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida"*, elaborata per la preparazione, la gestione e la revisione critica del ciclo di vita.

Nel caso specifico dei sistemi a membrana pretesa, quando si affronta la questione relativa all'energia incorporata di un materiale, vale a dire la totale energia utilizzata per la fabbricazione, il trasporto, la manutenzione e l'eliminazione di un prodotto, due sono i metodi di analisi più utilizzati. Il primo si basa su analisi input-output legate a dati economici nazionali, mentre il secondo risale fino all'estrazione delle materie prime impiegate nella fabbricazione di un prodotto. Attualmente, sono disponibili dati specifici relativi ad alcune materie plastiche, tuttavia essi non consentono di condurre un discorso esaustivo da allargare alle membrane tessili. Relativamente agli scenari di fine vita dei tessili tecnici impiegabili nel settore edilizio, si devono in primo luogo distinguere i prodotti multi-componente da quelli mono-componente. Appartengono alla prima categoria i tessili composti da una membrana costituita dall'accoppiamento tra tessuto e rivestimento, ad esempio il poliestere/pvc, il vetro/ptfe, il vetro/silicone. La separazione a fine vita dei loro diversi strati è un pro-

cesso attualmente possibile, che rende attuabile il riciclo delle materie prime. I prodotti mono-componente, realizzati a partire da una sola componente di sintesi chimica, sono per loro natura riciclabili al 100%. Appartengono a tale categoria il tessuto rivestito di PTFE espanso, il cui processo di lavorazione è tuttora noto solo al detentore del brevetto (Tenara-Gore), e il film di ETFE, ottenuto per estrusione dei granuli del polimero.

Il processo di riciclo dei materiali sta assumendo un ruolo sempre più importante, in quanto oggi appare oltremodo preoccupante il problema della collocazione delle macerie derivanti dalla demolizione di opere civili, in continuo aumento a seguito di interventi di recupero del patrimonio edilizio esistente e dell'adeguamento a nuove esigenze abitative. A ciò si contrappone il progressivo esaurimento delle aree disponibili per l'ubicazione di discariche, che rende lo smaltimento di tali materiali di scarto sempre più difficoltoso e oneroso. L'affermazione del concetto di sviluppo sostenibile nei riguardi di tutti i processi produttivi di beni, che devono essere necessariamente strutturati secondo una logica di risparmio energetico e di controllo della produzione di scorie e rifiuti, prevede un loro riutilizzo in altri settori o un loro smaltimento senza provocare danni all'ambiente. Le costruzioni con involucro in membrana tessile presentano un volume di rifiuti assai trascurabile se confrontato con quello degli edifici convenzionali; tuttavia è fondamentale investire anche sui processi di riciclo dei tessili tecnici, come già iniziato nel 1998, quando Solvay ha brevettato un processo che permette il riciclaggio separato della resina di pvc e delle fibre di poliestere, attraverso la dissolvenza chimica selettiva, e che, insieme all'azienda francese Ferrari, ha reso possibile il riciclo delle membrane in poliestere spalmato in pvc. L'iniziativa è denominata Taxyloop, tecnologia basata sul processo Vinyloop, che si svolge in sei fasi: pretrattamento, dissoluzione, separazione, precipitazione, essiccazione, recupero del solvente. L'intero processo si compie in un ciclo completamente chiuso e ciascuno dei due componenti del tessuto può essere riutilizzato una volta separato e re-immesso nella catena produttiva.

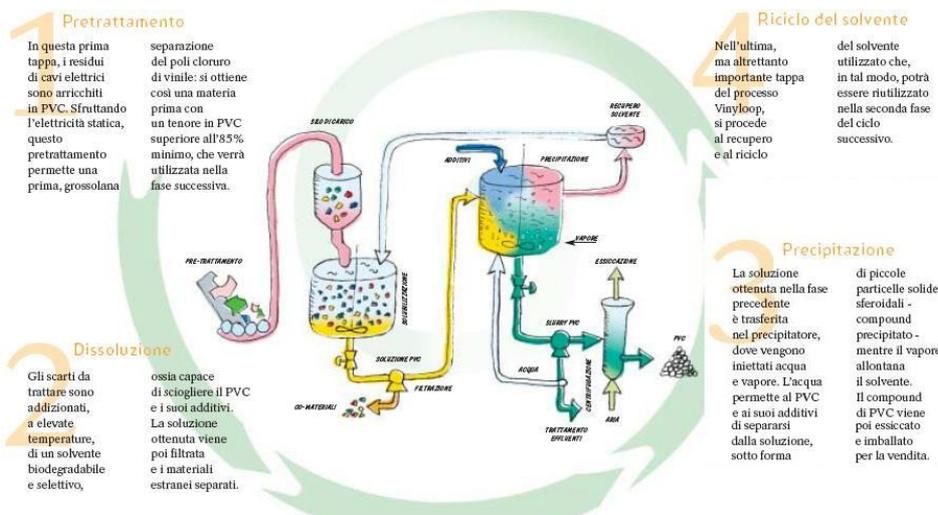


Figura 22. Schema di funzionamento del sistema di riciclo della membrana in poliestere/PVC.
 (Fonte: *Il giornale di Solvay Italia*, anno XXVI, n. 1, aprile 2002)

Accanto al riciclo di tipo meccanico, che permette di avere a disposizione materia prima seconda, si colloca il riuso, o reimpiego delle membrane tessili dismesse. Infatti, una volta terminata la fase di vita utile nel manufatto, dopo un semplice processo di pulizia, le membrane possono essere utilizzate nuovamente, in contesti o tipologie funzionali diverse, senza che i materiali di cui sono composte subiscano trasformazioni.

Le ultime considerazioni fanno riferimento ad ulteriori requisiti di progetto, come si spiegherà più avanti, relativi alle fasi di gestione e dismissione del manufatto edilizio, che mettono in evidenza alcuni dei punti di forza intravisti nella tecnologia tessile rispetto ad altre tecnologie più "tradizionali".

1.3.3 Manutenibilità e modalità di dismissione delle facciate tessili

In linea con le suddette considerazioni, i requisiti connessi alle fasi di costruzione ed esercizio del processo edilizio chiamano in causa aspetti relativi alla manutenzione e dismissione dei manufatti tessili. La manutenibilità, insieme alle modalità di dismissione, dovrebbe rappresentare un requisito integrato all'intero processo progettuale.

Le membrane tessili hanno dimostrato in passato limiti nella *durabilità*, dovuti a un rapido insorgere di decadimenti fisici e prestazionali. Attualmente il mondo dell'industria e della ricerca sta lavorando in maniera efficace su tale aspetto,

in particolare attraverso l'utilizzo e la produzione di materiali e trattamenti più durevoli, grazie alle innovazioni tecnologiche che hanno riguardato i materiali di base e le loro modalità di protezione. La durabilità di questi materiali infatti è incrementata dal trattamento superficiale, che ha lo scopo di proteggere la spalmatura dai raggi UV, influisce sulla pulizia della membrana, allontana gli agenti atmosferici inquinanti ed ha la finalità di preservare il tessuto, senza l'ausilio di particolari attività di manutenzione. L'incremento di durabilità ha consentito, inoltre, anche la possibilità di impiegare le membrane non solo per manufatti temporanei, ma anche per strutture permanenti, grazie a migliorate prestazioni meccaniche, con molteplici occasioni di inserimento, in maniera integrata, in architetture realizzate con altre tecniche costruttive. Un ulteriore problema legato alla durabilità è rappresentato dai possibili atti di vandalismo cui può essere soggetta la membrana. Un comune utensile, infatti, può provocare gravi danni alla membrana e in alcuni casi solo un'opportuna sua collocazione, che la renda inaccessibile alla mano dell'uomo, può ridurre tale rischio; è da sottolineare comunque che eventuali danni non incidono sulla sicurezza della struttura, che prevede adeguati dispositivi d'integrazione e garanzia.

I fattori che influiscono sulla durabilità della membrana sono essenzialmente gli agenti esterni, quali l'umidità e la temperatura, che compromettono le caratteristiche meccaniche della tela, nonché le radiazioni ultraviolette, che possono danneggiare le fibre. Inoltre, la resistenza a trazione delle membrane tende a diminuire approssimativamente del 20% nei primi dieci anni, per poi mantenersi quasi costante. Altro fattore determinante sulla durabilità è il fenomeno di capillarità, evitabile sigillando con la stessa protezione impiegata per la membrana i bordi della tela una volta tagliata e cucita, verificandola con un'immersione di 24 ore in acqua colorata. Le membrane, infine, devono essere resistenti alla fiamma e al fuoco, secondo i tempi e le modalità prescritte dalla normativa.

Le opere di manutenzione per strutture a membrana non riguardano solo la durabilità del tessuto, bensì anche altri aspetti tecnici legati alla messa in opera della struttura; infatti è fondamentale per tale tipologia costruttiva il requisito della *stabilità dimensionale*. Come già detto, la tela si deforma in presenza di sforzi di trazione. Tale deformazione è importante nel funzionamento strutturale dell'insieme, poiché

permette alla membrana di assorbire parte della tensione alla quale è sottoposta. Bisogna perciò revisionare periodicamente lo stato tensionale della membrana. Il controllo dei livelli di tensionamento può essere effettuato con ispezioni manuali, sentendo la resistenza allo spostamento laterale dei tiranti, oppure misurando in loco la tensione con tensiometri, celle di carico, perizie geometriche. In relazione alla strategia di manutenzione, contenuta nel piano di manutenzione, si dovrebbe determinare il valore-soglia per il quale attivare il ritensionamento del telo.

Altro fattore importante per la durabilità delle membrane riguarda la *pulizia*, che dipende dalle condizioni climatiche del sito, dal tessuto e dalla forma della membrana, e deve avvenire periodicamente con acqua e sapone, spugne e spazzole morbide, evitando spazzole rigide, acqua ad alta pressione, solventi aggressivi, detersivi chimici, per scongiurare il danneggiamento della membrana.

Infine, è possibile prevedere la *riparazione* di membrane, sia mediante adesivi che saldatura in situ, quando i danni sono ridotti e di diametro inferiore ai 5 cm, avendo cura di realizzare i rappezzi con gli angoli arrotondati e che la zona di saldatura sia pulita e libera da polvere, grasso e olio. I confezionatori dovrebbero fornire al cliente una piccola quantità del materiale originario, come materiale da rappezzo eventuale, immagazzinato in luogo buio e asciutto.

Per le membrane è oggi possibile progettare durate appropriate in relazione all'uso, ottenendo alti gradi di affidabilità e livelli di manutenzione estremamente bassi, che prevedono ad esempio eventuali riparazioni, facilitate se localizzate. La progettazione appropriata consente un allungamento della vita del prodotto, connessa a quella del sistema edilizio in cui sono inserite le membrane: se progettati e costruiti ad hoc, infatti, si possono inserire elementi tessili in opere tecnologicamente ibridate, senza particolari difficoltà costruttive.

La tecnologia a secco propria delle membrane tessili favorisce anche il *disassemblaggio*, che porta di conseguenza la facilità di raccolta e trasporto del materiale dopo la dismissione dell'opera. Le strutture tessili, per le loro specifiche caratteristiche di leggerezza, disassemblabilità dei componenti, indifferenza al piano di appoggio, risolvono adeguatamente numerosi problemi di dismissione, in quanto si prestano ad essere ricollocate in altri luoghi o ad essere facilmente immagazzinate in attesa di riuso.

La concezione sostenibile del progetto di un manufatto tessile deve, tra l'altro, agevolare la *rimozione* delle membrane ma anche la *sostituzione*, la *modularità* e l'*intercambiabilità* delle parti delle membrane stesse, che oggi possono garantire il soddisfacimento di esigenze di salvaguardia ambientale, che chiamano in causa requisiti come la *reversibilità*, *riutilizzabilità* e *riciclabilità* di materiali, prodotti e componenti edilizi.

Per la sostituzione, se non sono più disponibili le dimensioni dei rotoli di membrana usati originariamente, devono essere realizzati nuovi modelli di taglio e potrebbe essere necessario trovare una nuova forma della membrana, a partire dalle misurazioni della struttura di supporto esistente. Inoltre, prima di sostituire il tessuto bisogna controllare che gli altri componenti siano riutilizzabili o meno.

Infine, il fenomeno della "smaterializzazione" della costruzione risolve, in parte, un problema a cui i progettisti dovranno dedicare molta attenzione: l'eventuale *smaltimento* dei rifiuti delle costruzioni obsolete o il *riciclaggio* dei materiali impiegati. Tutta la cultura contemporanea è segnata dalla scoperta della limitatezza delle risorse e dal tentativo di trovare soluzioni possibili per garantire la qualità della vita ad una quantità sempre maggiore di individui, evitando lo spreco e la distruzione di un patrimonio ambientale non più rinnovabile.

Un'ultima considerazione, legata alle modalità di reimpiego degli organismi tessili, riguarda l'*adeguamento funzionale* delle strutture tessili. Infatti, la natura stessa dei manufatti tessili presuppone la mutevolezza funzionale, per cui l'adeguamento dei componenti ad altra funzione non altera la validità dell'atto progettuale, perché appartiene alla consapevolezza di una scelta di principio, legata all'alta flessibilità di queste tipologie strutturali. In altri termini, l'archetipo strutturale delle tensostrutture e la sua atipicità architettonica possono consentire al progettista sia di dare significato al suo gesto progettuale sia di sublimare la sua funzione.

Di seguito si riportano le schede di lettura esigenziale-prestazionale relative alla realizzazione e utilizzazione:

Scheda 1.e	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSI DI REQUISITI	<p>CANTIERABILITA' Attitudine del progetto esecutivo ad identificare per forma, dimensione, caratteristiche tecniche ed economiche, ogni elemento dell'edificio, nonché a precisare le modalità operative in fase di costruzione (Cfr. Scalese D., "Qualità totale", Tesi di laurea 2008/2009, relatore: Falotico A.)</p>
REQUISITO	<p>LEGGEREZZA STRUTTURALE⁴ Associazione tra materiali con massa irrilevante e alta resistenza data dalla forma strutturale e trasmissione degli sforzi all'interno del sistema, prevalentemente in trazione ⁴(nuova definizione proposta)</p>
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	<p>La facciata tessile è costituita da materiali iper-leggeri ed al contempo resistenti, che consentono la riduzione di una serie di costi di costruzione (inerenti il trasporto, l'immagazzinamento, la manovra) e di gestione (quali la sostituzione, la sicurezza ecc ...). Inoltre i sistemi tessili permettono riduzione di materiale ed energia nella fase di produzione e messa in opera, e di rifiuti nella fase di dismissione finale</p>
RIFERIMENTI NORMATIVI	<p>Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981</p>

Scheda 1.f	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSI DI REQUISITI	<p>CANTIERABILITA' Attitudine del progetto esecutivo ad identificare per forma, dimensione, caratteristiche tecniche ed economiche, ogni elemento dell'edificio, nonché a precisare le modalità operative in fase di costruzione (Cfr. Scalese D., "Qualità totale", Tesi di laurea 2008/2009, relatore: Falotico A.)</p>
REQUISITO	<p>TRASPORTABILITÀ Attitudine di prodotti e sistemi a essere trasportati in cantiere con ridotto impiego di risorse e di tempi</p>
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	<p>La facciata tessile si compone di elementi molto leggeri, in grado di garantire la facile trasportabilità in cantiere e il facile movimento e manovra in fase di lavorazione e produzione fino alla completa messa in opera del sistema</p>
RIFERIMENTI NORMATIVI	<p>Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981</p>

Scheda 1.g	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSI DI REQUISITI	<p>CANTIERABILITA' Attitudine del progetto esecutivo ad identificare per forma, dimensione, caratteristiche tecniche ed economiche, ogni</p>

	<p>elemento dell'edificio, nonché a precisare le modalità operative in fase di costruzione (Cfr. Scalese D., "Qualità totale", Tesi di laurea 2008/2009, relatore: Falotico A.)</p>
REQUISITO	<p>FACILITÀ DI MONTAGGIO Attitudine a realizzare soluzioni tecniche caratterizzate da una esecuzione senza particolari difficoltà</p>
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	<p>La facciata tessile consente una facilità di montaggio, garantita dalla possibilità di integrare i prodotti tessili con altri sistemi tecnologici o di progettare nel dettaglio le connessioni tra gli elementi del sistema di chiusura. Semplicità e rapidità di montaggio si traducono in una serie di scelte:</p> <ul style="list-style-type: none"> .preferenza di materiali resistenti leggeri e immagazzinabili .ripartizione delle tensioni attraverso un numero di punti di ancoraggio sufficienti ad assicurare la distribuzione del carico, garantendo facilità di installazione e maneggevolezza, .altezze contenute per evitare l'uso di mezzi speciali .impiego di supporti interni che evitano impalcature e attrezzature speciali
RIFERIMENTI NORMATIVI	<p>Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981</p>

Scheda 1.h	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSI DI REQUISITI	<p>CANTIERABILITÀ' Attitudine del progetto esecutivo ad identificare per forma, dimensione, caratteristiche tecniche ed economiche, ogni elemento dell'edificio, nonché a precisare le modalità operative in fase di costruzione (Cfr. Scalese D., "Qualità totale", Tesi di laurea 2008/2009, relatore: Falotico A.)</p>
REQUISITO	<p>RAPIDITÀ' DI MESSA IN OPERA Attitudine a realizzare soluzioni tecniche in tempi brevi</p>
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	<p>La facciata tessile permette di avere tempi complessivi di realizzazione significativamente brevi, grazie alla possibilità di effettuare operazioni di esecuzione sequenziali, pianificabili e senza particolari tempi morti, in quanto non necessita di speciali macchinari, grazie al peso esiguo dei materiali e alla bassa complessità dei componenti</p>
RIFERIMENTI NORMATIVI	<p>Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981</p>

Scheda 1.i	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	<p>GESTIONE Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio</p>

CLASSI DI REQUISITI	DI MANUTENIBILITA' Attitudine del sistema edilizio a mantenere in condizioni di integrità le capacità di fornire prestazioni di tutti i suoi elementi tecnici durante tutto il periodo di vita programmata
REQUISITO	FACILITÀ DI INTERVENTO Possibilità di operare ispezioni, manutenzione e ripristini in modo agevole
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile, quando è costituita da pannelli in tessuto, è facilmente ispezionabile e manutenibile, grazie alla facilità di smontaggio e rimontaggio dei pannelli, mentre più problematico risulta l'intervento su facciate costituite da un involucro avvolgente, realizzato da una membrana unica che dovrebbe essere rimossa totalmente laddove non siano possibili interventi di riparazione localizzata, per poi reintegrarla nella costruzione
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 8290-2:1983

Scheda 1.l	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	GESTIONE Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio
CLASSI DI REQUISITI	DI ECONOMIA Attitudine del sistema edilizio a fornire prestazioni di benessere con il minor consumo possibile di energia
REQUISITO	IMMAGAZZINABILITÀ Attitudine degli elementi tecnici ad essere facilmente e rapidamente stoccati, garantendo una più efficace organizzazione del cantiere, sia in fase di produzione che di esecuzione
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile è composta da elementi tecnici molto leggeri e manovrabili, ciò comporta la facilità di immagazzinamento degli stessi, sia in fase di montaggio della facciata, quando i componenti vengono trasportati in cantiere, sia in fase di dismissione, quando essi vengono smontati e stoccati in magazzino in attesa di una nuova funzione da svolgere
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 1.m	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	GESTIONE Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio
CLASSI DI REQUISITI	DI ECONOMIA Attitudine del sistema edilizio a fornire prestazioni di benessere con il minor consumo possibile di energia

REQUISITO	COMODITA' D'USO E DI MANOVRA Attitudine a presentare opportune caratteristiche di funzionalità, di capacità d'uso, di manovrabilità
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile presenta un alto grado di comodità d'uso e di manovrabilità in fase di realizzazione, grazie all'estrema leggerezza dei suoi componenti e alla possibilità di non occupare grandi aree e spazi per il deposito del materiale da utilizzare, in modo da consentire una più facile fruibilità dei mezzi e delle aree di cantiere
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 8290-2:1983

Scheda 1.n	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	GESTIONE Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio
CLASSI DI REQUISITI	DI MANUTENIBILITA' Attitudine del sistema edilizio a mantenere in condizioni di integrità le capacità di fornire prestazioni di tutti i suoi elementi tecnici durante tutto il periodo di vita programmata
REQUISITO	SOSTITUIBILITÀ Attitudine a consentire la collocazione di elementi tecnici al posto di altri
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile può essere costituita da elementi tecnici tra di loro componibili e perciò sostituibili con facilità, sia per motivi di tipo manutentivo sia per avere diverse possibilità di integrazione con altri materiali, ad esempio quando si vogliono accostare superfici opache ad altre traslucide o trasparenti, per esigenze relative al comfort visivo
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 8290-2:1983

Scheda 1.o	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE Insieme delle condizioni per utilizzare le risorse dell'ambiente in modo coerente nei confronti dell'utente e dell'ambiente stesso con un regime economico/ambientale definito
CLASSI DI REQUISITI	DI SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE Controllo dell'inquinamento causato dall'edificio sull'ambiente esterno prodotto dalla combustione di sostanze nocive nonché dallo scarico di acque di rifiuto
REQUISITO	RIUTILIZZABILITÀ E REVERSIBILITÀ DI PRODOTTI E COMPONENTI

	Attitudine alla riutilizzazione di elementi tecnici dopo la demolizione e ad una facile rimozione consentendo a parti ed elementi un ritorno allo stato e alle condizioni iniziali senza subire alterazioni
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile garantisce la possibilità di ridurre gli scarti e i rifiuti edilizi, grazie all'impiego di prodotti e sistemi riutilizzabili e reversibili. Le membrane tessili, infatti, sono costituite da materiali che possono essere riutilizzati, grazie alla loro leggerezza e flessibilità, come elementi reversibili e adattabili in diversi contesti e su edifici caratterizzati da forme e funzioni diversificate, senza subire alterazioni dopo la rimozione dall'edificio originario
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 1.p	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE Insieme delle condizioni per utilizzare le risorse dell'ambiente in modo coerente nei confronti dell'utente e dell'ambiente stesso con un regime economico/ambientale definito
CLASSI DI REQUISITI	DI SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE Controllo dell'inquinamento causato dall'edificio sull'ambiente esterno prodotto dalla combustione di sostanze nocive nonché dallo scarico di acque di rifiuto
REQUISITO	UTILIZZO DI MATERIALI ELEMENTI E COMPONENTI AD ELEVATO POTENZIALE DI RICICLABILITÀ I materiali, gli elementi e i componenti devono avere un elevato grado di riciclabilità che dipende da: -condizioni relative all'ubicazione del cantiere rispetto alle attività di trattamento e recupero dei materiali, che sono effettuate nel contesto territoriale; -disponibilità di spazi nel cantiere di demolizione per la raccolta dei rifiuti e dei materiali recuperati; -tecniche costruttive con cui è realizzato il manufatto edilizio; -potenzialità dei materiali che costituiscono l'edificio di essere avviati a processi di recupero e/o di riciclaggio; -condizioni relative alla vicinanza al sistema della viabilità
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile può essere costituita da materiali parzialmente o totalmente riciclabili e riciclati. La maggior parte dei prodotti tessili sono oggi riciclabili grazie alla loro costituzione materiale o a processi meccanici che separano i diversi strati delle membrane multicomponenti e ne permettono il riciclo e il riutilizzo
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 11277: 2008

Scheda 1.q	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE Insieme delle condizioni per utilizzare le risorse dell'ambiente in modo coerente nei confronti dell'utente e dell'ambiente stesso con un regime economico/ambientale definito
CLASSI DI REQUISITI	DI SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE Controllo dell'inquinamento causato dall'edificio sull'ambiente esterno prodotto dalla combustione di sostanze nocive nonché dallo scarico di acque di rifiuto
REQUISITO	UTILIZZO DI TECNICHE COSTRUTTIVE CHE FACILITINO IL DIS-ASSEMBLAGGIO A FINE VITA E' richiesto che siano adottati sistemi costruttivi in grado di facilitare la separabilità dei componenti dell'edificio durante i processi di demolizione e recupero. Le possibilità di recuperare i materiali da costruzione alla fine del ciclo di vita dell'edificio dipendono dalle caratteristiche costruttive dell'edificio stesso
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile è costituita da componenti facilmente aggregabili o separabili, di forme e dimensioni diverse a seconda che la membrana sia utilizzata in integrazione ad altri materiali o che venga impiegata come un unico involucro. Il disassemblaggio può avvenire rapidamente e in alcuni casi consente il riutilizzo dei componenti
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 11277: 2008

Scheda 1.r	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE Insieme delle condizioni per utilizzare le risorse dell'ambiente in modo coerente nei confronti dell'utente e dell'ambiente stesso con un regime economico/ambientale definito
CLASSI DI REQUISITI	DI MANUTENIBILITA' Attitudine del sistema edilizio a mantenere in condizioni di integrità le capacità di fornire prestazioni di tutti i suoi elementi tecnici durante tutto il periodo di vita programmata
REQUISITO	UTILIZZO DI MATERIALI, ELEMENTI E COMPONENTI CARATTERIZZATI DA ELEVATA DURABILITÀ I materiali, gli elementi e i componenti devono avere una vita utile durevole rispetto alla vita utile dell'edificio
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile deve garantire una durata di vita pari agli altri prodotti e sistemi utilizzati per gli involucri edilizi convenzionali. Attualmente, i tessili tecnici raggiungono una durata di vita, garantita dai produttori, che arriva anche a 30 anni, e mediamente pari a 20 anni, comparabili ad altri prodotti più consolidati nel settore edilizio
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978

	Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 11277: 2008
--	---

Scheda 1.s	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	GESTIONE Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio
CLASSI DI REQUISITI	DI MANUTENIBILITA' Attitudine del sistema edilizio a mantenere in condizioni di integrità le capacità di fornire prestazioni di tutti i suoi elementi tecnici durante tutto il periodo di vita programmata
REQUISITO	PULIBILITÀ Attitudine a consentire la rimozione di sporcizia e sostanze indesiderate
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	I prodotti tessili impiegati negli involucri hanno caratteristiche di autopulibilità ed eventuale possibilità di smontaggio di parti, nel caso in cui necessitino di lavaggio manuale (in genere si utilizza acqua e sapone e non si utilizzano strumenti aggressivi per la membrana, come spazzole rigide, pompe ad alta pressione)
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 1.t	REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE
CLASSE DI ESIGENZA	GESTIONE Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio
CLASSI DI REQUISITI	DI MANUTENIBILITA' Attitudine del sistema edilizio a mantenere in condizioni di integrità le capacità di fornire prestazioni di tutti i suoi elementi tecnici durante tutto il periodo di vita programmata
REQUISITO	MANUTENIBILITÀ Possibilità di conformità a condizioni prestabilite entro un dato arco di tempo in cui è compiuta l'azione di manutenzione
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	Gli involucri tessili presentano facile manutenzione, grazie al facile smontaggio dei teli o alle riparazioni puntuali. Le opere di manutenzione non riguardano solo la durabilità del tessuto, ma anche la necessità di revisionare periodicamente lo stato tensionale della membrana. Per la sostituzione, se non sono più disponibili le dimensioni dei rotoli usati originariamente, devono essere realizzati nuovi modelli di taglio e potrebbe essere necessario trovare una nuova forma della membrana, a partire dalle misurazioni della struttura di supporto
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

CAPITOLO 2: INVOLUCRO TESSILE E COMFORT AMBIENTALE

Le problematiche della trasmissione dei flussi termici e luminosi attraverso un involucro leggero e traslucido implicano, da un lato, l'indagine sulle caratteristiche ottiche e termo-fisiche delle membrane, raccogliendo dati quantitativi per verificare le loro proprietà in termini di prestazioni per il benessere termo-acustico e visivo, dall'altro, parlando di sistemi tensostrutturali, affrontano anche la questione della forma.

Più dettagliatamente, l'involucro tessile assume una specifica configurazione geometrica in conseguenza dell'equilibrio che deve assumere nello spazio, essendo una struttura auto-portante, composta da un tessuto plastico che ha una propria dimensione produttiva, per la quale al fine di realizzare la sua pre-forma è necessario unire tra loro i vari teli (o ferze) che compongono una membrana tessile e rinforzarli lungo i bordi. Tutto ciò fa parte di una complessa fase progettuale che richiede una progettazione più sofisticata ingegneristicamente rispetto ai prodotti definibili "rigidi", come i pannelli vetrati e simili.

"In natura esistono tre modi di percepire la luce: il primo si potrebbe definire di superficie per cui la luce viene riflessa appunto da una superficie ben definita. Poi c'è quello secondo il quale la luce viene percepita come attraverso un velo. Il terzo modo è invece quello volumetrico, che è come guardare uno stagno o una nuvola, se ne vede l'interno; è dunque la percezione della luce, ma non della sua fonte" Nicholas Goldsmith



Figura 23. Grafici illustrativi delle modalità di percezione della luce, secondo Nicholas Goldsmith.
(Fonte: Goldsmith N., "Leggerezza e luminosità", in: *Architettura e leggerezza*, 1999)

In particolare, abbiamo visto che con gli involucri tessili si è in grado di raggiungere gradi di flessibilità tecnologica capaci di soddisfare anche le esigenze di comfort ambientale in modo dinamico rispetto alle variazioni delle condizioni di contesto o delle esigenze di utenza. In effetti, la necessità di un uso razionale delle risorse ha introdotto nuovi materiali e modelli di funzionamento delle facciate degli edifici capaci di variare, in maniera non statica ma variabile nel tempo, il modo di rispondere alle sollecitazioni ambientali.

A tale riguardo, alcuni tessuti tecnici impiegati per l'involucro edilizio, sia in funzione di chiusura tecnologica che di protezione ambientale, sono in grado di consentire la riflessione della radiazione solare diretta, lasciando passare invece la radiazione luminosa diffusa, offrendo un buon livello di comfort visivo senza alterare le condizioni termiche degli ambienti e contribuendo, al contempo, alla riduzione del fabbisogno di raffrescamento. L'illuminazione naturale di un ambiente interno dipende infatti dalla quantità di luce che penetra direttamente dalle superfici trasparenti o traslucide, ma anche dalle dimensioni e dalla forma dello spazio e dalla luce riflessa dalle superfici interne, come le pareti i pavimenti e i soffitti che lo delimitano. E' perciò importante, nell'analisi termo-fisica degli involucri tessili, considerare anche questi aspetti.

L'elaborazione di schede di sintesi, basate sull'approccio esigenziale-prestazionale, è di ausilio all'analisi delle chiusure a membrana pretesa, oggetto della ricerca. Di seguito si riportano le schede elaborate per ognuna dei requisiti tecnologici selezionati allo scopo, che, nello specifico di questo capitolo, riguardano la percezione visiva e le sue implicazioni sugli aspetti relativi al benessere ambientale (termo-igrometrico ed acustico in particolare).

Di seguito si riportano le schede di lettura esigenziale-prestazionale relative alla percezione visiva.

Scheda 2.a	PERCEZIONE VISIVA
CLASSE DI ESIGENZA	<p>BENESSERE</p> <p>Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti</p>
CLASSI DI REQUISITI	<p>VISIVI</p> <p>Attitudine dell'edificio a mantenere stabile il livello di illuminazione mediante sorgenti luminose naturali o artificiali ed elementi per l'oscuramento</p>
REQUISITO	<p>BENESSERE VISIVO</p> <p>Sensazione di benessere che contribuisce in via indiretta ad aumentare la produttività delle attività svolte, relativa al controllo dei livelli di illuminamento sufficienti e dei fenomeni disturbanti</p>
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	<p>La facciata tessile deve garantire un'adeguata percezione degli ambienti interni ed esterni. Essa può presentare un grado di trasmissione della luce visibile tale da garantire elevate condizioni di visibilità e al contempo evitare fenomeni di abbagliamento o di disturbo visivo per scarsa o eccessiva quantità di luce. Il fattore di luce diurna è molto elevato in ambienti racchiusi da membrane tessili, pari a circa al 10%. I livelli di illuminamento, con un'illuminazione altamente diffusa, possono provocare pochi contrasti e ombre marcate, dando l'impressione di un ambiente scarsamente illuminato. Importante è quindi la distribuzione della luce, con finiture riflettenti per le superfici interne e componenti trasparenti nelle parti più basse dell'involucro. La percezione dei colori, infine, è migliore se è più chiaro il colore della membrana, grazie alla linearità della trasmissione dello spettro luminoso visibile</p>
RIFERIMENTI NORMATIVI	<p>Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI EN 12464-1:2004</p>

Scheda 2.b	PERCEZIONE VISIVA
CLASSE DI ESIGENZA	<p>BENESSERE</p> <p>Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti</p>
CLASSI DI REQUISITI	<p>VISIVI</p> <p>Attitudine dell'edificio a mantenere stabile il livello di illuminazione mediante sorgenti luminose naturali o artificiali ed elementi per l'oscuramento</p>
REQUISITO	<p>RIDUZIONE DEGLI EFFETTI DI DISTURBO VISIVI</p> <p>Si devono evitare il verificarsi di eventuali disturbi visivi quali per esempio l'abbagliamento, provocati dalle interazioni tra elementi del progetto e il contesto</p>

PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile deve assicurare un elevato livello di protezione visiva, che permette sia di schermare la luce sia di lasciar passare quella quota necessaria per lo svolgimento della attività previste negli ambienti interni. Le membrane sono adatte ad essere impiegate come elementi schermanti, che evitano fenomeni di abbagliamento e surriscaldamento ma allo stesso tempo non riducono la luminosità degli spazi
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 11277: 2008

Scheda 2.c	PERCEZIONE VISIVA
CLASSE DI ESIGENZA	UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE Insieme delle condizioni per utilizzare le risorse dell'ambiente in modo coerente nei confronti dell'utente e dell'ambiente stesso con un regime economico/ambientale definito
CLASSI DI REQUISITI	VISIVI Attitudine dell'edificio a mantenere stabile il livello di illuminazione mediante sorgenti luminose naturali o artificiali ed elementi per l'oscuramento
REQUISITO	ILLUMINAZIONE NATURALE Il livello di illuminazione naturale in un ambiente confinato deve essere garantito in modo adeguato
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile deve consentire un livello adeguato di luce naturale negli ambienti interni. Grazie alla traslucidità dei tessuti, il passaggio di luce naturale consente, in architetture dalle grandi dimensioni, anche un risparmio energetico relativamente agli impianti di illuminazione artificiale
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 11277: 2008

Scheda 2.d	PERCEZIONE VISIVA
CLASSE DI ESIGENZA	UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE Insieme delle condizioni per utilizzare le risorse dell'ambiente in modo coerente nei confronti dell'utente e dell'ambiente stesso con un regime economico/ambientale definito
CLASSI DI REQUISITI	VISIVI Attitudine dell'edificio a mantenere stabile il livello di illuminazione mediante sorgenti luminose naturali o artificiali ed elementi per l'oscuramento

REQUISITO	UTILIZZO PASSIVO DI FONTI RINNOVABILI PER L'ILLUMINAZIONE Devono essere previsti sistemi captanti di luce naturale, come sistemi riflettenti e condotti di luce
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile può consentire un livello adeguato di luce naturale, che può essere captata sia dalla superficie stessa dell'involucro, quando presenta maggiori gradi di traslucidità, sia da sistemi trasparenti integrati alla chiusura, garantendo una parte di risparmio energetico relativamente agli impianti di illuminazione artificiale
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981 Norma UNI 11277: 2008

Scheda 2.e	PERCEZIONE VISIVA
CLASSE DI ESIGENZA	BENESSERE Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti
CLASSI DI REQUISITI	VISIVI Attitudine dell'edificio a mantenere stabile il livello di illuminazione mediante sorgenti luminose naturali o artificiali ed elementi per l'oscuramento
REQUISITO	CONTROLLO DEL FLUSSO LUMINOSO Attitudine a consentire l'ingresso di energia luminosa dal suo valore massimo fino all'oscurità
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile consente di modulare la luce in ingresso negli spazi interni, grazie ai diversi gradi di traslucidità delle membrane. In particolare, i tessuti adattivi sono in grado di regolare la trasmissione del flusso luminoso grazie a specifici trattamenti sulla loro superficie, realizzati con tecnologie di tipo attivo o passivo
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

2.1 Percezione Visiva. Il controllo della forma nelle superfici tessili

La "forma", in regime membranale in generale e tensostrutturale in particolare, non può essere identificata mediante modellazioni fisiche e/o informatiche che impieghino puramente algoritmi, ma è condizionata da una ricerca di equilibrio nell'ambito delle condizioni limite al contorno. L' impostazione classica del problema parte dalla conoscenza dello stato geometrico e trova lo stato di sollecitazione, mentre la impostazione membranale capovolge l'equazione: noto lo stato di sollecitazione bisogna trovare lo stato geometrico che lo soddisfi. Nel regime

tensostrutturale, anche in assenza di carichi esterni otteniamo l'ideale configurazione della superficie minimale (fisicamente approssimata dalle bolle di sapone).

Con gli studi di Frei Otto sull'architettura della natura, il principio della costruzione leggera diventa il criterio per osservare gli oggetti della natura vivente dal punto di vista tecnico: ogni costruzione ha una forma geometrica e una struttura. "Una costruzione resiste ad una sollecitazione o perché dispone di tanto materiale da riuscire ad assorbirla, o perché cerca di evitarla cambiando la propria forma"³⁹. Questo, in estrema sintesi, è il principio delle strutture resistenti per forma. Le prime sperimentazioni architettoniche tessili risalgono agli anni '50 del secolo scorso, coi modelli realizzati da Frei Otto studiando le bolle di sapone, strutture minimali fondamentali per gli studi sul comportamento delle strutture sottoposte a tensione. Frei Otto mise a punto uno strumento per la misurazione della superficie creata dalle bolle di sapone, che poteva rilevare le curvature dei modellini in acqua saponata per le tensostrutture. Grazie alla tensione superficiale il liquido saponato si conforma secondo la forma geometrica - tensionale minima per qualunque configurazione di contorno.

Le tensostrutture hanno avuto un'evoluzione esponenziale a valle dell'introduzione di metodi computerizzati di ausilio alla progettazione ed analisi di sistemi complessi, tanto che oggi si assiste ad un processo di innovazione denominato "ingegnerizzazione dell'architettura". Con l'avvento dei primi computer, infatti, è stato possibile sviluppare gli algoritmi di calcolo che, tramite programmazione interattiva e mediante particolari periferiche grafiche, rendevano possibile la visualizzazione delle superfici strutturali generate da "condizioni di equilibrio" e non da predefinite geometrie. Nasce così la teoria della ricerca della forma strutturale, "lo Stato 0", che ribalta la classica analisi strutturale considerando note le sollecitazioni e ricercando, come incognita, la forma strutturale. Si arriva alla definizione di superfici membranali minimali, presollecitate, pneumatiche, idrostatiche, e alla ottimizzazione della forma strutturale in funzione della distribuzione tensionale. Il contenuto tecnologico, apportato dai nuovi materiali da costruzione, insieme alle tipologie e metodologie costruttive che hanno portato

³⁹ Otto, Frei, *L'architettura della natura*, trad. it., Il Saggiatore, Milano, 1984, p.24.

anche ad una metamorfosi del linguaggio, sono supportate dalle tecniche informatiche (IT) interattive grafiche (CAD). Nel processo di progettazione architettonica la componente tecnologica informatica, mediante l'impiego di algoritmi geometrici per la generazione di superfici e solidi, diventa dominante nella configurazione di forme che possono essere definite *decostruite*; ciò consente una libera espressività formale in alcuni episodi di architettura contemporanea che crea edifici-scultura, la cui forma, nella maggior parte dei casi, non ha nessun nesso con principi di tipo strutturale, e perciò è discutibile da punto di vista costruttivo⁴⁰.

Nel contesto della terza rivoluzione tecnologica degli elaboratori elettronici e dei metodi di calcolo ad elementi finiti, tra i pionieri nel campo dell'architettura strutturale troviamo Pier Luigi Nervi, Riccardo Morandi e Sergio Musmeci, i quali ci conducono a ragionamenti molto vicini al processo progettuale e costruttivo connotante le tensostrutture a membrana. Morandi afferma che le consapevoli scelte costruttive che precisano l'identità derivano dalla esplicita adozione di "schemi statici semplici facilmente controllabili, in cui la disposizione e la forma delle varie membrature esprimano chiaramente la funzione statica, cioè in ultima analisi la loro ragione di esistere". Mentre Musmeci introduce il concetto della ricerca della "forma strutturale" in funzione della minimizzazione della materia richiesta per opporsi alla energia potenziale esterna: "la ricerca della forma strutturale non è innescata da un atto intuitivo o capriccioso, ma da un processo che ricerca la necessaria configurazione della materia nello spazio, atta a risolvere un determinato compito strutturale impiegando il minimo indispensabile delle risorse". "La struttura, attraverso la sua forma, rivela con immediatezza i flussi delle forze interne che le percorrono e che non sono dunque rinchiusi e nascosti entro il volume di una morfologia concepita astrattamente, secondo pregiudizi estetici e statici in cui gran parte della materia e dello spazio impiegati è superflua". E' la forma che, con il minimo impiego di una certa materia, occupa il minimo volume nello spazio.

Queste preziose osservazioni, citate da Majowiecki ad avallare la critica a quell'architettura contemporanea definita auto-celebrativa, ci consentono di comprendere ulteriormente la problematica strutturale nei sistemi a membrana pretesa, strutture

⁴⁰ Tali considerazioni sono scaturite da incontri accademici sul tema dell'*etica tecnologica*, in cui l'ingegnere Massimo Majowiecky ha sottolineato l'importanza del tema relativamente all'architettura strutturale.

resistenti per forma. Nello specifico, le due tematiche strutturali fondamentali delle tecnologie leggere sono la *presollecitazione* e la *curvatura*, che, da fattori inscindibili, danno luogo alla *rigidezza geometrica per forma*. Quest'ultima è in grado di garantire un'efficace resistenza meccanica ad elevati carichi di trazione, carichi gravitazionali come la neve e carichi pulsanti come il vento. Ma la curvatura, se per le tensostrutture a membrana di grandi dimensioni necessariamente è configurata come *doppia* (paraboloide iperbolico), le tipologie costruttive che impiegano membrane tessili di più esigue dimensioni possono assumere anche *curvatura semplice o nulla*. Se la membrana è impiegata con forma piana, ad esempio in pannelli di chiusura verticale, bisogna che essa si deformi dopo il carico, per evitare una deformazione infinita che deriverebbe proprio dalla configurazione piana. In tal modo, grazie alla configurazione post-deformata, si evitano gli effetti dovuti a carichi gravitazionali come la neve (effetto *bounding*), e le sacche che si formano quando vi è un carico gravitazionale elevato. In applicazioni verticali, invece, le sacche non vengono a formarsi ma si palesa il rischio dovuto a forze verticali e pulsanti come il vento, che dura frazioni di secondo. La membrana, quindi, quando è impiegata tesa e dritta (assumendo una forma piana), prende la corretta curvatura necessaria a resistere ai carichi statici solo dopo l'applicazione dei carichi stessi.

Tali considerazioni si ritengono utili per riflettere sulla crescente varietà di applicazioni tessili nell'architettura diffusa, che dipende anche dalla possibilità di superare la caratteristica configurazione a doppia curvatura delle tensostrutture. Oggi, infatti, grazie a nuovi materiali e a nuove sperimentazioni ed impieghi di dimensioni e contesti differenti, è possibile realizzare sistemi a membrana pretesa non necessariamente legati alla forma anticlastica del paraboloide iperbolico. Si sta in particolar modo diffondendo l'utilizzo delle membrane nelle chiusure verticali, dove, soprattutto per applicazioni dalle ridotte dimensioni, il tessile è in grado di modellarsi in una differente geometria resistente. Se la membrana è piana, bisogna che essa si deformi dopo il carico, per evitare una deformazione infinita. Quando la membrana è impiegata in verticale, tesa e dritta, non è necessario sopportare carichi gravitazionali bensì forze "pulsanti" come il vento, che dura frazioni di secondo. Ciò va messo in pratica nel progetto, ad esempio quando le membrane sono impiegate come pannelli di chiusura o partizione, ottenendo varietà di

configurazioni verticali ed orizzontali che si adattano in diverse modalità al contesto. Nel caso di impiego delle membrane in componenti orizzontali, numerosi test hanno dimostrato che, impiegando membrane con pendenza minima di 22° , non si crea l'effetto *bounding* provocato dall'acqua sul telo, e in tal modo si preserva la membrana da eventuali danni provocati da agenti esterni.



Figura 24. Palazzo dello sport di Pesaro. (Fonte: www.panoramio.com)



Figura 25. Nuovo stadio della Juventus. (Fonte: www.solopallone.it)

2.1.1 Implicazioni della forma sulle problematiche connesse alla percezione visiva

L'occasione di creare spazialità nuove e di giocare con fattori materiali e immateriali diversi, come la luce e le ombre, i suoni, il movimento, il clima è una prerogativa delle tensostrutture a membrana. Queste, infatti, presentano due caratteristiche che determinano particolari condizioni di illuminazione, in grado di incidere sul comfort visivo degli ambienti interni: da un lato, la configurazione di

spazi a tutta altezza, illuminati in modo uniforme attraverso la copertura o la chiusura verticale, dall'altro, l'alta diffusione della luce, tipica dei tessuti spalmati, che permette di trasmettere e riflettere ampiamente la radiazione solare attraverso la superficie più interna.

Altro aspetto fondamentale del progetto delle strutture tessili, che implica una differente percezione visiva degli spazi avvolti da esse, è la cosiddetta *ricerca della forma*, in quanto il materiale prende forma solo se viene messo in tensione. Più specificamente, la "traduzione" della forma virtuale in forma reale avviene mediante la sua "discretizzazione" secondo dei moduli che, realizzati tagliando "a spicchi" la membrana secondo una certa direzione e larghezza, vengono uniti mediante incollaggio o cucitura. Una volta assemblati i moduli, la membrana viene messa in tensione dai supporti strutturali esterni.

Il concetto di forma resistente, tipica anche delle tensostrutture, può farsi risalire già alla seconda metà del XIX secolo, quando, come nota Morabito⁴¹, la tendenza eclettica sovrappone la *forma*, intesa in senso tipologico, alla struttura resistente, assegnando a quest'ultima il ruolo di generatrice della forma. Così va in crisi la concezione di un'architettura concepita come unità complessiva tra le componenti della triade vitruviana, mentre si fa strada la completa autonomia della struttura portante dall'interno dell'organismo architettonico.

La decisiva trasformazione dell' involucro, sulla scorta della tradizione della costruzione leggera, ha rinnovato i principi costruttivi dell'edificio, definendo nuove matrici espressive.

Come osservano Wilkinson e Eyre, l'elaborazione di geometrie complesse ispirate alla creatività delle forme presenti in natura è un fattore qualitativamente fondamentale dell'architettura contemporanea, che riguarda le proprietà performanti dei materiali ma anche il design dei componenti, la forma e l'espressione della struttura. Lo spazio si trasforma in architettura grazie alla sofisticata tecnologia digitale dei più aggiornati software: costruire implica infatti anche riuscire ad ingegnerizzare strutture complesse senza compromettere la chiarezza e la leggibilità della struttura. Invece di utilizzare la massa per proteggersi dagli agenti atmosferici, le costruzioni del futuro saranno sistemi pluristrato di fibre leggere con

⁴¹ Cfr. Morabito, Giovanni, *Forme e tecniche dell'architettura moderna*, Officina Edizioni, Roma, 1990.

performance termiche capaci di proteggere dall'irraggiamento solare e dall'azione dei carichi dinamici.

Il processo realizzativo di una struttura a membrana pretesa comprende precise fasi da seguire:

- 1- determinazione della configurazione geometrica appropriata
- 2- determinazione dei carichi cui la struttura sarà sottoposta
- 3- scelta del materiale tessile con le caratteristiche fisiche appropriate
- 4- progettazione degli elementi strutturali di supporto
- 5- riduzione o migliore distribuzione delle concentrazioni di sforzo
- 6- progettazione del cantiere, con sistemi di prefabbricazione e assemblaggio in situ
- 7- risoluzione dei problemi di drenaggio e smaltimento delle acque.

E' indispensabile l'adozione di pratiche progettuali integrate: una membrana non può essere progettata indipendentemente dal resto dell'edificio.⁴²

Tutto ciò chiama in causa l'aspetto progettuale del processo edilizio connotante le strutture tessili.

Gerry D'Anza, che ha sviluppato un software di calcolo per la progettazione delle tensostrutture a membrana diffuso in tutto il mondo, definisce tre fasi distinte e sempre presenti nella realizzazione di una tensostruttura a membrana : Ricerca di Forma, Calcolo, Taglio ed Esecuzione. Più specificamente, la *ricerca di forma* è ciò che caratterizza tali strutture da quelle convenzionali. Il modello architettonico infatti non può essere definito, come è consueto per un progettista, attraverso schizzi e disegni, sia perché le geometrie inconsuete sono difficili da controllare in uno spazio bidimensionale sia perché la membrana, non essendo un materiale rigido, sfugge alle nostre capacità di modellare lo spazio attraverso forme note (piani, solidi etc). Il concetto base è la "stabilità" dimensionale sia in fase di costruzione che di esercizio, che si ottiene con due componenti inscindibili: Forma e Energia. La ricerca di forma si traduce in quella fase progettuale in cui, definite le condizioni al contorno (vincoli progettuali), si definisce una forma stabile idonea a risolvere il problema in esame. Sinteticamente, il problema della ricerca di forma può essere definito attraverso:

⁴² Cfr. Olivetti, Catia, *Le forme e i materiali della trazione*, FrancoAngeli, Milano, 1995, pp.144-145.

- parametri noti (vincoli geometrici ed uno stato iniziale di pretensione all'interno di un intervallo valido)
- incognita (la superficie G) sottoposta alle condizioni di stabilità in ogni punto (sella locale) e di equilibrio con un regime di tensione stabilito, definendo una superficie di partenza G_0 e deformandola fino a farle rispettare le condizioni poste.

Il *calcolo strutturale* indaga il comportamento della struttura sottoposta ai carichi esterni e verificarne la sicurezza di esercizio. Data la natura non-lineare del comportamento di una membrana sottoposta a forze esterne, il professionista deve avvalersi di strumenti adeguati e solutori FEM (solutori strutturali ad elementi finiti) in campo non-lineare. Le due tecniche di base per il calcolo strutturale, codificate a partire dagli anni '60 ed ancora oggi in auge, sono il metodo del Rilassamento Dinamico e il metodo della Densità Di Forza, adattabili a diversi contesti. In Italia le prime realizzazioni di tensostrutture a membrana risalgono al 1973, progettate con il software dell'ingegnere Massimo Majowiecki, che ha il primato di essere il primo sistema interattivo grafico per la definizione di forma e analisi non lineare geometrico di sistemi tensostrutturali.

La successiva fase del progetto di una tensostruttura riguarda il processo di *taglio* o "*patterning*", che risolve il problema di sviluppare sul piano una superficie *non-sviluppabile* come quelle risultanti dalla ricerca di forma. E' bene ricordare che una superficie sviluppabile ha curvatura gaussiana costante almeno in una delle due direzioni principali, mentre le superfici stabili hanno curvatura gaussiana negativa in ogni punto per definizione (doppia curvatura contrapposta) e quindi sono non-sviluppabili. La realizzazione pratica dunque è eseguita apportando dei tagli sulla superficie, individuando delle zone o "*patches*" che sviluppate in piano forniscono il "*pattern*" della superficie originale, e che saranno saldate e pretese in situ.

Alla luce di queste considerazioni, è evidente che la *visione tridimensionale* negli ambienti avvolti da membrane è particolarmente importante, soprattutto negli spazi destinati a ospitare attività che richiedono un buon livello di visibilità: infatti, se il campo visivo è illuminato in modo indifferenziato, come spesso accade in edifici tessili, gli occhi ricevono un'immagine uniforme, dove manca la differenza tra tridimensionalità e bidimensionalità. Un altro aspetto è legato alla percezione dei livelli di illuminamento: un'illuminazione altamente diffusa può risultare povera di

contrasti e di ombre marcate, dando l'impressione di trovarsi in un ambiente scarsamente illuminato. Importante, per questo motivo, risulta la distribuzione della luce: all'interno di una tensostruttura, la luce diffusa tende a ridurre il contrasto tra oggetti piani, mentre si riscontra una spiccata differenza tra la luminosità della copertura traslucida e quella delle altre superfici interne. Questo effetto può essere corretto attraverso l'utilizzo di finiture riflettenti per le superfici interne e permettendo alla luce diretta di penetrare all'interno attraverso componenti trasparenti disposti nelle parti più basse dell'involucro. E' necessario, infine, considerare anche l'aspetto legato alla *percezione dei colori*: più chiaro è il colore della membrana, migliore è la percezione, grazie alla linearità della trasmissione dello spettro luminoso visibile.

Gli aspetti fin qui trattati influenzano, in dipendenza delle caratteristiche ottiche del materiale tessile, la percezione visiva degli ambienti avvolti da involucri costituiti da membrane, in quanto le proprietà di traslucida, connesse ai fattori di trasmissione, riflessione e assorbimento luminoso delle superfici, variano in dipendenza della geometria spaziale delle "pareti" di un ambiente. Nei successivi paragrafi si approfondiranno, pertanto, le proprietà fisiche e termo-ottiche dei tessuti tecnici al fine di comprendere meglio il loro comportamento ai flussi luminosi.

2.2 Gli aspetti percettivi dell'involucro tessile e loro implicazioni sul comfort ambientale

Il comfort ambientale è quella condizione in cui l'individuo che svolge una data attività non avverte alcuna sensazione di disagio; le sensazioni di comfort, diverse da persona a persona, sono comunque strettamente legate agli scambi di calore del corpo umano con l'ambiente⁴³. Come sappiamo, i fattori ambientali che influenzano tale condizione sono la temperatura, l'umidità e la velocità dell'aria, l'irraggiamento da sorgenti esterne e fattori soggettivi tra i quali l'abbigliamento, l'attività fisica svolta, l'età e il sesso dell'utente ecc. Da tali considerazioni definiamo il comfort ambientale, relativo alle condizioni esclusivamente fisiche dell'utente, come prodotto da condizioni di benessere igro-termico e visivo. Il comfort visivo, che ci interessa in maggior misura per la presente ricerca, è definito come "lo stato che

⁴³ Cfr. Marocco, Marcello, Orlandi, Fabrizio, *Qualità del comfort ambientale*, Dedalo, Roma, 2000, p.160.

assicura le condizioni per la miglior percezione visiva⁴⁴, e viene qui considerato come un requisito fondamentale cui tener conto nella progettazione degli edifici.

La percezione visiva in ambienti racchiusi da sistemi a membrana pretesa pone, nella fase di progettazione di tali chiusure, ulteriori questioni che integrano gli aspetti tecnologici trattati precedentemente, e che vanno affrontati con attenzione, in quanto strettamente correlate al benessere ambientale.

Innanzitutto è da sottolineare come una strategia di illuminazione efficiente deve sempre supportare i bioritmi dell'utilizzatore: la qualità della vista, la dimensione e l'orientamento delle aperture, il campo visivo in relazione all'ambiente circostante, la disposizione degli spazi interni, la protezione dei raggi solari diretti, la ventilazione e la possibilità di aprire le finestre, sono tutti fattori che incidono sulla percezione di un ambiente.

Se si confronta la ripartizione spettrale della luce naturale con la curva di sensibilità dell'occhio umano, appare evidente come l'occhio si sia naturalmente adattato alle caratteristiche della radiazione luminosa solare; la luce diurna rappresenta quindi la sorgente luminosa per eccellenza, sia a livello fisiologico che a livello psicologico. La sua variabilità necessita, tuttavia, di apporti complementari da illuminazione artificiale e, in determinate condizioni, richiede l'impiego di sistemi di schermatura fissi o mobili in grado di creare una condizione visiva accettabile all'interno degli ambienti.

La buona visibilità di un oggetto richiede almeno quattro condizioni simultanee: una dimensione minima interna non eccessivamente piccola, un minimo di tempo necessario all'occhio per focalizzare la sua percezione, una luminanza minima ed un minimo di contrasto tra l'oggetto e l'ambiente che lo circonda.

Tali considerazioni vanno ad influenzare le condizioni di benessere visivo in ambienti racchiusi da involucri leggeri e traslucidi.

⁴⁴ Marocco M., Orlandi F., *op. cit.*, p. 165.

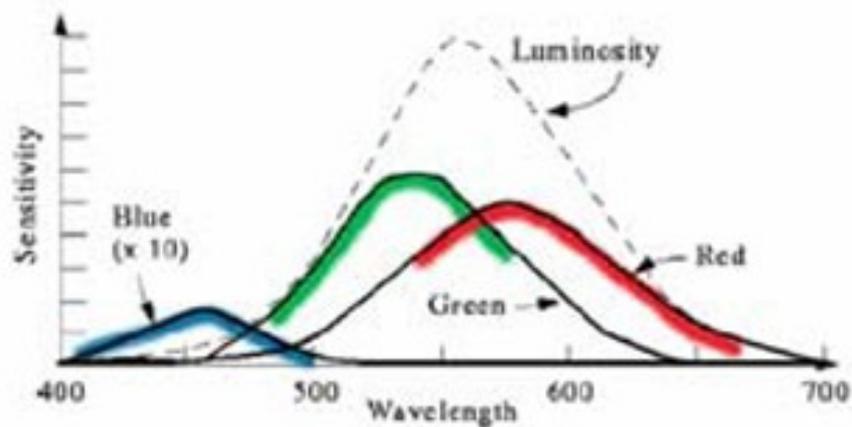


Figura 26. Sensibilità dell'occhio umano alla luce. La visione prodotta dai coni è a colori. Nella retina esistono tre tipi di coni, ognuno dei quali è sensibile a diverse lunghezze d'onda: rossa, verde e blu. (Fonte: Fiorentin P., Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Elettrica)

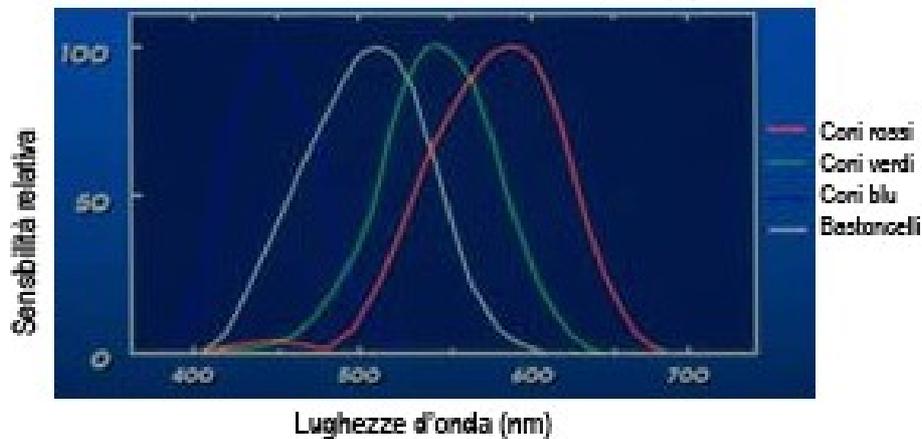


Figura 27. Sensibilità dell'occhio umano al colore. La visione prodotta dai soli bastoncelli è in bianco e nero. (Fonte: Fiorentin P., Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Elettrica)

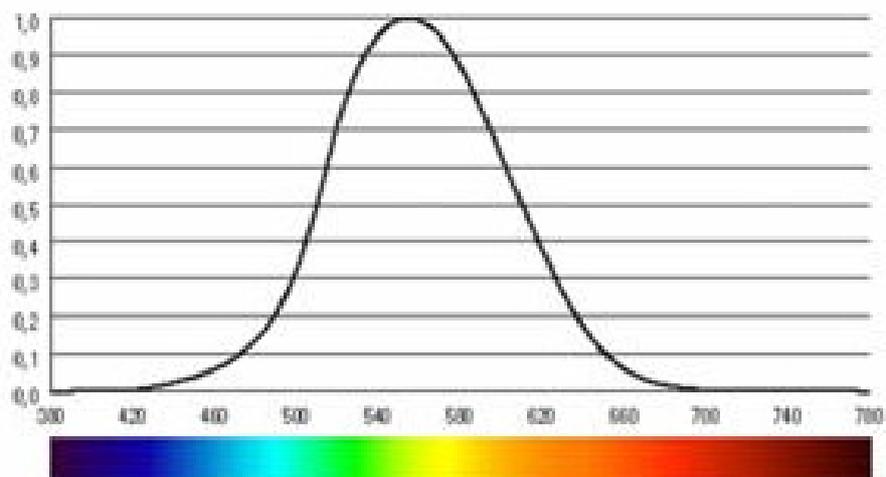


Figura 28. La radiazione del visibile. L'occhio umano è più sensibile alla lunghezza d'onda di circa 555 nm (giallo-verde). La sintesi additiva per la generazione dei colori nello spazio tricromatico CIE e la percezione dei colori nell'occhio umano avvengono con modalità molto simili. (Fonte: Fiorentin P., Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Elettrica)

Come osserva Altomonte, per l'involucro la leggerezza ha un significato strutturale ben preciso, ma non di tipo ambientale. Si può affermare che l'elevata capacità termica, associata anche alle masse murarie, conviene sempre nelle utenze relativamente continue (residenza), in climi freddi, temperati e caldo-secchi, mentre la sua convenienza nelle utenze discontinue (uffici, servizi) è oggetto di discussione⁴⁵.

Nell'analisi dell'efficienza tecnologica degli involucri leggeri, è utile definire quali siano i *requisiti prestazionali* che un sistema di chiusura è chiamato ad assolvere, sintetizzabili come segue:

- controllo e gradazione della relazione percettivo / visiva
- controllo e regolazione degli scambi termici
- controllo della ventilazione naturale / artificiale
- regolazione dell'umidità dell'aria e diffusione del vapore
- controllo della qualità dell'aria e dell'inquinamento gassoso e pulviscolare
- controllo e gradazione dell'inquinamento acustico
- controllo dell'illuminazione naturale diretta e/o diffusa e del soleggiamento / ombreggiamento
- controllo dei fenomeni di elettromagnetismo e del passaggio dei raggi UV
- comunicazione, trasmissione e veicolazione di informazioni
- barriera contro gli agenti atmosferici⁴⁶.

Le seguenti schede sono indicative dello studio elaborato per analizzare le implicazioni della percezione visiva sul comfort ambientale degli spazi racchiusi da chiusure tessili, secondo una lettura di tipo esigenziale – prestazionale.

⁴⁵ Cfr. Altomonte, Sergio, *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, Alinea, Firenze, 2004, p. 74.

⁴⁶ *Ibidem*

Scheda 2.f	PERCEZIONE VISIVA: RICADUTE SUL BENESSERE
CLASSE DI ESIGENZA	BENESSERE Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti
CLASSI DI REQUISITI	TERMICI ED IGROMETRICI Controllo della temperatura d'ambiente, stabilità ed uniformità della temperatura in tutti i punti dei locali; controllo dei disturbi dovuti all'irraggiamento delle pareti sugli occupanti, alle correnti d'aria nonché controllo dell'umidità.
REQUISITO	BENESSERE TERMO-IGROMETRICO Attitudine ad assicurare un'opportuna resistenza al passaggio di calore e di aria in funzione delle condizioni climatiche, controllando la temperatura e i livelli di umidità
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile deve garantire temperature e livelli di umidità dell'aria accettabili per la vivibilità degli ambienti interni. La bassissima inerzia termica e la ridotta proprietà isolante la rendono inadeguata a smorzare gli sbalzi di temperatura che si creano sulle diverse facce dell'involucro, e l'idrorepellenza dei tessuti rivestiti provoca i fenomeni di condensa, favorendo la proliferazione di macchie e scolorimento. Con l'aumento del numero degli strati tessili e con l'interposizione di camere d'aria o materiali isolanti, si riduce il trasferimento di calore per convezione tra esterno e interno. Per il controllo della condensa si ricorre all'inserimento di barriere al vapore opache o metallizzate. Infine, la ventilazione naturale è utile a consentire il raffrescamento grazie a parti apribili dell'involucro prevista generalmente ai livelli inferiori
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 2.g	PERCEZIONE VISIVA: RICADUTE SUL BENESSERE
CLASSE DI ESIGENZA	BENESSERE Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti
CLASSI DI REQUISITI	DI TENUTA Permeabilità all'aria di ricircolo evitando dispersioni eccessive, tenuta alle fughe di gas e di fumi; tenuta alle precipitazioni atmosferiche, all'acqua di sottosuolo, alla

	neve, ed ai materiali in sospensione; tenuta delle condutture
REQUISITO	TENUTA ALL'ACQUA, ALL'ARIA (CONTROLLO DELLA PORTATA E DELLA VELOCITÀ), ALLA NEVE, ALLE POLVERI, VENTILAZIONE Attitudine ad evitare l'ingresso dell'acqua, a garantire un adeguato passaggio d'aria, a non trattenere e/o lasciare passare polveri
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile deve evitare l'ingresso dell'acqua, tramite connessioni ed assemblaggi progettati nel dettaglio. Inoltre, i sistemi chiusi a membrana pretesa possono essere integrati a componenti apribili, di diverse tipologie, in modo da garantire un adeguato passaggio d'aria. Infine, le membrane tessili impiegate per gli involucri sono trattate con diversi rivestimenti, al fine di non trattenere sporco o lasciare passare polveri dall'esterno all'interno e viceversa
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 2.h	PERCEZIONE VISIVA: RICADUTE SUL BENESSERE
CLASSE DI ESIGENZA	BENESSERE Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti
CLASSI DI REQUISITI	AUDITIVI Controllo del livello dei rumori provenienti dall'esterno all'interno di un locale - Isolamento acustico dai rumori che attraversano le pareti - Controllo del livello di rumori da colpi trasmessi dalla struttura, nonché dei rumori dovuti all'equipaggiamento dell'edificio stesso - Controllo del livello dell'eco all'interno dei singoli ambienti
REQUISITO	BENESSERE ACUSTICO Attitudine a fornire un'adeguata resistenza al passaggio dei rumori, controllando la propagazione dei suoni gradevoli, non desiderati o non richiesti
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile deve garantire un adeguato livello del rumore, per evitare qualsiasi condizione di discomfort acustico negli ambienti interni. Con membrane multistrato, le attenuazioni sonore si aggirano fra i 5 e i 10 dB per frequenze inferiori ai 500 Hz. Le MAW incrementano il loro

	potere fonoassorbente alle basse frequenze, con valori inferiori ai 300 Hz, di circa 5-11 dB, con camera d'aria di spessore pari a 500 mm. Con membrane pretensionate, le attenuazioni sonore alle alte frequenze pari a 700 Hz sono inferiori rispetto a quelle tipiche delle strutture non pretensionate
RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981

Scheda 2.i	PERCEZIONE VISIVA: RICADUTE SUL BENESSERE
CLASSE DI ESIGENZA	BENESSERE Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti
CLASSI DI REQUISITI	TERMICI ED IGROMETRICI Controllo della temperatura d'ambiente, stabilità ed uniformità della temperatura in tutti i punti dei locali; controllo dei disturbi dovuti all'irraggiamento delle pareti sugli occupanti, alle correnti d'aria nonché controllo dell'umidità.
REQUISITO	CONTROLLO DEL FATTORE SOLARE Attitudine a consentire l'ingresso di energia termica raggiante attraverso superfici trasparenti, adeguate alle condizioni climatiche
PRESTAZIONI TECNOLOGICHE	La facciata tessile deve garantire il controllo del flusso termico, per evitare fenomeni di surriscaldamento nella stagione estiva o in climi caldi. Pertanto, i sistemi chiusi a membrana devono potersi integrare con sistemi apribili, per far circolare l'aria negli ambienti interni. Sistemi multistrato in membrane isolate con materiali traslucidi riducono gli apporti di calore, aumentando lo spessore e mantenendo una certa traslucidità. Tessuti adattivi, riflettenti, con microstrutture spaziate, con base scura e rivestimento trasparente, sono diversi sistemi innovativi in grado di controllare il fattore solare, comportandosi come collettori

RIFERIMENTI NORMATIVI	Norma UNI 7867/1: 1978 Norma UNI 8289: 1981
-----------------------	--

2.2.1 Controllo dei flussi luminosi: trasmissione, riflessione e assorbimento luminoso

Il comfort ambientale include problematiche complesse, tra cui gli aspetti energetici del progetto, in quanto <<il benessere discende dal controllo di tutti i flussi di energia in ingresso e in uscita>>⁴⁷. Infatti <<fare entrare nella logica del progetto l'energia non è finalizzato solo al contenimento dei consumi, ma, ad un tempo, al comfort ambientale e alla difesa dell'ambiente - artistica e naturale - giacché l'energia non è che una grandezza fisica che serve a quantificare fenomeni disparati che determinano i fondamentali requisiti qualitativi dello spazio architettonico: caldo e freddo sì, ma anche suoni e rumori, campi elettrici e magnetici, luci ed ombre, tensioni, sforzi, sollecitazioni nelle strutture edili, nelle attrezzature di arredo, nel corpo umano impegnate nelle attività di lavoro>>⁴⁸.

In particolare, il benessere visivo rientra nelle <<problematiche che attingono alla vita stessa degli esseri umani, come la ricerca del giusto rapporto tra periodi di esposizione alla luce naturale e di permanenza nell'oscurità>>⁴⁹.

Le caratteristiche ottiche e termo-fisiche dei tessuti tecnici per l'edilizia sono parametri utili per individuare le prestazioni tecnologiche necessarie per rispondere alle esigenze di controllo dei flussi termici e luminosi, che hanno forti implicazioni sul raggiungimento del comfort ambientale di un'architettura.

Come è stato evidenziato nelle schede, la norma definisce il comfort visivo come la sensazione di benessere che contribuisce in via indiretta ad aumentare la produttività delle attività svolte, e la prestazione visiva come l'attitudine a eseguire i *compiti visivi* anche in condizioni difficili e protratti nel tempo⁵⁰. I principali parametri che caratterizzano l'ambiente luminoso sono:

⁴⁷ AA.VV., *La luce. Funzione della luce sull'ambiente e sulle attività umane e progetti di illuminazione naturale-artificiale per spazi architettonici privati e pubblici*, Over, Milano, 1989, Vol.1.

⁴⁸ *Ibidem*

⁴⁹ *Ibidem*

⁵⁰ Cfr. UNI EN 12464-1:2004, *Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni*.

- l'*illuminamento* del compito visivo,
- la *distribuzione* costante della luce ed i rapporti delle *luminanze*,
- l'*abbagliamento* diretto o indiretto,
- il *colore apparente* della luce, che implica una corretta percezione dei colori.

Non solo, come infatti evidenzia Altomonte, il comfort visivo dipende da una combinazione di parametri fisici: illuminamento, luminanza, contrasto, abbagliamento e spettro luminoso, ai quali occorre aggiungere le caratteristiche proprie dell'ambiente e del compito da svolgere⁵¹. I parametri sono pertanto incrementabili con:

- la percezione dell'ambiente esterno,
- l'assenza di ombre e/o di riflessi disturbanti,
- l'evidenza del rilievo e dei contorni degli oggetti,
- le esigue perdite di calore e i guadagni in termini di illuminazione naturale.

E' da sottolineare, però, che la qualità visiva e luminosa di uno spazio dipende in gran parte dall'utente, ed è impossibile arrivare alla definizione di un singolo parametro in grado di descriverla in maniera esauriente, sebbene sia possibile stabilire una serie di criteri, appropriatamente combinati tra loro, capaci di risolvere un determinato problema luminoso.

Le prescrizioni normative vengono generalmente espresse in termini di illuminamento minimo, per una maggiore facilità di misurazione. Un adeguato livello di illuminamento – che tenga conto anche della destinazione d'uso dei locali, del fattore di brillantezza e quindi dei coefficienti di riflessione delle superfici, e del rischio di insorgenza di fenomeni di contrasto o di abbagliamento – aumenta il benessere degli occupanti e ne diminuisce la fatica visiva, incrementando anche la loro produttività. I *valori ottimali di illuminamento* dipendono dalla funzione svolta e dal tempo necessario ad espletarla; in generale, fissato il valore minimo di soglia pari a **20 lux**, con un fattore di circa 1.5 per la più piccola differenza significativa

⁵¹ Cfr. Altomonte, Sergio, *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, Alinea, Firenze, 2004, p. 234.

nell'effetto soggettivo dell'illuminamento, si ottiene la scala degli illuminamenti raccomandati⁵²:

20 – 30 – 50 – 70 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 1000 – 2000 – 3000 – 5000

in base alla quale la norma stabilisce lo standard minimo di comfort.

Relativamente ad ambienti racchiusi da membrane, che generalmente presentano un fattore di trasmissione luminosa prossimo al 25%, si ottiene, se consideriamo un cielo tipo CIE all'esterno che produce 5.000 lux su superficie orizzontale, un illuminamento interno pari a 750 lux, livello adeguato anche per attività di precisione. Ciò significa che le membrane possono consentire ottimi livelli di comfort visivo, anche in ambienti che richiedono particolari prestazioni, dovute alle attività presenti e previste dal progetto.

La *distribuzione delle luminanze* deve essere tale che la differenza tra la zona nella quale si svolge il compito visivo e quelle immediatamente vicine non deve scendere al di sotto di uno step nella scala degli illuminamenti⁵³. Quando la fonte di luce è naturale, l'uniformità di luminanza è funzione del rapporto tra il minimo ed il massimo *fattore di luce diurna* rilevabile nell'ambiente, che non deve essere maggiore di **0.16**⁵⁴.

Il limite superiore generalmente ammesso per il valore di luminanza assoluta di una superficie è di circa **1500 cd/m²**; tuttavia, norme e standard nazionali o internazionali possono indicare valori di riferimento variabili tra 400 e 4000 cd/m², in funzione delle condizioni specifiche. Tali valori dipendono dall'angolo di visuale: maggiore è l'angolo, più il valore di luminanza ammissibile aumenta, sia per illuminazione diretta che diffusa.

L'*abbagliamento* è la sensazione visiva prodotta da elevato gradiente di luminanza proveniente da superfici all'interno del campo visivo, e viene distinto in molesto (*discomfort glare*), che provoca discomfort senza ridurre la capacità visiva, e debilitante (*disability glare*), che riduce anche la capacità visiva dell'utente.

⁵² Cfr. UNI EN 12464-1:2004, *Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni*.

⁵³ *Ivi*

⁵⁴ *Ivi*

L'abbagliamento prodotto da fonti di luce naturale può essere determinato attraverso l'indice di abbagliamento *DGI*, definito come⁵⁵:

$$DGI = 10 \log \sum_{j=1}^n 0.48 \frac{L_{s,i}^{1.6} \Omega_{s,i}^{0.8}}{L_{med} + 0.07 \Omega_{tr}^{0.5} L_{med,tr}}$$

con:

$L_{s,i}$: luminanza della singola superficie luminosa primaria o secondaria

$\Omega_{s,i}$: angolo solido sotteso dall'osservatore

L_{med} : luminanza media di tutte le superfici che rientrano nel campo visivo

$L_{med,tr}$: luminanza media delle superfici trasparenti

Ω_{tr} : angolo solido sotteso dall'osservatore.

I criteri di valutazione dell'abbagliamento sono indicati dalla norma rispetto alla scala di tolleranza (*Appena percettibile*: 16-18, *Accettabile*: 20-22, *Fastidioso*: 24-26, *Intollerabile*: 28), e i valori limite del DGI sono **21** nei locali dove le attività richiedono un compito visivo più accurato e **23** negli altri.

E' però necessario sottolineare che, dalla normativa europea citata, attualmente non si considera affidabile l'indice DGI per valutare il fenomeno dell'abbagliamento.

Le principali fonti di abbagliamento, che devono essere evitate in una strategia di buona illuminazione naturale, possono essere costituite da:

- visione diretta del sole o della volta celeste attraverso le aperture
- riflesso del sole o del cielo su una superficie riflettente esterna
- contrasto di luminanza eccessivo tra una parte trasparente / traslucida ed una opaca delle pareti di chiusura
- presenza di superfici interne altamente riflettenti che creano contrasti di luminanza troppo elevati in relazione alle superfici adiacenti.

In relazione al colore della luce naturale la norma non prescrive alcuna limitazione, mentre per le fonti artificiali vengono definite tre fasce in funzione della *temperatura di colore*: calda (minore di 3300 K), intermedia (tra 3300 K e 5300 K), fredda (superiore a 5300 K). Attualmente⁵⁶ sono previsti *limiti inferiori* di temperatura di **4000, 5000 e 6000 K** soltanto nei locali dove il compito visivo diventa critico, soprattutto nell'apprezzamento delle tonalità di colore.

⁵⁵ *Ivi*

⁵⁶ *Ivi*

Nello specifico, in questa parte della ricerca si forniscono dati fisici per mettere in evidenza i parametri con cui verificare l'efficienza dei materiali tessili, nell'applicazione in sistemi chiusi, relativamente al benessere visivo. Nello studio delle relazioni interno - esterno che si verificano nelle chiusure a membrana pretesa, e quindi dell'analisi termo-fisica degli involucri tessili, oltre ai già citati fattori presenti nella norma, i meccanismi della fisica tecnica da considerare sono l'irraggiamento solare e i fattori di trasmissione, riflessione e diffusione del flusso luminoso, quindi le modalità di passaggio dei flussi termici e luminosi tra esterno ed interno:

α_L = fattore di assorbimento luminoso [%], che rappresenta il rapporto tra il flusso luminoso assorbito da una superficie e il flusso luminoso incidente.

ρ_L = fattore di riflessione luminosa [%], che rappresenta il rapporto tra il flusso luminoso riflesso da una superficie e il flusso luminoso incidente.

τ_L = fattore di trasmissione luminosa [%], che rappresenta il rapporto tra il flusso luminoso trasmesso da una superficie e il flusso luminoso incidente.

α_G = fattore di assorbimento solare [%], che rappresenta il rapporto tra il flusso termico assorbito da una superficie e il flusso luminoso incidente.

ρ_G = fattore di riflessione solare [%], che rappresenta il rapporto tra il flusso termico riflesso da una superficie e il flusso luminoso incidente.

τ_G = fattore di trasmissione solare [%], che rappresenta il rapporto tra il flusso termico trasmesso da una superficie e il flusso luminoso incidente.

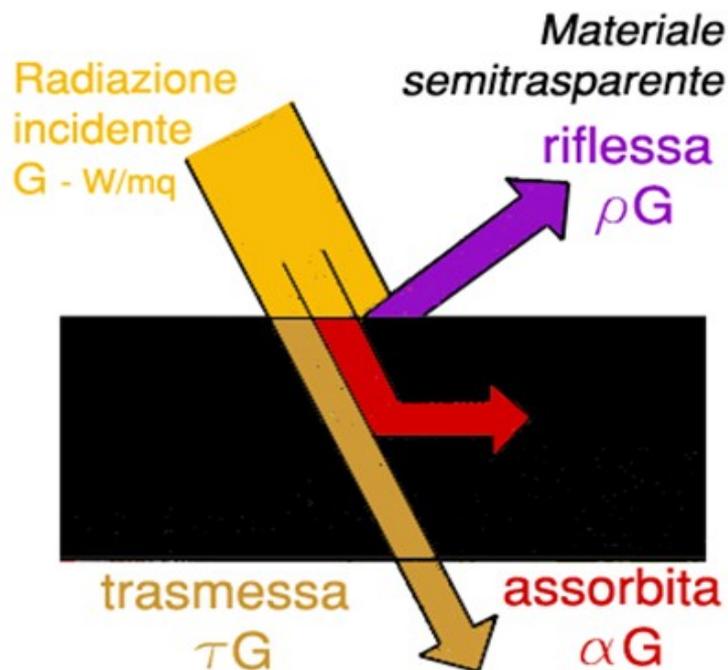


Figura 29. Meccanismi di passaggio del flusso luminoso attraverso una superficie.

Un fattore particolarmente importante per la valutazione delle prestazioni relative all'utilizzo di energia solare, e quindi utile per valutare le prestazioni energetiche delle chiusure trasparenti, è la *trasmissione solare* (o fattore solare g , chiamato anche **SHGC**: *solar heat gain coefficient*), che indica più precisamente il rapporto tra la radiazione solare incidente su un mezzo e l'energia trasmessa dallo stesso, la cui valutazione deve essere pesata e mediata rispetto all'intero spettro solare tra i 300 e i 2500 nm, che include anche la radiazione ultravioletta ed infrarossa rispetto allo spettro luminoso che include solo la parte visibile. La *trasmissione* e la *riflettanza luminosa* (o fattore di trasmissione luminosa) sono fondamentali per valutare gli aspetti visivi e di regolazione dei sistemi di controllo dell'illuminazione.

distribuzione della luminanza (candele/mq)

		cielo sereno		cielo nuvoloso	
ESPOSIZIONE	NORD	460	NORD	290	
	NORD-EST	500	NORD-EST	300	
	EST	550	EST	310	
	SUD-EST	460	SUD-EST	320	
	SUD-EST	1000	SUD-EST	300	
	SUD-OVEST	4300	SUD-OVEST	270	
	OVEST	1400	OVEST	280	
	NORD-OVEST	440	NORD-OVEST	310	

Variazione della luminanza in funzione dello stato del cielo per diverse esposizioni.

RIFLETTANZA (intensità riflessa / intensità incidente)			
COLORE	%	COLORE	%
bianco	70-85	rosa	45-60
grigio	25-40	rosso	25-35
giallo	65-75	rosso scuro	10-20
marrone	10-25	celeste	30-55
verde chiaro	30-55	bleu	10-25
verde scuro	10-25	nero	5

Valori medi della riflettanza in relazione alla colorazione superficiale.

Figura 30. Tabelle con valori di luminanza e riflettanza luminosa. (Fonte: Marocco, Marcello, Orlandi, Fabrizio, *Qualità del comfort ambientale*, Librerie Dedalo, Roma, 2000)

Per considerazioni di tipo energetico è necessario stimare la quantità di trasmissione "direzionale - emisferica", mentre per valutazioni sulla illuminazione è sufficiente considerare le caratteristiche bidirezionali. Un parametro utile per la comparazione tra materiali è la *trasmissione per radiazione diffusa* t_{hh} , che può essere assimilata ad una trasmittanza media su scala annuale, indipendente dalle

variazioni di angolazione del raggio incidente, dall'orientamento e dalla pulizia della superficie del materiale⁵⁷.

Altri parametri importanti per gli aspetti trattati sono:

T-UV = trasmissione dei raggi Ultravioletti [%], che rappresenta il rapporto percentuale fra la radiazione dello spettro ultravioletto trasmessa dalla superficie e quella incidente su di essa. Minore è la percentuale di trasmissione, maggiore è la durabilità del materiale, in quanto le membrane all'azione dei raggi UV subiscono il fenomeno dell'invecchiamento e in alcuni casi dell'ingiallimento del tessuto.

ε = emissività [%], che rappresenta il rapporto tra radiazione emessa dalla superficie e radiazione emessa dal corpo nero alla stessa temperatura T e ha un valore compreso tra: $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

U (o K) = trasmittanza termica [W/mq K], che rappresenta la capacità isolante di un elemento. Dato un fenomeno di trasmissione di calore in condizioni di regime stazionario, essa misura la quantità di calore che nell'unità di tempo attraversa un elemento strutturale della superficie di 1 m² in presenza di una differenza di temperatura di 1°C tra l'interno e l'esterno. Definita anche dall'inverso della somma delle resistenze termiche (R) degli strati della chiusura e delle resistenze superficiali dovute a fenomeni di conduzione ed irraggiamento.

Ra (o IRC) = resa cromatica [%], che misura quanto naturali appaiono i colori degli oggetti illuminati da una data sorgente (o superficie). Essa rappresenta la "fedeltà" con cui un sistema di illuminazione è in grado di restituire all'osservatore il colore delle superfici presenti nel campo visivo. E' stato dimostrato che la piena funzionalità dell'apparato visivo umano si realizza in condizioni analoghe a quelle che si verificano con la luce del sole. Pertanto, una resa cromatica elevata indica una certa fedeltà alla resa della luce naturale. Al crepuscolo l'illuminamento può variare nell'intervallo compreso tra 500 e 100 lux, mentre la temperatura di colore della luce è di circa 2.000 K. In pieno giorno, invece, i livelli di illuminamento possono arrivare a 100.000 lux e la temperatura di colore a 6.000-7.500 K.

⁵⁷ Cfr. Altomonte, Sergio, *op. cit.*, p. 121.

Temperatura di colore e resa cromatica sono grandezze fotometriche qualitative fondamentali per valutare la percezione visiva di un ambiente.

Se una membrana è traslucida e selettiva (colorata) altera il colore della luce. Per esempio una tenda gialla lascia filtrare una luce gialla e modifica i colori come un vetro giallo. Trovare i valori della resa cromatica di una membrana è complicato, ma in genere si può paragonare a vista il colore della membrana con quello di un vetro e usare per la membrana il valore di Ra relativo a quel vetro.

Infine, insieme all'applicazione di tali parametri fisici, per costruire una strategia efficace di illuminazione naturale si potrebbero prevedere alcuni accorgimenti in fase progettuale, ovvero:

- una *superficie trasparente ampia*, piuttosto che una serie di piccole finestre, che genera minori effetti di abbagliamento in quanto aumenta il livello di adattamento alla luce dell'occhio e diminuisce il contrasto di luminanza e la sensazione di disturbo visivo ad esso associata;
- *ambienti protetti dalla luminanza* della volta celeste, schermando la superficie trasparente / traslucida tramite un elemento deflettente (light self, pensiline orizzontali);
- uno *spazio intermedio* tra interno ed esterno, in grado di diffondere la luce (atrio, serra, buffer zone);
- un *minimo contrasto* tra le pareti perimetrali e le superfici traslucide, aumentando il coefficiente di riflessione dei muri o la componente indiretta di illuminazione naturale con colori chiari per le superfici interne.

Le proprietà termo-ottiche fin qui trattate sono indicate, per ciascuno dei tessuti tecnici analizzati, nella successiva tabella 2.a, che consente un facile e veloce confronto tra i diversi materiali. La tabella, tuttavia, è preceduta da alcune importanti considerazioni sulle implicazioni della luce relativamente al raggiungimento di una generale condizione di comfort ambientale.

Superficie	α_s	ϵ
Alluminio		
lucido	0.09	0.03
anodizzato	0.14	0.84
in foglio	0.15	0.05
Rame		
lucido	0.18	0.03
ossidato	0.65	0.75
Acciaio inossidabile		
lucido	0.37	0.60
opaco	0.50	0.21
Metalli placcati		
Ossido di nickel nero	0.92	0.08
Cromo nero	0.87	0.09
Calcestruzzo	0.60	0.88
Marmo bianco	0.46	0.95
Laterizio rosso	0.63	0.93
Asfalto	0.90	0.90
Vernice nera	0.97	0.97
Vernice bianca	0.14	0.93
Neve	0.28	0.97
Pelle umana (razza caucasica)	0.62	0.97
Membrane plastiche	0.12-20	0.80

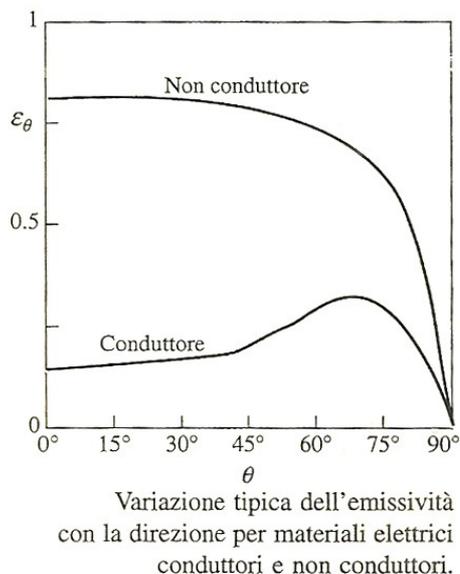


Figura 31. Valori e variazione tipica di emissività, confrontati per diversi materiali. (Fonte: Yunus, A. Cengel, "La trasmissione del calore per irraggiamento", CAP. 14 in: *Termodinamica e trasmissione del calore*, McGraw-Hill, Milano, 1998)

2.2.2 Le ricadute del controllo dei flussi luminosi sugli aspetti termici e acustici. Parametri prestazionali

Nel valutare le ricadute dei flussi luminosi sul comfort ambientale degli spazi confinati, si è ritenuto utile affrontare quegli aspetti che più degli altri sono influenzati dalla tipologia di involucro edilizio impiegata, che, nel caso delle membrane, sono relativi al benessere termico (affrontati attraverso il richiamo a grandezze quali la trasmittanza termica **U** e i meccanismi di sfasamento e attenuazione termica φ_a e **fa**) e acustico (affrontati attraverso il richiamo al fattore di riduzione del suono **Rw**). Sinteticamente, i fattori limitanti e caratterizzanti le condizioni di benessere termogrometrico sono i livelli di *temperatura ed umidità* dell'aria e dei componenti edilizi, la *radiazione solare* e la *ventilazione*; quelli del benessere visivo sono rappresentati invece dai livelli di *intensità e gradazione di luce naturale e artificiale*, del *panorama*, dall'assenza di fenomeni quali *l'abbagliamento e il contrasto*; quelli relativi alle esigenze acustiche sono, infine, definiti dai *suoni* e dai *rumori*⁵⁸.

Il livello prestazionale in termini di efficienza energetica dei sistemi di involucro viene valutato in base alla loro rispondenza ai *requisiti energetici* definiti dal D.Lgs 192/2005 e dal D.Lgs 311/2006. Per gli involucri edilizi opachi vengono

⁵⁸ Cfr. Altomonte, Sergio, *op. cit.*, p. 121.

identificati due parametri energetici: la *trasmissione termica* (i cui valori limite variano in base alla zona climatica e all'anno di realizzazione dell'intervento) e la *massa superficiale*. Per la climatizzazione estiva, invece, i due decreti sopra citati introducono due concetti, al fine di limitare gli effetti delle oscillazioni giornaliere delle temperature esterne e di ridurre il fabbisogno energetico, la *massa superficiale* (M_s), intesa come “*massa per unità di superficie della parete opaca compresa la malta dei giunti, esclusi gli intonaci, espressa in kg/mq*” - stabilendo un valore minimo di **230 kg/mq** per le chiusure di edifici in località con un'irradiazione sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, maggiore o uguale a 290 W/mq – e l' *inerzia termica*, definita come “*capacità di un materiale di smorzare e sfasare l'onda termica*”, che influenza in maniera sostanziale il comportamento energetico dinamico di un involucro edilizio e può essere quantificata attraverso due parametri prestazionali: lo *sfasamento temporale* φ_a e il *fattore di attenuazione* f_a dell'onda termica.

Il fattore di sfasamento dell'onda termica (φ_a) è il ritardo (in ore) che esiste fra l'oscillazione del flusso termico che passa attraverso la superficie interna della parete e l'oscillazione della temperatura nella superficie esterna. Un elevato sfasamento permette di ritardare i flussi termici in ingresso verso le ore serali.

Il fattore di attenuazione dell'onda termica (f_a) è il rapporto tra la trasmissione termica periodica e la trasmissione termica in condizioni stazionarie, U ; il prodotto di f_a per U fornisce la trasmissione termica dinamica, in regime variabile.

Le normative italiane precedentemente citate impongono un valore minimo di massa per unità di superficie delle chiusure opache localizzate in aree climatiche con una notevole irradiazione, che garantisce uno sfasamento ed un'attenuazione nella trasmissione del calore accettabili, ma impone l'utilizzo di una gamma ristretta di materiali e tecnologie, generalmente di tipo tradizionale. Materiali, sistemi e componenti leggeri, assemblati a secco, facilmente reversibili e manutenibili, in cui le prestazioni energetiche dipendono dalle caratteristiche fisiche dei singoli strati che li compongono, quasi mai presentano una massa superficiale rispondente al valore minimo definito dalla normativa. Per rispondere a questa esigenza, lo stesso D.lgs 192/2005 prevede che “*gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di massa superficiale delle pareti opache, possono essere raggiunti, in alternativa, con*

l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare...". Il Decreto Legislativo delega totalmente al singolo progettista la scelta di metodologie e strumenti adatti. Valori indicativi del fattore di attenuazione e dello sfasamento, tabulati in funzione della tipologia di parete, della trasmittanza e della massa frontale, sono riportati nella Norma UNI 10375:199524 o sono ricavabili mediante un'equazione, contenuta nella norma UNI EN ISO 13786:2008, basata sui valori di densità, calore specifico, conduttanza termica, spessore e ordine degli strati di cui è composta la parete. Tali metodologie di calcolo risultano però complesse e difficilmente applicabili per materiali e sistemi innovativi non tabulati all'interno della norma.

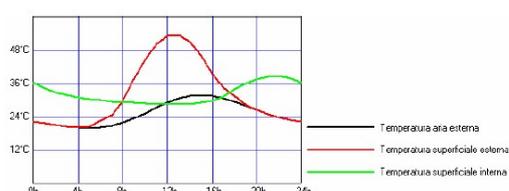
Tra le recenti ricerche sull'argomento, nel *Best practice Sheet, Non-massive structures for buildings* del *ProEcoPolyNet*⁵⁹ del 2007 si afferma che il controllo ottimale del carico estivo *"può essere ugualmente ottenuto utilizzando pareti non massive molto innovative, effettuando una corretta scelta dei materiali da costruzione (specialmente i materiali per l'isolamento termico) e una corretta distribuzione degli strati in ogni singola struttura"*. Le tecnologie stratificate a secco, infatti, oltre a permettere una grande flessibilità e l'impiego di bio-materiali, sono in grado di contribuire in modo significativo al controllo delle condizioni ambientali. Nello stesso documento viene inoltre introdotto l'*"Energy Performance"*, un coefficiente in grado di definire il livello delle prestazioni energetiche di un involucro stratificato a secco che dipende da tre parametri: la *trasmittanza termica*, lo *sfasamento* e l'*attenuazione* della trasmissione del calore. Anche nel Protocollo Itaca Sintetico per gli edifici residenziali nel sottocriterio *inerzia termica* il coefficiente di sfasamento ed il fattore di attenuazione vengono definiti come *"indicatori di prestazione dell'esigenza di mantenere condizioni di comfort termico negli ambienti interni nel periodo estivo, evitando il surriscaldamento dell'aria"*. Secondo il Protocollo Itaca, che impone la rispondenza al requisito minimo di massa superficiale previsto dal D.Lgs 311/2006, i due *"indicatori di prestazione"* devono essere calcolati secondo il procedimento descritto dalla Norma UNI EN ISO 13786:2008 e pesati rispetto all'area delle superfici opache e alla loro esposizione

⁵⁹ ProEcoPolyNet, *Best Practice Sheet, Non-massive structures for building*, 2007 (www.proecopoly.net/info).

rispetto ai punti cardinali. Il livello di soddisfacimento di entrambi i parametri del sottocriterio inerzia termica è verificato in base ad una scala di valutazione. Anche in questo caso, però, la strategia di riferimento consigliata dal Protocollo Itaca è l’*“impiego di murature pesanti di involucro, caratterizzate da una elevata capacità termica e una bassa conduttività termica”*, mentre non sono fornite indicazioni specifiche né strumenti per verificare l’inerzia termica di involucri edilizi leggeri, con una massa superficiale inferiore a 230 Kg/mq.

Località: Milano
Esposizione: Sud
 $\alpha=0.6$

Parete pesante	
Massa superficiale:	259,0 kg/m ²
Trasmittanza:	0,9530 W/m ² K
Fattore di attenuazione:	0,3060
Sfasamento:	9h 24'



Parete leggera	
Massa superficiale:	87,4 kg/m ²
Trasmittanza:	0,1845 W/m ² K
Fattore di attenuazione:	0,1261
Sfasamento:	12h 24'

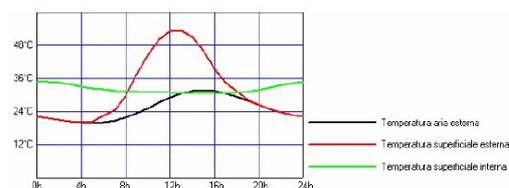


Figura 32. Confronto tra i valori del fattore di attenuazione e sfasamento di una parete leggera e una pesante. (Fonte:)

Il comportamento delle facciate tessili ai flussi termici e acustici, insieme con altri aspetti del comfort ambientale come la tenuta all'acqua e la qualità dell'aria, è strettamente correlato agli aspetti precedentemente analizzati relativamente alla percezione visiva (in particolare riguardo ai sistemi di isolamento di chiusure a membrana pretesa, che consentono di raggiungere valori di trasmittanza termica prossimi a quelli delle chiusure opache o dei componenti finestrati ad alto isolamento). Pertanto risulta utile affrontare brevemente le tematiche connesse alla trasmissione dei flussi fisici che attraversano gli involucri.

Le prestazioni termo-igrometriche dei sistemi a membrana pretesa difficilmente possono essere comparate con quelle offerte da elementi costruttivi massimi, infatti la resistenza conduttiva dello strato interno di una membrana, costituita ad esempio in fibra di vetro/ptfe, è pari a 0,0042 contro 0,15 del calcestruzzo e 0,01 del vetro. In effetti, una membrana in trazione è una sottilissima pelle che non possiede la capacità di smorzare gli effetti conseguenti alla

fluttuazione delle temperature esterne. Ogni cambiamento di temperatura sulla faccia esterna della membrana, dovuta a moti convettivi e radianti, è legato in modo quasi istantaneo a variazioni sulla sua faccia interna. Inoltre, le membrane presentano bassissima inerzia termica (il valore della trasmittanza termica può variare tra 6 e 5,7 W/mq K, per una membrana singola) e ridotta proprietà isolante, e poiché i tessuti rivestiti sono idrorepellenti le membrane sono soggette frequentemente ai fenomeni di condensa, favorendo la proliferazione di macchie e scolorimento, e riducendone la vita di esercizio.

Queste problematiche sono state affrontate da numerosi studi e ricerche, ed oggi si può affermare che diversi sono i sistemi in grado di ottenere involucri tessili che rispondono efficacemente ad esigenze di benessere termo-igrometrico, in particolare grazie a sistemi multistrato costituiti da camere d'aria o materiali traslucidi isolanti e schiume, o combinazioni di differenti accorgimenti tecnici. Tra gli involucri multistrato i più diffusi sono quelli a doppio strato di membrana tessile: l'intradosso della membrana strutturale esterna è rivestito da uno strato addizionale e fra questo e la membrana più interna, che costituisce lo strato visibile internamente, viene lasciata una lama d'aria di uno spessore che può variare fra i 100 e i 500 mm.

Vi sono poi le membrane isolate, costituite da uno strato di materiale isolante a bassa densità inserito tra la pelle strutturale esterna e la pelle interna, che può essere collegato in modo diretto alla pelle strutturale, sospeso a essa, o appoggiato sulla pelle interna, preferendo soluzioni che evitano il contatto diretto con lo strato strutturale, perché semplificano la fase di assemblaggio e di pretensionamento della tensostruttura.

Il controllo della condensa invece può essere ottenuto con l'inserimento di barriere al vapore opache o metallizzate, a scapito però della trasparenza. E' importante sottolineare che anche la ventilazione deve assumere un ruolo strategico: fondamentali sono le parti apribili dell'involucro, attraverso cui favorire l'ingresso dell'aria fresca esterna ai livelli inferiori, trasportando quella surriscaldata verso l'alto, secondo il flusso naturale dei moti convettivi interni. Durante il periodo invernale, invece, l'immissione di aria esterna dovrebbe essere ridottissima, così da diminuire le dispersioni di calore, mentre sarebbe opportuno, impiegando per

esempio ventole de-stratificanti, mescolare i diversi flussi d'aria stratificati nell'ambiente interno.

Il *comfort acustico* all'interno delle tensostrutture a membrana è un altro aspetto problematico di tali sistemi chiusi leggeri. Infatti, le tecniche che si applicano normalmente agli edifici tradizionali non trovano lo stesso riscontro nelle strutture tessili. La norma⁶⁰ considera indirettamente che un *livello di pressione sonora istantanea* di picco superiore a **120 dB(A)** genera danni irreversibili.

La qualità sonora di un ambiente può essere espressa sinteticamente da due parametri principali: *il livello di inquinamento acustico e il tempo di riverberazione*. Per inquinamento acustico si intende⁶¹ «l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo e alle attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi», ed il suo *valore limite di immissione assoluto*⁶² dipende dalla destinazione d'uso del territorio e dal tempo di riferimento, diurno (6.00 – 22.00) e notturno (22.00 – 6.00)⁶³. Per ogni classe, ad esclusione della VI, il *valore limite di immissione differenziale*⁶⁴ è pari a 5 dB(A) per il periodo diurno, e 3 dB(A) per il periodo notturno. Si definiscono poi i *valori di qualità*⁶⁵, funzione della classe e del tempo, come i livelli di rumore che possono considerarsi di comfort uditivo⁶⁶. Nel caso in cui la sollecitazione acustica non è inquinante ed il livello di rumore ambientale è al di sotto dei valori limite, la qualità

⁶⁰ Cfr. UNI ISO 226:2007, *Acustica. Curve normalizzate di egual livello di sensazione sonora*. Nella norma le curve isophon si limitano al valore di 120 dB.

⁶¹ Cfr. art.2 Legge 26 ottobre 1995 n.447, *Legge quadro sull'inquinamento acustico*.

⁶² *Ibidem*

⁶³ Cfr. D.P.C.M. del 1 marzo 1991, *Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno*.

⁶⁴ Cfr. art.2 Legge 26 ottobre 1995 n.447.

⁶⁵ *Ibidem*

⁶⁶ Cfr. Tabella D del D.P.C.M. 14 novembre 1997.

dell'ascolto è data dal *tempo di riverberazione*⁶⁷, che è funzione della frequenza e del volume dell'ambiente.

Cl.	Tipo	Limite		Qualità	
		Diurno	Notturmo	Diurno	Notturmo
I	Aree particolarmente protette: aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate al riposo ed allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, ecc.	50 dB	40 dB	47 dB	37 dB
II	Aree destinate ad uso prevalentemente residenziale: aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali ed artigianali	55 dB	45 dB	52 dB	42 dB
III	Aree di tipo misto: aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici	60 dB	50 dB	57 dB	47 dB
IV	Aree di intensa attività umana: aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali; le aree con limitata presenza di piccole industrie	65 dB	55 dB	62 dB	52 dB
V	Aree prevalentemente industriali: aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni	70 dB	60 dB	67 dB	57 dB
VI	Aree esclusivamente industriali: aree esclusivamente interessate da attività industriali e prive di insediamenti abitativi	70 dB	70 dB	70 dB	70 dB

Classificazione del territorio in funzione dell'inquinamento acustico

Tra le sperimentazioni ed applicazioni effettuate su questo tema, le membrane multistrato hanno dimostrato notevoli risultati, presentando attenuazioni sonore che si aggirano fra i 5 e i 10 dB per frequenze inferiori ai 500 Hz. In alcuni lavori sperimentali⁶⁸, è stato ipotizzato che, attaccando piccoli pesi sulle membrane,

⁶⁷ Cfr. UNI EN ISO 3882-2:2008, *Acustica. Misurazione dei parametri acustici negli ambienti. Parte 2: tempo di riverberazione negli ambienti ordinari.*

⁶⁸ Membrane multistrato in fibra di vetro e PTFE sono state usate estensivamente per affrontare i problemi di riverberazione in numerose grandi strutture, come lo Spaceship Earth nell'Epcot Center (Orlando, FL), Hubert H. Humphry Metrodome (Minneapolis, MN), RCA Dome (Indianapolis, IN), Georgia Dome (Atlanta, GA) e il Denver International Airport (Denver, CO).

è possibile migliorare il comportamento acustico alle basse frequenze (inferiori ai 300 Hz), con un impatto negativo minimo sulla trasparenza del materiale. Le membrane appesantite, denominate MAW (*Membrane with Additional Weights*), incrementano il loro potere fonoassorbente di circa 5-11 dB ulteriori. Queste ricerche hanno inoltre evidenziato che, con membrane pretensionate, le attenuazioni sonore alle alte frequenze (intorno ai 700 Hz) sono inferiori rispetto a quelle tipiche delle strutture non pretensionate. Se la camera d'aria interposta fra gli strati tessili di una membrana multistrato è caratterizzata da uno spessore che non supera i 100 mm, le vibrazioni della membrana provocate dai pesi addizionali vengono frenate dall'aria, che si comporta come una molla, e l'effetto finale consiste in una riduzione del potere fonoassorbente dovuto all'applicazione dei pesi. Per rendere più performanti le membrane appesantite, la camera d'aria deve avere uno spessore di almeno 500 mm. Nel caso della Gaudi Musical Dome, costruita in Germania nel 1995, è stata associata alla membrana esterna di poliestere Tipo V rivestito con PVC una membrana interna costituita da un tessuto di poliestere Tipo III, spalmato con PVC e distanziato dal primo da 50 a 250cm. Il valore medio di assorbimento acustico della copertura ottenuto è di 34 dB. Non è da trascurare, infine, *l'effetto rimbombo* che si produce sull'involucro tessile, e molta attenzione deve essere rivolta a una corretta integrazione tra struttura e impianti meccanici, onde evitare fenomeni vibrazionali locali che possono propagarsi attraverso la struttura, creando riverberi sulla membrana.

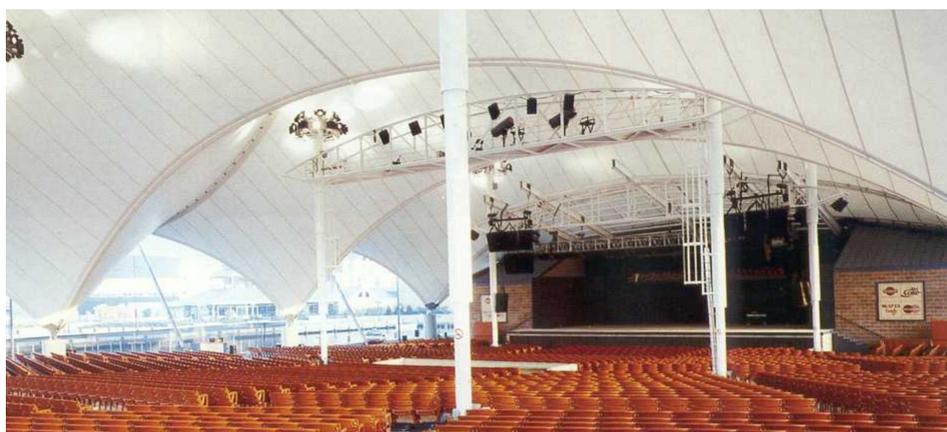


Figura 33. Interno della Gaudi Music Hall. (Fonte: Saboia De Freitas C., *Architettura sostenibile in zone tropicali: le tensostrutture. Una scelta tecnologica*, Dottorato in TdA, Napoli, A.A.2002-2003)

Una precisazione utile è relativa ai concetti di *assorbimento acustico*, che controlla la propagazione del rumore all'interno dello stesso ambiente dove questo è generato controllando il *tempo di riverberazione*, e di *isolamento acustico*, che riduce il rumore trasmesso tra due ambienti. Il tempo di riverbero (stimato in 0.8 sec per il parlato, 1.2/1.3 sec per la musica da camera, 1.7/2.1 per un'orchestra sinfonica), dipende anche dai materiali da costruzione, in quanto un elevato coefficiente di assorbimento accorcia il tempo di riverbero. Quando un'onda sonora, emessa in un ambiente chiuso, incontra una parete, una parte della sua energia attraversa la parete, una parte viene assorbita ed una parte riflessa. Se la quantità di superficie riflettente è elevata, l'ambiente risulta molto riverberante, e al fine di ridurre la riverberazione si usano materiali fonoassorbenti di rivestimento delle superfici interne degli ambienti. Tra i tessuti tecnici studiati appositamente per il controllo acustico vi è *Quonda*, un prodotto in grado di abbinare le funzionalità tecniche, tipiche dei pannelli acustici, a quelle estetiche tipiche dei quadri; presenta uno spessore di circa 50 mm ed è realizzato con il pannello Ecoten, certificato ESA, materiali sostenibili, con marchio Trekkology. A titolo di esempio, supponendo di dover migliorare il comfort acustico di un ambiente domestico di circa 45 mq ed altezza di 2.8 m, con 5 mq di vetrate senza tende, soffitto intonacato, pavimenti in ceramica senza tappeti, con tempo di riverbero medio di 1.08 sec, con quadri Quonda di dimensioni 75 x 100 cm si hanno i seguenti risultati:

<u>N° quadri</u>	<u>Tempo Medio di riverbero</u>	<u>Giudizio</u>
0	1.08	non sufficiente
4	0.98	buono per uso domestico
7	0.92	ottimo per uso domestico
10	0.86	sufficiente per Home Theatre
20	0.73	ottimo per Home Theatre

Infine, nell'affrontare la questione del benessere ambientale, un requisito importante per gli involucri edilizi è garantire la *purezza dell'aria* e quindi l'igiene degli ambienti interni. Nel caso dei prodotti polimerici, le fonti potenziali di inquinanti chimici, soprattutto composti organici, possono essere i monomeri, i plastificanti, gli stabilizzanti, gli antimicotici e gli antibatterici, i solventi, i prodotti di reazione. Non

tutte le materie plastiche presentano lo stesso grado di pericolosità, dipendendo dalle materie prime costituenti i prodotti finiti, ma gli studi su alcuni tipi di plastiche più innovative non sono ancora così approfonditi da poter restituire un quadro tossicologico completo dei potenziali rischi associati al rilascio di sostanze inquinanti.

2.2.2.1 Nuove tecnologie per l'isolamento termo-acustico degli involucri tessili: sistemi adattivi, sistemi con isolanti traslucidi, tessuti interattivi, tessuti spacer

L'esigenza di combinare una buona illuminazione naturale diffusa ad un'elevata capacità di isolamento termico ha fatto sì che la ricerca nel settore dei tessili tecnici affrontasse il problema di concepire nuovi componenti edilizi in grado di rispondere ad entrambe le esigenze, senza compromettere i caratteri connotanti delle strutture a membrana pretesa. La trasmissione del calore attraverso un corpo, e quindi anche attraverso un involucro edilizio, dipende infatti dalla conduttività termica (λ) dei materiali di cui è composto, dallo spessore e dalla disposizione dei singoli strati, e in particolare dalla posizione dello strato isolante rispetto agli altri. I prodotti che andiamo a descrivere rispondono ad esigenze diverse, sia di tipo termico che percettivo o visivo, pertanto ognuno di essi presenta caratteristiche diverse, a seconda che si tratti di tessuti con funzioni strutturali o meramente estetiche.

In particolare, i sistemi già studiati e sperimentati per questo tipo di applicazioni possono avere funzionamento attivo o passivo. I sistemi adattivi applicano tecnologie avanzate che oggi sono disponibili anche per prodotti tessili, grazie al trasferimento tecnologico da altri settori applicativi, così come per i sistemi con isolanti traslucidi, ad esempio gli aerogel o i TIM, applicati già per le chiusure vetrate con buoni risultati in termini di comfort termico.

Infine, *tessuti interattivi* e *tessuti stampati* sono prodotti che presentano potenzialità notevoli per un rinnovato aspetto delle facciate tessili, mentre i *tessuti spacer* presentano, all'interno della loro struttura, un processo di lavorazione che permette un miglioramento del loro comportamento termico.

Sistemi adattivi

I sistemi adattivi applicano tecnologie che modificano il comportamento termico dei tessuti strutturali senza modificarne lo spessore. Siamo di fronte ad un particolare tipo di trasferimento tecnologico, che vede l'adattamento delle tecnologie per l'isolamento termico del vetro ai "tessuti ottici", su cui si applicano sostanze che modificano le caratteristiche di assorbimento, trasmissione e riflessione luminosa, incidendo sullo scambio di calore per irraggiamento. I sistemi adattivi sono così definiti perché si adattano alle condizioni esterne, ed in particolare sono suddivisi in sistemi che impiegano tessuti ottici attivi e passivi.

I *tessuti ottici* sono fibre polimeriche ricoperte di vetro, in grado di riflettere la luce meglio degli specchi metallici, recentemente prodotte grazie all'apporto di due campi molto diversi tra loro: l'industria delle telecomunicazioni e l'industria tessile. Sviluppate da Shandon Hart, ricercatore del Massachusetts Institute of Technology, le fibre possono anche essere prodotte in diversi diametri, per adattare le loro proprietà ottiche a diverse applicazioni. Hart e i suoi colleghi hanno combinato la resistenza delle fibre sintetiche con le proprietà degli specchi dielettrici, producendo una fibra che può essere intrecciata in un tessuto, per costruire filtri e schermi per le radiazioni. Gli specchi dielettrici sono fatti di strati alternati di due materiali con diversi indici di rifrazione, che danno allo specchio una particolare banda di lacuna fotonica, in modo che rifletta la luce solo in un certo intervallo di lunghezze d'onda. Gli specchi dielettrici sono comunemente usati nei sistemi di comunicazione per riflettere luce di lunghezza d'onda selezionata, ma sono molto fragili e costosi. Il gruppo di Hart ha prodotto fibre di triseleniuro di arsenico, un vetro con un indice di rifrazione pari a 2,8, e un polimero con un indice di rifrazione di 1,6, hanno depositato uno strato di vetro su ciascun lato di un foglio del polimero e arrotolato il foglio numerose volte attorno al filo di polimero. In questo modo è stata prodotta una fibra con 21 strati alternati di vetro e polimero, che è stata poi «stirata» per ottenere diametri compresi fra 175 e 500 micron. Il diametro della fibra determina lo spessore dei suoi strati dielettrici e, quindi, le sue caratteristiche di riflessione. Questo ha permesso ai ricercatori di produrre fibre con bande fotoniche diverse. Al contrario di alcuni specchi dielettrici, che funzionano solo se la luce li colpisce con il giusto

angolo, le fibre funzionano indipendentemente dalla direzione di provenienza della luce.

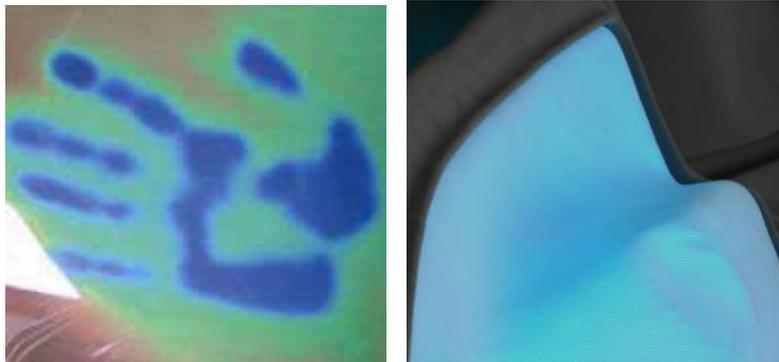


Figura 34. Tessuto termo-ottico e tessuto elettroluminescente.

Come abbiamo già accennato, i tessuti ottici possono essere attivi e passivi. Quelli *attivi* sono distinti in:

- Tessuti fotocromatici, sui quali sono applicati pigmenti fotocromatici, adottabili su diverse superfici come fibre, tessuti, pelli, plastiche, espansi, carta e inchiostri, che consentono di cambiare colore in modo rapido con l'esposizione alla luce solare, che una volta assorbita fa scomparire il colore e ritorna quello di base.
- Tessuti elettrocromatici, materiali nanocompositi ibridi organici-inorganici capaci di cambiare colore, o passare da trasparenti ad opachi, al passaggio di energia elettrica, che consentono di ottenere rivestimenti a basso costo, lunga durata e dalla vasta gamma cromatica, con dispositivi elettrocromatici basati su film e foglie flessibili a base di materiali plastici.
- Tessuti termocromatici, composti da fibre di poliestere spalmate con un composto a base di poliuretano (99%) caricato con composti organici (1%), che sono in grado di assumere tonalità e sfumature di colore diverse al variare della temperatura; la parte organica è sensibile ai grassi, agli oli e ai solventi.

I sistemi adattivi attivi sono studiati, rispetto alla loro possibilità di applicazione sulle tensostrutture, all'interno dell' ILEK (Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design) dell'Università di Stoccarda, diretto dall'ingegnere Werner Sobek. I sistemi fotocromatici consistono nell'applicazione di strati, con spessore microscopico, di sostanze fotocromatiche sulle superfici dei tessuti; sono trasparenti in assenza di luce, ma hanno la proprietà di modificare le loro strutture molecolari quando entrano in contatto con una fonte luminosa, cambiando temporaneamente il

proprio colore. Oggi si trovano sul mercato tessuti otticamente attivi per la protezione solare, ma applicazioni su tessuti strutturali per le tensostrutture ancora non sono state sviluppate.

I sistemi termocromatici, invece, si basano sull'applicazione di sostanze sensibili al calore sulle superfici tessili: i valori di conducibilità termica (U-values) di tali tessuti sono ancora da verificare secondo criteri specifici.

I sistemi elettrocromatici, già applicati sugli infissi vetrati, sono costituiti da sette strati di materiali. Il principio di funzionamento consiste nel trasporto di ioni di idrogeno o di litio da uno strato di immagazzinamento ad uno strato conduttore di ioni per poi iniettarli nello strato elettrocromatico, costituito da ossido di tungstenio (WO₃), il quale, stimolato dagli ioni, cambia le sue proprietà ottiche, passando ad assorbire la luce visibile. In altre parole, la finestra diventa scura, ritornando alla condizione di trasparenza al ricevere carica elettrica inversa. Il vantaggio principale del sistema elettrocromatico è la facilità di controllo dell'intensità e della durata dell'effetto.

I *tessuti ottici passivi*, invece, sono i cosiddetti low-E materials (*Low Emittance of IR Radiation*), materiali a bassa emissività che riducono le perdite di calore fino al 30%, durante i mesi estivi riducono gli apporti di calore solare fino al 73% e l'abbagliamento fino all'81%, incorporando un rivestimento anti-abrasione per migliorare resistenza e durata, abbinato ad uno strato a bassa emissività, che assorbe calore e lo riflette. I rivestimenti "Low - E" sono sostanze costituite da combinazioni di metalli vari che vanno applicate a materiali costruttivi con lo scopo di migliorare la loro coibenza termica senza alterazione dello spessore, infatti riflettono gran parte della radiazione infrarossa su di essi incidente. I rivestimenti "Low-E" realmente efficienti nell'evitare il passaggio del calore per irraggiamento non sono trasparenti alla luce visibile e, pertanto, la loro applicazione conduce alla perdita della traslucenza caratteristica delle tensostrutture. Esistono, però, alcune sostanze "Low-E" trasparenti all'energia solare di onde corte che permettono il passaggio di gran parte dello spettro solare, compresa la luce visibile, senza perdere la loro capacità di assorbire e riflettere la radiazione infrarossa. Lo scienziato tedesco Rainer Blum, fondatore del Laboratorio Blum di Stoccarda, sta sviluppando una tecnica per applicare questo tipo di sostanza ai tessuti strutturali,

essendo ancora necessario perfezionare la sostanza di supporto per il loro fissaggio alle membrane⁶⁹.

Sistemi con isolanti traslucidi

All'inizio degli anni ottanta, la ricerca sui nuovi materiali per l'edilizia affronta il tema degli isolanti trasparenti: una tipologia eterogenea di materiali prodotti da industrie chimiche e utilizzati per lo più nel settore dell'ingegneria aerospaziale.

I TIM (*Transparent Insulation Materials*) sono materiali che hanno proprietà termiche del tutto paragonabili a quelle dei materiali isolanti opachi pur conservando un alto valore di trasmittanza luminosa, sono quindi trasparenti o traslucidi e perciò ampiamente utilizzati per la realizzazione di involucri edilizi con particolari esigenze visive. Tali materiali, combinati a sistemi costituiti da membrane multilayer, sono in grado di fornire agli ambienti interni un'illuminazione diffusa a largo spettro limitando le elevate dispersioni termiche che generalmente caratterizzano gli involucri tessili, evitando anche eventuali fenomeni di abbagliamento e garantendo un buon livello di isolamento termico con conseguente riduzione del fabbisogno energetico primario, in particolare dell'utilizzo di energia elettrica per l'illuminazione. I TIM, brevettati per la prima volta in Germania dalla ditta Okalux, sono costituiti generalmente da materiali plastici o vetriati, trasparenti nel visibile e nel vicino infrarosso, ma opachi nel lontano infrarosso, realizzati con una particolare struttura capillare (con celle di diametro tra 1 e 2 mm) o a nido d'ape (con celle di dimensioni fino a qualche cm).

I polimeri con struttura a nido d'ape sono pannelli composti da piccoli tubicini cavi di policarbonato (PC) o polimetilmetacrilato (PMMA) a sezione circolare disposti in file parallele e protetti ai bordi. Bisogna fare una distinzione tra materiali isolanti trasparenti producibili in forma di *pannello autoportante* (generalmente prodotti da materiali plastici, policarbonato o polimetilmetacrilato, pvc) e materiali che possono essere utilizzati solo all'interno di un *pannello portante*.

I pannelli isolanti trasparenti sono applicati negli involucri architettonici in modo che la microstruttura sia perpendicolare alla facciata e quindi parallela alla direzione dell'energia solare radiante. In questo modo, nel caso ideale di assenza di

⁶⁹ Cfr. Chilton, J., Blum, R., Devulder, T., Rutherford, P., "Internal environment", in Mollaert, M. e Forster, B., *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, VRIJE Universiteit Brussel e E.C., 2004.

assorbimento e di diffusione dell'energia solare, tutta la radiazione incidente raggiunge l'altra estremità del componente indipendentemente dal numero di successive riflessioni e trasmissioni. In una situazione ideale, quindi, lo spessore dello strato di TIM non è influente sulle proprietà ottiche, ma contribuisce a migliorare notevolmente le prestazioni termiche. Nella realtà si verificano fenomeni di assorbimento, anche se minimi, che fanno sì che i TIM non risultino effettivamente trasparenti, bensì traslucidi: hanno cioè un'elevata permeabilità all'irraggiamento solare, ma non permettono una visione degli ambienti esterni. Data l'elevata fragilità dei TIM il loro inserimento in sistemi di facciata non può essere effettuato in cantiere, poiché è necessaria l'ermeticità del sistema. Inoltre vi sono dei limiti dimensionali nella produzione dei pannelli e ad un aumento delle dimensioni corrisponde un aumento esponenziale del prezzo.

Un' interessante novità nel settore degli isolanti traslucidi è costituita dagli *aerogel*: materiali costituiti per il 95-98% da aria e per il restante 2-5% da particelle di diossido di silicio (silice). Tale scarsissima densità, pari ad appena 3 kg/mc, fa sì che gli aerogel risultino i materiali più leggeri che siano mai stati prodotti. La loro trasmittanza termica è compresa tra 0,1 e 0,2 W/mqK, pari a quella dei migliori isolanti termici opachi.

Gli aerogel nascono da esperimenti svolti nel 1931 dal chimico americano Samuel Kristler che tentò di disidratare un gel di silice contenente acqua senza farlo restringere nel corso del processo. L'obiettivo era quello di sostituire il liquido contenuto all'interno del gel con aria senza che avvenisse il collasso della struttura microcellulare in silicio. Ciò fu reso possibile grazie allo sviluppo del procedimento *supercritical drying* (essiccamento supercritico), che si ottiene mantenendo il liquido contenuto nel gel di silice ad una pressione costantemente maggiore della pressione del vapore ed aumentando contemporaneamente la temperatura, fino a quando il liquido si trasforma in gas senza che le due fasi siano mai presenti contemporaneamente. In questo modo fu possibile produrre un materiale con una composizione chimica molto simile a quella del vetro ma estremamente più leggero e con caratteristiche termiche sorprendenti grazie all'elevata percentuale di aria in esso contenuta. L'estrema fragilità e la sensibilità all'umidità di tali materiali ha fatto sì che, solo negli ultimi anni - a seguito della messa in commercio di infissi

impermeabili ed ermetici, di vetri ad alte prestazioni e di camere d'aria sottovuoto - sia stata ipotizzata la possibilità di utilizzare gli aerogel di silice come isolanti traslucidi nella realizzazione di involucri architettonici ad alte prestazioni termiche e visive.

In edilizia possono essere utilizzati due forme differenti di aerogel: monolitici e granulari. Gli *aerogel monolitici* sono costituiti da lastre di spessore compreso tra 8 e 20 mm, con densità tra 3 e 500 kg/mc, e possono essere utilizzati in sostituzione delle tradizionali finestre in vetro ma, al contrario di quest'ultime, garantiscono una trasmittanza estremamente ridotta (circa 0,85 W/mqK), paragonabile a quella di sistemi di facciata opachi.

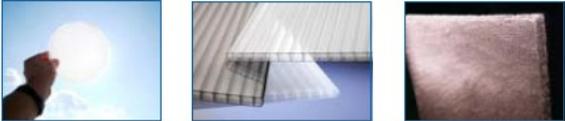
Gli *aerogel granulari* sono invece costituiti da sfere con diametro variabile compreso tra gli 8 e i 12 mm. Riempiendo con i granuli di aerogel l'intercapedine di una vetrocamera si ottengono delle prestazioni termiche estremamente elevate, ma si perde la visibilità dell'esterno. La composizione in granuli di dimensioni ridotte dà una maggiore libertà nel formato dei sistemi di involucro rispetto a quelli realizzati con aerogel monolitico. In questo caso la dimensione del modulo di facciata non dipende dalle tecnologie di produzione dell'aerogel, ma da quelle del vetro.

L'ultima novità in questo settore è il *nanogel*, dalle prestazioni estremamente elevate grazie alle dimensioni ridotte dei granuli che lo compongono, particelle sferiche con diametro compreso tra 0,5 e 4 mm, un indice di porosità del 90% ed una densità di 90÷100 kg/mc. Un sistema di facciata contenente nanogel ha una trasmissione termica sorprendentemente bassa, pari a 0,28 W/mqK.

Le membrane traslucide sono realizzabili in integrazione ai TIM nelle strutture tessili. Un sistema membranale multistrato (MMS) con proprietà meccaniche, termiche ed ottiche ottimali, è composto da uno strato esterno di membrana, TIM intermedi e una struttura di supporto. La struttura del TIM trasparente a nido d'ape mostra flessibilità meccanica nelle tre dimensioni e può essere contenuta, ad esempio, tra due film di ETFE, in modo da avere pannelli non rigidi rispetto ai più comuni pacchetti vetrati con isolanti traslucidi. La SolarNext AG/Hightex Group D-Rimsting ha sviluppato un sistema di copertura costituito da "cuscini" realizzati con fogli di EFTE, sorretti e tenuti tesi da una sottostruttura metallica, che al loro interno contengono aerogel granulare. Tale sistema di

copertura, oltre a garantire un buon livello di isolamento termico, è in grado di fornire un'illuminazione naturale zenitale eliminando i fenomeni di abbagliamento.

CONFRONTO TRA DIVERSI ISOLANTI TERMICI TRASPARENTI
(fonte: ITV di Denkendorf)



DATI FISICI	TESSILI SPACER SPALMATI (TRASPARENTI SU AMBO I LATI)	PANNELLI A CAMERA CAVA	STRUTTURA A PETTINE
SPESSORE [mm]	5 - 60	6 - 16	20 - 60 (28 - 68 con vetro)
MASSA PER UNITA' DI AREA [kg/m ²]	1,2 - 2,0	1,3 - 3,1	0,32 - 0,96 (20,32 - 20,96 con vetro)
TRASMISSIONE LUMINOSA [%]	bis 80	77 - 82	84
FATTORE DI TRASMISSIONE TERMICA [W/(K·m ²)]	3,0 - 2,2	2,6 - 3,6	1,3 - 2,2

Figura 35. Tabella di confronto tra isolanti termici. (Fonte: Fonte: Stegmaier T. et al., Architex 2008, Torino)

Gli isolanti trasparenti hanno trovato una loro efficace applicazione anche come materiali per il *riscaldamento solare*. Tale utilizzo trae la sua origine da scoperte e sperimentazioni provenienti dai settori della biologia e della zoologia. Nel corso degli anni ottanta alcuni studi condotti sugli orsi polari hanno portato alla conclusione che tali animali sono in grado di sopportare temperature fino a -70°C grazie alle particolari caratteristiche della loro pelliccia. Il pelo dell'orso bianco, infatti, non è pieno, bensì cavo, ed è in grado di captare ed incanalare la radiazione solare dal punto più esterno fino alla cute. Quest'ultima è dotata di una colorazione estremamente scura ed è quindi in grado di assorbire efficacemente l'energia termica trasmessa dalla pelliccia. In questo trasferimento di energia i raggi solari captati si riflettono sulle pareti cave generando una serie di impercettibili microvibrazioni del pelo stesso, producendo energia cinetica che contribuisce ulteriormente al riscaldamento della massa dell'animale. Le ricerche dell'istituto ITV di Denkendorf⁷⁰ sulle implicazioni della luce nei materiali tessili scaturiscono proprio da queste osservazioni. Le applicazioni 3d-textile, infatti, assumono le fibre del pelo bianco dell'orso come fonte di ispirazione per la produzione di fibre con altrettanti proprietà isolanti. Il trasferimento tecnologico, in questo caso, ha riguardato il

⁷⁰ Cfr. Thomas Stegmaier, Michael Linke, Jamal Sarsour, Petra Schneider, Matthias Schweins, Heinrich Planck, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf, "Heat and Light Management of Textile Materials for Construction", in ARCHITEX 2008, Torino, 1-2 Luglio 2008.

passaggio dalla natura alla tecnologia: la base tessile della membrana, dipinta con colori scuri, è ricoperta da un tessuto trasparente, che è flessibile e può diventare un vero e proprio collettore solare.

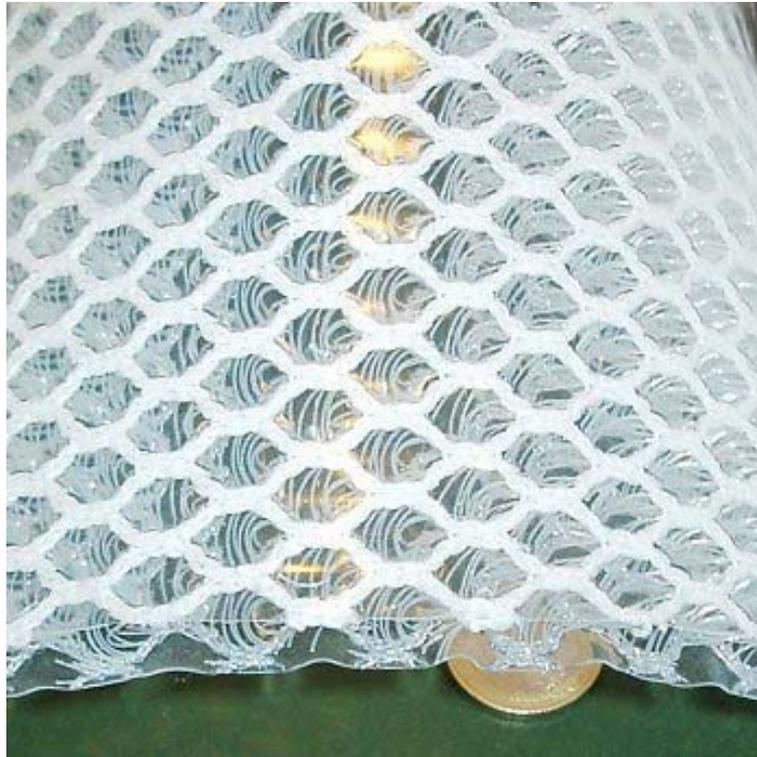


Figura 36. Tessuto termoisolante di poliestere rivestito con gomma siliconica, impiegabile come collettore solare. (Fonte: Stegmaier T. et al., Architex 2008, Torino)

Tessuti interattivi e stampati

Una tecnologia innovativa applicata ai tessuti consiste nella capacità di cambiare colore sotto il controllo di un computer, aggiungendo tempo e movimento ai motivi e ai disegni sui tessuti, che mutano lentamente sulle superfici, per fornire informazioni di vario tipo. Tra i prodotti sviluppati e diffusi in commercio, il tessuto denominato *Electric Plaid* può essere abbinato ad altre tecnologie, come sensori sensibili al tatto e alla pressione, per controllare luci o altri dispositivi elettronici, dando vita ad un tessuto completamente interattivo. La IFM (International Fashion Machine) ha brevettato tale prodotto, che si presenta come un tessuto morbido la cui particolarità consiste nella capacità di cambiare colore sotto il controllo di un computer. I tessuti interattivi possono rivestire pareti, o diventare parte integrante dell'arredamento, come elemento decorativo, e allo stesso tempo controllare le luci all'interno della stanza, diventando uno schermo o un supporto per il trasferimento di

dati. I campi di applicazione non si limitano all'arredamento, ma si avvicinano al mondo dell'arte e di diversi settori industriali, come quello militare e dell'abbigliamento. Si tratta di prodotti che vanno a modificare radicalmente l'estetica e le proprietà materiali delle superfici, creando effetti decisamente inediti ed inattesi.

I *tessuti stampati*, infine, sono quelli che ricevono l'impressione di un pattern sulla superficie con la finalità di riflettere una parte della radiazione solare, diminuendo il riscaldamento all'interno della membrana. Questo tipo di tecnologia può inoltre essere usata per aumentare il coefficiente di ombra dei tessuti o per correggere il colore della luce naturale che penetra gli ambienti racchiusi da chiusure a membrana. I risultati ottenibili con queste tipologie di prodotto sono pertanto di tipo estetico ma anche ambientale, in quanto sono in grado di incrementare il comfort termico, grazie al loro impiego come elementi di protezione ambientale.

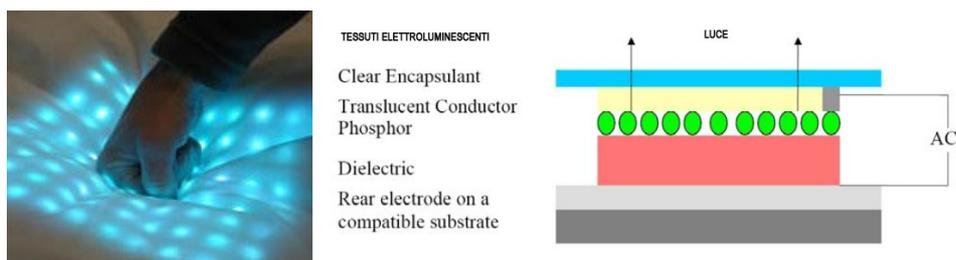


Figura 37. Tessuti interattivi ed elettroluminescenti. (Fonte: Stegmaier T. et al., Architex 2008, Torino)

Tessuti spacer

I tessuti spacer sono sottoposti ad un processo di lavorazione che impiega specifici macchinari e fasi di lavorazione complesse. All'interno della barriera di tessuto viene inserito un distanziatore termicamente e chimicamente stabile, che crea uno spessore d'aria isolante. Questa innovazione nel campo dei tessuti leggeri offre protezione termica associata ad una riduzione della fatica dovuta allo stress da eccesso di calore.

La Terrot Strickmaschinen di Stoccarda utilizza macchine perfezionate e innovative per la produzione di tessuti spazati. Il modello 13P572, diametro 34", 28E rappresenta un nuovo concetto di macchina a 8 serrature ad alte prestazioni. Le sue caratteristiche fondamentali sono: 4 piste aghi nel cilindro, 3 piste aghi nel piatto, sistema rapido di cambio del disegno sia su piatto che su cilindro. Per la produzione di tessuti spazati il modello UCC572 BW, 32" diameter, 32E è a doppia frontura

jacquard a controllo elettronico con sistema piezo-elettrico di selezione aghi. Con l'introduzione delle nuove macchine, l'industria di Stoccarda entra nel mercato dei tessuti tecnici, in crescita con l'offerta di nuovi articoli a maglia circolare. Insieme con l'Istituto Tessile tedesco, la Terrot ha sviluppato un nuovo tipo di tessuto, lo "spacer fabric" appunto: la struttura a maglia "spacer" si basa su un tessuto a doppia faccia. Il filo base è un 100% monofilamento di poliestere non testurizzato con un diametro tra 0,10 e 0,15 mm, che corrispondono a un titolo di 69- 243 dtex. In dipendenza della finezza di macchina, lo spessore del filo di poliestere testurizzato sul piatto e sul cilindro è di circa 167 dtex f 32. La spaziatura del tessuto è paragonabile alla regolazione d'altezza della piastra centrale del piatto, ciò significa che il volume e il grado di elasticità del tessuto sono in rapporto con lo spessore e la stabilità del filo base. In base alle illimitate possibilità di selezione elettronica degli aghi, sono realizzabili molti disegni di maglia. I tessuti circolari spacer possono essere usati in una vasta gamma di applicazioni, dall'abbigliamento sportivo e tecnico agli impieghi medici, imbottiture per materassi, rivestimenti per interni ecc.

I tessuti spacer presentano ulteriori vantaggi, che fanno pensare ad una possibile loro applicazione anche in campo propriamente edile, in particolare per gli involucri. Tra le proprietà più interessanti ci sono: permeabilità all'aria, peso leggero, capacità di assorbire urti, facilità di assumere forme diverse, aspetto tridimensionale, flessibilità, strato di rivestimento trasparente o di colore nero (per migliorare l'accumulo di calore), estrema resistenza alla luce solare, blocco dei raggi Ultravioletti, possibilità di riempimento d'aria fino alla pressione di 1 bar.

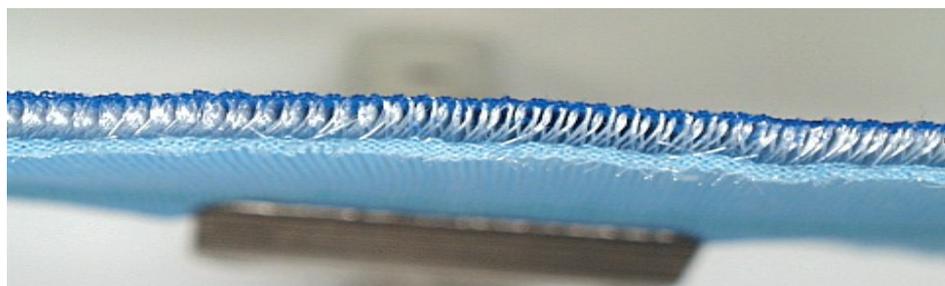


Figura 38. Tessuti spacer. (Fonte: Stegmaier T. et al., Architex 2008, Torino)

2.3 Classificazione e definizione delle proprietà ottiche delle membrane tessili

L'analisi dei materiali tessili, utile per la presente ricerca, riguarda cinque dei numerosi tessuti tecnici descritti nell'appendice dedicata allo stato dell'arte sulle membrane. La selezione è stata effettuata in base a criteri che riguardano: la maggiore diffusione sul mercato, il maggior numero di realizzazioni con involucri edilizi tessili, le migliori prestazioni in termini di comfort visivo e più in generale la rispondenza ai requisiti indicati come connotanti le chiusure a membrana pretesa, oggetto della ricerca. Pertanto, la classificazione e le proprietà ottiche e termofisiche dei tessuti tecnici saranno relative alle membrane, impiegate anche nei casi studio della ricerca, costituite da: fibre di POLIESTERE spalmate in PVC, fibre di VETRO spalmate in SILICONE, fibre di KEVLAR/CARBONIO, PTFE ESPANSO, POLIETILENE e POLICARBONATO.

Un particolare cenno al *policarbonato* è utile per sviluppare in seguito alcune considerazioni sui componenti traslucidi per chiusure edilizie, che differiscono tra di loro per prestazioni tecnologiche diverse e sono adeguati, quindi, a differenti usi ed esigenze specifiche di utenza.

Il policarbonato è un tecno-polimero dalle elevate proprietà fisico-meccaniche, un generico poliestere dell'acido carbonico. Viene impiegato in qualsiasi applicazione sostitutiva al vetro, a differenza del quale è curvabile a freddo, ed in particolare dove si richieda un'alta resistenza agli urti. Inoltre presenta una maggiore capacità di isolamento termico che consente un risparmio termico fino al 50% rispetto ad un vetro singolo. Le caratteristiche principali del materiale, che si presenta come componente rigido trasparente, sono una resistenza meccanica agli urti 250 volte superiore a quella del vetro; una leggerezza strutturale che favorisce l'utilizzo di lastre con spessori minimi; l'auto-estinguenza che non produce gas tossici durante la combustione; la notevole trasmissione luminosa che permette ampie superfici illuminanti; la facile lavorabilità che permette la formatura a freddo o la termoformatura. I policarbonati resistono agli acidi minerali, agli idrocarburi alifatici, alla benzina, ai grassi, agli oli, agli alcoli (tranne alcol metilico) e all'acqua sotto i 70°C. La trasparenza e l'assenza di colore permettono una permeabilità alla luce dell'89% nello spettro del visibile. Gli UV vengono assorbiti e causano ingiallimento,

si utilizzano perciò degli stabilizzatori come i benzotriazoli o delle protezioni applicate sulla superficie esposta agli agenti atmosferici. Inoltre, il policarbonato manifesta una riduzione della trasparenza del 10% in 5 anni. L'estrusione del policarbonato prevede temperature intorno ai 300 °C e ciò richiede macchine e stampi speciali, differenti da quelli utilizzabili per la maggior parte delle materie plastiche.

Alla luce dello studio svolto sui materiali costituenti i prodotti tessili per l'architettura, impiegabili nell' involucro edilizio in particolare come componenti verticali di chiusura, si ritiene utile mettere a sistema i dati ricavabili dall'analisi termo-fisica ed ottica dei tessili tecnici selezionati, come riportato nel grafico 2.a, relativamente ai parametri fisici esplicitati in nota, i cui valori sono ricavati da aziende di settore e ricerche scientifiche, documentate in bibliografia.

TESSILI TECNICI	PROPRIETA' TERMO-FISICHE E OTTICHE ⁷¹										
	s	ε	αG	ρG	τG	αL	ρL	τL	g	T-UV	K (o U)
Poliestere / PVC - acrilico	0.6	86	15	75	10	8	80	12	> 10	0.1	Vedi nota
	0.8	86	18	77	5	6	84	10	> 5	(resistenza	
	1.2	86	19	77	4	3	89	8	> 4	ottima)	
Fibre di vetro / PTFE - FEP	0.6	88	11	72	17	-	-	17	> 17	0.1	Vedi nota
	0.9	88	20	70	10	-	-	10	> 10	(resistenza	
Fibre di vetro/ Silicone	-	86	12	50	20-30	<12	52-	75	25-80	0.2	Vedi nota
	-	-	0-1	63	37-40	2-3	79-59	19-38	> 37	(resistenza	
PTFE espanso (Tenara)	-	-	0-1	63	37-40	2-3	79-59	19-38	> 37	1-32 (resistenza sufficiente)	Vedi nota

⁷¹ s = spessore [mm] ε = emissività [%] αG = fattore di assorbimento solare ρG = fattore di riflessione solare τG = fattore di trasmissione solare [%] αL = fattore di assorbimento luminoso ρL = fattore di riflessione luminoso τL = fattore di di trasmissione luminosa [%] g = fattore solare [%] T-UV = trasmissione ai raggi Ultravioletti [%]

K (o U) = trasmittanza termica [W/mq K]. I valori dipendono dai sistemi chiusi adottati, che negli involucri tessili sono costituiti da:

- Membrana a singolo strato: **K 5,7 W/mq K**
- Membrana a singolo strato, con strato interno in schiuma: **K 5,0 W/mq K**
- Membrane a doppio strato con fibre di materiale isolante: **K 0,2 W/mq K**
- Membrane a doppio strato con cellule riempite di aria: **K 2,8-3,0 W/mq K**
- Cuscini a doppio strato con riempimento ad aria costante: **K 2,0 W/mq K**
- Cuscini multistrato con riempimento ad aria costante: **K 2,2 - 0,8 W/mq K***

*Dati ricavati da B. Baier, "Control of Energy Flows in Multi-Layer Membrane Structures", in: Atti Techtextil-Symposium, Lyon, 1998.

Policarbonato	3-32	-	10	10	60-85	-	-	40-85	65-90	1-30 (resistenza sufficiente)	4 - 1.4
---------------	------	---	----	----	-------	---	---	-------	-------	----------------------------------	---------

Tabella 2.a

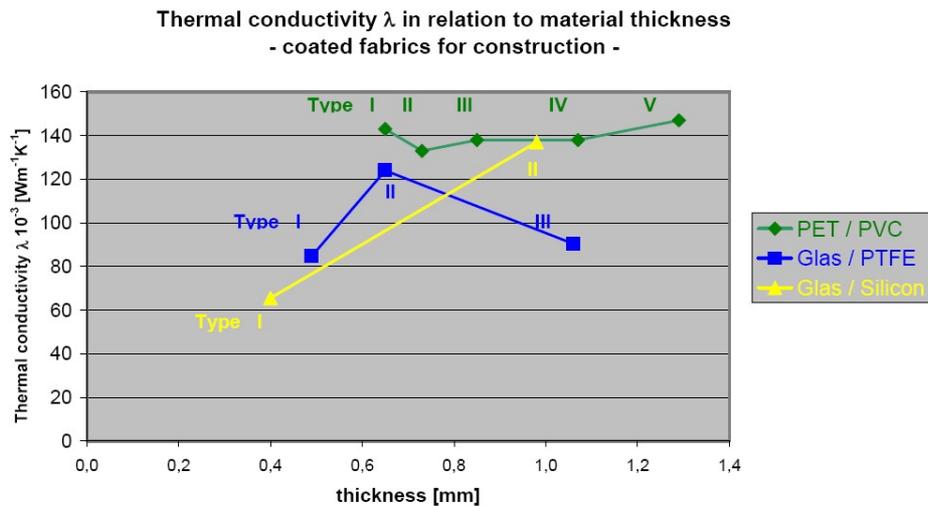
Dalla tabella 2.a è ricavabile una proposta di classificazione in base al livello di traslucidità (misurato dal fattore di trasmissione visiva τ_v) dei materiali selezionati, dove i valori percentuali dipendono da una serie di fattori:

- materiale costituente la membrana,
- numero di strati nel sistema di chiusura a membrana,
- spessore totale dell'involucro,
- angolo di incidenza della radiazione solare⁷²,
- colorazione a stampa o tinteggiatura della membrana.

Construction		U-Value (W/m ² K)	Observations indoor	application
Single membrane		5,5 – 6,0	With sun: high temperature Night: cooling	Open structures, not tempered rooms
Double membrane		2,7 – 0,8	Reduced heat conductivity	Closed rooms
Double membran with insulation		2,7 - 0,8	Reduced heat conductivity, reduced heat convection	Temperature controlled rooms
membran layers with insulation and reflexion layers		~ 0,2	Reduced heat conductivity, reduced heat convection, reduced heat radiation	Advanced energetic constructions

Figura 39. Sistemi di chiusura a membrana pretesa con differenti prestazioni in termini di isolamento termico. (Fonte: Stegmaier T. et al., Architetx 2008, Torino)

⁷² All'aumentare dell'angolo di incidenza la trasparenza diminuisce, perché aumenta la componente riflessa.
Cfr. Marocco, Marcello, Orlandi, Fabrizio, *Qualità del comfort ambientale*, Dedalo, Roma, 2000, p. 154.



U- Value: about 5,5 – 6,0 W/m²K

Figura 40. Diagramma della conduttività termica in relazione allo spessore di alcune membrane tessili. (Fonte: Stegmaier T. et al., Architex 2008, Torino)

Gli aspetti relativi ai requisiti tecnologici di riferimento per la ricerca, correlati alle questioni del controllo della forma nelle superfici membranali e delle implicazioni sulle problematiche della percezione e del benessere visivo nei sistemi tensostrutturali, strutture non convenzionali, sono stati analizzati in primo luogo attraverso la messa a sistema delle caratteristiche ottiche e termo-fisiche dei materiali tessili (come riportato in Tabella 2.a). Da questi dati, infatti, è possibile proporre la suddetta classificazione, utile per la scelta del materiale più adatto alle varie esigenze delle facciate in cui si richiedono particolari prestazioni luminose, ciò giustifica anche la scelta del parametro in base al quale i materiali vengono classificati, il fattore di trasmissione visiva τ_v . Inoltre, la scelta dei casi studio per l'elaborazione della ricerca è dipesa anche dallo studio di tali tessuti tecnici, che più degli altri si prestano a rispondere a determinati requisiti di progetto, così come indicati precedentemente.

Di seguito si riporta la classificazione proposta, relativa alle cinque membrane selezionate per la ricerca, accennando ai casi studio in cui esse sono state applicate come materiali costituenti le chiusure verticali, da sviluppare nella fase successiva della ricerca (capitolo 3). Il grado di traslucidità è definito, in base al valore percentuale di trasmissione visiva del materiale, secondo tre termini: *traslucido* (per valori che vanno dal 40% fino al 95% circa, raggiungibile solo dalle

pellicole in ETFE), *semiopaco* (per valori compresi tra il 10% e il 40%) e *opaco* (per valori che vanno dallo 0% al 10% circa).

GRADO DI TRASLUCIDITA'	MATERIALE	TRASMISSIONE VISIVA	CASI STUDIO
I° grado Traslucidi τ_v 40-95%	FIBRA DI VETRO E SILICONE	20-40% fino a 80%	AUDITORIUM ZENITH, Strasburgo 2008
	POLIETILENE E POLIESTERE	Fino al 70%	WALL HOUSE, Santiago del Cile 2007
	POLICARBONATO E KEVLAR/CARBONIO	10-50%	BASE LUNA ROSSA, Valencia 2006
II° grado Semiopachi τ_v 10-40%	POLICARBONATO E KEVLAR/CARBONIO	20-40%	INFLATABLE TEA HOUSE, Francoforte 2008
	TENARA (PTFE ESPANSO)		
III° grado Opachi τ_v fino a 10%	POLIESTERE/ PVC	8-12%	Negozi UNITEDBAMBOO, Tokyo 2003

Grafico 2.b: classificazione dei tessuti tecnici selezionati per involucri edilizi traslucidi

Altri materiali tessili ampiamente utilizzati per gli involucri edilizi presentano i seguenti fattori τ_v :

FIBRA DI VETRO E PTFE	10-17%
PVC (pellicola)	fino a 90%
ETFE	95%
TEFLON (PTFE)	35 % (con fluoropolimeri combinati a fibre di vetro) e fino al 65 %

Mentre prodotti tessili specifici per facciate, dell'azienda francese *FERRARI*, presentano i seguenti fattori τ_v :

<i>Protezione solare</i>	
PRECONSTRAINT 371 392 S	34%
PRECONSTRAINT 402 high translucency	35%
<i>Facciate</i>	
STAMISOL FT 381(da 3101 a 3130)	27-34%.

Un'ultima considerazione va fatta sul comportamento delle superfici alla luce, ovvero alle radiazioni ottiche. L'interazione tra materia e luce, infatti, è un aspetto fondamentale della percezione visiva degli ambienti, in quanto in dipendenza delle caratteristiche delle superfici e dei materiali che ci circondano, godiamo o soffriamo di una percezione visiva che può variare in maniera considerevole. Il fattore percettivo è influenzato dalla complessità delle scene che vediamo e la loro percezione viene configurata grazie a molti elementi: differenze cromatiche, di luminanza, di texture ecc...

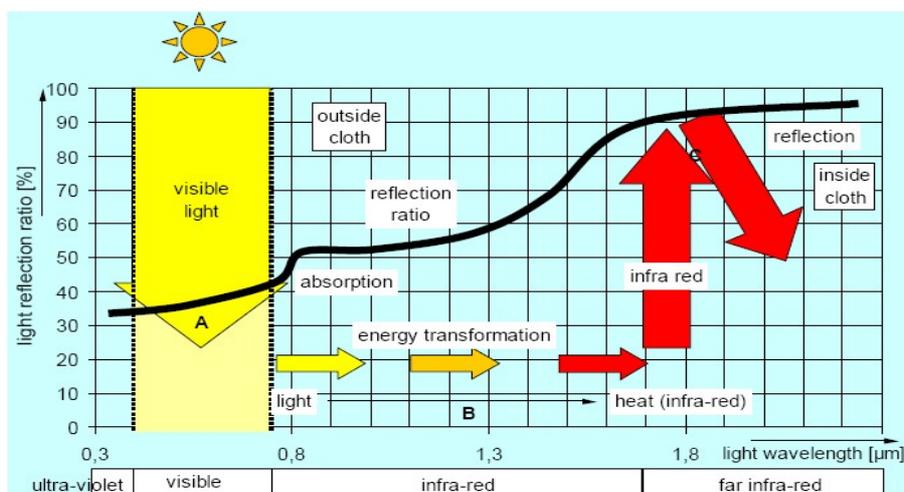


Figura 41. Comportamento dei tessuti per l'architettura in relazione al flusso solare. (Fonte: Stegmaier T. et al., Architex 2008, Torino)

Translucent polymers of ITV development:
UV and IR blocking, VIS transmission

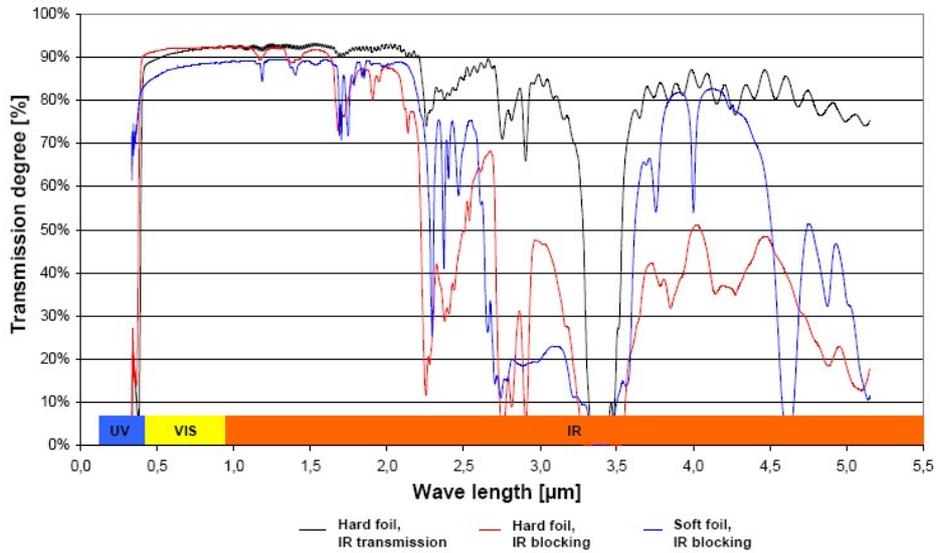


Figura 42. Diagramma della trasmissione luminosa di polimeri traslucidi nel campo del visibile, ultravioletto e infrarosso. (Fonte: Stegmaier T. et al., Architex 2008, Torino)

Translucent polymers of ITV development:
UV and IR blocking, VIS transmission

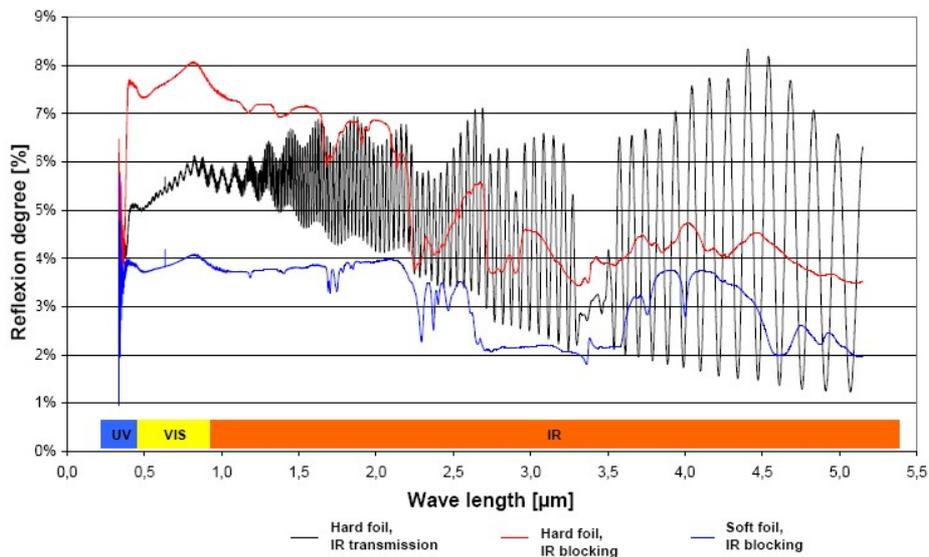


Figura 43. Diagramma della riflessione luminosa di polimeri traslucidi nel campo del visibile, ultravioletto e infrarosso. (Fonte: Stegmaier T. et al., Architex 2008, Torino)

Le superfici opache chiare sono in genere riflettenti, ovvero riflettono gran parte della luce che incide su di esse; le membrane, costituite da tessuti spalmati, sono

superfici definibili in parte lambertiane e in parte no, poiché potrebbero avere effetti riflettenti speculari che solo tramite prove effettuate in diverse condizioni di luce, con il flusso luminoso proveniente da più direzioni, possono essere realmente misurate e definite.

La *riflessione speculare* conserva il colore della luce, ciò accade ad esempio con le superfici lucide non lambertiane, che possono costituire i componenti cosiddetti “*specchianti*”. La superficie rugosa, piana ed opaca, emette invece secondo la *legge di Lambert*, che definisce una relazione molto importante tra la Luminanza e l’illuminamento: $E = \pi L$. Le superfici diffondenti (opache, lambertiane) sono superfici teoriche, caratterizzate da una distribuzione delle luminanze (emesse o riflesse) indipendente dall’angolo di osservazione. Se un raggio di luce incide su una superficie lambertiana questo viene riflesso con una data indicatrice di emissione sferica, e le intensità luminose emesse sono proporzionali al coseno dell’angolo(θ) compreso tra questa direzione e la normale al piano. Pertanto la luminanza (rapporto tra l’intensità luminosa e l’area apparente in direzione dell’osservatore) di una superficie lambertiana è costante, come indicato nella precedente relazione.

I componenti per il passaggio della luce, il cui elemento base di riferimento è la finestra, possono venire classificati rispetto: alle funzioni (illuminazione, vista e ventilazione) – alle dimensioni – alla forma – alla posizione – all’orientamento – agli elementi di controllo (schemi, filtri, ostruzioni ecc)⁷³.

Le membrane tessili possono costituire componenti cosiddetti “*riflettenti*” o “*diffondenti*” o entrambi. Infatti, se la superficie è fortemente levigata si ha principalmente il fenomeno della riflessione, altrimenti spesso le membrane spalmate diffondono la luce in maniera uniforme, permettendo il passaggio da tutte le direzioni e assicurando un livello luminoso elevato senza determinare alti contrasti.

Bisogna specificare, come illustrato nei grafici seguenti, che la superficie diffondente può esserlo sia per riflessione che per trasmissione; le superfici opache, traslucide e trasparenti, possono essere definite diffondenti in varia misura, a seconda della costituzione materiale, del colore, della tessitura ecc.

⁷³ Cfr. Rogora, Alessandro, *Luce naturale e progetto*, Maggioli, Rimini, 1997, p. 178.

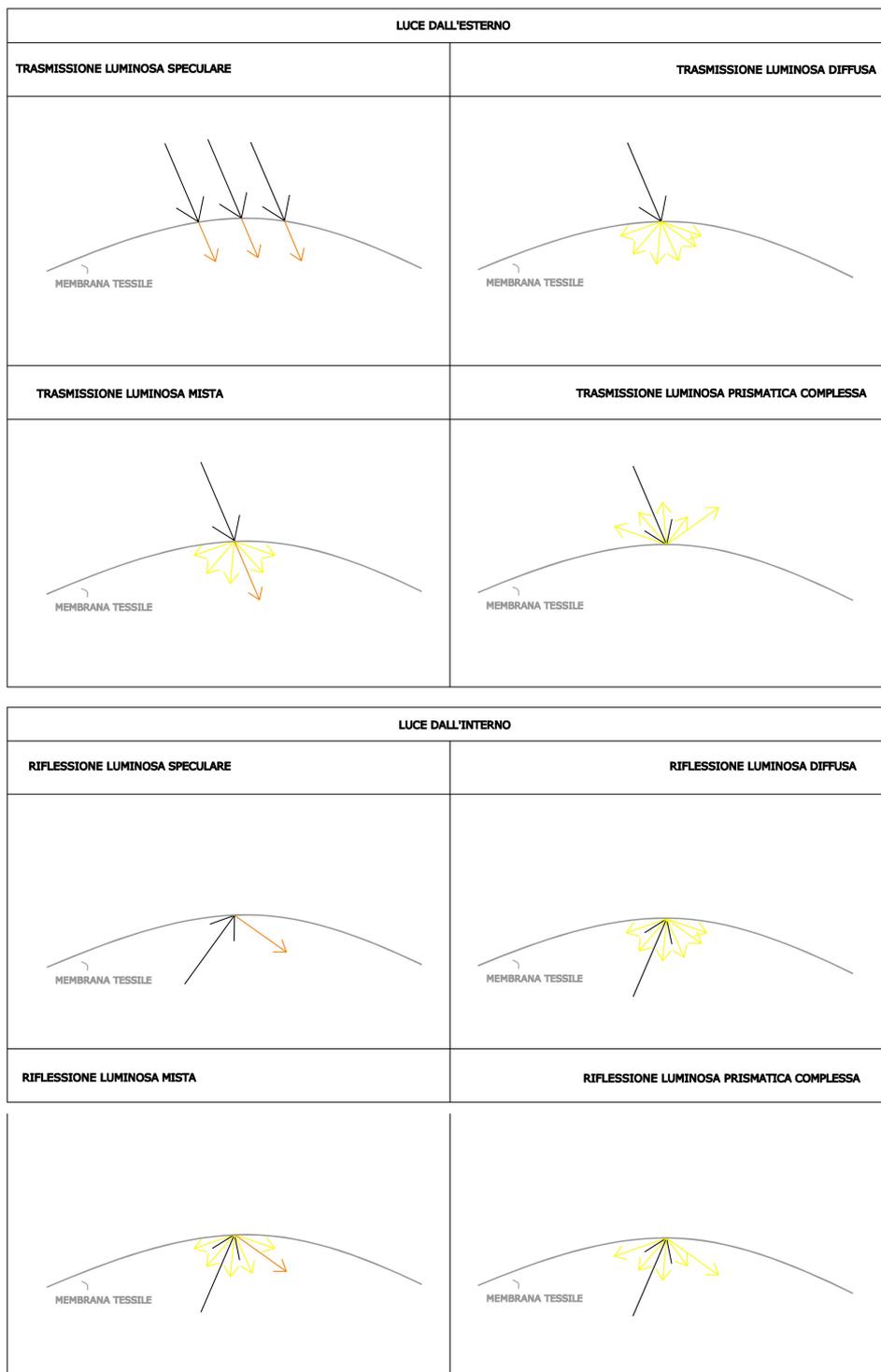


Figura 44. Grafici illustrativi delle modalità di passaggio del flusso luminoso attraverso la membrana tessile (elaborazione dell'autore).

Le variabili di stato riferite al componente membrana (o tipo di variazione indotta sullo spazio servito)⁷⁴ sono indicate come segue:

⁷⁴ Rogora A., *op. cit.*, p. 192.

- morfologia (andamento della luce rispetto ad una sezione orizzontale): lineare
 - gradiente (andamento della luce rispetto ad una sezione verticale): crescente al centro
 - intensità (quantifica la crescita del gradiente rispetto al campo visivo omogeneo costante): media costante
 - tipo di luce (distribuzione luminosa nell'ambiente): diffusa e instabile
 - livello luminoso: > 60% del fattore di luce diurna
 - vista dall'esterno: possibile, nei casi in cui le membrane sono altamente traslucide.
- Ognuna di tali variabili è considerata rispetto al particolare compito visivo richiesto in un dato ambiente.

In generale è possibile dire che l'involucro tessile rientra in quella tipologia di componenti di passaggio definiti "globali", realizzati con materiale trasparente o traslucido, che racchiudono completamente o parzialmente un ambiente luminoso e permettono il passaggio della luce naturale contemporaneamente da direzioni diverse realizzando un campo omogeneo.

Quando si affronta la progettazione di una facciata è importante, relativamente alle questioni appena trattate, definire le diverse tipologie di controllo della luce naturale considerando le funzioni che tali sistemi di controllo devono svolgere, ovvero:

- controllo della quantità di radiazione luminosa e solare diretta (che può essere attenuata con schermature o con il ridirezionamento della radiazione incidente)
- controllo della luminanza della superficie trasparente
- controllo del colore della luce naturale in ambiente.

Il ridirezionamento avviene tramite i meccanismi di *riflessione* verso l'esterno e/o verso l'interno, di *rifrazione* (deviazione nella direzione di propagazione della luce che essa subisce quando passa da un mezzo ad un altro a densità diversa), di *diffrazione* (la radiazione non si propaga in linea retta ma secondo direzioni diverse, producendo un effetto semidiffuso), di *diffusione* (la radiazione viene deviata in tutte le direzioni, sia in relazione alla trasmissione che alla riflessione).

Infine, possiamo dire che tutte le aperture trasparenti, in edilizia, si possono considerare come superfici vetrate, dai materiali trasparenti, in vetro o sostanze plastiche, ai telai e colonnine divisorie, ai sistemi integrali di ombreggiamento e di schermature esterne ed interne, che possono essere:

- sistemi speculari, con *materiali lucidi* che si comportano come uno specchio, con angolo di riflessione della radiazione uguale all'angolo di incidenza, che però possono creare problemi di abbagliamento

- sistemi diffondenti, con *materiali opachi* che riflettono la radiazione luminosa incidente in maniera uniformemente distribuita in tutte le direzioni, ma possono comportare bassi livelli di illuminamento.

I parametri prestazionali dei componenti schermanti possono essere riassunti in due fattori:

- fattore di ombreggiamento luminoso, **FL** = rapporto tra il flusso luminoso incidente sulla vetrata con schermo

e il flusso luminoso incidente sulla vetrata senza schermo

- fattore di apertura, **OF** = rapporto tra l'area aperta tra le fibre e l'area totale del tessuto, con valori caratteristici pari a:

Trama stretta $0 \leq OF \leq 0.07$

Trama media $0.07 \leq OF \leq 0.25$

Trama larga $0.25 \leq OF \leq 1$.

Tali questioni sulle condizioni visive negli ambienti racchiusi da involucri traslucidi ci permettono di trarre in seguito alcune riflessioni, derivate anche dall'analisi dei casi studio svolta nel prossimo capitolo, che indicano quali sono le potenzialità dei materiali tessili nei confronti del benessere visivo, esigenza problematica ma sempre più richiesta da parte dell'utenza contemporanea, che nasce dalle nuove scelte architettoniche indirizzate alla creazione di edifici dalle facciate leggere, trasparenti ma allo stesso tempo capaci di garantire un livello elevato di comfort ambientale.

CAPITOLO 3: LETTURA PRESTAZIONALE DI CASI STUDIO

Il presente capitolo necessita di una breve introduzione su un esempio applicativo che aiuta ad affrontare l'analisi dei casi studio selezionati per la ricerca, e che presenta uno studio elaborato in maniera minuziosa proprio sugli aspetti relativi alle condizioni luminose di un ambiente racchiuso da membrane tessili.

L'istituto Transsolar Energietechnik, con sede a Monaco di Baviera, ha effettuato prove termo-ottiche sul comportamento alla luce dell'involucro tessile impiegato per la copertura del New Bangkok International Airport, NBIA⁷⁵.

L'involucro è di tipo integrato, infatti le parti tessili, accostate ad altre parti vetrate, sono costituite da una membrana multistrato traslucida che permette il passaggio parziale del flusso solare nell'edificio come luce diffusa. I risparmi energetici, ottenuti col materiale tessile impiegato in integrazione alla copertura in vetro, si riscontrano nei costi di costruzione dell'edificio.

Tra le membrane più esterne, costituite da fibre di vetro rivestite di Teflon, che proteggono dagli agenti atmosferici, e le membrane interne traslucide sono previste delle camere d'aria. La membrana più interna è un laminato di due strati, composto da una pellicola basso-emissiva trasparente, in scambio radiativo con tutte le superfici interne dell'edificio. Sottili rivestimenti metallici bloccano lo scambio di calore radiativo tra la costruzione a membrana riscaldata e le parti interne dell'edificio, trasparenti alla luce naturale e al rumore, grazie allo spessore molto basso. La superficie basso-emissiva ha un ulteriore vantaggio: la radiazione delle superfici raffrescate del pavimento è riflessa verso la stanza dal rivestimento basso-emissivo, che migliora il comfort termico per gli occupanti.

Le simulazioni di luce naturale aiutano a valutare i livelli di *luminanza* nell'edificio, risultanti dal passaggio della luce attraverso l'involucro traslucido/trasparente, e sono utilizzate per correggere gli eventuali problemi di abbagliamento. Un importante aspetto è lo *scambio radiativo di lunghezze d'onda* tra le superfici interne calde delle pareti di chiusura e la superficie del pavimento, raffreddata meccanicamente.

⁷⁵ Cfr. Wolfgang Kessling, Stefan Holst, Matthias Schuler, Transsolar Energietechnik, Munich, "Innovative Design Concept for the New Bangkok International Airport, NBIA", in: Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Dallas 2004.

Per ottenere una qualità accettabile di comfort termico, la radiazione di lunghezza d'onda deve essere minimizzata. A questo scopo, uno strato pirolitico basso-emissivo, con un coefficiente di emissione di 0.17, è applicato sulle superfici vetrate interne. Ciò riduce la radiazione termica di lunghezza d'onda dalla superficie vetrata dell'80%. Inoltre, un foglio di PET trasparente con rivestimento basso-emissivo metallico, che incrementa la resistenza al graffio, è applicato alle superfici in membrana con lo stesso scopo.

Ottimizzare l'involucro significa incrementare i parametri termici e correggere l'incidenza luminosa nell'edificio, in modo che la luce artificiale non sia richiesta durante il giorno, anche con cielo coperto, e allo stesso tempo la luminanza totale sia ridotta, così da non avere effetti abbaglianti.

La soluzione è la riduzione di trasmissione luminosa attraverso le membrane, applicando strati isolanti aggiuntivi nel sistema multilayer di chiusura. La struttura è ottimizzata riguardo alla trasmissione luminosa, sulla base di risultati ottenuti da simulazioni operate con i software SUPERLITE e RADIANCE, in combinazione con simulazioni termiche. La distribuzione delle luminanze degli ambienti al livello inferiore, con condizioni di cielo coperto, è determinata dalla struttura di involucro con una elevata porzione delle superfici vetrate sui lati delle pareti.

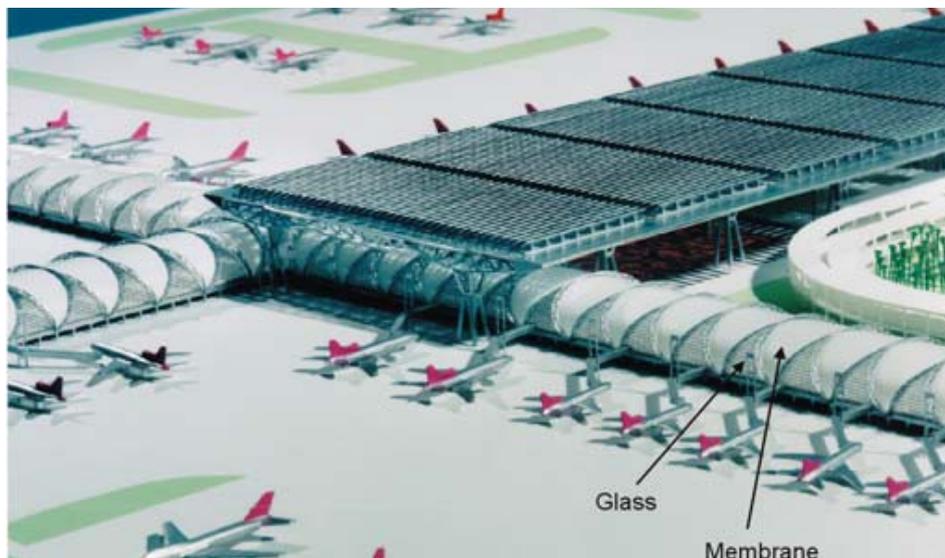


Figura 45. Modello dell'aeroporto di Bangkok, con indicazione dei materiali di copertura. (Fonte: Transsolar Energietechnik, "Innovative Design Concept for the NBIA", in: Symposium Dallas 2004)

Con una stima di trasmissione luminosa del 2% attraverso le sezioni a membrana e del 7.5% attraverso le sezioni vetrate, solo una piccola area tra i supporti dei livelli

superiori mostra una luminanza di meno di 300 lux, valore minimo per un luogo di lavoro.

Le simulazioni di luce naturale hanno dimostrato che l'obiettivo di fare a meno di luce artificiale durante il giorno può essere raggiunto, grazie all'impiego di materiali leggeri e traslucidi, che consentono un elevato livello di comfort ambientale e allo stesso tempo lasciano passare una quantità di luce naturale negli ambienti interni sufficiente a beneficiarne per un arco di tempo prolungato.

Infine, uno strato di assorbimento acustico trasparente, sviluppato specificatamente per questo progetto, è stato applicato direttamente sotto la membrana (con spessore pari ad 1 mm). Sul lato interno della copertura è applicata una pellicola trasparente sottile con rivestimento basso-emissivo allo strato di membrana perforata, impiegata in alcuni punti per lasciar passare il rumore. La trasmissione di luce naturale attraverso la membrana traslucida è stata testata da strumenti che hanno rilevato un coefficiente di conduttanza termica pari a 2.5 W/mq K, accettabile per l'edificio in questione.

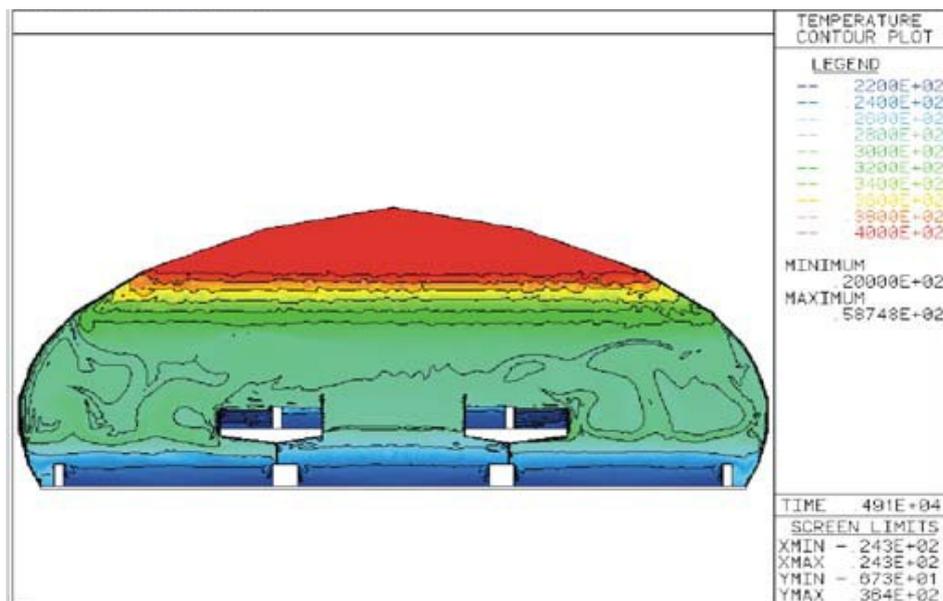


Figura 46. Termografia dell'involucro. (Fonte: Transsolar Energietechnik, "Innovative Design Concept for the NBIA", in: Symposium Dallas 2004)

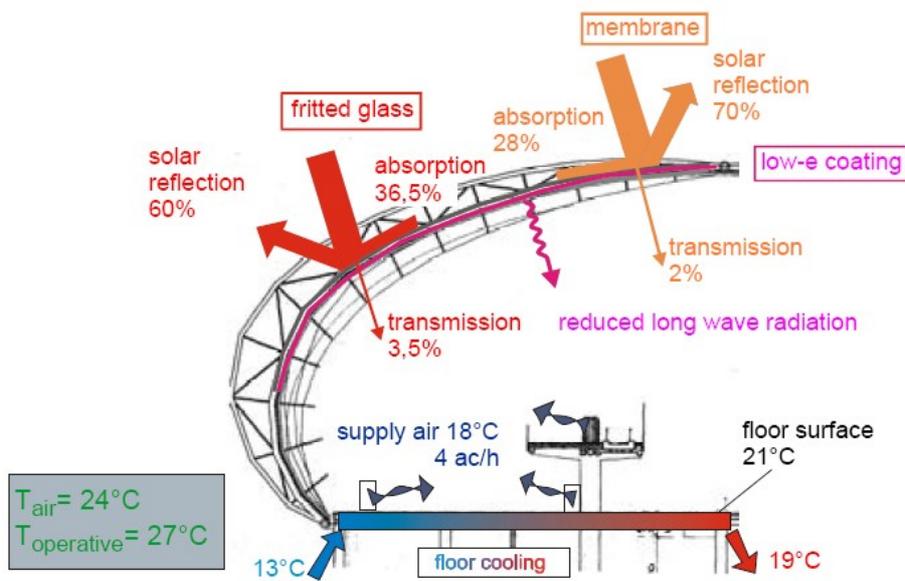


Figura 47. Grafico illustrativo dei flussi termici. (Fonte: Transsolar Energietechnik, "Innovative Design Concept for the NBIA", in: Symposium Dallas 2004)

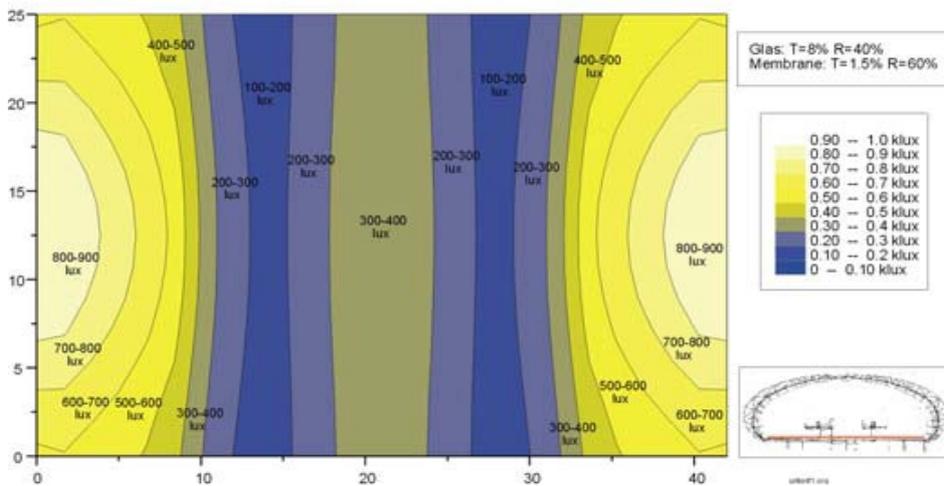


Figura 48. Grafico dell'illuminamento interno, in condizioni di cielo coperto con 20.145 klux. (Fonte: Transsolar Energietechnik, "Innovative Design Concept for the NBIA", in: Symposium Dallas 2004)

3.1 Schedatura di soluzioni progettuali per determinate applicazioni

Se all'inizio della loro diffusione gli involucri tessili si erano affermati grazie alle loro proprietà strutturali (copertura di grandi luci, riduzione del peso delle strutture), negli ultimi anni sono spesso impiegati per le loro caratteristiche di trasparenza, traslucenza o per i vantaggi prestazionali ottenibili per l'isolamento termico.

I casi-studio proposti ed analizzati nella presente ricerca fanno riferimento ad organismi edilizi costituiti da sistemi di chiusura verticale realizzati con materiali tessili, ognuno dei quali conferisce all'edificio particolari proprietà funzionali, ambientali e tipo-morfologiche.

La selezione tra numerosi casi esistenti al mondo di *edifici tessili*, infatti, è dettata dalla volontà di approfondire le tematiche dell'involucro tessile, così come sono state trattate precedentemente in questa ricerca, in tipologie edilizie molto differenti tra loro. L'analisi dei casi studio è partita dalla suddivisione in base alle classi esigenziali-prestazionali (UNI 8289), riferimento indispensabile per valutare la qualità dei sistemi e componenti in edilizia. Esse si sono rivelate però non del tutto esaustive per l'analisi di organismi edilizi non convenzionali, come, appunto, i manufatti realizzati con sistemi a membrana pretesa. Si è optato quindi per un metodo di analisi articolato anche sulla base di altre considerazioni, che, come prima chiave di lettura, suddivide i progetti in base alle loro variabili di *forma e dimensione, destinazione d'uso e condizioni climatiche*.

Un primo criterio di selezione riguarda, pertanto, le dimensioni dell'edificio, in quanto un parametro indicativo per la valutazione del fabbisogno energetico e luminoso di un edificio, e quindi del comfort ambientale interno, è proprio la superficie fruita dagli utenti.

Un secondo criterio di selezione riguarda la funzione dell'edificio, e con essa anche l'impiego e l'utilizzo per cui è stato previsto l'involucro, ovvero se la sua fruizione sia di tipo permanente, temporaneo o stagionale, in quanto questi ultimi fattori incidono sulla valutazione finale di un'architettura, basati su indicatori quali: il tipo di utenza, le richieste del committente, le esigenze finali.

Un terzo criterio di selezione riguarda la zona climatica in cui si colloca l'edificio, in quanto i fattori ambientali sono fondamentali per la scelta di uno specifico prodotto da impiegare nel sistema tecnologico dell'edificio e per la sua buona riuscita in termini di prestazioni adeguate in risposta a requisiti di tipo ambientale.

In generale, considerando la suddivisione tra zone climatiche in tropicale (caratterizzata da elevate temperature costanti per tutto l'arco dell'anno), temperata (caratterizzata da temperature variabili a seconda delle stagioni) e glaciale (caratterizzata da temperature rigide per tutto l'arco dell'anno), molteplici sono le soluzioni tecnologiche che possono essere adoperate per impiegare sistemi chiusi a membrana pretesa che consentano buone prestazioni in termini di comfort ambientale.

Un altro criterio di classificazione dei casi studio è relativo alle *modalità costruttive* delle chiusure. I casi studio scelti adoperano sistemi tecnologici diversi, a seconda delle esigenze da soddisfare, caratterizzati dall'accostamento ad altri materiali, componenti o strutture, così sintetizzabili:

- sistema a doppia pelle con rivestimento tessile interno ed esterno, posto in tensione, montato su una facciata preesistente in cemento armato;
- sistema a pannelli tessili, montati su pannelli di polycarbonato e sottostante struttura di acciaio;
- sistema multistrato, realizzato con materiali e tecnologie diverse, di cui lo strato esterno tessile ha funzione di protezione esterna, non strutturale e quindi con la membrana non in tensione;
- sistema a doppia membrana sottoposta a pressione, ovvero presso-struttura o struttura pneumatica;
- sistema di chiusura e rivestimento a membrana pretesa, ancorato ad una doppia sottostruttura portante, in acciaio per la membrana esterna e in cemento armato per l'acciaio.

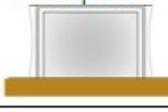
I citati sistemi tecnologici di chiusura consentono di studiare l'involucro tessile anche in base ad un'ulteriore chiave di lettura, ovvero relativamente agli aspetti connessi all'integrazione involucro-struttura, così come sviluppato nei capitoli precedenti, insieme agli aspetti relativi al comfort visivo e alla realizzazione/utilizzazione del manufatto edilizio. Va sottolineato che questa scelta

nasce dalla necessità di porre in rilievo i requisiti connotanti di tali componenti tessili, i quali rendono possibile un loro più diffuso impiego in unità tecnologiche, quali le chiusure verticali traslucide, ancora poco esplorate da tali componenti.

Questa breve premessa è utile alla comprensione della lettura critica effettuata sui casi studio, distinguendo l'analisi di ciascun caso in due paragrafi, relativi alla tecnologia dell'involucro e al comportamento termo-ottico della membrana, allo scopo di richiamare gli aspetti analizzati nella ricerca.

I casi studio sono cinque e per ognuno di essi si è effettuata una raccolta di dati per elaborare una scheda conoscitiva dell'organismo analizzato, inserendo dati informativi e tecnici. La tabella è inserita nel quadro più generale relativo ai requisiti tecnologici di riferimento, così come impostato nei precedenti capitoli. Per ciascuno dei casi studio, pertanto, si propone una scheda di lettura prestazionale, con voci relative sia all'organismo che ai suoi componenti; le schede includono, infine, gli aspetti legati alla tecnologia costruttiva impiegata per la messa in opera delle chiusure verticali.

Di seguito si riporta lo schema di classificazione elaborato per i casi studio.

SCHEMA DI CLASSIFICAZIONE DEI CASI STUDIO						
VARIABILI TECNOLOGICHE E MORFOLOGICHE	Tessuto modellato su sotto-struttura portante 	VARIABILI FUNZIONALI				
	Pannelli tessili su sotto-struttura portante 					Residenziale	Produttivo	Ricreativo	Espositivo	Commerciale
	Protezione tessile su sottostante involucro 	VARIABILI DIMENSIONALI				
	Struttura pneumatica, doppia membrana con aria ad alta pressione 	$x \leq 50$ mq	$50 < x \leq 100$ mq	$100 < x \leq 500$ mq	$500 > x \leq 5000$ mq	$x \geq 5000$ mq
	Doppia pelle tessile su sotto-struttura collegata ad un nucleo portante 	VARIABILI CLIMATICHE				
		Zona temperata	Zona tropicale	Zona glaciale		
						

Schema di classificazione dei casi studio, con le quattro variabili considerate per l'analisi degli edifici: funzionali, dimensionali, climatiche e tecnologiche/morfologiche.

3.1.1 UNITED BAMBOO, Acconci Studio, Tokyo 2003⁷⁶

Il progetto per lo showroom United Bamboo a Daikanyama, vicino Tokyo, propone una nuova immagine per l'involucro interno ed esterno di un edificio residenziale esistente. Il gruppo di progettazione Acconci Studio si misura con i materiali tessili ed insieme con l'architettura, il paesaggio, l'installazione artistica e la "performance art". Gli aspetti più significativi del progetto sono dati dalla fluidità e morbidezza degli spazi, che spiccano nella transizione tra le superfici, i materiali, l'illuminazione e l'organizzazione morfologica e spaziale.

L'intervento di riqualificazione dell'esistente interessa una superficie coperta pari a 60 mq; tale dato influenza, insieme ad altri parametri, la scelta del materiale per il rivestimento e la protezione dell'edificio. La membrana, infatti, date le dimensioni non eccessive dell'edificio, risponde egregiamente alle esigenze dell'utenza, che mira all'acquisizione di una rinnovata e più attraente immagine dell'edificio che ospita lo show-room, più che alla soddisfazione di esigenze di tipo termo-igrometrico e acustico, in quanto l'impiego puramente commerciale dell'ambiente non richiede specifiche condizioni di comfort ambientale, se si esclude il comfort visivo fondamentale per uno spazio di vendita. Il progetto punta, pertanto, prevalentemente all'aspetto comunicativo, che, grazie alla membrana tessile, viene esaltato anche tramite l'impiego della luce artificiale.

La stratificazione dell'involucro è costituita da uno strato esterno di acciaio brillante, di grande forza espressiva, ed uno interno di PVC, morbidamente formato e illuminato dall'interno con un sistema di illuminazione artificiale a LED.

Il tessuto scolpisce l'interno e contiene la luce, infatti nessuna fonte di luce è direttamente esposta ma l'intero luogo diviene esso stesso una fonte luminosa. Il tessuto copre le componenti strutturali visibili e ammorbidisce tutti gli angoli acuti, tra il soffitto e le pareti e tra queste ultime e il pavimento, ottenendo così un'unica superficie continua. La membrana in PVC viene utilizzata in tre accezioni diverse:

- come involucro degli spogliatoi, nello spazio interno;

⁷⁶ Le schede di lettura dei casi studio sono riportate alla fine del paragrafo 3.1.

- come involucro dello spazio di vendita interno, completamente avvolto e reso fluido e aperto, grazie alla membrana montata sui binari del soffitto e del pavimento;
- come schermo esterno, posto al secondo piano, con funzione di superficie di proiezione per le immagini pubblicitarie visibili dallo spazio pubblico.

La tecnologia del sistema involucro

Acconci descrive il lavoro per lo show-room United Bamboo come “un vecchio edificio rivestito”. L'esterno dell'edificio, infatti, ha una seconda pelle, uno schermo di superficie d'acciaio inossidabile che racchiude i balconi e ridefinisce le chiusure.

Vestire il negozio di abbigliamento è il tema concettuale del progetto: come un vero vestito infatti l'involucro diventa un costume teatrale, costituito da molti strati attentamente orchestrati in un assemblaggio che conferisce all'edificio un carattere elegante ed affascinante, requisito fondamentale per il marchio United Bamboo, cliente e committente del progetto.

Il primo strato esterno di chiusura è realizzato con superfici di acciaio brillante, successivamente lo strato più interno è realizzato in membrana di PVC, impiegata per rivestire le pareti interne, formando lo spazio in modo da cancellare alla vista qualsiasi angolo retto, ammorbidendo tutti gli angoli acuti. Il tessuto, infatti, tirato dall'alto verso il basso, deformandolo dal soffitto fin sulle pareti, assume diverse forme sinuose, al fine di generare scaffalature, mensole espositive e banconi di vendita. Inoltre, il tessuto copre tutte le componenti strutturali visibili. C'è una continuità della superficie che consente la percezione di un continuum spaziale tra pavimento, che passa attorno alle pareti e quasi si dissolve in altezza, e pareti, che si avvolgono attorno al soffitto e perdono l'immagine verticale dei “muri” perimetrali.

La superficie è unica e l'utilizzo di un materiale tessile è fondamentale per ottenere tale effetto, non solo perché è efficace per gli esiti scenografici voluti dal progettista, ma perché partecipa attivamente all'evento “sociale e culturale” dello *shopping*, legato alla cultura della passerella e del teatro. Acconci, grazie alle proprietà del materiale tessile, crea spazi diversi a seconda del livello di privacy richiesto, come per gli spogliatoi privati, disponibili aprendo semplicemente una membrana, montata sui binari del soffitto e del pavimento.

Queste differenziazioni spaziali minime rendono lo spazio fluido e aperto. Il luogo più pubblico è il secondo piano, con la chiusura in PVC impiegata per proiettare le sagome dei clienti sullo schermo visibile dall'esterno. Tale schermo di proiezione, che offre all'esterno immagini catturate all'interno dello show-room, è un segno critico dell'epoca, della moda e del panorama culturale in cui si inserisce. Il suo

successo come esperimento è intrinsecamente dovuto alla partecipazione e alla performance degli artisti e dei clienti di United Bamboo. Al secondo piano un cliente può attivare una telecamera per permettere all'immagine del suo corpo, che indossa vestiti alla moda, di essere proiettata su un grande schermo pubblico.

Il comportamento termo-ottico della membrana

La membrana impiegata per lo show-room United Bamboo è stata scelta come materiale di rivestimento e chiusura, particolarmente adatto allo scopo del progetto, ovvero quello di rinnovare la facciata esterna del negozio, nonché di trasformarne l'interno in un'unica fonte di luce artificiale, grazie ad un sistema di illuminazione a LED installato all'interno della struttura d'acciaio, che funge da supporto per la membrana tesa e traslucida.

In questo modo, la luce viene diffusa uniformemente nell'ambiente, grazie alla traslucidità del tessuto, in grado, a differenza di qualsiasi altro materiale, di creare forme curve e morbide che trasmettono uniformemente la luce nello spazio circostante. La flessibilità del materiale e la sua traslucidità sono pertanto elementi indispensabili per la buona riuscita del progetto.

Nello specifico, la membrana utilizzata, sia all'esterno che all'interno dell'edificio, è costituita da fibra di poliestere spalmata in PVC, e presenta uno spessore di circa 8 mm, con emissività pari all'86% e trasmittanza termica pari a 5,7 W/mq K, essendo impiegata come un sistema a singolo strato.

In effetti, nel caso in esame, la membrana è impiegata più come rivestimento che come strato resistente di chiusura verticale, pertanto la necessità di garantire un buon comfort termico all'interno dell'edificio è soddisfatta dalla struttura preesistente in cemento armato e in acciaio, che costituisce anche parte delle chiusure esterne.

La tipologia di intervento è infatti quella di ristrutturazione e rifunzionalizzazione di un manufatto esistente, e la membrana è impiegata come soluzione tecnica capace di valorizzare dal punto di vista estetico e comunicativo l'edificio preesistente. Il progetto, in particolare, è stato studiato per utilizzare al meglio l'illuminazione naturale ed artificiale; infatti grazie alla membrana è possibile avere originali effetti luminosi sia all'esterno che all'interno dell'edificio. La membrana presenta una non elevata traslucidità, con fattore di trasmissione luminosa pari al 10% e fattori di assorbimento, riflessione e trasmissione solare pari rispettivamente a 18, 77 e 5%, valori che permettono un adeguato controllo del fattore solare grazie all'elevato potere riflettente. Infine, la membrana presenta una trasmissione dei raggi ultravioletti quasi nulla, consentendo pertanto un'ottima resistenza al passaggio di quei raggi ultravioletti dannosi alla salute.

Tali valori consentono di affermare che il materiale impiegato per l'intervento di riqualificazione risponde efficacemente alle esigenze poste dal in fase progettuale.



Ingresso su strada dello show room United Bamboo. (Foto di Vito Acconci)



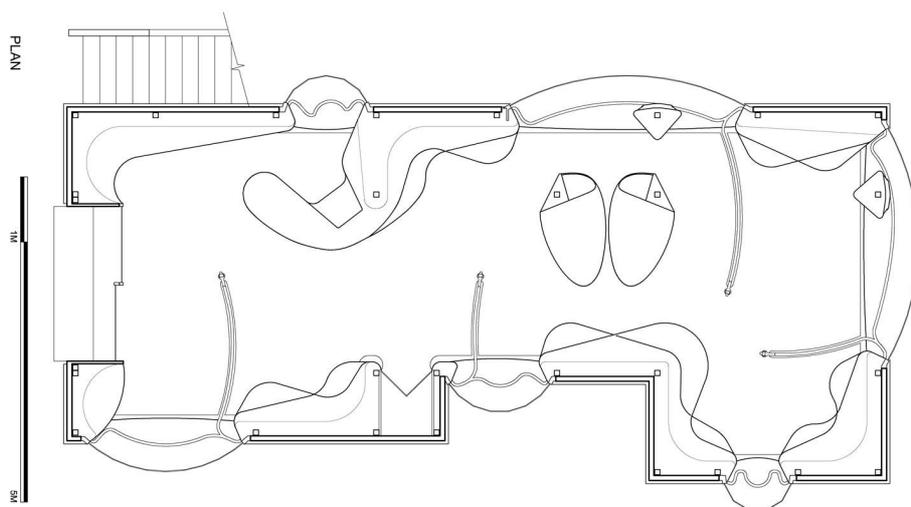
Interni dello show room United Bamboo, modellati dalla membrana. (Foto di Ryota Atarashi)



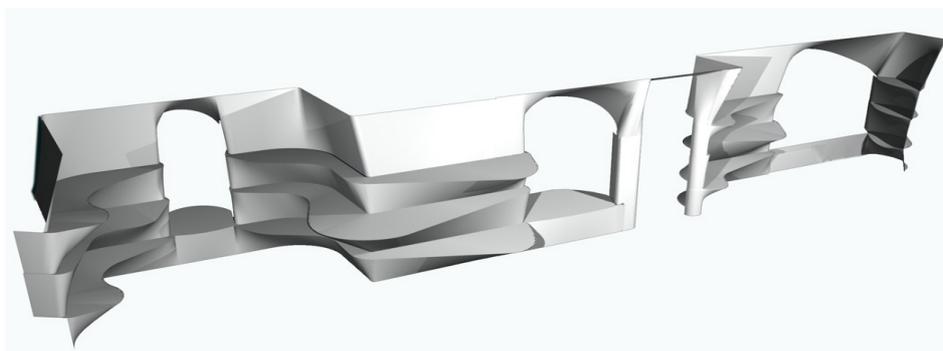
Fase di cantiere, montaggio della membrana sulle strutture in acciaio di supporto. (Fonte: Acconci Studio)



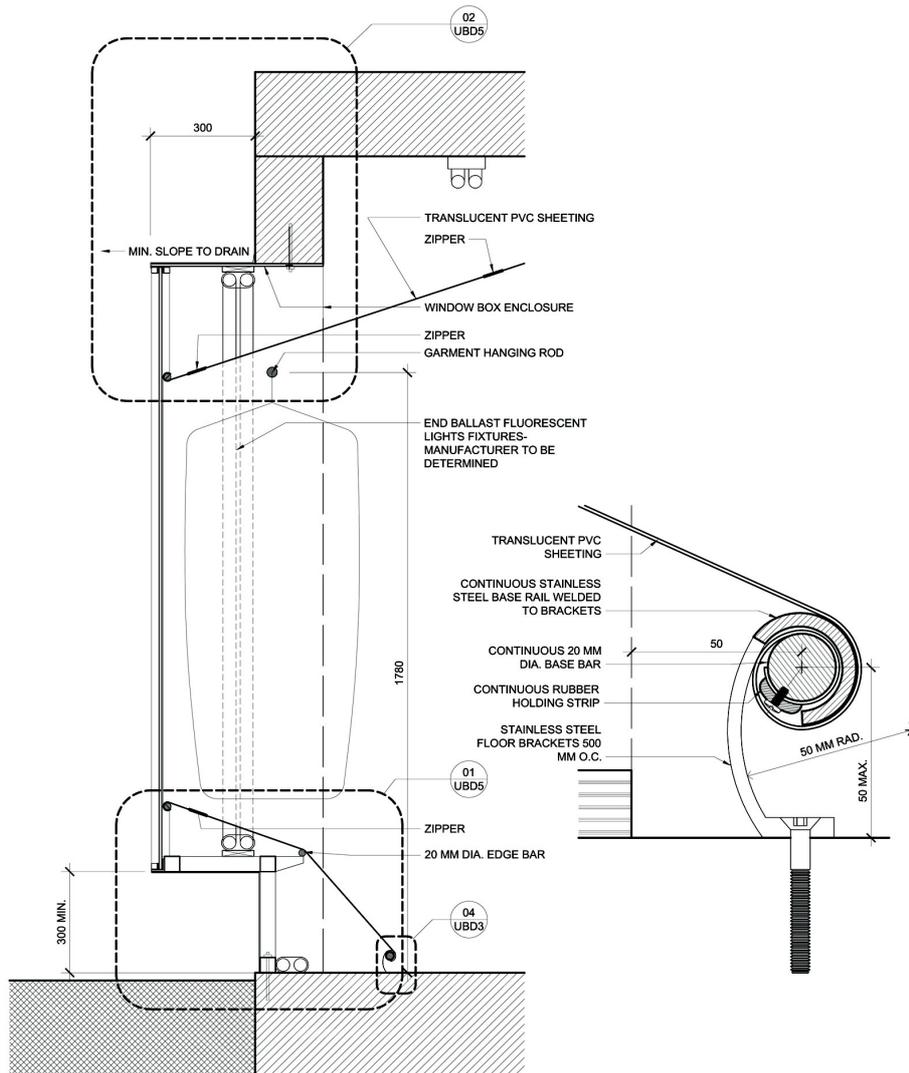
Fase di cantiere, montaggio della membrana sul soffitto e le pareti interne. (Fonte: Acconci Studio)



Pianta dello show room United Bamboo con la traccia dell'involucro interno in membrana. (Fonte: Acconci Studio)



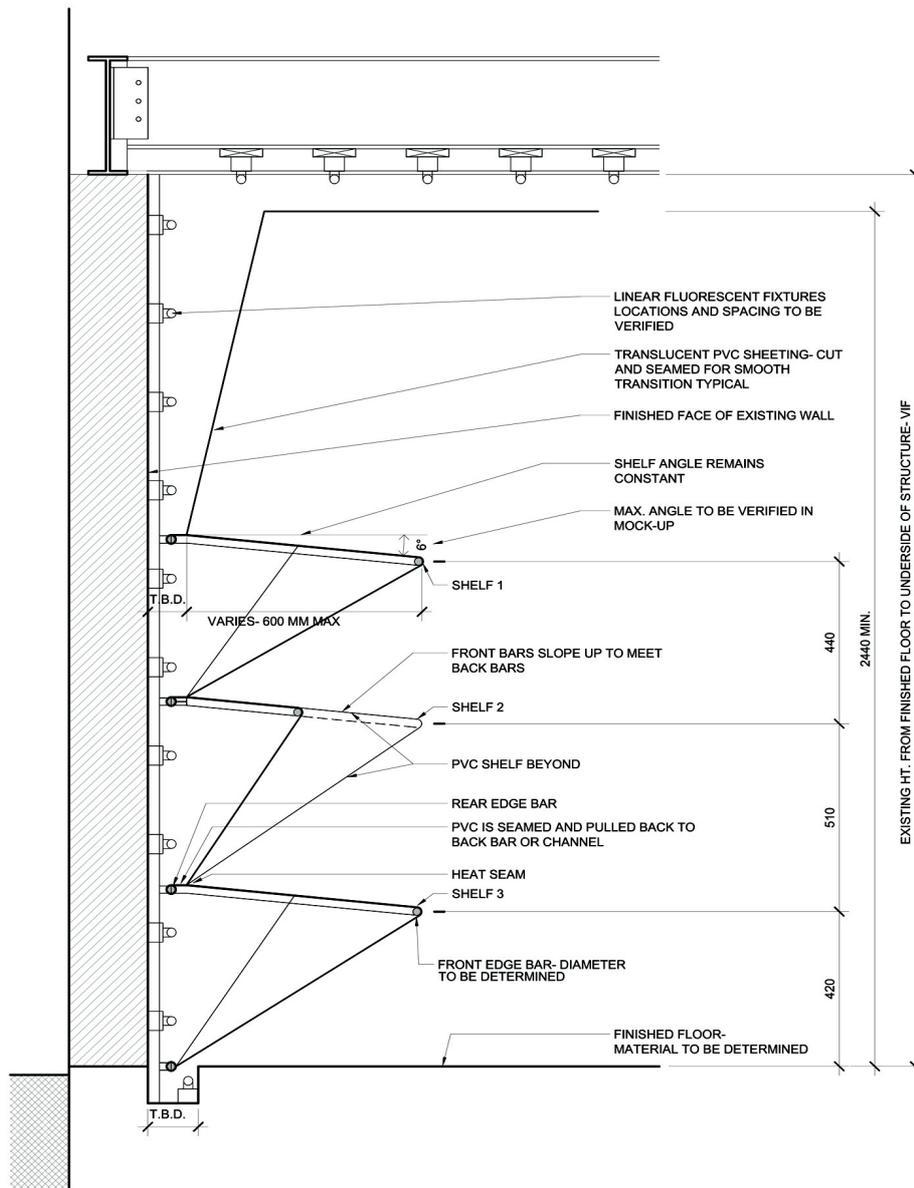
Rendering di progetto, modellazione del tessuto sulle pareti interne. (Fonte: Acconci Studio)



03 TYPICAL WINDOW SECTION
UBD3 SCALE: 1 CM = 100 MM

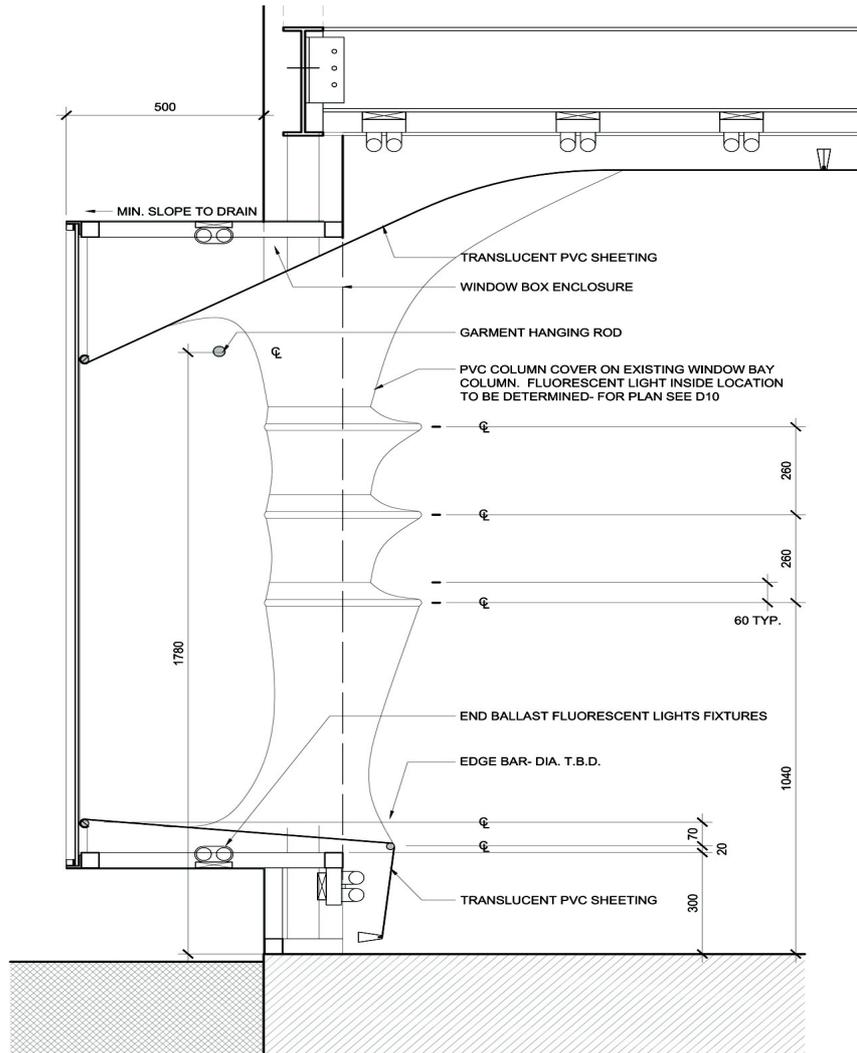
04 STRETCHED FABRIC BASE DETAIL
UBD3 SCALE: FULL

Dettagli tecnologici. (Fonte: Acconci Studio)



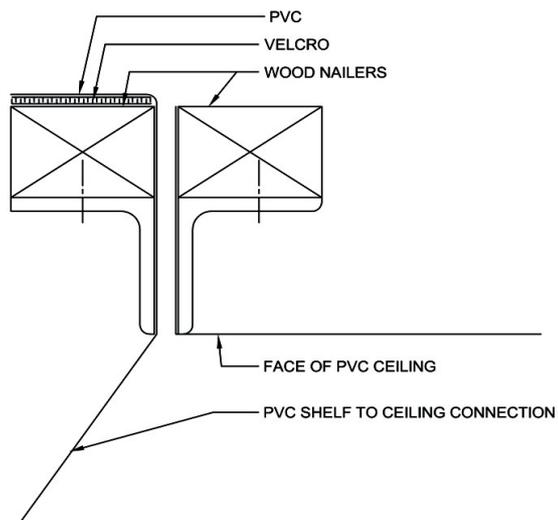
02 TYPICAL SHELVING SECTION
 UBD2 SCALE: 1 CM = 100 MM

Dettagli tecnologici. (Fonte: Acconci Studio)



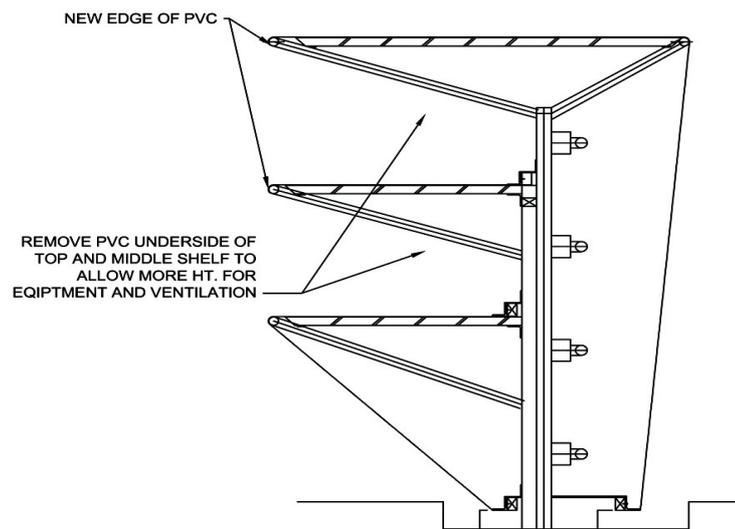
03 TYPICAL WINDOW SECTION
 UBD3 SCALE: 1 CM = 100 MM

Dettagli tecnologici. (Fonte: Acconci Studio)



01 SECTION- CONNECTION BETWEEN SHELF & CEILING
UBD14 SCALE: FULL

Dettagli tecnologici. (Fonte: Acconci Studio)



01 SECTION- THROUGH SALES COUNTER
UBD17 SCALE: 1 : 10

Dettagli tecnologici. (Fonte: Acconci Studio)

3.1.2 BASE OPERATIVA LUNA ROSSA, Renzo Piano Building Workshop, Valencia 2006

Il progetto, concepito dal Renzo Piano Building Workshop, per la nuova base operativa di Luna Rossa Challenger, in occasione della 32° edizione della Coppa America, è un edificio che si contraddistingue per l'originalità del sistema d'involucro, definito "semplice" nella sua concezione strutturale (facciata continua) e "geniale" nella scelta degli elementi di tamponamento e finitura.

La scelta del materiale da impiegare per l'involucro esterno dell'edificio è dipesa essenzialmente dall'analogia con il tema progettuale, ovvero realizzare una base operativa per eventi legati al mare. L'immagine che ne deriva è quella delle vele, elementi essenziale delle barche da regata, che sono anche, e sempre più spesso, protagoniste nell'architettura contemporanea.

L'involucro della base operativa Luna Rossa, infatti, è realizzato con materiali recuperati dal "mare", ricavati proprio da vele dismesse di barche da regata; gli elementi di tamponamento sono infatti composti da una membrana tessile (costituente le vele), tesata e fissata ad un telaio rettangolare di alluminio, assemblata con biadesivo acrilico a pannelli di policarbonato alveolare.

Le dimensioni della superficie da racchiudere sono mediamente ampie, pari a circa 3100 mq, pertanto l'impiego di un materiali traslucido per le facciate dell'edificio pone, da un lato, alcuni benefici in termini di comfort visivo, grazie alla possibilità di usufruire della luce naturale per lungo tempo durante il giorno, ma al contempo non garantisce livelli di comfort termico ed acustico elevati.

Ciò, in effetti, è una scelta consapevole dei progettisti, che, in fase progettuale, hanno dovuto rispondere ad esigenze di altro tipo, essendo il comfort ambientale un'esigenza relativamente poco sentita dai fruitori del nuovo edificio, in quanto esso si trova in una zona climatica temperata ed inoltre è prevalentemente usato in stagioni calde. In questo senso, le variabili di progetto relative alle dimensioni e al contesto climatico hanno influenzato le scelte tecniche di progetto, facendo prediligere materiali leggeri, con poca massa e inerzia termica, ma capaci di filtrare la luce naturale senza creare discomfort visivi, contribuendo invece alla realizzazione di spazi di lavoro con adeguati livelli di comfort visivo, ed inoltre hanno

la capacità di esaltare il rapporto tra l'architettura e il contesto naturale in cui si inserisce, il mare di Valencia.

Il risultato è un edificio dalle chiusure leggere e traslucide, che contribuiscono a dare un'immagine molto poco invasiva della nuova architettura sul paesaggio circostante.

La tecnologia del sistema involucro

La parte portante del pannello di tamponamento è costituita da un profilo di alluminio, sagomato in modo tale da poter accogliere il bordo di silicone che viene attaccato alla vela tramite cucitura. I pannelli sono inseriti in un sistema di facciata continua a montanti e traversi, vincolati ad una serie di ganci di sospensione. I pannelli giungono in cantiere preassemblati e vengono poi montati in opera. Il sistema di facciata è vincolato a sua volta alla sottostruttura mediante staffe, garantendo, con un sistema di guarnizioni, la tenuta all'acqua e all'aria. All'irregolarità segnata dalle cuciture delle vele si contrappone il rigore geometrico del telaio, di forma rettangolare, e della sottostruttura portante in estrusi di alluminio. La non convenzionalità del sistema progettato, legata al materiale impiegato e alle tecniche di assemblaggio dei due elementi costituenti il sistema, la vela e i pannelli in policarbonato, ha richiesto una serie di prove per verificare la resistenza meccanica degli elementi e per definire il comportamento dei materiali a contatto tra loro, ovvero il controllo delle dilatazioni differenziali. Le verifiche effettuate prima dello sviluppo dell'esecutivo e della posa in opera del sistema sono relative a prove di trazione a rottura delle vele singole, accoppiate all'elastomero dopo la cucitura, e posizionate nel profilo di alluminio, e prove di laboratorio per la verifica della resistenza e delle dilatazioni tra vela, biadesivo e policarbonato.

La posa in opera dell'intero sistema, sottostruttura di alluminio e pannelli tessili di tamponamento, è stata effettuata in 40 giorni lavorativi. La produzione dei pannelli di chiusura ha richiesto una procedura abbastanza complessa, che prevede una prima fase di taglio delle vele e del loro assemblaggio secondo schemi definiti in fase progettuale, seguita dall'applicazione dell'elastomero, che funziona come una molla e consente di avere elementi pretesi in modo uniforme con possibilità di allungamento per l'assorbimento dei carichi o per le dilatazioni termiche e successivo ritorno alle condizioni originarie, sul perimetro della vela. Questa, poi,

viene inserita all'interno dei profili di alluminio e pretesa mediante macchina a martinetti idraulici. Il pretensionamento della vela trasforma la membrana in un elemento strutturale rigido, che resiste bene alle sollecitazioni esterne. La fase finale del montaggio della vela tesata e fissata è l'incollaggio ai pannelli di polycarbonato, ed infine l'imballaggio e la spedizione dei pannelli finiti.

La linea definita dell'involucro deriva dalla forma regolare dell'edificio, che presenta sporgenze e rientranze solo in corrispondenza degli ingressi e dei sistemi di collegamento verticale. L'edificio si sviluppa su tre piani: al piano terra vi è l'hangar, officina in grado di accogliere fino a due imbarcazioni senza albero, un'area destinata a manutenzione ordinaria e straordinaria delle barche, un deposito per gli alberi e una veliera, mentre al piano primo sono ubicati gli uffici e al secondo piano uno spazio di accoglienza, mensa e palestra.

Il comportamento termo-ottico delle vele

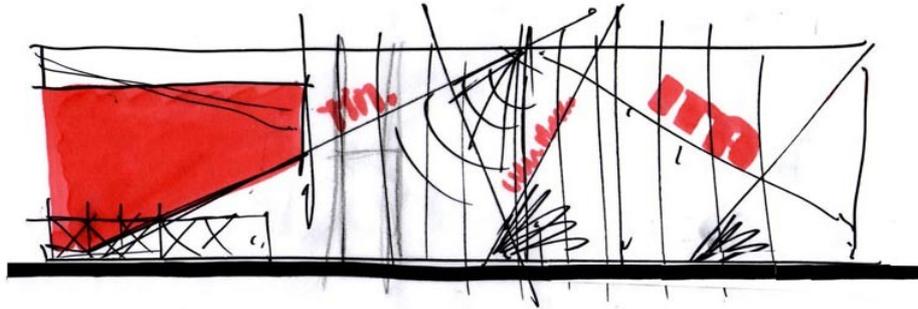
L'involucro esterno si presenta come un patchwork di rande e fiocchi⁷⁷, opportunamente tagliati e riasssemblati tra loro, secondo le fasi di progettazione e realizzazione proprie della tecnologia tessile. La "pelle" dell'edificio è costituita di 485 pannelli che ricoprono i 3100 mq delle facciate, realizzati con 50 vele (12 rande e 38 fiocchi) recuperate dalle imbarcazioni del Team Luna Rossa, costituite da fibra di kevlar e carbonio; le vele vengono opportunamente tesate e incollate con biadesivo acrilico a pannelli in polycarbonato alveare dello spessore di 40mm. I pannelli così composti forniscono una resistenza termica minima, ma nel caso specifico in esame quest'ultima si rivela una prestazione secondaria, data la particolare collocazione geografica sul molo di Valencia, in un contesto climatico caratterizzato da brevi periodi freddi e prolungati periodi caldi, e l'utilizzo di tipo stagionale dell'edificio. Inoltre è opportuno sottolineare che il controllo delle condizioni ambientali viene totalmente demandato agli impianti di climatizzazione.

⁷⁷ La *randa* è una vela armata sull'albero principale di un'imbarcazione a vela. Nell'armatura velica contemporanea, la randa è di forma triangolare, posizionata a poppavia dell'albero di maestra e sostenuta ad esso mediante canestrelli inseriti nell'apposita canaletta dell'albero. In condizioni di normale navigazione la randa viene usata per risalire il vento in combinazione con il *fiocco*, vela issata a prua della randa, o con il *genoa*, un fiocco di maggiori dimensioni. (fonte: www.wikipedia.it).

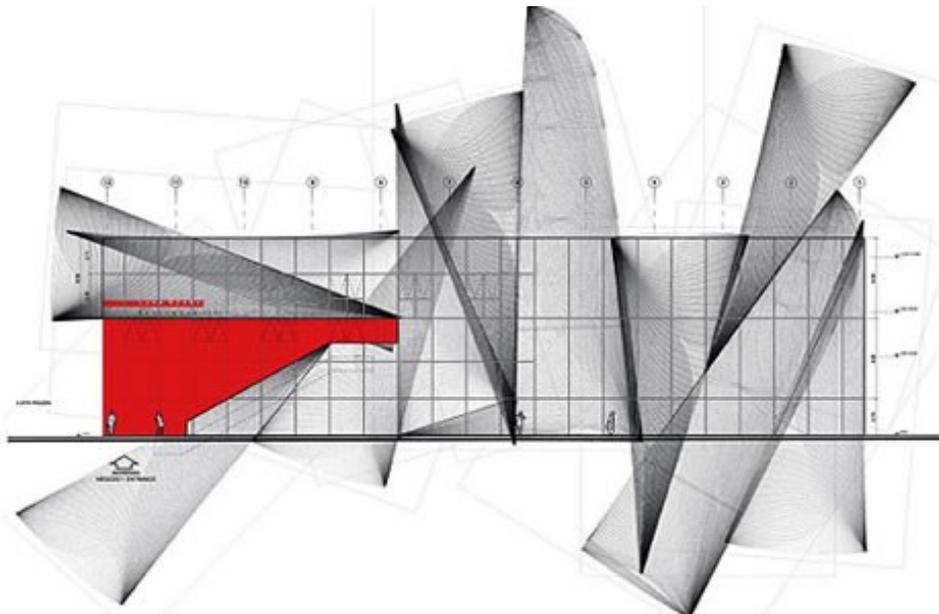
La superficie composta rigida lascia trasparire luce naturale, calibrata dal posizionamento sulla facciata di due diversi tipi di vela, realizzate in fibre di kevlar e carbonio: la randa ha un basso coefficiente di trasmissione luminosa τ_L (10%) mentre il fiocco lascia filtrare una buona percentuale di luce (50%). La vela all'interno del pannello ha la funzione di controllo del flusso luminoso negli ambienti, generando un adeguato livello di illuminazione che non consente forti contrasti tra le aree prossime all'involucro e le parti più lontane, creando perciò una condizione ottimale di luce diffusa. La membrana ha infatti caratteristiche ottiche, variabili in funzione del tipo, della trama e della densità delle fibre che la costituiscono, che consentono di regolare e beneficiare degli effetti dell'irraggiamento luminoso. Inoltre, i pannelli tessili fungono da schermo visivo tra interno ed esterno durante le ore diurne. Durante la notte invece, quando i locali interni sono illuminati, l'edificio si trasforma in una scatola luminosa, dove la partitura degli elementi strutturali del sistema di facciata diventano elementi connotanti l'edificio.

L'idea progettuale non poteva prescindere dal contesto di riferimento, inevitabile perciò è stato il richiamo alle vele che dominano e connotano il paesaggio circostante, e sono convertiti nell'architettura divenendo la pelle dell'edificio. L'elevata resistenza meccanica, la leggerezza materiale, l'indefornabilità che permette alla superficie velica di mantenere inalterato il proprio profilo per garantire il massimo rendimento sotto l'azione del vento, la resistenza all'usura, la tenuta all'acqua e all'aria, la semitrasparenza delle superfici, la buona lavorabilità legata alle tecniche di taglio e di assemblaggio sono aspetti che hanno suggerito il trasferimento tecnologico del prodotto tessile dalle imbarcazioni nautiche all'organismo edilizio.

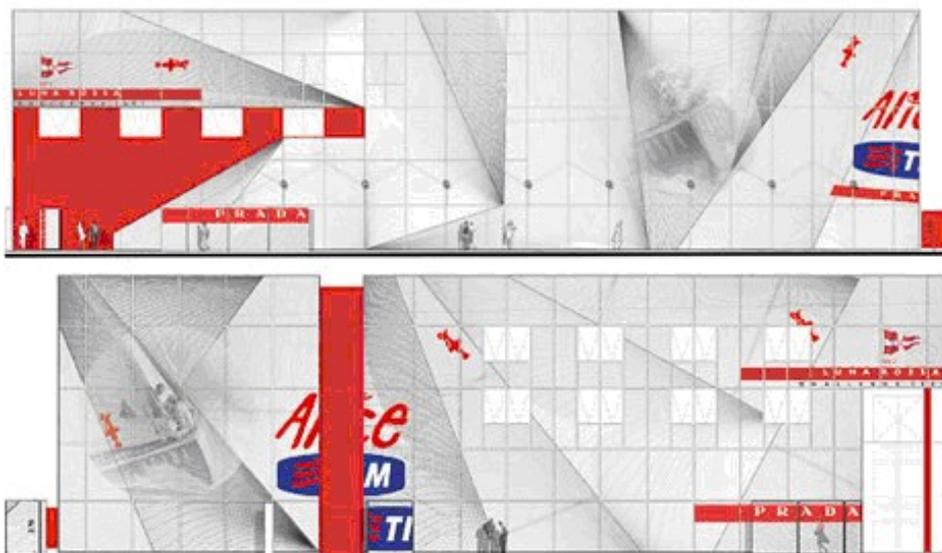
Il materiale impiegato per questo involucro è riutilizzato dalle vele in Kevlar/Mylar dell'imbarcazione Lunarossa. Queste fibre, nate nel 1970 sotto il marchio DuPont, sono a parità di peso diverse volte più resistenti dell'acciaio e molto resistenti al calore, infatti decompongono a circa 500 °C senza fondere. Il kevlar viene utilizzato in ambito nautico nel 1970 con lo scopo di ridurre il peso proprio delle vele da regata, circa il 75% più leggere di quelle in poliestere.



Schizzo progettuale per la facciata esterna della Base operativa di Luna Rossa, Valencia. (Fonte: Renzo Piano Building Workshop)



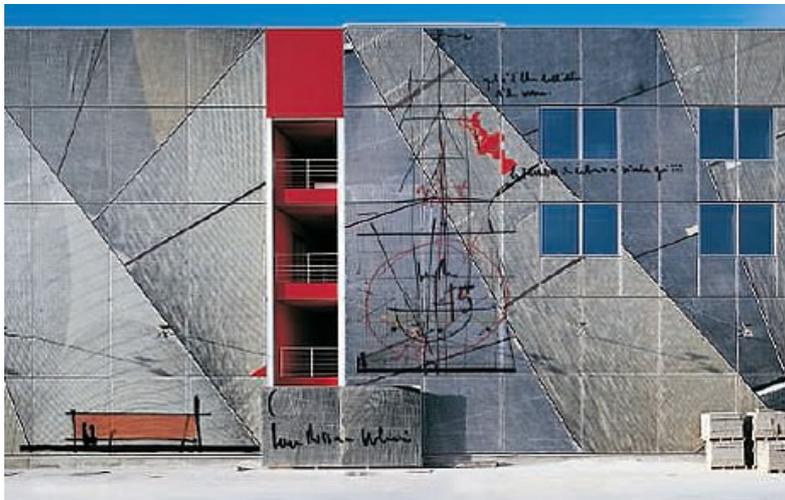
Schema grafico con i tagli disegnati dai pannelli tessuti. (Fonte: Renzo Piano Building Workshop)



Prospetti verso la strada, ingresso negozio, e verso la piazza, ingresso ospitalità. (Fonte: Renzo Piano Building Workshop)



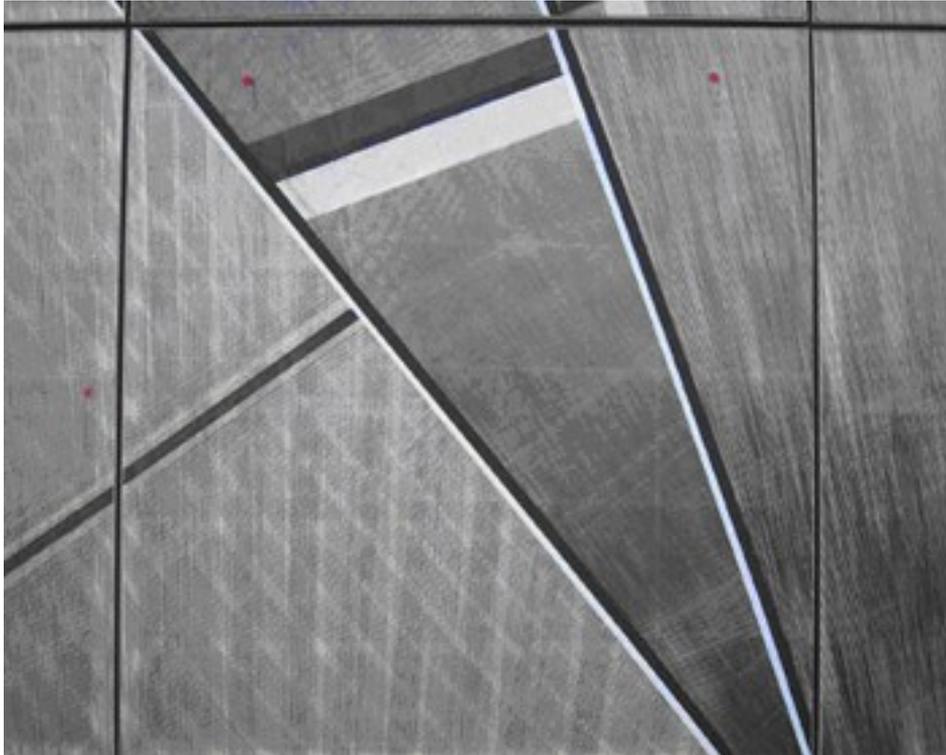
Fase di cantiere, montaggio dei pannelli tessili. (Fonte: T. Poli, "Leggero e indeformabile come una vela", *Arketipo*, luglio 2006. Foto di Enrico Cano)



Dettaglio della facciata in fase di cantiere. (Fonte: T. Poli, "Leggero e indeformabile come una vela", *Arketipo*, luglio 2006)



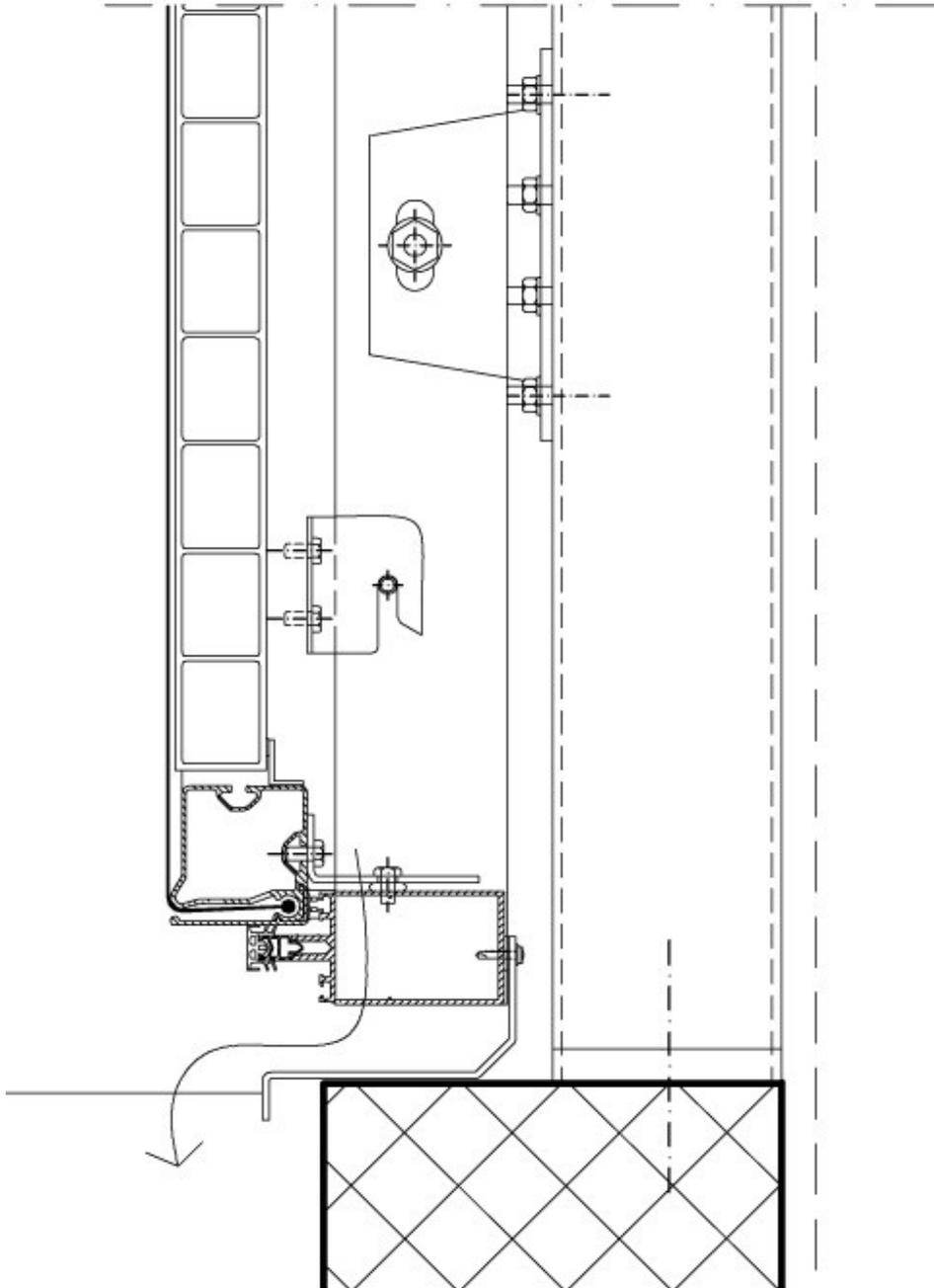
L'involucro tessile della base operativa Luna Rossa, Valencia. (Fonte: www.architetturatessile.polimi.it)



Dettaglio della facciata tessile, con i tagli delle vele. (Foto di Enrico Cano)



Vista interna della veleria, in primo piano il tessuto delle vele. (Fonte: T. Poli, "Leggero e indeformabile come una vela", *Arketingo*, luglio 2006. Foto di Enrico Cano)



Sezione verticale tipo del sistema di facciata. (Fonte: Renzo Piano Building Workshop)

3.1.3 WALL HOUSE, FAR frohn&rojas - Koln, Santiago del Cile 2007

La Wall House è una delle poche applicazioni, oggi esistenti, di membrane tessili impiegate in facciate di edifici residenziali contemporanei. In questa residenza, infatti, la membrana è utilizzata come elemento protettivo, e non come componente di chiusura verticale, ma piuttosto di schermo/diaframma che relaziona l'interno con l'esterno e viceversa. La dimensione della superficie da coprire è strettamente correlata alla funzione dell'edificio, infatti complessivamente la membrana avvolge circa 230 mq di superficie. L'immagine, derivata dall'utilizzo di una membrana tessile come strato esterno dell'involucro, ricorda le tende nomadi, interpreti di un concetto di riparo originario, che vede nella leggerezza il suo archetipo costruttivo.

Inoltre, la Wall House è divenuta famosa per l'originale idea progettuale che considera la casa come un rifugio costituito da tanti strati che ne reinterpretano il contatto tra interno ed esterno. Il sistema costruttivo adoperato, poi, consente ai progettisti di offrire ad altri eventuali clienti la possibilità di auto-costruire la propria casa, disponendo di una sorta di kit di montaggio.

La casa unifamiliare, progettata da FAR frohn&rojas, è stata concepita e realizzata con un budget limitato, in una delle aree suburbane che si estende dal centro di Santiago del Cile lungo l'autostrada. La natura ambigua del lotto, parte di una suddivisione di periferia, si sviluppa in un'immagine rurale attraverso le strade sterrate, le grandi aree di oltre 50.000 metri quadrati e, soprattutto, l'uso intelligente di siepi alte che consentono un elevato livello di privacy. Le siepi, mentre il nucleo dell'edificio resta fuori da qualsiasi collegamento visivo con il contesto di periferia, ma si apre alla vista delle montagne andine, potrebbero essere intese come uno strato più esterno della pelle dell'edificio e diventano un punto di partenza per il progetto, che dalle siepi naturali si raccoglie in maniera sempre più intima fin nel cuore della casa.

La tecnologia del sistema involucro

Dalla considerazione di un involucro multistrato nasce l'idea progettuale che sta alla base delle scelte concettuali e materiali della Wall House. L'idea è semplice quanto efficace, non solo dal punto di vista economico e costruttivo, ma anche per la

ricchezza degli ambienti che riesce a organizzare all'interno dello spazio domestico, e per l'innovativa spazialità che riesce a proporre.

Una serie di strati di chiusura si sviluppa verso il giardino circostante, che si attenuano gradualmente verso l'esterno a partire dalla solida ed intima struttura del nucleo fino al morbido e delicato involucro esterno. Mentre la "tradizionale" casa familiare stabilisce in genere una netta separazione tra interno ed esterno attraverso pareti solide, con finestre e porte chiaramente definite, qui viene creata una transizione graduale tra esterno ed interno. Si sperimenta un'abitazione con strati di differenti densità, peso e permeabilità alla luce naturale. La facciata si sviluppa in quattro strati, realizzati con elementi costruttivi diversi, e ognuno di essi presenta caratteristiche molto specifiche in termini materici, strutturali, funzionali, climatici, contribuendo a una gerarchia intelligente: mentre le zone più interne contengono le funzioni più private della casa, spostandosi verso l'esterno si gioca con la profondità spaziale, i cambiamenti di materia e di condizioni di illuminazione.

Il primo strato è definito dai progettisti "caverna" di cemento, nucleo interno e primo elemento del sistema strutturale. Contiene i due bagni della casa e le sue pareti interne sono interamente rivestite in piastrelle di ceramica, permettendo la completa pulibilità delle superfici. Questo strato più interno è solido, opaco e lucido e offre protezione e riservatezza per le attività private della casa. L'esiguo nucleo di due piani che delimita i bagni costituisce anche il supporto per le serpentine di acqua che innervano le pareti. L'impianto trasmette calore nel cuore della casa d'inverno, mentre, in estate, una pompa di calore raffredda l'acqua delle serpentine rinfrescando passivamente l'ambiente. Le parti della casa, insieme, costituiscono un ambiente protetto, interamente chiudibile e caldo per la stagione fredda (mai al di sotto dei 10 °C), e apribile e ampliabile verso l'esterno nella stagione calda (fino ai 35-40 °C).

Il secondo strato è costituito da una "scaffalatura" di pannelli di compensato, che circonda il nucleo centrale. Le bande sono sostenute da fogli di compensato in alcune zone, mentre in altre sono lasciate aperte, impostando così diverse configurazioni per il posizionamento di oggetti domestici, zone di privacy o di apertura, livelli di illuminazione secondo l'orientamento previsto, le cui variazioni fluttuano in modo intermittente. Completamente contenute all'interno del secondo

strato di parete, in una continuità spaziale, sono la cucina, la sala da pranzo, una camera al piano terra e uno studio al piano superiore.

Il terzo strato è un "guscio" di polycarbonato, una pelle traslucida costituita da pannelli ad alto isolamento, che filtrano i raggi del sole, registrano le ombre degli alberi e degli elementi esterni sulla propria superficie e inondano la zona interna di luce. Questo guscio crea due spazi parzialmente a doppio altezza lungo gli angoli esterni della casa, inondati di luce naturale diffusa, che includono il soggiorno e la camera matrimoniale, dove superfici di vetro scorrevoli amplificano gli spazi verso l'esterno.

Il quarto strato è definito "pelle morbida", realizzata in membrana, utilizzata per l'effetto serra come schermo protettivo, che riduce fino al 70% l'energia solare incidente sulla superficie e allo stesso tempo crea una barriera protettiva contro le zanzare e gli insetti. La membrana avvolge la casa e si collega lungo gli angoli dello strato in polycarbonato sottostante, creando una tenda-schermo che funge da portico tra dentro e fuori, completamente aperto alla brezza e alla vista, in dipendenza dei tre diversi gradi di trasparenza del tessuto.

L'involucro, con la sua forma a diamante, cambia luminosità e profondità di campo a seconda del momento della giornata e della stagione dell'anno. Inoltre sono previste nella membrana tre cerniere lampo per l'accesso dalla casa in giardino. Sia la scocca in polycarbonato sia la membrana di polietilene sono elementi caratterizzanti per le loro qualità performanti e il vantaggio, durante il processo costruttivo, dell'auto-installazione. Attraversando i diversi strati di involucro, si comprende il rapporto formale e geometrico che si instaura tra essi. A partire da un nucleo semplice rettangolare, i diversi strati costruiscono geometrie più complesse, descrivendo la trasformazione da una semplice scatola ad un diamante: così la casa è percepita dall'ambiente circostante, giocando con strati di nuovi materiali per creare differenti valori estetici, sensoriali e climatici, instaurando molteplici relazioni con la natura circostante, la luce, il clima.

A parte il nucleo di calcestruzzo, tutti gli altri elementi sono stati progettati scegliendo materiali poco costosi, con soluzioni di dettaglio facili da predisporre e altrettanto leggeri da montare. Unico aiuto alla forza degli operai è, infatti, il braccio mobile dell'autoarticolato che ha portato, già preassemblati dall'officina, gli scaffali di

legno che delimitano gli spazi principali della casa e che sorreggono le piastre di legno dei solai.

Il vero e proprio involucro esterno della casa è la cosiddetta “scocca lattiginosa”, che sigilla il volume della casa creando una luminosità diffusa, sapientemente sfruttata nei mesi più freddi per accumulare la radiazione solare. Tale involucro continuo, realizzato in lastre di policarbonato alveolare montate su profili di acciaio zincato, si affianca poi a grandi vetrate scorrevoli al piano terra e a piccole aperture a ribalta al secondo piano, sapientemente collocate per innescare un benefico raffreddamento nella stagione estiva. È proprio in questo periodo che entra maggiormente in gioco anche lo strato più esterno della casa, ossia la tensostruttura a membrana. Tra la scocca di policarbonato e la membrana esterna si creano spazi di differente ampiezza e vivibilità, tutti pensati come ampliamenti estivi della casa, uno spazio aperto che, andando oltre l'involucro di policarbonato, rimane interno alla membrana e dunque protetto. L'essenzialità degli elementi compositivi messi in campo, così come la semplicità delle soluzioni tecniche scelte, hanno reso conciliabili due traguardi difficilmente raggiungibili insieme: la messa in opera di nuove spazialità per la residenza, funzionali e dinamiche, e un'attenzione al contenimento dei costi che non rinuncia alla cura dei dettagli e del comfort.

Il comportamento termo-ottico della membrana

L'involucro tessile ha funzione di protezione solare e schermo per l'energia termica, e consiste in una combinazione di strisce di alluminio altamente riflettenti, che sono tessute insieme a fibre polimeriche. La forma a diamante, che dipende dalla direzione di orientamento delle vele, riflette dal 50 al 75% dei raggi solari, allontanandoli dall'edificio.

Inoltre, l'involucro tessile che avvolge e protegge l'edificio, costituito dal tessuto di poliammide che di solito si applica per le serre, presenta tre differenti densità di tessitura, in accordo con le direzioni dei punti cardinali: in tal modo, i due ambienti principali della casa sono inondati di luce. La funzione principale della membrana, in questo specifico caso studio, è quella di essere un elemento di protezione ambientale, non solo dai raggi solari, che provocano irraggiamento non desiderato

nella stagione o nelle ore più calde del giorno, ma anche dagli insetti, ponendosi come una sorta di enorme zanzariera che avvolge la casa e le chiusure sottostanti.

La membrana polimerica, intessuta con nastri di alluminio, è posta in tensione tramite tenditori a vite e tiranti di diametro 19 mm. Un'asta filettata, di diametro pari a 25 mm, è ancorata ai profili in alluminio della copertura costituita da pannelli in policarbonato, e ha la funzione di distanziare lo strato dei pannelli di chiusura da quello più esterno della membrana di protezione, in modo da fungere anche da supporto per consentire al tessuto di prendere la caratteristica forma a tenda.

Il progetto si pone come un'indagine sugli aspetti qualitativi delle chiusure. Lo strato tessile di involucro più esterno crea non solo una illuminazione diffusa e un ambiente domestico climaticamente confortevole, ma anche, attraverso le superfici di chiusura, a volte traslucide a volte riflettenti, contribuisce a conferire alla casa le sembianze di un "diamante" accogliente e protettivo.



Veduta della Wall House di giorno. (Fonte: Zanelli A., "Wall House", *Arketipo*, ottobre 2008, *IlSole24ore*, Milano)



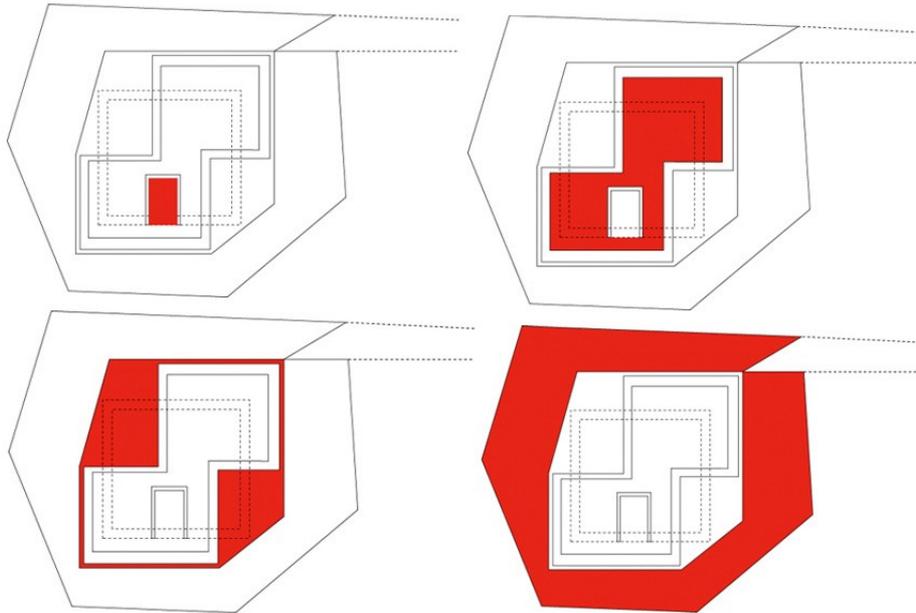
Veduta della Wall House di notte. (Fonte: Zanelli A., "Wall House", *Arketipo*, ottobre 2008, *IlSole24ore*, Milano)



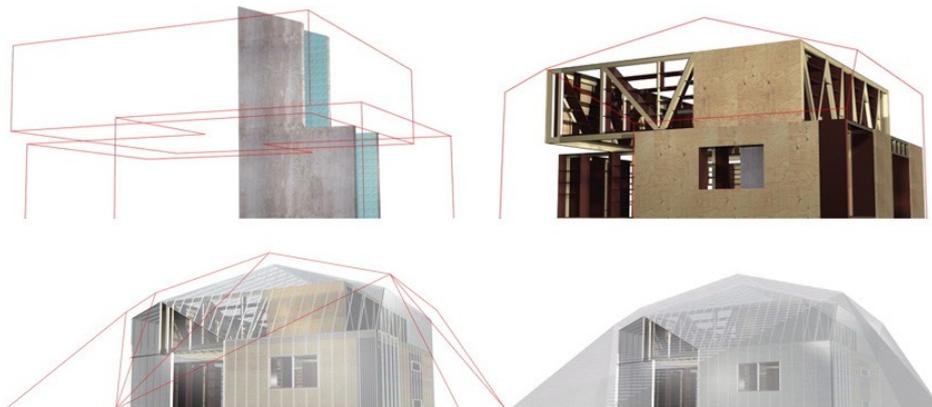
Interni della Wall House. (Fonte: Zanelli A., "Wall House", *Arketipo*, ottobre 2008, *IlSole24ore*, Milano)



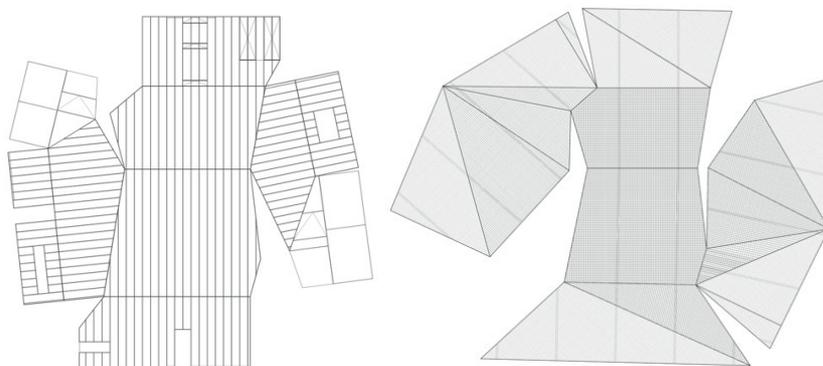
Vista dello spazio filtro tra interno ed esterno. (Fonte: Zanelli A., "Wall House", *Arketipo*, ott. 2008, *IlSole24ore*, Milano)



Schemi in pianta degli strati di involucro: nucleo centrale in c.a._pareti in legno_ pannelli in polycarbonato_ membrana esterna. (Fonte: Studio FAR)



Schemi tridimensionali degli strati di involucro: nucleo centrale in c.a._pareti in legno_ pannelli in polycarbonato_ membrana esterna. (Fonte: Studio FAR)

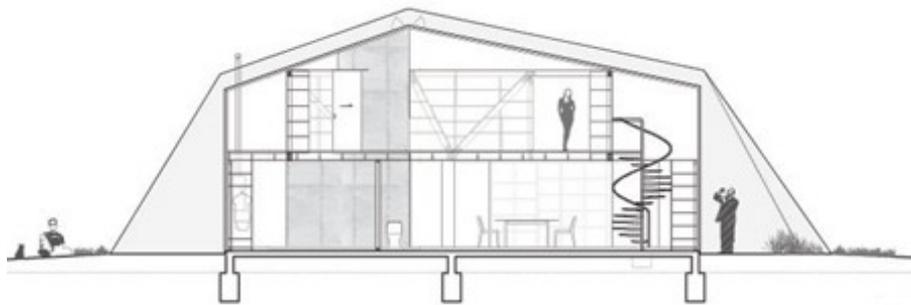
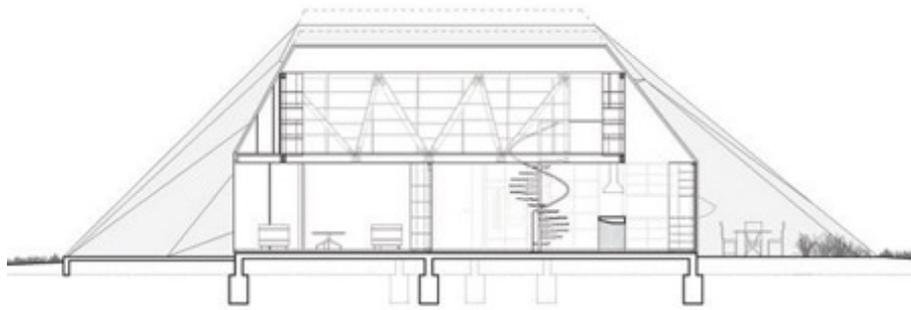


Schema dei moduli per i pannelli in polycarbonato e dei tagli per la membrana tessile.

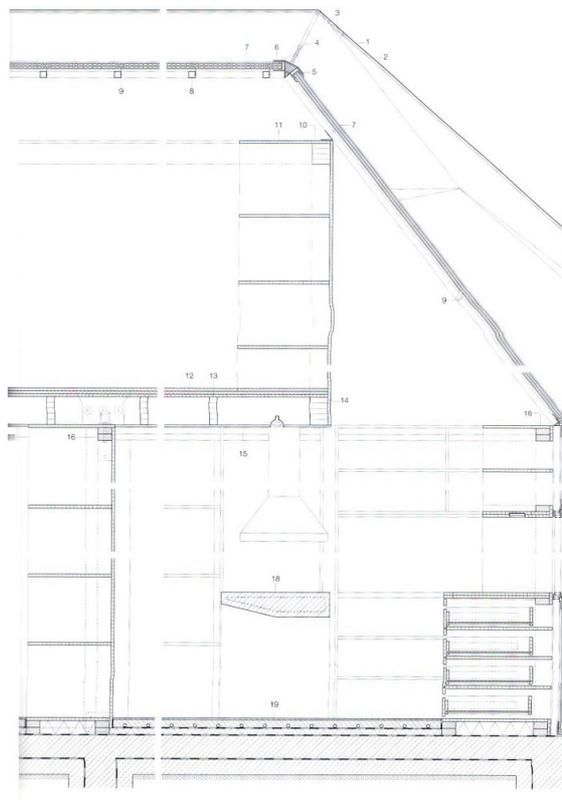
(Fonte: Studio FAR)



Fasi di montaggio della Wall House. (Foto: Studio FAR)



Sezioni della Wall House. (Fonte: Studio FAR)



- 1 polymer fabric with aluminium strips woven in
- 2 Ø 3 mm steel cable
- 3 turnbuckle
- 4 Ø 19 mm threaded rod in Ø 25 mm steel CHS
- 5 aluminium section with rubber seal
- 6 0,5 mm galvanized metal coping
- 7 40 mm twin-wall polycarbonate sheet
- 8 40/40/5 mm aluminium SHS
- 9 stainless steel purlin clip
- 10 115/135 mm laminated-timber beam
- 11 shelf construction:
18 mm plywood board
- 12 floor construction:
18 mm plywood board
20 mm impact-sound insulation
18 mm plywood board
- 13 50/185 mm laminated-timber beam
- 14 115/185 mm laminated-timber perimeter beam
- 15 12,5 mm plasterboard
- 16 2x 40/90 mm squared timber
- 17 aluminium awning-sash with double glazing
- 18 reinforced concrete stove
- 19 10 mm concrete, smoothed
50 mm underfloor heating screed
aluminium-foil separating layer
40 mm thermal insulation
polythene sealing layer
150 mm reinforced concrete slab
polythene sealing layer
subbase

Dettaglio tecnologico dell'attacco tra i pannelli in polycarbonato e la membrana tessile. (Fonte: *Detail* 2008, serie speciale 5)

3.1.4 INFLATABLE TEA HOUSE, Kengo Kuma, Francoforte 2008

La Inflatable Tea House è stata definita dal progettista un' "architettura che respira", descrivendo il suo comportamento con il contesto in cui sorge usando l'analogia con l'atto del respirare, che consiste nell'avere una comunicazione interattiva tra gli ambienti. A volte, infatti, l'architettura si rimpicciolisce, come se trattenesse il respiro, e altre volte respira a pieni polmoni ingrandendosi: con questa immagine si può descrivere un nuovo stile dinamico ideato per l'architettura contemporanea, una forma mutevole che interagisce con l'ambiente, dispiegandosi nello spazio come una sagoma aerea. Quando è attivato il sistema di ventilazione, la Tea house si gonfia prendendo la forma di un bianco materasso tessile ad alta tecnologia.

Il progetto, realizzato per il "Museum für angewandte Kunst" (MAK) di Francoforte, è una sorta di ibrido tra una scultura ed una struttura temporanea. Si tratta di un omaggio di alcune aziende giapponesi alla città di Francoforte ed in particolare al MAK, che ha legami molto forti con il Giappone grazie all'alto numero di collezioni orientali che ospita. Il risultato è una struttura pneumatica autoportante a doppia membrana, dalla singolare forma, che le è valso il soprannome di "nocciolina", poiché accosta due forme circolari di grandezza diversa proprio come il guscio dell'arachide. L'intenzione iniziale era proprio quella di creare un ambiente molto semplice, che concepisse la struttura, i materiali e la forma come un tutt'uno, aderendo nella concezione progettuale allo spirito di un ambiente minimale.

Anche le dimensioni dell'involucro, infatti, sono contenute, essendo la superficie coperta pari a circa 80 mq di membrana per lo strato esterno e 60 mq per l'interno della struttura pneumatica.

Tali dimensioni permettono di definire uno spazio intimo ed accogliente, nel quale la luce proveniente dall'esterno e morbidamente diffusa dal materiale tessile contribuisce ad offrire un adeguato comfort visivo, che rievoca il minimalismo giapponese nella tonalità completamente bianca dello spazio interno, dedicato alla cerimonia del tè, e quindi intimamente legato a rituali tradizionali.

La tecnologia del sistema involucro

I materiali impiegati per il progetto della Tea House hanno poco a che vedere con la tradizione, infatti il legno e le pareti scorrevoli, tradizionalmente utilizzate nell'architettura giapponese, sono state accantonate, mentre è rimasto come materiale tradizionale il bambù impiegato in minima parte alla base della struttura.

Le Tea Rooms provengono originariamente da uno spazio temporaneo chiamato "Kakoi". Sono rimasti fedeli alla tradizione i tatami, seppure in materiale sintetico, previsti all'interno dello spazio per la cerimonia del tè, così come i soffitti e le porte basse.

La struttura tessile, costituita da PTFE espanso, meglio conosciuto col nome commerciale di *Tenara*, è stata utilizzata in un sistema a doppia membrana con uno strato d'aria presente nell'intercapedine. Le due membrane sono collegate da una stringa di poliestere, i cui nodi sono posti in un campo di circa 600 millimetri, visibili all'esterno come piccoli punti sulla superficie tessile. Il *Tenara* non si compone di un materiale di base, in fibre di vetro o di poliestere, ed è il più morbido e più leggero tra le membrane impiegate in architettura; per questi motivi, dettati dalla volontà di far respirare la membrana espandendola e contraendola, il *Tenara* è stato scelto appositamente per questo progetto, anche per la sua elevata trasparenza che permette l'intermediazione "tra la realtà e il mondo immaginario". Il concetto dell'architettura che respira è un tentativo di approccio all'originale Tea Room, ambiente dedicato ad un momento intimo tra poche persone in una piccola stanza. La cerimonia è basata sulla sensibilità del buddismo Zen, sulla purificazione dello spirito in relazione con la natura, e rappresenta un momento di meditazione, la semplicità della stanza per tale motivo era essenziale nel progetto: assenza di mobili oggetti od ornamenti, a rappresentazione del vuoto a cui la meditazione Zen aspira. L'ispirazione alla tradizione antica si accompagna, nelle intenzioni del progettista, anche all'obiettivo di opporsi all'architettura di cemento del XX° secolo, che lo stesso Kengo Kuma definisce architettura che "non-respira".

Il sistema a doppia membrana viene realizzato mediante saldatura in alcuni punti dell'involucro, evitando qualsiasi ruga sulla copertura esterna, sebbene le pieghe erano prevedibili già in fase di progetto, a causa della concentrazione localizzata dei

carichi. La superficie di copertura esterna si sviluppa a distanza di 40-100 cm dalla superficie di copertura interna.

Al piano di calpestio le due coperture sono strettamente saldate insieme e, con un cadenza di circa 3-4 volte per mq, sono assemblate con sottili cavi sintetici in cui l'aria viene soffiata, in modo simile ad una barca a vela spinta dal vento. Le due coperture sono unite solo per punti, che conferiscono all'involucro una forma da palla da golf e definiscono la tessitura interna ed esterna della superficie. La stabilità di tali forme flessibili è data dall'ampiezza dell'attacco a terra, dal numero di punti di assemblaggio e dalla pressione interna immessa tra i due strati di membrana. Con una pressione interna di 1000 Pa l'organismo sta in piedi e con 1500 Pa è stabilizzato sufficientemente per resistere ad una tempesta. Il ventilatore preposto all'immissione d'aria è dimensionato per una pressione di 2200 Pa, regolabile così da prevedere spazio sufficiente per una quantità d'aria aggiuntiva. La Tea House ha resistito all'afflusso di 1000 visitatori in occasione della sua inaugurazione e a diverse fasi di montaggio e smontaggio, i cui tempi sono ridotti al minimo, essendo una struttura itinerante, che prevede anche la rimozione del ventilatore per poterla affittare.

Il comportamento termo-ottico della membrana

La membrana utilizzata per l'involucro tessile dalla Tea House è costituita da PTFE espanso spalmato in PTFE, più conosciuto come Tenara. Il materiale, come dichiara lo stesso progettista, è stato scelto in base alle sue caratteristiche di flessibilità e leggerezza, in quanto, a differenza delle membrane costituite da fibre di vetro come materiale di base, è malleabile, si espande e si contrae come se respirasse, rispondendo ad uno degli obiettivi del progetto, ovvero realizzare un'architettura che "respira".

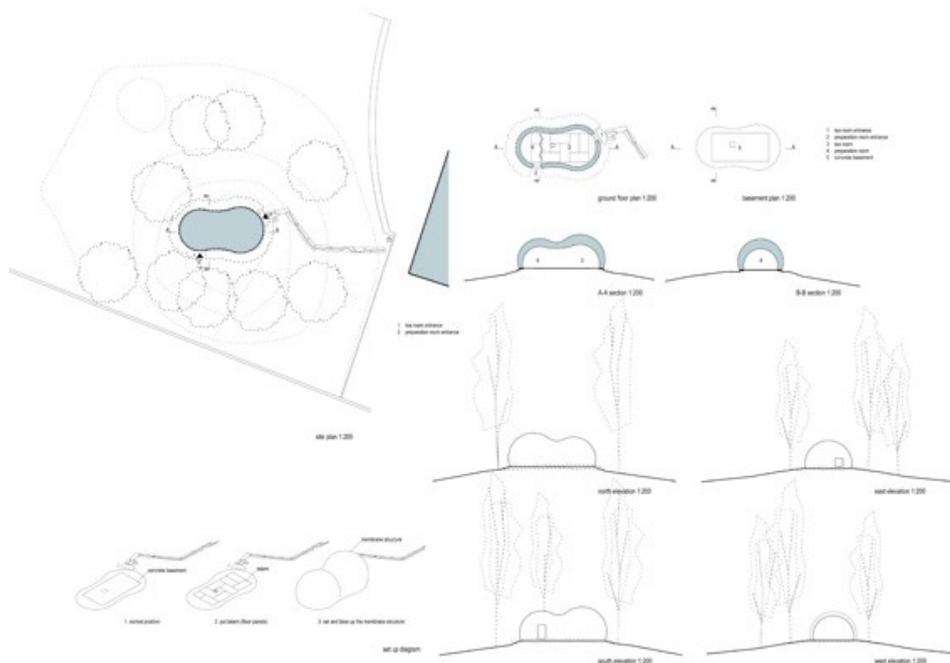
Inoltre, poiché il Tenara è molto trasparente, realizza un altro degli obiettivi prioritari del progetto, ovvero l'intermediazione tra la realtà e il mondo immaginario, rappresentato dalle antiche cerimonie del tè.

All'interno della Tea House, in una superficie di circa 20 mq, vi sono nove stuoie "tatami", un bollitore elettrico per l'acqua ed una stanza per la preparazione del tè. L'ambiente è concepito secondo una progettazione dello spazio di tipo minimalista,

ispirata alla cultura giapponese, dove l'uso della luce diventa essenziale. Una tecnologia LED integrata nell'involucro permette di fruire della Tea House anche di notte, grazie all'illuminazione artificiale che si diffonde dall'interno della membrana e la rende, all'esterno, un riferimento visivo e luminoso in armonia col paesaggio circostante.

La membrana in PTFE, infatti, presenta un elevato livello di traslucenza, grazie ad un fattore di trasmissione luminosa che raggiunge circa il 38%, con spessore di circa 0,5 mm e una camera d'aria tra i due strati tessili che presenta un'intercapedine variabile dai 400 ai 1000 mm. Il fattore di trasmissione solare è pari a circa il 40%, ma grazie alla camera d'aria è garantito un buon livello di comfort termico.

Infine, la membrana presenta una buona resistenza ai raggi ultravioletti, proteggendo l'ambiente interno da eventuali danni arrecati dalla radiazione solare, grazie ad una trasmissione agli UV contenuta entro il 30%.



Planimetria di ubicazione della Tea House. (Fonte: Kengo Kuma Studio)



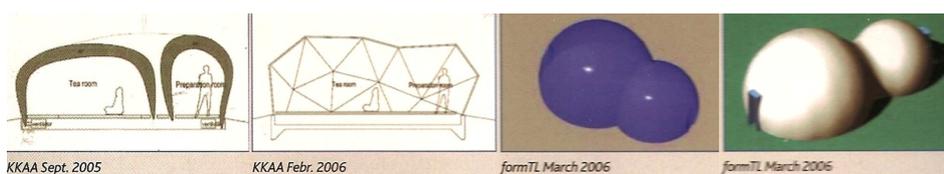
Veduta della Tea House di notte. (Fonte: Kengo Kuma Studio)



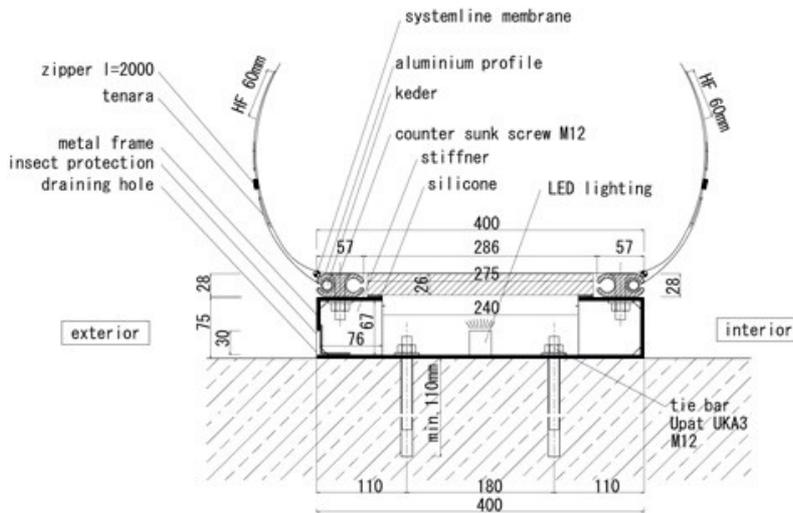
Interno della Tea House, con la cerimonia del tè. (Fonte: Kengo Kuma Studio)



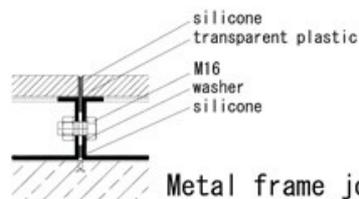
Interno della Tea House, con la superficie di involucro "puntinata". (Fonte: Kengo Kuma Studio)



Evoluzione del concept. ((Fonte: Schmid, G., Lombardi, S., "Modern Tea House 2007 for Mak Frankfurt", *Tensinews*, dicembre 2007)



Base connection detail 1:10



Metal frame joint detail 1:10

Dettaglio tecnologico dell'attacco a terra della struttura pneumatica. ((Fonte: Kengo Kuma Studio)



Sistema di pompaggio della pressione all'interno della struttura pneumatica. ((Fonte: Schmid, G., Lombardi, S., "Modern Tea House 2007 for Mak Frankfurt", *Tensinews*, dicembre 2007. Foto: formTL)

3.1.5 AUDITORIUM ZENITH, Massimiliano e Doriana Fuksas, Strasburgo 2008

Il progetto per lo Zenith di Strasburgo rientra nella linea delle strutture dedicate ai grandi spettacoli, realizzate in Francia da quando, alla fine degli anni Settanta, il Ministero della Cultura ha promosso la qualificazione degli spazi dedicati agli spettacoli dal vivo, consultando i professionisti del settore e redigendo insieme a loro una serie di requisiti essenziali per la loro progettazione. L'obiettivo principale è conciliare le esigenze di grande afflusso di persone per gli spettacoli di musica rock e pop, con quelle di performance acustiche e comfort visivo richieste per altri tipi di concerto. Le scelte architettoniche, così come quelle costruttive, sono tutte orientate a fornire un insieme efficiente e congruente con il marchio "Zenith": ampi spazi per il pubblico, adeguati locali per gli artisti, acustica perfetta e buone visuali per la sala. Il progetto è stato studiato per soddisfare alcune richieste iniziali: modularità, equilibrio tra gli spazi, qualità della visibilità per gli spettatori, facilità nell'adeguarsi alle esigenze delle programmazioni, ottimizzazione dei costi.

All'ingresso Ovest della città di Strasburgo, nel comune di Eckbolsheim, l'edificio di tela arancione emerge da uno scenario urbano orizzontale per affermare la sua presenza colorata nel paesaggio. L'edificio è stato pensato come un elemento scultoreo, autonomo, e, nonostante il volume monumentale, dotato di leggerezza e dinamismo grazie alla traslazione e rotazione delle ellissi che costituiscono l'ossatura metallica esterna, a sua volta rivestita da una membrana sottile. Il basamento dell'edificio tra il terreno e il primo arco, ad un'altezza di 5 metri, è rivestito da una superficie in acciaio arancione laccato per dare continuità di forma e colore di trattamento nella parte superiore.

La tecnologia della tensostruttura, solitamente utilizzata come copertura, è stata portata in facciata e messa in opera in modo da formare fasce continue ad inclinazione variabile, che ricordano le pieghe di una lanterna. La forma architettonica si avvicina a un oggetto di *Land Art*, come l'ha definita lo stesso progettista, e si allontana dalle tipologie a "tenda" o a "vela" caratterizzate da pennoni e tiranti, alle quali siamo abituati normalmente quando si parla di strutture per concerti. La novità sta nell'aver superato lo skyline tipico delle tensostrutture: qui non c'è più traccia del contrappunto tra pali alti e punti di ancoraggio bassi. Gli

andamenti sinusoidali necessari a soddisfare i vincoli statici della tensostruttura a membrana sono completamente reinterpretati: netti cambi di direzione del tessuto, esternamente percepibile come un'unica superficie arancione scolpita da rientranze e sporgenze curve sull'orizzontale quanto spigolose sulla verticale.

Le dimensioni dell'involucro sono elevate, pari a circa 14000 mq, e la scelta della membrana in chiusura consente di usufruire di ampie porzioni di luce naturale e diffusa all'interno dell'arena.

La tecnologia del sistema involucro

La sala interna è concepita come un nucleo, protetto da un guscio duro, plasmato su linee di differenti raggi di curvatura, studiate per ottimizzare il rapporto tra massima capienza e migliore visuale. Il guscio è costruito in calcestruzzo armato per controllare al meglio le performance acustiche. L'involucro, invece, è leggero, colorato, traslucido, tessile. Tramite questa seconda pelle sottile, sensibile alla luce diurna e capace di accendersi nel paesaggio notturno, si ricrea la magica atmosfera degli spettacoli viaggianti.

La struttura della superficie esterna, con ellissi prive di asse, fa sì che la facciata abbia la parete a inclinazione variabile, con una torsione ellittica fuori asse che segnala l'ingresso dell'edificio.

La tela arancione veste con leggerezza il volume in cemento armato della sala per gli spettacoli, chiusa e opaca, e crea lo spazio della hall e del deambulatorio. Dall'interno, la hall, che si impone per la sua altezza, dà un'immagine teatrale e rafforza il rapporto tra interno e esterno. La copertura della cupola posta al di sopra dello spazio dedicato agli spettacoli e delle aree di servizio è in acciaio ricurvo e in policarbonato sulla corona esterna al di sopra della hall e del deambulatorio. Dalla hall si accede alla sala attraverso larghi corridoi laterali e accessi centrali, mentre larghe scale conducono alle gradinate superiori. Gli spazi dedicati ai professionisti sono situati nella parte posteriore dell'edificio, su tre livelli compresi nel rivestimento della struttura.

L'architettura dell'auditorium è, quindi, costituita da diverse tipologie e tecniche costruttive, che definiscono il nucleo centrale in cemento armato, l'ossatura in acciaio e l'involucro tessile.

Il nucleo centrale dell'edificio è costituito da un'arena a pianta ellissoidale sul cui perimetro poggiano a incastro le travi della copertura in carpenteria metallica con pannelli in lamiera grecata. Le sottili pareti curve dell'arena sono costituite da altissimi setti di cemento completamente ciechi che, nell'insieme, formano il volume di una geometria astratta segnata solamente da alcuni fori irregolari e qualche finestra. I fori sono stati utilizzati in una prima fase per l'aggancio dei ponteggi esterni e, in un secondo tempo, come punto d'ancoraggio per i bracci dell'ossatura esterna in acciaio. L'ossatura d'acciaio è costituita da 22 putrelle (lunghe oltre 60 metri) che sorreggono una sorta di porticato a sbalzo, che, in parte ancorato alle pareti di cemento e in parte appoggiato al suolo, è ideato per costituire lo scheletro di supporto al materiale di rivestimento esterno. Cinque giganteschi anelli orizzontali, costituiti da tubi di acciaio con una sezione di circa 50 cm, posti a intervalli irregolari (in media a sei metri l'uno dall'altro) e inclinati secondo direzioni diverse, avvolgono il complesso, con funzione di supporto alla membrana composta da strisce tese a cavallo degli anelli.

Uno "spazio-diaframma", atrio del teatro esterno all'arena ma contenuto all'interno del rivestimento tessile, è stato realizzato per imprimere al complesso una forma dinamica capace di esprimere un movimento di torsione, sul disegno in pianta di due ellissi traslate e ruotate fra loro una sull'altra. La prima ellisse che corrisponde alla forma dell'arena è traslata rispetto alla seconda che coincide con la tensostruttura e si sviluppa lungo il perimetro. La sezione verticale, poi, è svasata dal basso verso l'alto e lungo il perimetro, assumendo più di 20 conformazioni diverse grazie al disassamento fra i centri delle due ellissi. Lo spazio-diaframma che si crea a tutta altezza fra telo e pareti di cemento si stringe e si allarga lungo tutto il perimetro.

La membrana utilizzata per l'involucro è un tessuto in fibra di vetro rivestito in silicone, altamente trasparente e resistente alla tensione, con un'elevata resistenza al fuoco, idrorepellente e molto malleabile. Il telo è stato tagliato e giuntato a caldo nei laboratori dell'azienda produttrice. Una volta confezionate le lunghe strisce per le dieci fasce anulari orizzontali della "lanterna", sono state trasportate in cantiere e agganciate alla carpenteria attraverso un montaggio a secco. Il tessuto, collegato come un nastro agli anelli d'acciaio e a sottili cavi di

tensionamento, avvolge la sala avvicinandosi e allontanandosi dal guscio di calcestruzzo, creando uno spazio intermedio carico di dinamicità. La geometria complessa della “lanterna” ha determinato un’alta varietà dimensionale e formale fra un telo e l’altro. La progettazione integrata fra la struttura in carpenteria e quella dei teli ha ridotto al minimo le difficoltà e le incongruenze in fase di montaggio, che avrebbero compromesso la buona riuscita del risultato finale: una superficie liscia e tesa senza pieghe.

In fase di montaggio, è stata creata una sorta di “barella” sulla quale stendere i teli per arrivare in quota con i pezzi pronti da montare. Questi sono agganciati con delle piattine ai cinque anelli tubolari della struttura di acciaio e pinzati fra loro. La forte componente siliconica ha reso i teli particolarmente malleabili, ed è stato facile maneggiarli senza creare danni da piegatura. Una volta completato il rivestimento, i teli sono stati tesi e tirati verso l’interno per mezzo di cavi, a loro volta rivestiti con una guaina arancione, in modo da raggiungere la particolare configurazione a lanterna. Il risultato visibile è una superficie esterna uniforme e continua che, all’esterno, non mostra in alcun modo gli elementi di fissaggio della membrana.

Il comportamento termo-ottico della membrana

L’involucro edilizio, costituito da un rivestimento esterno di membrana arancione, illuminato dall’interno rivela un gioco di ombre cinesi proiettate sull’involucro circolare contenente la sala per gli spettacoli, e funge da schermo per le informazioni sulle varie programmazioni previste all’interno dell’auditorium. La membrana, quindi, è stata scelta non solo in funzione di involucro esterno dalle valenze cromatiche e formali, ma anche come schermo funzionale alle attività previste all’interno dell’edificio. Il volume architettonico percepito dall’esterno conferisce, di giorno, all’edificio l’immagine di un manufatto fermo su se stesso, quasi ermetico, se si esclude il parziale distacco dal suolo che permette di introdursi all’interno attraverso una serie di porte disposte su una parete vetrata. Di notte, invece, l’edificio stesso diventa spettacolo grazie all’illuminazione artificiale che si diffonde dall’interno e rende la superficie esterna traslucida una fonte luminosa in

grado di trasformarsi in segnale di riferimento per i visitatori ma anche di svelare la struttura sottostante, costituita da colonne e pilastri in acciaio.

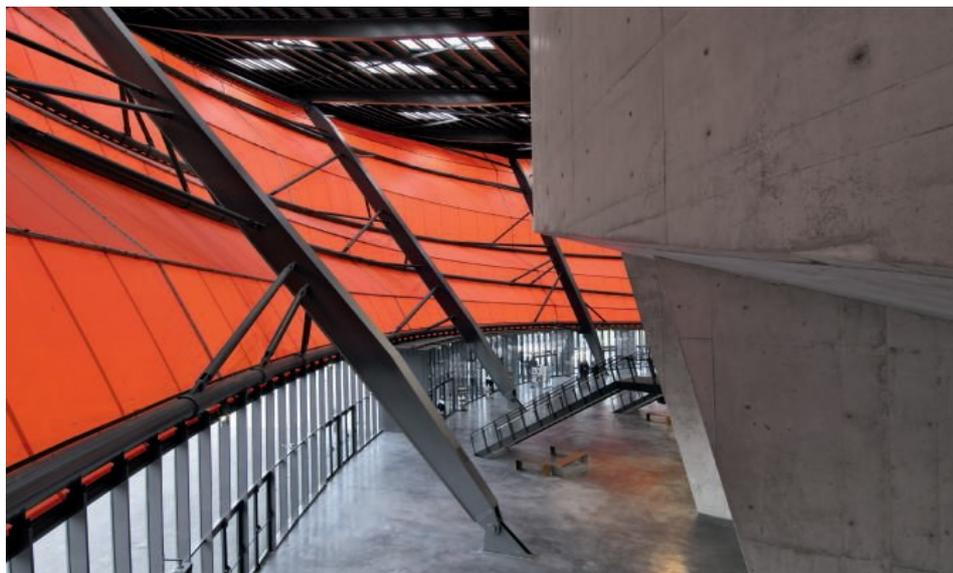
Per verificare la traslucenza e il colore del telo impiegato, si è resa necessaria la costruzione di un *mock up*, modello a grande scala in grado di riprodurre uno spicchio di tensostruttura. Dalle prove effettuate, la membrana, di colore arancione, presenta un fattore di trasmissione luminosa pari al 15%, e fattori di assorbimento riflessione e trasmissione solare pari rispettivamente a circa 13, 68 e 20%, con uno spessore pari a 0.85 mm. Questo significa che la membrana presenta un elevato potere riflettente e quindi protegge in maniera ottimale dalla radiazione solare e al contempo presenta un'ottima resistenza ai raggi ultravioletti, con trasmissione degli stessi quasi nulla.



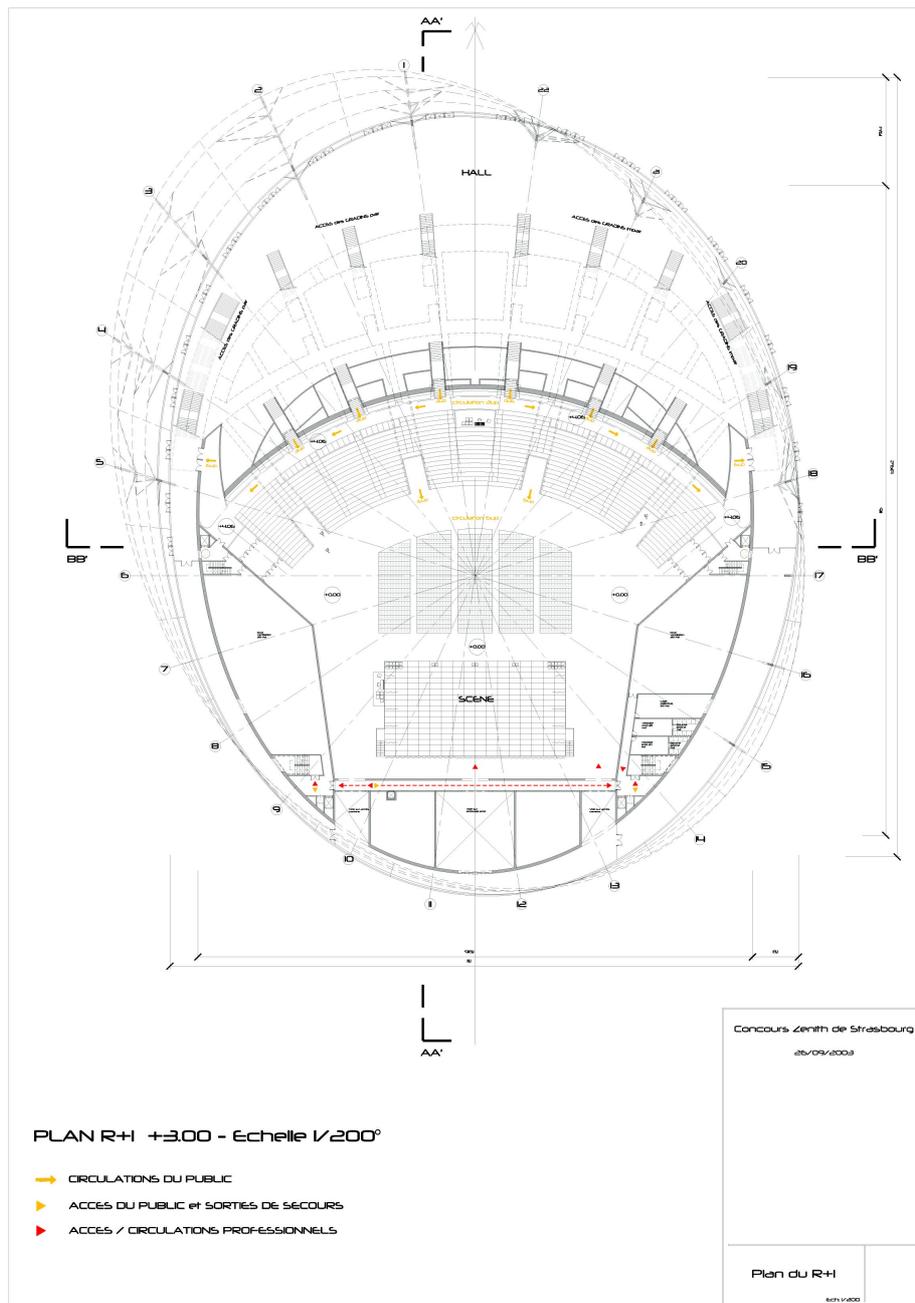
Vista diurna dello Zenith di Strasburgo.



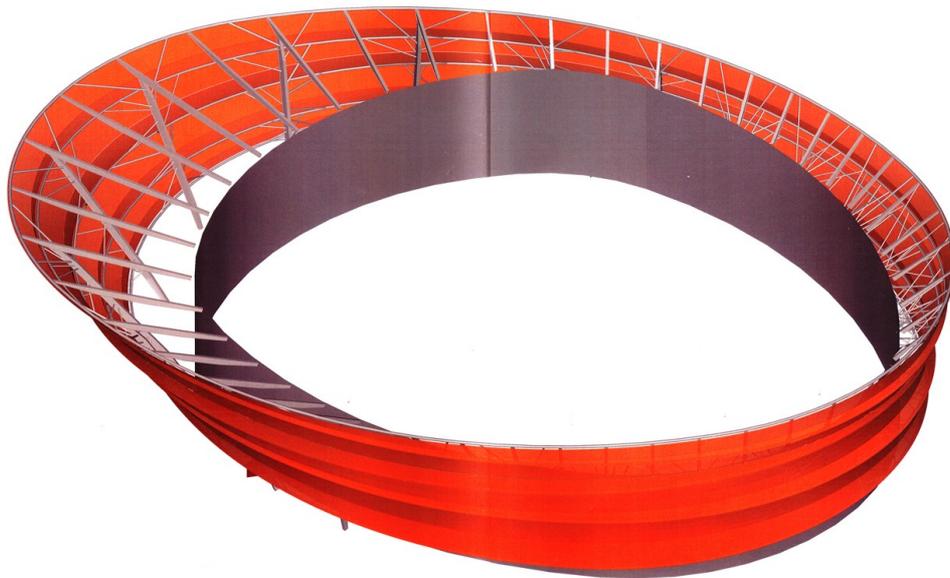
Vista notturna dello Zenith di Strasburgo. (Fonte: www.canobbio.com)



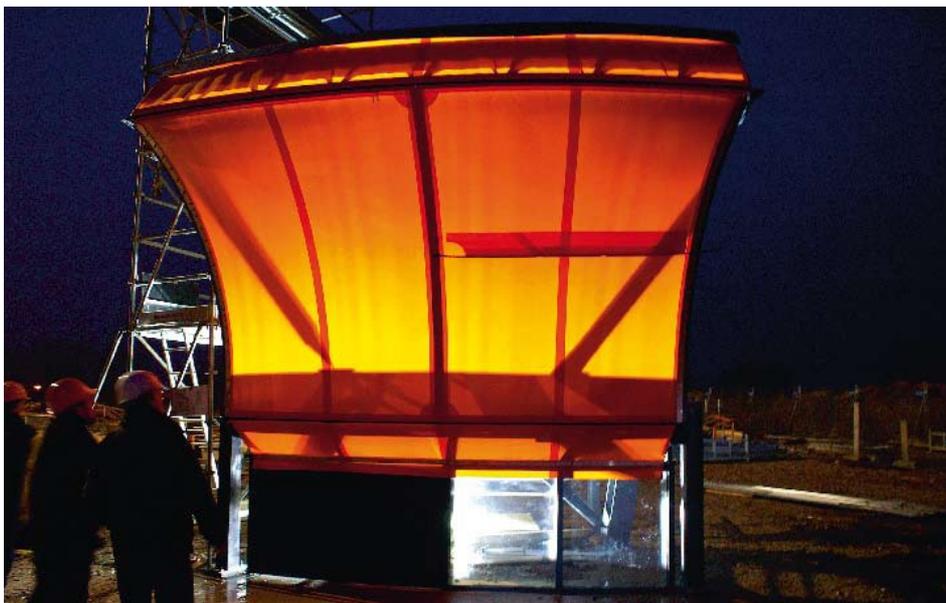
Vista interna dello Zenith di Strasburgo. (Foto di Moreno Maggi)



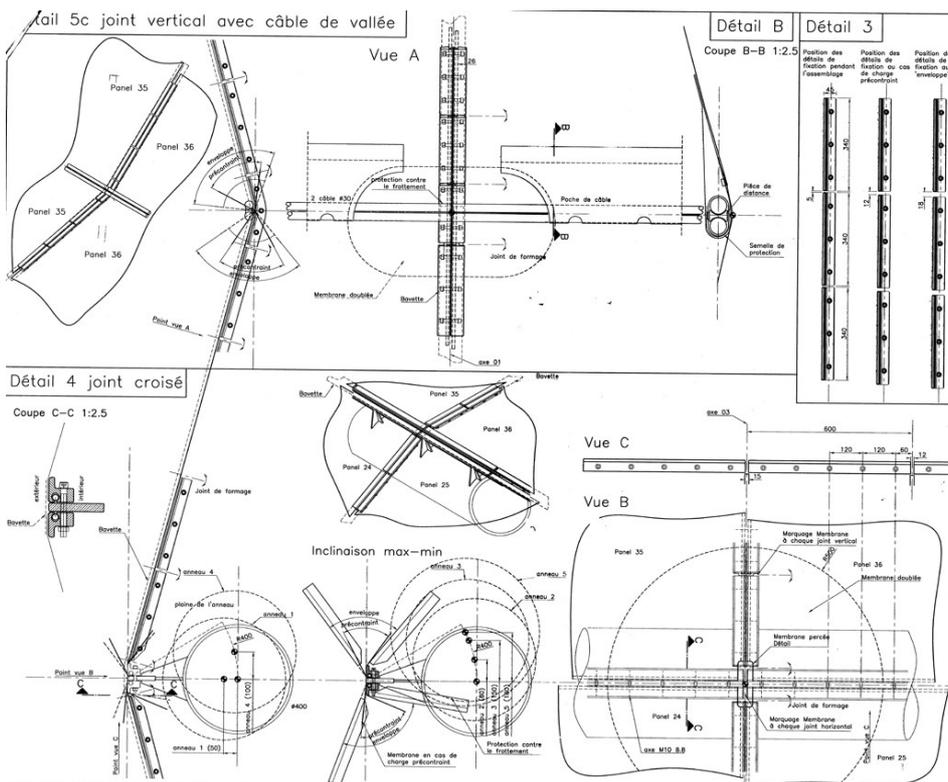
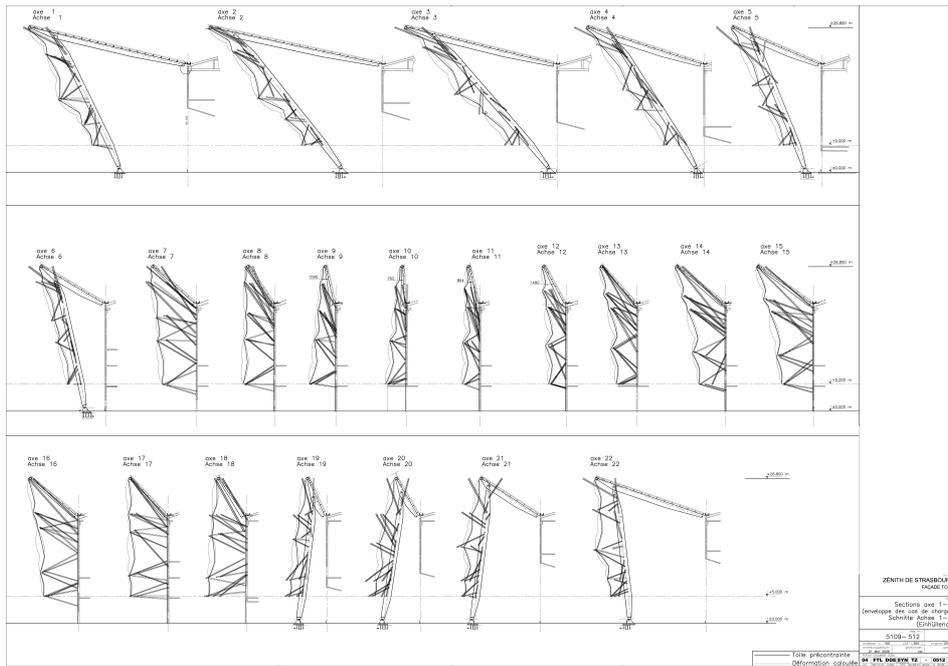
Pianta dell'auditorium Zenith di Strasburgo. (Fonte: Massimiliano e Doriana Fuksas Studio)



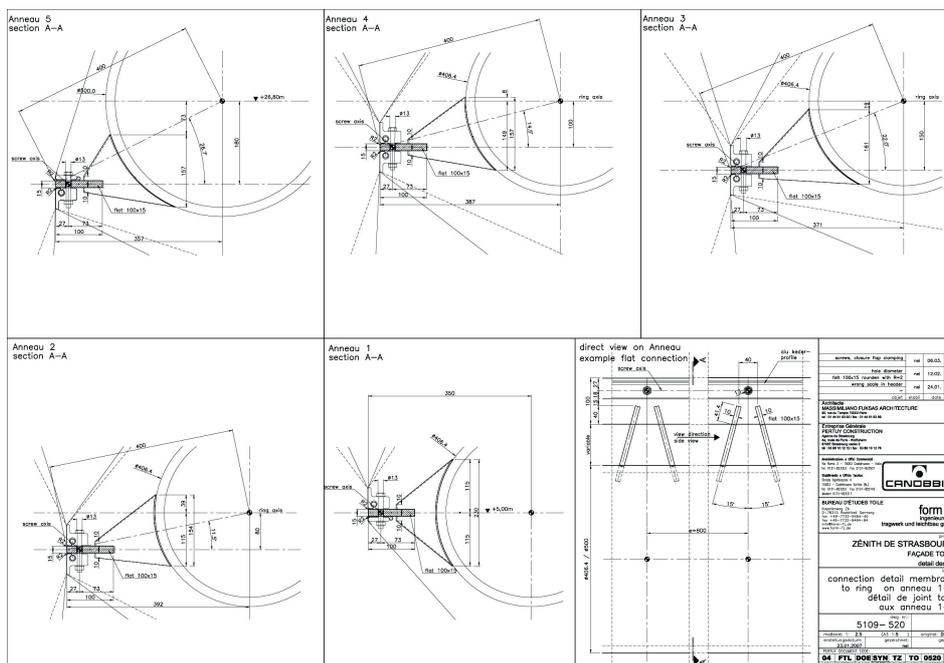
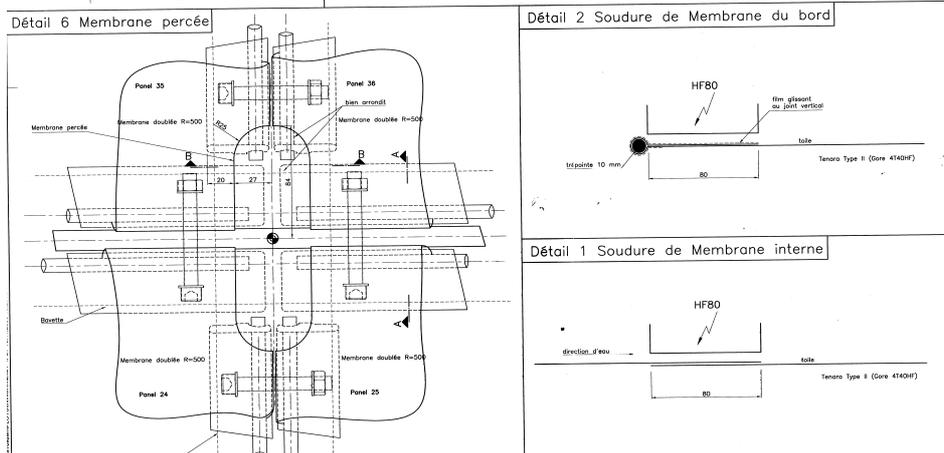
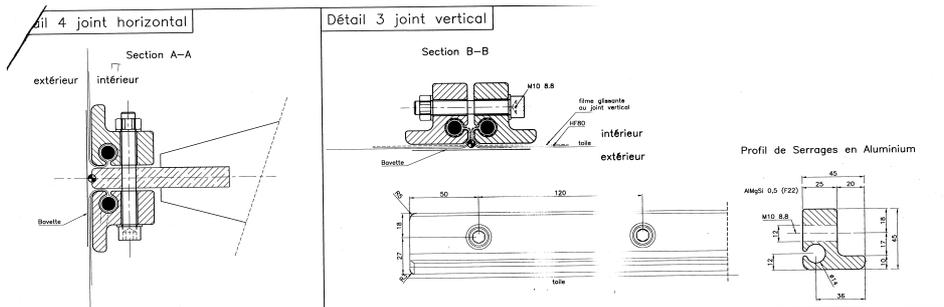
Rendering della struttura: pareti in cemento armato, carpenterie metalliche e membrana esterna. (Fonte: Massimiliano e Doriana Fuksas Studio)



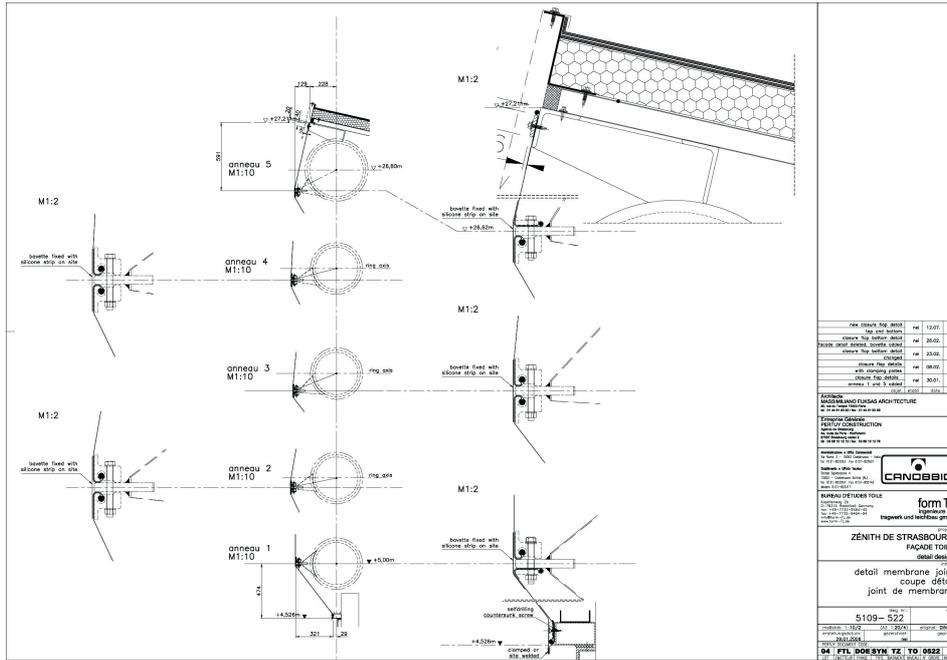
Mock-up costruito per testare il comportamento alla luce della membrana impiegata per l'involucro. (Fonte: Canobbio S.p.A.)



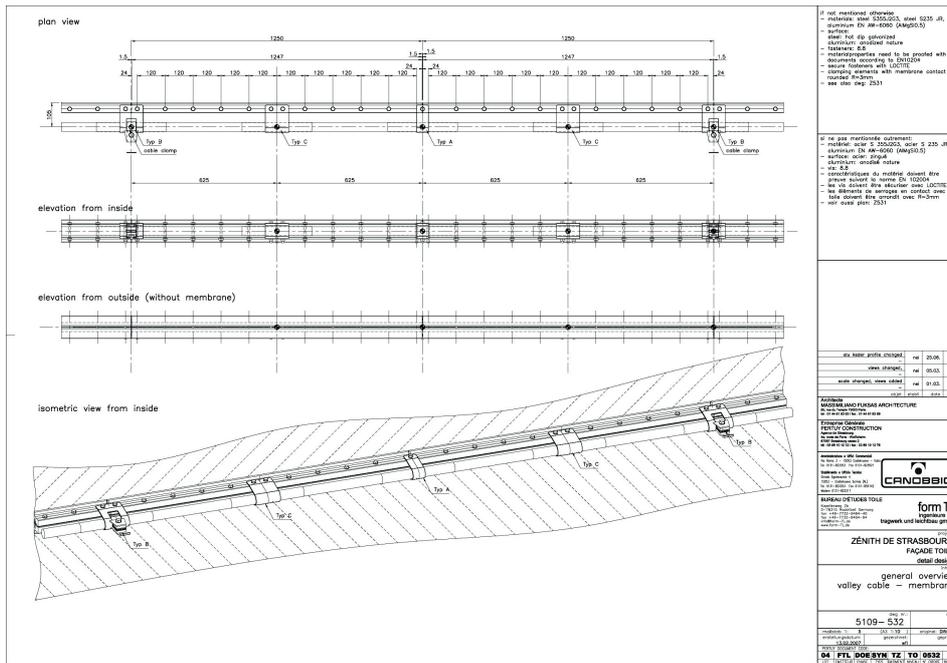
Dettagli tecnologici, sezioni della facciata e fissaggio dei teli. (Fonte: Massimiliano e Doriana Fuksas Studio)



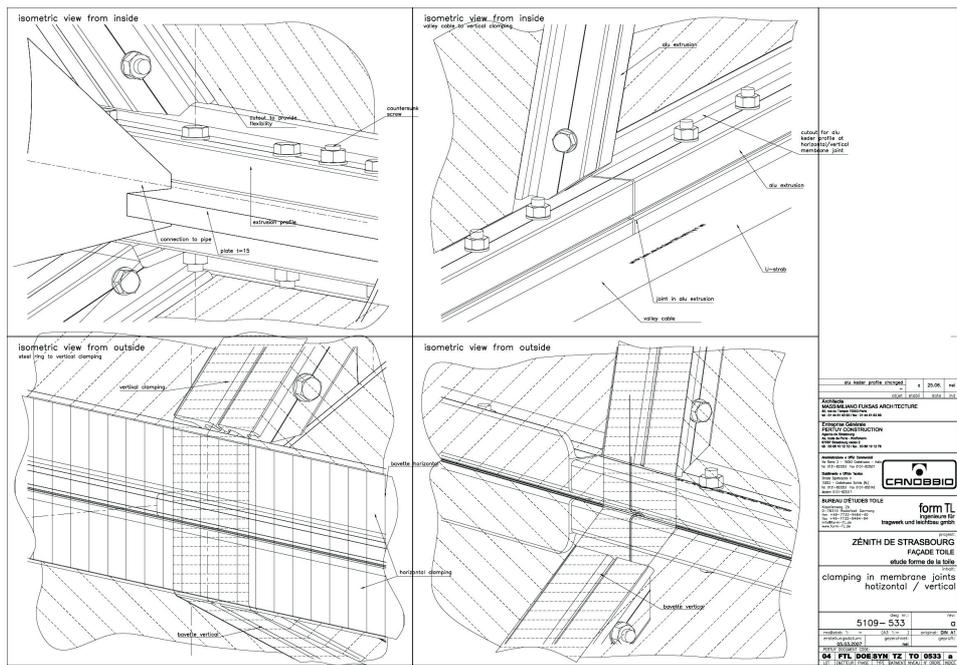
Dettagli tecnologici. (Fonte: Massimiliano e Doriana Fuksas Studio)



Dettagli tecnologici. (Fonte: Massimiliano e Doriana Fuksas Studio)



Dettagli tecnologici. (Fonte: Massimiliano e Doriana Fuksas Studio)



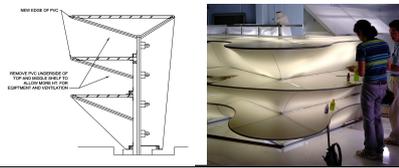
Dettagli tecnologici. (Fonte: Massimiliano e Doriana Fuksas Studio)



Fissaggio della membrana per l'attacco alla sottostruttura portante. (Fonte: Canobbio S.p.A.)

Si riportano di seguito le schede di analisi dei casi studio proposti.

NEGOZIO UNITED BAMBOO^a

DATI IDENTIFICATIVI DELL'EDIFICIO	Anno di costruzione	2003							
	Progettista	Acconci Studio							
	Confezionatore e installatore	Hisao Horiguchi, JUN co.							
	Tipologia di intervento	Ristrutturazione e rifunzionalizzazione							
DATI AMBIENTALI DELL'EDIFICIO	Zona climatica	Temperata							
	Luogo	Tokyo							
	Collocazione urbana	Centro abitato							
DATI FUNZIONALI DELL'EDIFICIO	Superficie coperta	60 mq							
	Utilizzo	Permanente							
	Impiego	Commerciale							
	Funzione	Showroom Tipologia merceologica: abbigliamento							
DATI TECNOLOGICI DELL'EDIFICIO	Tipologia costruttiva	Sistema chiuso a membrana integrato							
	Materiale impiegato	Poliestere / PVC							
	Proprietà fisico-meccaniche 	<ul style="list-style-type: none"> - natura del materiale: plastico - peso: 600 g/mq ca. - resistenza a trazione: 250 daN/5cm ca. - resistenza al fuoco: classe 2 (media) - resistenza allo sporco: media - resistenza chimica: buona - resistenza allo strappo: 180 N 							
aspetti relativi alla PERCEZIONE VISIVA	Parametri di controllo (da cui dipendono i requisiti tecnologici di riferimento):								
	PROPRIETA' TERMO-FISICHE E OTTICHE (in funzione dello spessore) ^b								
	s	ε	αG	ρG	τG	τL	U	g	T-UV
0.8	86	18	77	5	10	5,7 (singolo strato)	8	0	
aspetti relativi alla INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA e REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE	Parametri di controllo per gli								
	ASPETTI DEL PROCESSO COSTRUTTIVO, GESTIONE E DISMISSIONE								
	Procedimento costruttivo	Industriale							
	Tecnica costruttiva 	Acciaio e membrana tessile La struttura in acciaio permette alla membrana in tensione di assumere forme sinuose, che rivestono l'edificio sia all'esterno che all'interno, e nascondere la struttura, definendo l'ambiente con attrezzature e spazi richiesti dalla funzione dell'edificio.							
	Modalità esecutiva	Assemblaggio a secco							
	Giunti di connessione	Cerniere, tenditori							
	Tempi di costruzione	Inizio costruzione settembre 2003, finito a dicembre 2003							
	Costi di costruzione	\$1,000,000,000 (di cui \$650,000 per rivestimento di PVC, struttura metallica e illuminazione a LED)							
	Costi energetici	Non pervenuti							
	Facilità di lavorazione	La membrana in poliestere/PVC è lavorabile con facilità, in quanto materiale leggero e flessibile.							
	Facilità di manovra	Grazie al suo peso leggero e alla sua consistenza non rigida, il prodotto confezionato consente la facile manovra durante i lavori.							
Facilità di immagazzinamento	Le membrane confezionate per la messa in opera sono facilmente immagazzinabili in breve tempo e in								

^a **Fonti delle informazioni:**

Acconci Studio, 20 Jay Street, Suite 215, Brooklyn, NY 11201

Heshmati, Ali, "Screen test", *Fabric ARCHITECTURE*, marzo/aprile 2007

^b **s**= spessore [mm] **T-UV**= trasmissione dei raggi ultravioletti [%]

αG= fattore di assorbimento solare [%] **ρG**= fattore di riflessione solare [%] **τG**= fattore di trasmissione solare [%] **τL**= fattore di trasmissione luminosa [%]

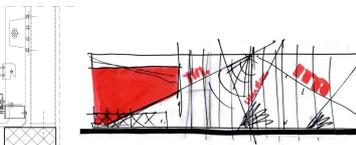
ε= emissività [%] (rapporto tra radiazione emessa dalla superficie e radiazione emessa dal corpo nero alla stessa T: $0 \leq \epsilon \leq 1$)

U (o **K**)= Trasmittanza termica [W/mq K] **g** (o **SHGC**) = Fattore solare [%]

		poco spazio, grazie al loro peso e consistenza.	
	Facilità di trasporto	La facilità di trasporto del prodotto in sito è ottima, in quanto non ha bisogno di speciali mezzi di trasporto.	
	Facilità di manutenzione	Il materiale è resistente allo sporco e la pulizia si effettua con detersivi ecologici. Esente da manutenzione, le ispezioni sono però raccomandate, per riparare difetti o danni da impatti meccanici.	
	Tempi di esercizio (durata di vita)	10/15 anni	
	Costi di smaltimento	Sistema reversibile <i>(dichiarato dai progettisti)</i> Organismo: smontabile Materiale: riciclabile Componenti: reversibili e riutilizzabili	costi non eccessivi, considerando le caratteristiche del sistema
	Note: TEMPI DI PROGETTAZIONE Il progetto ci è stato proposto nella primavera del 2002, dopo la prima visita abbiamo avanzato 6-7 idee discusse con i clienti, che non avevano che fare col PVC, ma che non hanno soddisfatto nessuno. All'inizio del 2003 abbiamo iniziato a lavorare con l'idea di un negozio morbido, proprio come un tessuto. Nella primavera del 2003 abbiamo stabilito che l'unico materiale in grado di restituire il nostro <i>concept</i> era il PVC e, nell'estate del 2003, abbiamo testato diversi tessuti. Il cliente ci ha poi assegnato come consulente l'architetto Kenichi Ueki, con cui abbiamo sviluppato il progetto definitivo. Durante l'agosto 2003 si è elaborato il progetto esecutivo e la costruzione è iniziata a settembre, completata a dicembre dello stesso anno [°] . ^c		

^c Da un'intervista elettronica della scrivente ai progettisti, maggio 2010.

BASE OPERATIVA LUNA ROSSA^d

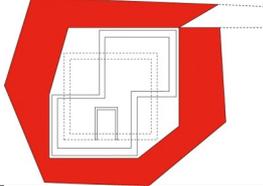
DATI IDENTIFICATIVI DELL'EDIFICIO	Anno di costruzione	2006								
	Progettista	Renzo Piano Building Workshop								
	Confezionatore e installatore	Tensoforma Trading								
	Tipologia di intervento	Costruzione ex-novo								
DATI AMBIENTALI DELL'EDIFICIO	Zona climatica	Temperata								
	Luogo	Valencia								
	Collocazione urbana	Lungomare								
DATI FUNZIONALI DELL'EDIFICIO	Superficie coperta	3100 mq								
	Utilizzo	Stagionale								
	Impiego	Produttiva								
	Funzione	Base operativa per regate								
DATI TECNOLOGICI DELL'EDIFICIO	Tipologia costruttiva	Sistema chiuso a membrana integrato								
	Materiale impiegato	Fibra di Kevlar / Carbonio Policarbonato alveolare								
	Proprietà fisico-meccaniche 	<ul style="list-style-type: none"> - natura del materiale: plastico (kevlar/ carbonio) rigido (policarbonato) - peso pannelli completi: 1500 g/mq ca. (peso policarbonato alveolare: 1300 g/mq peso kevlar: 250 g/mq) - resistenza a trazione: 3,6 GPa ca. - resistenza al fuoco: classe B2 (buona) - resistenza allo sporco: buona - resistenza chimica: alta - resistenza allo strappo: 700-4450 N 								
aspetti relativi alla PERCEZIONE VISIVA	Parametri di controllo (da cui dipendono i requisiti tecnologici di riferimento): PROPRIETA' TERMO-FISCHE E OTTICHE (in funzione dello spessore)									
	s	ε	α_G	ρ_G	τ_G	τ_L	U	g	T-UV	
	40	-	9	9	82	50 (fiocco) 10 (randa)	2,7	88	< 30	
aspetti relativi alla INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA e REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE	Parametri di controllo per gli ASPETTI DEL PROCESSO COSTRUTTIVO, GESTIONE E DISMISSIONE									
	Procedimento costruttivo					Industriale				
	Tecnica costruttiva 					Alluminio, pannelli rigidi in policarbonato e membrana tessile La struttura in alluminio è leggera e permette l'assemblaggio con la membrana e il pannello in policarbonato, costituendo un unico pannello leggero.				
	Modalità esecutiva 					Assemblaggio a secco L'assemblaggio tra la struttura e la membrana di involucro è a secco, tramite biadesivo acrilico tra pannelli e membrana, con silicone tra membrana e telaio di alluminio e ganci a sospensione per montanti e traversi in estrusi di alluminio.				
	Giunti di connessione					Cucitura, tenditori, adesivi, bullonature Cucitura tra le vele, ganci e bullonature tra le strutture di alluminio, biadesivo tra membrana e pannelli di policarbonato.				
	Tempi di costruzione					40 giorni				
Costi di costruzione					Non quantificabili in base al materiale impiegato per l'involucro, in quanto il tessuto utilizzato per il rivestimento è costituito dalle vecchie vele di Lunarossa fornite dal committente. Trattandosi di					

^d **Fonti delle informazioni:**

Renzo Piano Building Workshop Studio, Via Rubens 29, 16158 Genova
 Poli, Tiziana, "Leggero e indeformabile come una vela", *Arketipo*, luglio 2006
www.architetturatessile.polimi.it

		materiali dimessi da precedente diverso utilizzo non si può attribuire un valore di riferimento.	
Costi energetici		<i>Non pervenuti</i>	
Facilità di lavorazione		L'assemblaggio tra vela e pannelli in policarbonato ha richiesto una serie di prove per verificare la resistenza meccanica degli elementi e definire il comportamento dei materiali a contatto tra loro, ovvero il controllo delle dilatazioni differenziali. Le verifiche prima della posa in opera sono state: prove di trazione a rottura delle vele singole, accoppiate all'elastomero dopo la cucitura, e posizionate nel profilo di alluminio e prove per la verifica della resistenza e delle dilatazioni tra vela, biadesivo e policarbonato.	
Facilità di manovra		I pannelli finiti sono imballati per la spedizione, permettendo buona facilità di manovra in cantiere.	
Facilità di immagazzinamento		I pannelli sono leggeri ma hanno dimensioni diverse tra loro, quindi richiedono modalità di immagazzinamento più articolate e spazi appositi.	
Facilità di trasporto		La facilità di trasporto del prodotto in sito è buona. I 485 pannelli (circa 7 mq ognuno) giungono in cantiere preassemblati e vengono poi montati in opera.	
Facilità di manutenzione		È fondamentale evitare che la vela fileggi (ovvero che venga colpita dal vento orizzontalmente alla sua superficie) e che entri in contatto con candeggina o altri prodotti a base di ipoclorito di sodio.	
Tempi di esercizio (durata di vita)		<i>Non pervenuti</i>	
Costi di smaltimento		Sistema reversibile <i>(dichiarato dai progettisti)</i> Organismo: smontabile Materiale: riciclato e riciclabile Componenti: riutilizzabili	costi non eccessivi, considerando le caratteristiche del sistema
Note: La produzione dei pannelli ha richiesto una procedura abbastanza complessa, una prima fase di taglio delle vele e assemblaggio secondo gli schemi di taglio, seguita dall'applicazione dell'elastomero sul perimetro della vela, poi inserita all'interno dei profili di alluminio e pretesa mediante macchina a martinetti idraulici. Il pretensionamento della vela trasforma la membrana in un elemento strutturale rigido, che resiste bene a sollecitazioni esterne.			

WALL HOUSE^e

DATI IDENTIFICATIVI DELL'EDIFICIO	Anno di costruzione	2007							
	Progettista	FAR frohn&rojas							
	Confezionatore e installatore	Santiago de Chile							
	Tipologia di intervento	Costruzione ex-novo							
DATI AMBIENTALI DELL'EDIFICIO	Zona climatica	Tropicale							
	Luogo	Santiago del Cile							
	Collocazione urbana	Area suburbana							
DATI FUNZIONALI DELL'EDIFICIO	Superficie coperta	230 mq							
	Utilizzo	Permanente							
	Impiego	Residenziale							
	Funzione	Casa unifamiliare							
DATI TECNOLOGICI DELL'EDIFICIO	Tipologia costruttiva	Tensostruttura a membrana su sottostruttura in pannelli di policarbonato, scaffalatura in legno e nucleo in cemento armato							
	Materiale impiegato	Polietilene/Poliammide con nastri di alluminio							
	Proprietà fisico-meccaniche 	- natura del materiale:	plastico						
	- peso:	200 g/mq ca.							
	- resistenza a trazione:	fino a 300 kN/m ca.							
	- resistenza al fuoco:	classe HB							
	- resistenza allo sporco:	alta							
	- resistenza chimica:	molto buona							
	- resistenza allo strappo:	500-700 MPa							
aspetti relativi alla PERCEZIONE VISIVA	Parametri di controllo (da cui dipendono i requisiti tecnologici di riferimento): PROPRIETA' TERMO-FISICHE E OTTICHE (in funzione dello spessore)								
	s	ε	αG	ρG	τG	τL	U	g	T-UV
	-	-	-	50-75	-	elevata	1,65 (policarbonato, s = 40 mm)	-	(filtrati UV-B e UV-C e trasmessi UV-A) Resistenza media
aspetti relativi alla INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA e REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE	Parametri di controllo per gli ASPETTI DEL PROCESSO COSTRUTTIVO, GESTIONE E DISMISSIONE								
	Procedimento costruttivo	Industriale							
	Tecnica costruttiva 	Cemento armato, pannelli rigidi in policarbonato, struttura in legno e pannelli in compensato e membrana tessile La membrana dell'involucro più esterno è autoinstallante e si collega ai pannelli di policarbonato.							
	Modalità esecutiva 	Assemblaggio a secco L'assemblaggio tra la membrana e la struttura sottostante è a secco, tramite aste che si agganciano ai pannelli di policarbonato, e piastre bullonate tra policarbonato e compensato di legno. L'assemblaggio ad umido è presente solo nel nucleo centrale in c.a. su cui si assemblano i successivi strati di involucro.							
	Giunti di connessione	Aste, tenditori, piastre La membrana è connessa alla struttura sottostante tramite aste filettate di 25 mm di diametro, giuntate su profili zincati ed è tenuta sotto forma di tenda grazie a tenditori a vite e tiranti di 19 mm di diametro.							
	Tempi di costruzione	<i>Non pervenuti.</i> Essendo la parte in membrana facilmente autoinstallante, i tempi di montaggio possono variare.							
	Costi di costruzione	600 €/mq							
	Costi energetici	<i>Non pervenuti</i>							

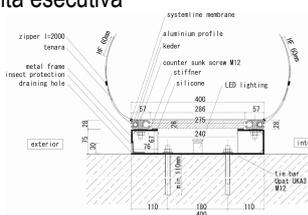
^e **Fonti delle informazioni:**

Studio FAR, Georgstr. 15-17 50676 Köln, <http://www.f-a-r.net/index.htm>

Zanelli, Alessandra, "Wall House", *Arketipo*, ottobre 2008, *IlSole24ore*, Milano

Facilità di lavorazione	La membrana in polietilene è lavorabile con facilità, in quanto materiale leggero e flessibile.	
Facilità di manovra	Grazie al suo peso leggero e alla sua consistenza non rigida, il prodotto confezionato consente la facile manovra durante i lavori.	
Facilità di immagazzinamento	Le membrane confezionate per la messa in opera sono facilmente immagazzinabili in breve tempo e in poco spazio, grazie al loro peso e consistenza.	
Facilità di trasporto	Unico ausilio meccanico per il montaggio è il braccio mobile dell'autoarticolato che ha portato, già preassemblati dall'officina, gli scaffali di legno.	
Facilità di manutenzione	La membrana è facilmente manutenibile, in quanto autoportante, smontabile, eventualmente sostituibile.	
Tempi di esercizio (durata di vita)	<i>Non pervenuti</i>	
Costi di smaltimento	Sistema reversibile <i>(dichiarato dai progettisti)</i> Organismo: smontabile Materiale: parzialmente riciclabile Componenti: reversibili e riutilizzabili	costi non eccessivi, considerando le caratteristiche del sistema
<p>Note: i progettisti hanno pensato di vendere i disegni per il modello della casa sul sito www.yourwallhouse.net, per dare la possibilità ai clienti di costruirsi e personalizzarsi la casa da soli. I disegni consistono in: schemi che includono le istruzioni per usarli, disegni tecnici dettagliati e simulazioni climatiche per le varie località, con specifiche e raccomandazioni per l'utilizzo dei materiali. Come affermato dai progettisti: "i clienti - molto entusiasti del loro nuovo ambiente - desideravano condividere la loro esperienza e ci hanno incoraggiato ad offrire il progetto della Wall House ad altri per apprezzare la sua particolare atmosfera. Abbiamo deciso di mettere a disposizione di potenziali clienti idee, dando ai futuri interessati la possibilità di costruire la loro versione. Insieme ai loro tecnici, o in collaborazione con il nostro ufficio, rettifiche o ulteriori idee possono essere sviluppate, in base a esigenze personali, interessi e condizioni climatiche locali".</p>		

MODERN TEA HOUSE^f

DATI IDENTIFICATIVI DELL'EDIFICIO	Anno di costruzione	2007																									
	Progettista	Kengo Kuma																									
	Progetto strutturale	formTL																									
	Confezionatore e installatore	Canobbio																									
DATI AMBIENTALI DELL'EDIFICIO	Tipologia di intervento	Costruzione ex-novo																									
	Zona climatica	Temperata																									
	Luogo	Francoforte																									
	Collocazione urbana	Centro urbano, Parco del Museums für Angewandte Kunst																									
DATI FUNZIONALI DELL'EDIFICIO	Superficie coperta	35 mq (80 mq involucro esterno e 60 mq interno)																									
	Utilizzo	Permanente																									
	Impiego	Espositivo																									
	Funzione	Spazio cerimoniale																									
DATI TECNOLOGICI DELL'EDIFICIO	Tipologia costruttiva	Sistema pneumatico																									
	Materiale impiegato	Tenara: PTFE espanso/PTFE																									
	Proprietà fisico-meccaniche	 <ul style="list-style-type: none"> - natura del materiale: plastico - peso: 630 g/mq - resistenza a trazione: 84 KN/m - resistenza al fuoco: classe B1/A2 - resistenza allo sporco: buona - resistenza chimica: molto buona - resistenza allo strappo: 925 N 																									
	aspetti relativi alla PERCEZIONE VISIVA	Parametri di controllo (da cui dipendono i requisiti tecnologici di riferimento): PROPRIETA' TERMO-FISICHE E OTTICHE (in funzione dello spessore) <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>s</th> <th>ε</th> <th>αG</th> <th>ρG</th> <th>τG</th> <th>τL</th> <th>U</th> <th>g</th> <th>T-UV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.5 (più camera d'aria da 400 a 1000)</td> <td>-</td> <td>6-10</td> <td>60</td> <td>37-40</td> <td>19-38</td> <td>2</td> <td>40-45</td> <td>1-32 Resistenza buona</td> </tr> </tbody> </table>									s	ε	αG	ρG	τG	τL	U	g	T-UV	0.5 (più camera d'aria da 400 a 1000)	-	6-10	60	37-40	19-38	2	40-45
s	ε	αG	ρG	τG	τL	U	g	T-UV																			
0.5 (più camera d'aria da 400 a 1000)	-	6-10	60	37-40	19-38	2	40-45	1-32 Resistenza buona																			
aspetti relativi alla INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA e REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE	Parametri di controllo per gli ASPETTI DEL PROCESSO COSTRUTTIVO, GESTIONE E DISMISSIONE																										
	Procedimento costruttivo	Industriale																									
	Tecnica costruttiva																										
	Modalità esecutiva	 <p>Assemblaggio a secco La struttura pneumatica viene gonfiata con un sistema di pompaggio dell'aria. I due strati di membrana sono collegati tra loro tramite saldatura in alcuni punti, definendone l'aspetto dell'involucro.</p>																									
	Giunti di connessione	Saldatura tra le ferze di membrana, 306 giunti sintetici con moschettoni avvitabili per la connessione tra i due strati di membrana con cinghie a strappo , cerniere tra la struttura pneumatica e la trave scatolare di fondazione.																									
Tempi di costruzione	1 mese (fase di produzione e assemblaggio)																										

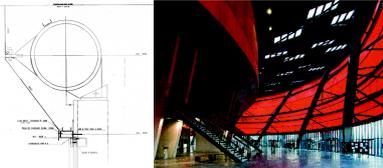
^f **Fonti delle informazioni:**

Kengo Kuma Studio
www.canobbio.com

Schmid, G., Lombardi, S., "Modern Tea House 2007 for Mak Frankfurt", *Tensinews*, dicembre 2007

Costi di costruzione	<i>Non pervenuti</i>	
Costi energetici	<i>Non pervenuti</i>	
Facilità di lavorazione	La membrana in Tenara è lavorabile con facilità, in quanto leggera e flessibile.	
Facilità di manovra	Grazie alla sua consistenza non rigida, il prodotto confezionato consente la facile manovra durante i lavori, infatti si può distendere sul suolo senza occupare volume per la messa in opera.	
Facilità di immagazzinamento	Le membrane confezionate per la messa in opera sono facilmente immagazzinabili in breve tempo e in poco spazio, grazie al loro peso e consistenza.	
Facilità di trasporto	La facilità di trasporto del prodotto in sito è ottima, in quanto non ha bisogno di speciali mezzi di trasporto essendo facilmente imballabile in rotoli leggeri.	
Facilità di manutenzione	Il materiale è resistente allo sporco, alle alte temperature e ai raggi UV. Esente da manutenzione, le ispezioni sono però raccomandate, per riparare difetti o danni da impatti meccanici.	
Tempi di esercizio (durata di vita)	25 anni	
Costi di smaltimento	Sistema reversibile <i>(dichiarato dai progettisti)</i> Organismo: smontabile Materiale: riciclabile Componenti: riutilizzabili	costi non eccessivi, considerando le caratteristiche del sistema
Note: i tempi di progettazione hanno richiesto circa un anno, da marzo 2006 a giugno 2007. In particolare per la fase di concept del progetto il progettista ha iniziato già nel settembre 2005 a dar forma all'organismo, fino a trasferire dopo sei mesi i disegni concettuali al gruppo formTL per il progetto strutturale che, in circa un anno, ha dato forma concreta alla struttura.		

AUDITORIUM ZENITH⁹

DATI IDENTIFICATIVI DELL'EDIFICIO	Anno di costruzione	2008							
	Progettista Strutturista tessile	Massimiliano e Doriana Fuksas Form TL							
	Confezionatore e installatore	Canobbio							
	Tipologia di intervento	Costruzione ex-novo							
DATI AMBIENTALI DELL'EDIFICIO	Zona climatica	Temperata							
	Luogo	Strasburgo							
	Collocazione urbana	Periferia							
DATI FUNZIONALI DELL'EDIFICIO	Superficie coperta	14000 mq							
	Utilizzo	Permanente							
	Impiego	Ricreativo							
	Funzione	Auditorium							
DATI TECNOLOGICI DELL'EDIFICIO	Tipologia costruttiva	Sistema chiuso a membrana su sottostruttura metallica e nucleo centrale in cemento armato							
	Materiale impiegato	Fibra di vetro/ silicone (ATEX 5000 TRIAL)							
	Proprietà fisico-meccaniche 	<ul style="list-style-type: none"> - natura del materiale: plastico - peso: 1165 g/mq - resistenza a trazione: 105 kN/m - resistenza al fuoco: classe A2 (incombustibile) - resistenza allo sporco: buona - resistenza chimica: molto buona - resistenza allo strappo: 700 N 							
aspetti relativi alla PERCEZIONE VISIVA	Parametri di controllo (da cui dipendono i requisiti tecnologici di riferimento): PROPRIETA' TERMO-FISICHE E OTTICHE (in funzione dello spessore)								
	s	ε	αG	ρG	τG	τL	U	g	T-UV
	0.85	86	13.2	68.4	20-25	15	-	25-30	Resistenza ottima
aspetti relativi alla INTEGRAZIONE INVOLUCRO-STRUTTURA e REALIZZAZIONE E UTILIZZAZIONE	Parametri di controllo per gli ASPETTI DEL PROCESSO COSTRUTTIVO, GESTIONE E DISMISSIONE								
	Procedimento costruttivo	Industriale							
	Tecnica costruttiva 	Cemento armato, acciaio e membrana tessile La struttura in acciaio ancorata al nucleo in cemento armato è il supporto su cui si tende la membrana.							
	Modalità esecutiva 	Assemblaggio a secco L'assemblaggio tra la struttura e la membrana di involucro è a secco, i teli sono agganciati con piattine ai cinque anelli tubolari di acciaio e pinzati fra loro. Una volta completato il rivestimento, i teli sono tesi e tirati verso l'interno per mezzo di cavi.							
	Giunti di connessione	Pinze, tenditori, ganci, bullonature Pinze tra i teli di membrana, ganci e bullonature per la struttura in acciaio, cavi tra membrana e acciaio.							
	Tempi di costruzione	Inizio lavori: Marzo 2005 Apertura: Gennaio 2008							
	Costi di costruzione	48.000.000,00 €							
	Costi energetici	Non pervenuti							
	Facilità di lavorazione	La forte componente siliconica ha reso i teli particolarmente malleabili, ed è stato facile maneggiarli senza creare danni da piegatura.							
	Facilità di manovra	Grazie al suo peso leggero e alla sua consistenza non							

⁹ **Fonti delle informazioni:**

Massimiliano e Doriana Fuksas Studio
Zanelli, Alessandra, "Luminosità tessile", *Arketipo*, marzo 2008, *IlSole24ore*, Milano
www.architetturatessile.polimi.it

		rigida, il prodotto confezionato consente la facile manovra in fase di montaggio, tramite una "barella" sulla quale i teli sono stesi per arrivare in quota con i pezzi pronti da montare.		
	Facilità di immagazzinamento	Le membrane confezionate per la messa in opera sono facilmente immagazzinabili in breve tempo e in poco spazio, grazie al loro peso e consistenza.		
	Facilità di trasporto	La geometria complessa della "lanterna" ha determinato un'alta varietà dimensionale e formale fra un telo e l'altro, che però facilmente sono stati trasportati in cantiere, grazie alla loro leggerezza e flessibilità.		
	Facilità di manutenzione	Il materiale ha un'ottima resistenza allo sporco ed è insensibile all'azione degradante dei raggi ultravioletti, quindi esente da manutenzione specifica.		
	Tempi di esercizio (durata di vita)	10 anni		
	Costi di smaltimento	<table border="1"> <tr> <td> Sistema smontabile <i>(dichiarato dai progettisti)</i> Organismo: smontabile Materiale: riciclabile Componenti: reversibili e riutilizzabili </td> <td>costi non eccessivi, considerando le caratteristiche del sistema</td> </tr> </table>	Sistema smontabile <i>(dichiarato dai progettisti)</i> Organismo: smontabile Materiale: riciclabile Componenti: reversibili e riutilizzabili	costi non eccessivi, considerando le caratteristiche del sistema
Sistema smontabile <i>(dichiarato dai progettisti)</i> Organismo: smontabile Materiale: riciclabile Componenti: reversibili e riutilizzabili	costi non eccessivi, considerando le caratteristiche del sistema			
	Note: i progettisti dichiarano che il rivestimento di tessuto, attraverso un'illuminazione dall'interno, è stato scelto per motivi estetici e funzionali: è capace di rivelare un gioco di ombre cinesi sull'involucro circolare che contiene la sala per gli spettacoli e soprattutto funge da schermo per le informazioni sulla programmazione degli spettacoli, dei concerti e delle manifestazioni culturali.			

3.2 Analisi dei risultati e individuazione delle criticità

Alla luce dello studio svolto sui casi studio, si evidenziano alcune considerazioni.

Innanzitutto, da una prima lettura dello stato dell'arte nel settore degli involucri tessili, sembra in calo l'interesse verso le architetture interamente realizzate in membrana, mentre è molto più diffuso il loro utilizzo in strutture integrate con altri materiali e sistemi. Le ragioni sono essenzialmente legate ai costi di esercizio, alla difficile reversibilità di strutture uniche e fortemente caratterizzate, e al fatto che le strutture cosiddette *ibride*, caratterizzate da una forte integrazione tra materiali e tecnologie diverse, sembrano rispondere meglio ai requisiti prestazionali indicati dalle nuove esigenze dell'utenza ma anche dalle rinnovate esigenze ambientali, ad esempio nell'impiego come elementi di protezione solare o visiva.



Figura 49. Membrane utilizzate come elementi schermanti nella Phoenix Library. (Fonte: Armijos, Samuel J., *Fabric architecture*, Norton, Londra, 2008, p. 148)

L'impiego delle membrane in modo permanente è possibile già da diverso tempo grazie ai più recenti studi sui tessili tecnici, garantiti oggi anche per trent'anni di vita utile dalla messa in opera. La tipologia dei "padiglioni espositivi" comprendenti grandi serre, musei, expo, ma anche delle strutture per il tempo libero, come auditorium o stadi, è ancora molto frequente, permettendo l'espressione massima delle proprietà delle strutture tensili, capaci di realizzare, con costi e tempi ridotti, progetti emblematici e rappresentativi. Per quanto riguarda l'impiego negli edifici per

uffici, le strutture a membrana sono state utilizzate maggiormente laddove è stato necessario caratterizzare l'immagine di una società o di un'azienda, anche per ristrutturare o ampliare le proprie sedi, poiché sono in grado di rappresentare la contemporaneità meglio di altre tecnologie, anche se sempre più frequentemente gli involucri tessili sono apprezzati ancora di più per la loro capacità di garantire alti livelli di prestazione visiva, fondamentali per questa tipologia funzionale. L'utilizzo nella residenza, invece, è ancora lontano, poiché si riscontrano ostacoli vari, tra cui il principale è sicuramente quello economico, in quanto ancora inaccessibili sono i costi per soluzioni di tipo standard relativamente ad involucri tessili. Ben più diffusi, invece, sono i tessuti tecnici adibiti a protezione solare, come nell'utilizzo di tende o schermature di complessi residenziali.



Figura 50. Dynaform for BMW Francoforte, progetto di Franken architekten.
(Fonte: Armijos, Samuel J., Fabric architecture, Norton, Londra, 2008)



Figura 51. Kinematografi_Planet_Tus_Slovenija_Maribor. (Fonte: <http://www.maribor-pohorje.si/images>)

Relativamente agli aspetti luminosi, invece, si evince dallo studio svolto una notevole capacità da parte delle chiusure tessili di garantire quei livelli di benessere visivo richiesti per diverse tipologie di utenza. In particolare, grazie alla possibilità di integrare le membrane tessili con materiali trasparenti come il vetro o il policarbonato o le pellicole in ETFE, l'illuminazione degli ambienti viene favorita dalla integrazione tra luce diretta e diffusa, che permette un miglior comfort visivo evitando fenomeni fastidiosi come l'uniformità luminosa eccessiva o l'abbagliamento.

Inoltre le membrane tessili si sono rivelate, e continuano a farlo, altamente efficienti nella protezione solare e visiva, in quanto sono in grado di ridurre l'irraggiamento solare ma nello stesso tempo di lasciare inalterata la luminosità degli ambienti da proteggere. Infatti, da recenti studi è risultato che le tende da sole possono migliorare l'efficienza energetica dei serramenti riducendo la dispersione di calore invernale del 10% con conseguente risparmio di energia. Inoltre, ad esempio negli esercizi commerciali, le tende retro illuminate possono garantire visibilità notturna e contemporaneamente svolgere funzione di luce di sicurezza. E' possibile considerare gli schermi tessili come complementi dell'edificio, e la loro applicazione "additiva" è capace di modificarne le prestazioni e l'aspetto, assimilandoli a strati permeabili all'aria, all'acqua e alla luce.

Negli ultimi anni, grazie alla ricerca scientifica, le prestazioni dei materiali hanno raggiunto eccellenti risultati, in particolare per il controllo del fattore solare e luminoso, aspetti che rientrano già nella fase progettuale in cui viene implicata la scelta del tessuto più adatto alle richieste degli utenti. In tal modo la facciata presenta un plus-valore grazie alla flessibilità degli schermi tessili, che, assicurando il richiesto comfort visivo, coniugano due caratteristiche antitetiche: leggerezza e resistenza.

Il comfort ambientale in edifici caratterizzati da involucri tessili pone però ancora alcune criticità, in particolare nei confronti del benessere termo-igrometrico ed acustico degli spazi interni confinati. L'innovazione tecnologica, in questo campo, è avanzata in maniera vertiginosa negli ultimi decenni, ed ha prodotti ottimi risultati nel campo dei tessili tecnici con capacità isolanti, che in alcuni casi eguagliano le prestazioni di materiali conosciuti ed impiegati ormai da secoli, come il vetro. La ricerca nel settore specifico dei tessili per l'architettura, che si è basata in larga parte e con soddisfacenti risultati sul trasferimento tecnologico da settori come la nautica o la medicina, necessita però di sempre più frequenti sperimentazioni, anche per rafforzare il processo di "insediamento" nel costruito di una tecnologia relativamente "giovane", che viene considerata da molti ancora prematura per applicazioni più complesse, dove si richiedono livelli di benessere ambientale sempre più elevati.

CAPITOLO 4: SCENARI FUTURI DI RICERCA

Gli incontri internazionali rivolti ai temi ambientali, sempre più frequenti negli ultimi anni, pongono un problema pressante da risolvere, a cui il settore edilizio non può sottrarsi, ovvero la ricerca di strategie di lungo termine e di immediata realizzabilità per contrastare i mutamenti climatici, lo spreco di risorse, la dipendenza dalle fonti di energia tradizionali, verso un'economia *low carbon*, per l'efficienza energetica, la mobilità sostenibile e per una convivenza responsabile con la natura. L'attuale situazione sui temi ambientali ci spinge ad interrogarci sul ruolo fondamentale delle nuove architetture nel contesto critico contemporaneo. Che la sostenibilità debba informare l'intero processo di progettazione e l'esito delle costruzioni è un assioma a cui tutti dobbiamo attenerci, pertanto i progettisti sono chiamati a lavorare con responsabilità su adeguate concezioni progettuali e realizzative, basate su soluzioni tecniche, prodotti e materiali appropriati ad ottenere costruzioni ad alto risparmio energetico e impatto nullo.

Tali concetti sono assunti come linee da seguire verso una concezione dell'edificio inteso come sistema flessibile ed integrabile, capace di adattarsi ad esigenze climatiche ed ambientali sempre più stringenti. L'integrazione tecnologica, infatti, offre l'opportunità di produrre e gestire manufatti che siano costituiti da elementi tra di loro adattabili, accostabili, reversibili ed anche riutilizzabili o riciclabili.

Ciascuno di tali aspetti rende il progetto maggiormente compatibile con l'ambiente, in quanto limita i danni all'ecosistema in cui si inserisce. Oltre a ciò, le soluzioni, i prodotti e i materiali possono contribuire a ridurre lo spreco di energia, realizzando edifici non più "energivori" ma in grado di essere autonomi o di produrre energia grazie ad innovazioni tecnologiche che non richiedono eccessivi costi economici ed energetici.

Le architetture tessili, leggere e reversibili, tendono sempre più verso tipologie funzionali che consentono l'integrazione nelle architetture convenzionali e che prevedono l'uso delle membrane in sub-sistemi chiusi, integrati con altri sistemi costruttivi. Ciò comporta diversi benefici, tra cui la possibilità di migliorare le prestazioni di comfort termo-acustico e luminoso degli edifici.

Le modalità d'uso dei tessili tecnici prefigurano originali configurazioni e impieghi insoliti, sia nel campo delle nuove costruzioni che negli interventi sul patrimonio edilizio esistente. Il recupero ed il riuso del tessuto edilizio minore della città è oggi una questione incalzante, cui le membrane tessili sono in grado di rispondere adeguatamente grazie alla possibilità di "ricucire" le parti smembrate di tale tessuto, conferendo nuova identità e funzioni a spazi secondari o di risulta. Nasce la necessità di impiegare con corrette modalità materiali innovativi ed efficaci dal punto di vista energetico ma non adatti a contesti in cui potrebbero crearsi contrasti non accettabili dagli organi di tutela. Mentre la progettazione del nuovo permette una vasta gamma di soluzioni tecniche percorribili, negli interventi di recupero il campo si restringe a quelle soluzioni in grado di conciliare prestazioni tecnologiche ed energetiche con vincoli posti dalla preesistenza, calibrando gli interventi tra tradizione e innovazione.

Le soluzioni tecniche utilizzate per le facciate, come interventi di nuova costruzione o di riqualificazione, dovrebbero mostrarsi versatili e flessibili nelle modalità di impiego. I tessili sono materiali versatili dal punto di vista funzionale e tecnologico, in particolare quando sono impiegati in integrazione con altri sistemi costruttivi, consentendo la possibilità di essere adoperati come facciate continue o schermature per la protezione solare.

Nell'involucro verticale leggero, membrane, lamiere e scocche costituiscono involucri avvolgenti che, realizzati con materiali scelti per la loro duttilità e inconsistenza materica, sono capaci di operare una ridefinizione volumetrica dell'architettura. Innovazioni tecnologiche sui materiali, sui processi e metodi di produzione e costruzione e di ottimizzazione delle prestazioni, in ordine al comfort ambientale e al risparmio energetico, hanno portato ad una nuova definizione della facciata come sistema integrato di elementi costruttivi eterogenei, che in un insieme assemblato delimitano e definiscono gli spazi confinati e ne soddisfano le esigenze, ma anche come elemento di "rappresentazione", in cui la distinzione ed alternanza tra opacità e trasparenza tendono a confondersi e completarsi.

E' proprio in rapporto alle caratteristiche di traslucenza, e quindi alla luce come elemento fondamentale del progetto, che le membrane tessili possono trovare nuovi scenari applicativi nell'architettura. Ricerche effettuate sul ritmo sonno-veglia

dell'uomo e il quadro delle malattie come SAD (*seasonal affect disorder*), SBS (*sick building syndrome*) e ADD (*attentional deficit disorder*) mostrano quanto sia vitale per l'uomo il necessario approvvigionamento di luce naturale⁷⁸.

Tale problematica è stata affrontata nel corso degli ultimi decenni, producendo una serie di innovazioni tecnologiche che hanno contribuito all'incremento del benessere visivo degli utenti. Dagli anni '70 sono apparsi sul mercato numerosi prodotti che incrementano la capacità dell'involucro edilizio di captare e "governare" la luce naturale necessaria agli ambienti interni, ed ha avuto inizio l'introduzione di vetri di nuova generazione: vetri per il controllo solare, vetri specchianti capaci di riflettere la luce, vetri serigrafati laccati a fuoco con la possibilità di essere stampati parzialmente e durante il processo produttivo senza compromettere la trasparenza. Ciascuna di tali innovazioni ha comportato un fondamentale contributo alla tecnologia per il controllo del flusso luminoso, e ciò ha reso possibile il più ampio incremento del comfort ambientale.

Da tali applicazioni è poi scaturito un trasferimento tecnologico che ha visto protagoniste le membrane tessili come elementi in grado di controllare la luce naturale in maniera efficace.

La relazione con la luce naturale è definita in ogni progetto in maniera specifica, perché la quantità di luce e la sua regolazione sono strettamente relazionati alla destinazione d'uso dell'ambiente da progettare. La luce in architettura, dunque, non è valutabile isolatamente, ma è leggibile in parallelo ad elementi fisici quali i colori, i rumori, le sensazioni tattili dei materiali, la temperatura interna, l'umidità e gli odori, parametri su cui si costruiscono i requisiti di un progetto architettonico.

Le chiusure a membrana pretesa, oltre ad assumere un ruolo decisivo per il soddisfacimento del benessere visivo richiesto in un ambiente, prevedono la possibilità di programmare la durata dei componenti, di scegliere tecniche di assemblaggio reversibili in funzione del periodo di vita dei prodotti e componenti, di costituirsi di parti facilmente sostituibili, smontabili ed intercambiabili per facilitare la manutenzione o la dismissione, di integrarsi con pannelli opachi semiopachi o trasparenti, in funzione delle modalità di fruizione dello spazio, ed inoltre presentano un minimo contenuto energetico intrinseco, il cui controllo è un requisito fondamentale per la

⁷⁸ Cfr. Brandi, Ulrike, "Orientamento della luce naturale in architettura", in *Detail* n° 4, 2004, p. 368.

sostenibilità di un progetto e riguarda il “contenimento entro determinati livelli della quantità dell’energia accumulata in un oggetto con riferimento sia alla sua natura, che al suo ciclo produttivo”⁷⁹.

Tali aspetti sono fondamentali per perseguire gli obiettivi posti dalla questione energetica ed ambientale, favorendo architetture attente ad accostarsi al contesto locale in maniera rispettosa, senza esigere quantità insostenibili di energia, ma piuttosto offrendo molteplici possibilità di “abitare” in maniera responsabile ed in continua trasformazione.

4.1 Scenari per lo sviluppo della tecnologia tessile

I tessuti tecnici offrono sempre più nuove soluzioni e nuovi approcci ai molteplici problemi del settore edile ed industriale e questo fa sì che, per gli operatori del settore, diventi essenziale acquisire le conoscenze necessarie e le capacità di sviluppare nuove applicazioni per usi finali differenziati.

Negli ultimi tempi, nel settore produttivo si parla del modello dell’impresa virtuale, aggregazione temporanea di imprese per sfruttare opportunità di mercato e sviluppare capacità competitiva, che si accordano in funzione del prodotto da realizzare, assumendo ruoli diversi in funzione dell’obiettivo e mantenendo la propria autonomia in altre attività produttive. Tale modello organizzativo trova un supporto nelle recenti tecnologie dell’informazione, che consentono lo sviluppo di nuovi prodotti da parte di entità localizzate ovunque, e può rappresentare un ulteriore tentativo di diffusione di tecnologie innovative. Importanti sono perciò il *know-how* e la cooperazione interdisciplinare per poter sostenere l’innovazione di prodotto e raggiungere livelli qualitativi appropriati in termini di prestazioni, nonché integrare nella catena produttiva le problematiche ambientali.

Quest’ultimo aspetto si è rivelato un punto di forza delle membrane tessili rispetto ad altri materiali più “convenzionali”, basti pensare al vetro, materiale antico quanto l’uomo, che ha conosciuto un’evoluzione esponenziale nel tempo e ha raggiunto livelli di prestazioni tecnologiche altamente efficienti. Ed è proprio dal confronto con tali tecnologie già sperimentate con successo che si possono rilevare le potenzialità di materiali tessili innovativi, che solo negli ultimi decenni si

⁷⁹ Cfr. Norma UNI 8290-2:1983

confrontano col mondo dell'architettura, capaci, se non di superare, almeno di eguagliare in alcuni casi le prestazioni offerte da materiali più consolidati. Ciò è già una notevole affermazione di successo, in quanto oggi possiamo affermare che le membrane tessili sono in grado di costituire componenti edilizi efficienti nella realizzazione di coperture, strutture, partizioni, chiusure, ed inoltre tale progresso tecnologico dà uno slancio rilevante allo sviluppo sempre più diffuso delle membrane tessili nell'architettura contemporanea, soprattutto in relazione alle questioni energetico-ambientali.

Il consumo energetico, dovuto alla fase di produzione realizzazione e dismissione di un componente edilizio, è estremamente ridotto nel caso delle membrane tessili, capaci di ottenere, se ben progettate, elevate prestazioni con un dispendio di energia minimo, in quanto la tecnologia tessile presuppone una strategia progettuale attenta all'uso discreto e temporalmente definito del territorio. L'istanza di operare con basso impatto sull'ambiente attraverso i cicli di trasformazione di materiali ed energia richiede di concepire, progettare e costruire manufatti che determinino ridotti flussi energetici e materiali, consumino poche risorse naturali, si inseriscano in maniera equilibrata nell'ambiente e favoriscano il comfort. La tecnologia delle tensostrutture a membrana è orientata alla generale dematerializzazione dei processi di trasformazione in cui, sfruttando al meglio l'innovazione, si impiega la minor quantità di materiale con il maggior rendimento possibile, e all'ottimizzazione formale e tecnologica, in cui ogni dettaglio va concepito in termini di efficienza e stretta finalizzazione strutturale. I manufatti tessili permettono riduzione dei costi del processo edilizio, impiego di tecnologie a basso consumo energetico, riduzione degli sprechi (di spazi, di materiali e prodotti, di energia), processi produttivi a bassa intensità energetica, logistica basata su materiali estremamente leggeri, minimi imballaggi e ridotti consumi per il trasporto.

A tal proposito, è importante sottolineare il ruolo dei tessili tecnici nella progettazione sostenibile e responsabile, che oggi si afferma anche nel ridurre il consumo energetico degli edifici, soprattutto quando vengono impiegati nelle chiusure verticali come protezione all'irraggiamento solare, ma anche come elemento tecnico in grado di incrementare le prestazioni ambientali dell'involucro, ad esempio in un sistema di parete ventilata o facciata a doppia pelle.

Tra le numerose innovazioni conseguite in questo settore, già trattate in questa ricerca partendo dalle nuove tecnologie per l'isolamento termo-acustico degli involucri tessili, come i sistemi adattivi, gli isolanti traslucidi, i tessuti interattivi e spacer, particolarmente interessante si è dimostrato l'uso dei tessuti anche in modalità diverse da quelle più "consuete". Un articolo apparso qualche anno fa su una rivista specializzata⁸⁰ ha reso noto un brevetto, prodotto da *Buitink Technology*, per nuovi sistemi di tensionamento per facciate tessili. Tale innovazione è scaturita dalla problematica della resistenza al vento delle membrane poste sulle facciate degli edifici, la cui sollecitazione è ancora più elevata se esse sono installate a più di 15 cm dalla parete di chiusura. I sistemi esistenti, infatti, prevedono il tensionamento del tessuto tramite sistemi a molla o a corde elastiche, o fissando i pannelli tessili ad un tubo di alluminio, ma in tali sistemi si hanno alcuni svantaggi, poiché le molle e le corde si usurano col tempo e devono essere spesso sostituite. Il tubo di tensionamento, poi, necessita di manutenzione periodica e lubrificazione ed essendo rigido rende difficile introdurre la pressione necessaria alla deformazione del tessuto. Inoltre, quando si usano molle o corde elastiche rimane dello spazio tra i punti di fissaggio alla facciata e i pannelli di tessuto, rimanendo visibili le connessioni. Il brevetto della Buitink Technology evita tali problemi e consiste in un tubo gonfiabile, a cui sono connessi i pannelli tessili. In caso di forze esterne, il tessuto tenderà a deformarsi e avrà bisogno di una lunghezza supplementare, ottenibile dalla deformazione del tubo circolare in una forma ovale. La sola manutenzione prevista è relativa all'unità centrale di aria da immettere nel tubo, inoltre gli architetti hanno maggiore libertà nel progetto, perché il tubo può essere installato non a vista e il tessuto può essere connesso direttamente alla facciata.

Tali innovazioni dimostrano quanti passi in avanti sono stati fatti nella tecnologia del tessile applicabile alle facciate, e ciò rappresenta un valore aggiunto di tali materiali leggeri e flessibili per un loro ulteriore sviluppo nel settore degli involucri traslucidi, ottenendo grandi benefici in termini di benessere visivo, come si è cercato di dimostrare nella presente ricerca.

⁸⁰ Cfr. "New tensioning system for textile facades", in *Tensinews*, aprile 2006, p.5.

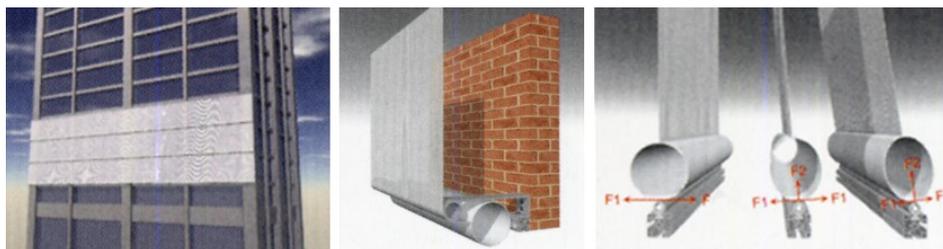


Figura 54. Esempio di facciata con pannelli tessili e sistema di funzionamento del tubo di tensionamento della membrana. (Fonte: "New tensioning system for textile facades", *Tensinews*, aprile 2006)

Restano, al di là dello sviluppo della tecnologia dei materiali e delle costruzioni, una serie di questioni irrisolte. Innanzitutto bisogna coinvolgere attivamente il progettista in tutte le fasi del processo edilizio, istruendolo e sensibilizzandolo sulle caratteristiche e le prestazioni delle strutture a membrana, dalla produzione della materia prima, alla sua progettazione e ingegnerizzazione nel componente tecnico, alla concreta messa in opera e dismissione finale. La figura del progettista deve avere un ruolo centrale nel processo edilizio dell'opera, in quanto la collaborazione attiva e continua con il produttore/costruttore e la committenza può evitare di dare prevalenza esclusiva alla logica del contenimento dei costi economici, a danno degli esiti funzionali, tecnologici, ambientali e dell'immagine complessiva di tali strutture leggere.

La significativa e rapida evoluzione delle membrane tessili come materiali edilizi si dimostra un elemento vincente nel raggiungimento di obiettivi eco-sostenibili, quali la riduzione degli sprechi e dei rifiuti, dell'impatto negativo e permanente sull'ambiente fisico che ci circonda e dei costi economici ed energetici sempre più insostenibili dal pianeta, ma tali potenzialità vanno sfruttate e sperimentate al fine di diffondere la "cultura tecnologica" necessaria per ottenere risultati soddisfacenti.

4.2 Quadro di confronto: potenzialità e limiti delle chiusure a membrana pretesa

Lo scopo della ricerca vuole favorire lo sviluppo nell'architettura diffusa della tecnologia tessile, analizzando nel dettaglio le potenzialità che detta tecnologia presenta nel suo impiego come chiusura verticale. L'elaborazione di un quadro di sintesi e di confronto destinato ai progettisti, ma anche a produttori e committenti, può dimostrarsi uno strumento utile per la comparazione tra alternative tecniche, basato sulle proprietà, caratteristiche e prestazioni dei sistemi chiusi a membrana pretesa rispetto ai sistemi costituiti da materiali, impiegati, per involucri trasparenti più tradizionali, come il vetro o il policarbonato.

Le caratteristiche di traslucidità, leggerezza, adattabilità e reversibilità che contraddistinguono le membrane tessili lasciano intravedere, infatti, interessanti possibilità di ibridazione con altri materiali che possono portare ad un miglioramento del comportamento ambientale delle strutture tensili, in particolare per il benessere visivo (distribuzione della luce in maniera diffusa, evitando problemi di discomfort visivo, possibilità di usufruire della luce naturale per maggior tempo durante l'arco della giornata ecc) in ambienti dalle più diverse funzioni, differenziandone adeguatamente le modalità d'uso e le prestazioni, e favorire nuove applicazioni dei materiali tessili in settori più consolidati, come quello degli involucri edilizi.

Il quadro di confronto proposto, poi, è anche finalizzato a divulgare la conoscenza tecnica utile per la progettazione dei sistemi tessili impiegabili per le chiusure degli edifici.

Il confronto tra diversi componenti per sistemi chiusi traslucidi si ritiene utile per una serie di motivi, primo tra tutti la possibilità di scegliere il prodotto adatto alle diverse esigenze progettuali per la realizzazione di involucri chiusi, in base a prestazioni connotanti i diversi sistemi tecnologici. Le strutture a membrana, non convenzionali se confrontate con sistemi già consolidati in applicazioni di questo tipo, sono in grado di offrire prestazioni che in alcuni casi superano quelle dei prodotti vetrati o simili. Inoltre, il confronto è utile anche perché si è rilevata una carenza nell'attuale informazione tecnica di settore, ben documentata dalle recenti ricerche scientifiche per quel che riguarda le molteplici proprietà e prestazioni dei

tessili tecnici, ma che trascura il termine di paragone con altri materiali per gli aspetti connessi alla percezione visiva e più in generale alle classi di requisiti tecnologici connotanti gli involucri leggeri, così come sono stati indicati nella stesura della presente ricerca (aspetti relativi alla Integrazione involucro-struttura e alla Realizzazione e Manutenzione).

Per l'elaborazione del quadro di confronto delle alternative tecniche si sono scelti i prodotti ad alta innovazione tecnologica impiegabili per le chiusure verticali traslucide, in quanto la tematica indagata dalla ricerca è relativa prevalentemente alla *luminosità* degli involucri edilizi, che comporta le problematiche relative ai flussi termici e luminosi tra interno ed esterno. In particolare i prodotti analizzati sono:

- *vetri* a controllo solare e a bassa emissività
- lastre di *policarbonato* alveolare e compatto
- *membrane* in fibra di vetro spalmata con silicone.

Un'alta efficienza tecnologica è richiesta per soddisfare le condizioni di benessere ambientale degli edifici contemporanei, tradotte in requisiti a cui l'involucro edilizio è chiamato a rispondere in quanto filtro tra ambiente esterno ed interno. L'analisi sviluppata nella ricerca, e quindi nel quadro di confronto finale, è relativa ai componenti intesi come "prodotti strutturalmente, morfologicamente e funzionalmente definiti, con precise caratteristiche dimensionali"⁸¹.

La scelta della *membrana* (oggetto dello studio) è dipesa da una serie di fattori, tra cui vi è il primo risultato di questa ricerca, che propone una classificazione dei prodotti tessili in base al fattore di trasmissione visiva, che ne determina quindi il grado di traslucidità (come indicato nel precedente grafico 2.b). Tra i prodotti definiti del I grado (*tessuti traslucidi*) la fibra di vetro spalmata in silicone raggiunge i migliori livelli di traslucidità ed inoltre, in base ai requisiti di riferimento per lo studio svolto, presenta le prestazioni tecnologiche più avanzate rispetto ad altri tessili tecnici.

I dati tecnici del *policarbonato*, relativi ai parametri per il benessere ambientale, sono ricavati da schede di prodotto delle aziende di settore, e sono da ritenersi non verificati scientificamente. I dati tecnici dei *prodotti vetrati* sono invece

⁸¹ Capasso Aldo, (a cura di), *Costruire per abitare*, Aracne editrice, Roma, 2006, p. 142.

ricavati in parte da aziende di settore e in parte da ricerche scientifiche⁸². Poiché l'oggetto di studio è la membrana tessile, i dati relativi alla fibra di vetro spalmata in silicone sono invece scientificamente dimostrati, le cui fonti possono trovarsi nella bibliografia tematica finale.

Infine, per la costruzione del quadro di confronto delle alternative tecniche, oltre a raccogliere e documentare i dati tecnici relativi ai parametri fisici per il benessere ambientale, si è rivelato necessario riferirsi a casi studio ed esempi applicativi di edifici in cui i prodotti selezionati sono stati impiegati con successo.

Nello specifico, per la membrana tessile il caso studio è riferito allo *Zenith* di Strasburgo, progetto di Massimiliano e Doriana Fuksas (già sviluppato nella scheda 3e); per il policarbonato il caso studio è riferito alla *Base Operativa Luna Rossa* di Valencia, progetto di Renzo Piano (già sviluppato nella scheda 3b); per il vetro, il caso studio è riferito alla *Torre Agbar* di Barcellona, progetto di Jean Nouvel, in cui è stato impiegato un sistema a vetrocamera costituito da vetri "SGG Planilux" e "SGG Planitherm" di produzione Saint-Gobain Glass Espagne.

L'esempio applicativo per il vetro è stato elaborato dall'Università di Venezia per la ricerca PRIN 2005. La Torre Agbar di Barcellona è costituita da 4.400 serramenti in vetro extra-chiaro e da 56.619 lastre di vetro trasparente e traslucido. Sulla base di un'accurata analisi dell'esposizione solare e delle vedute panoramiche possibili dall'intero della torre sono state collocate in facciata le 4.400 forature che alloggiavano i vani finestra. I serramenti utilizzati sono dotati di vetri camera con lastre a bassa emissione, membrane perimetrali in EPDM e profili esterni di tenuta in alluminio termo laccato. Il vetrocamera è costituito da vetri "SGG Planilux" + "SGG Planitherm" 6 + 15 + 4 mm. SGG PLANITHERM è un vetro chiaro, per isolamento termico rinforzato, sul quale viene depositato uno strato di metalli nobili per polverizzazione catodica sotto vuoto, che presenta una forte riflessione nella zona dell'irraggiamento infrarosso a grande lunghezza d'onda (bassa emissività), cosa che riduce notevolmente le dispersioni termiche per irraggiamento e conferisce alla vetrata un isolamento termico rinforzato, con un'elevata trasmissione luminosa. SGG PLANILUX è un vetro chiaro, trasparente, ricotto con entrambe le facce

⁸² Cfr. Ricerca "Percorsi e gestione delle informazioni tecniche per la promozione e il controllo dell'innovazione nei materiali e nel progetto di architettura" PRIN 2005, www.unirc.info/PRIN2005/vetro.

parallele ottenuto con processo float sopra un bagno di stagno in fusione. Una struttura di distanziatori in alluminio anodizzato sostiene le lamelle esterne di vetro, che contribuiscono alle performances energetiche dell'edificio provvedendo un oscuramento parziale sulla superficie dell'edificio e creando un' intercapedine ventilata. Le lastre vetrate, di dimensioni da 100x32 cm, sono collegate alla struttura di supporto mediante silicone strutturale: le vetrate sono inclinate con angoli che variano dai 20° ai 76° e presentano un trattamento serigrafico tra il 15 e il 65% che regola, dove previsto, l'incidenza dei raggi solari. Sensori di temperatura regolano la chiusura e l'apertura delle imposte di vetro ottimizzando il consumo necessario per il raffrescamento dell'edificio. Tutte le lastre delle lamelle frangisole esterne sono in vetro stratificato 4+8 mm e presentano, in funzione dell'orientamento dell'edificio, quattro diversi livelli di trasparenza ottenuti mediante trattamento serigrafico e stampaggio sulla superficie, e tramite utilizzo di vetro extra chiaro nelle porzioni di facciata che coincidono con viste privilegiate.

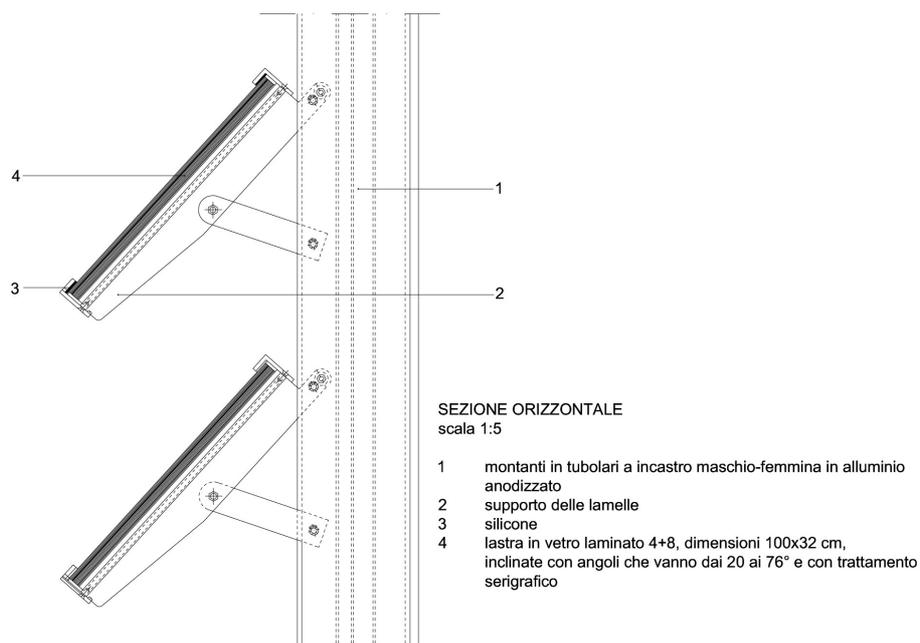


Figura 52. Dettaglio dei pannelli vetrati sulla facciata della Torre Agbar. (Fonte: www.unirc.info/PRIN2005/vetro)



Figura 53. Facciata della Torre Agbar, Barcellona. (Fonte: www.unirc.info/PRIN2005/vetro)

4.2.1 I prodotti selezionati per il confronto: membrana in fibra di vetro/silicone, vetro riflettente piroolitico a controllo solare, policarbonato compatto e alveolare

Al fine di avere un'informazione tecnica completa per la lettura del quadro di confronto delle alternative tecniche, si riportano le caratteristiche e prestazioni dei prodotti, oggetto del confronto.

- **FIBRA DI VETRO / SILICONE**

- **Atex 5000 TRL**

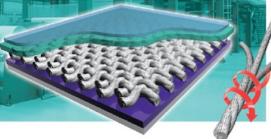
- Membrana in fibra di vetro spalmata in silicone

La membrana Atex 5000 TRL è costituita da fibra di vetro impregnata e rivestita con silicone traslucido per impieghi in tensostrutture a membrana, protezioni solari, tende ecc. Il prodotto è molto flessibile a temperature che vanno da -50°C a $+200^{\circ}\text{C}$ e blocca all'esterno i raggi UV-B ad onde corte, dannosi all'uomo, agli animali e alle piante, ma trasmette i raggi UV-A, essenziali per la crescita delle piante, questo rende la membrana efficace anche nell'utilizzo in coperture per serre. La membrana

non produce emissioni di fumi tossici alle alte temperature. Inoltre, il materiale è trattato per avere alta resistenza lungo le fibre, quando viene impiegata per usi esterni prolungati, ed ha una superficie tale da accrescere la resistenza alle macchie e ai trattamenti subiti durante la fase di produzione. Tale combinazione di qualità tecniche avanzate, insieme all'ottima resa estetica, rende il tessuto ATEX 5000 TRL un prodotto particolarmente efficiente per soluzioni architettoniche che adottano tessuti strutturali per l'involucro. Il prodotto è disponibile in un'ampia gamma di colorazioni su richiesta. Altre proprietà della membrana sono relative alla resistenza al fuoco, per cui soddisfa la classe di resistenza M1, e una garanzia di vita media di 25 anni, grazie alla minima manutenzione richiesta. Infatti il prodotto è auto-lavabile, presenta facilità nell'impiego ed è chimicamente inerte, insolubile e non soggetto ad alterazioni dovute all'aggressione degli agenti atmosferici né a ingiallimenti tipici causati dal passaggio dei raggi UV. I singoli elementi della membrana possono essere giuntati in modo duraturo e altamente resistente solo per mezzo di adesivo, essendo impossibile la saldatura termica del silicone; inoltre, la membrana presenta ottima resistenza meccanica e stabilità dimensionale.

Infine, la combinazione tra rivestimento di silicone e fibre di vetro presenta una traslucidità che permette di raggiungere valori di trasmissione luminosa pari all'80%.

Si riporta di seguito la scheda prodotto.

			DESCRIZIONE DEL PRODOTTO		
			Membrana in fibra di vetro spalmata in silicone		
			ANAGRAFICA		
			Denominazione prodotto: Atex 5000 TRL Azienda produttrice: P-D Interglas Technologies Ltd Sherborne Dorset DT9 3RB England Tel. + 44 (0)1935813722 Fax + 44 (0)1935811822 info@atex-membranes.com www.atex-membranes.com		
DIMENSIONAMENTO			PROGETTO – caso studio		
Sistema di facciata continua tessile			AUDITORIUM ZENITH, STRASBURGO		
Larghezza [m]	Spessore [mm]	Peso [g/mq]			
3	0.85	1165			
CARATTERISTICHE TECNICHE			NORMATIVE DI RIFERIMENTO		
BASE FABRIC Yarn Glass fibre filament Thread count Warp 8.4 per cm Weft 7.3 per cm Weight 685 g/m ² Weave style Plain			DIN EN 1049 DIN EN 12127 DIN ISO 9354 DIN 12654 DIN 53356 DIN ISO 4603 / E DIN EN 410 BS 476 Part 4, 6: 1989, Part 7: 1997 DIN 4102 DIN 53925 DIN 52612 / ASTM C 518 DIN 52615 / ASTM E 96		
COATED FABRIC Coating Silicone Tensile strength Warp > 5000 N / 5 cm Weft > 5000 N / 5 cm Trapezoidal tear Warp > 400 N Weft > 400 N Weight 1165 g/m ² Thickness 0.80 mm Width 2.00 – 3.00 m					
OPTICAL VALUES Transmission Solar 18.4% Standard D65 21.1% Reflection 68.4% 74.7% Absorption 13.2% 4.2%					
FIRE RATING Fabric Class 0 B1					
FABRICATING Sewing with PTFE thread Silicone adhesive tapes 5 cm x 0.75 mm					
CHARACTERISTICS Temperature range -50°C to +200°C Capillary rise < 5 mm / 24 h (hydrophobic) Thermal conductivity 0.1748 W/mk Thermal resistance 0.0050 m ² K/W Lifespan 25+ years Water vapour transmission 62 g/m ² /d (R.H. 40% 23°C) 156 g/m ² /d (R.H. 93% 23°C)					

- **VETRO**
SGG ANTELIO®
Vetro riflettente pirolitico a controllo solare

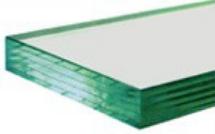
SGGANTELIO® è un cristallo riflettente ricotto chiaro (SGG PLANILUX®) o colorato (SGG PARSOL®) con buone prestazioni di controllo solare. La deposizione di uno o più metalli su una faccia, grazie alla polverizzazione a caldo, permette il controllo della trasmissione luminosa, selezionando la luce entrante nell'edificio e riflettendo l'energia incidente tramite il deposito metallico superficiale. Ciò comporta la riduzione del surriscaldamento nel periodo estivo, aumentando il comfort in prossimità delle finestre e consentendo una riduzione dei costi di climatizzazione.

L'effetto esteriore di una facciata in SGG ANTELIO® è influenzato dallo stato del cielo, dall'orientamento della facciata, dall'interno dell'edificio e dal colore degli infissi.

La gamma del prodotto comprende diverse colorazioni: chiaro, ambra, bronzo, verde e grigio (il prodotto selezionato per il confronto è quello chiaro). Tali varianti, presentando diversi gradi di riflessione, forniscono un'ampia panoramica di scelta estetica anche in relazione al contesto dell'edificio.

Il prodotto può essere usato in vetro monolitico o in vetrata isolante, soddisfacendo le esigenze di isolamento termico rinforzato, isolamento acustico e protezione dagli urti e dal fuoco; inoltre può essere curvato e temprato per aumentarne le caratteristiche meccaniche, ed è resistente all'inquinamento atmosferico e durevole.

Si riporta di seguito la scheda prodotto.

	DESCRIZIONE DEL PRODOTTO								
	Vetro riflettente pirolitico a controllo solare								
	ANAGRAFICA								
	Denominazione prodotto: SGG ANTELIO® Azienda produttrice: Saint-Gobain Glass Italia Via Ettore Romagnoli, 6, 24146, Milano, Italia Tel.: +39 02 42431 Fax: +39 02 47710708 www.saint-gobain-glass.com info@saint-gobain-glass.com								
DIMENSIONAMENTO				PROGETTO – caso studio					
Sistema di facciata continua vetrata				TORRE AGBAR, BARCELONA					
Larghezza [mm]	Spessore [mm]	Peso [kg/mq]							
6000x3210	5, 6, 8 e 10	20							
CARATTERISTICHE TECNICHE									
Vetrata isolante									
Vetro esterno	SGG ANTELIO ARGENTO		SGG ANTELIO CHIARO		SGG ANTELIO SMERALDO		SGG ANTELIO HAVANA		
Vetro interno	SGG PLANILUX								
Composizione	mm	6(12)6	6(12)6	6(12)6	6(12)6	6(12)6	6(12)6	6(12)6	6(12)6
Posizione deposito (1)	Face	1	2	1	2	1	2	1	2
Fattori luminosi									
TL	%	60	60	41	41	48	48	21	22
RL ext	%	35	33	33	28	31	22	32	12
RL int	%	31	33	29	34	24	31	17	34
Tuv	%	23	23	13	14	9	10	4	4
Fattori energetici									
TE	%	51	51	40	40	28	29	23	23
RE ext	%	27	24	27	21	23	12	27	10
AE1	%	14	17	26	32	45	56	46	52
AE2	%	8	8	7	7	3	3	4	4
Fattore solare g		0.58	0.58	0.47	0.48	0.36	0.37	0.31	0.33
Coefficiente Shading		0.66	0.67	0.55	0.56	0.41	0.43	0.36	0.38
Valore U	W/(m².K)								
Aria		2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Lastra singola ANTELIO spessore 6 mm									
Tipo	chiaro		elite		havana		smeraldo		
Faccia rifl.	1	2	1	2	1	2	1	2	
% T/	47	47	67	76	24	24	54	54	
% R/E	32	26	31	31	34	12	30	21	
% Ae	23	30	11	13	43	60	44	55	
G EN 410	0,57	0,59	0,67	0,67	0,41	0,45	0,44	0,47	
% resa colore	94	94	97	97	85	85	91	91	
NORMATIVE DI RIFERIMENTO E CERTIFICAZIONI									
UNI 10593-1/2/3/4 Vetro per edilizia – Vetrate isolanti									

- **POLICARBONATO**
Lexan Exell Solar Control IR
Lexan Thermoclear Solar Control IR
Lastre di polycarbonato compatte e alveolari

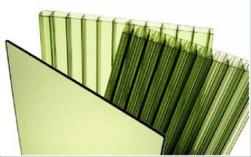
Le lastre Lexan sono in grado di respingere gran parte dei raggi solari pur offrendo livelli elevati di trasmissione della luce. Sono trasparenti e la tenue colorazione verde blocca il calore prodotto dall'infrarosso, lasciando passare la luce. L'isolamento termico è affidato ad additivi incorporati nella resina e non a rivestimenti che si possono danneggiare durante la manipolazione e il trasporto.

I prodotti sono disponibili in tutti gli spessori e i formati standard. Le lastre possono essere curvate a freddo e termoformate senza perdere le loro caratteristiche di resistenza all'urto e agli agenti atmosferici. Entrambe le versioni, compatte e alveolari, sono coperte da una garanzia limitata di 10 anni contro la riduzione delle proprietà di trasmissione della luce o dei raggi solari, l'ingiallimento e la rottura dovuta a grandine.

Lexan *Thermoclear* Solar Control IR è una lastra alveolare in grado di assorbire i raggi infrarossi, consigliata per spazi dove occorre ridurre gli effetti dell'accumulo di calore dovuto all'azione dei raggi del sole: serre, verande, lucernari.

Lexan *Exell* Solar Control IR riduce la trasmissione solare mantenendo una trasparenza simile al vetro, riduce l'effetto serra permettendo risparmi energetici nella climatizzazione, ed è garantito contro l'ingiallimento, la riduzione di trasmissione luminosa e la rottura. Il prodotto ha la struttura multi-parete (5 pareti per la lastra da 10 mm e 9 pareti per la lastra da 16 mm), in grado di offrire prestazioni di isolamento termico notevolmente superiori rispetto alle lastre tradizionali.

Si riporta di seguito la scheda prodotto.

	DESCRIZIONE DEL PRODOTTO		
	Lastre di policarbonato compatto e policarbonato alveolare		
	ANAGRAFICA		
	Denominazione prodotto: Lexan Exell D Azienda produttrice: GIMAS s.r.l. Via V.Bachelet, 23/25 – 29027 S.Polo di Podenzano (PC) Tel. 0523-558466 (2 linee r.a.) – Fax 0523-558488 Web: www.gimas.it - Email: info@gimas.it		
DIMENSIONAMENTO		PROGETTO – caso studio	
Sistema di facciata continua traslucida			
Larghezza [mm]	Spessore [mm]		Peso [kg/mq]
2050 x 3050 2050 x 6050	3 - 12		3,60 – 14,40
CARATTERISTICHE TECNICHE			
Colori standard		Trasmissione della luce*	
<ul style="list-style-type: none"> • Trasparente codice 112 • Bronzo codice 5109 • Grigio codice 713 • Opale 82939 • Opale 82943 		<ul style="list-style-type: none"> 84-87% in funzione dello spessore 50% tutti gli spessori 50% tutti gli spessori 50% tutti gli spessori 25% tutti gli spessori 	
Pellicola protettiva:			
Lato superiore:	Coestruso opale PE Stampa in porporino		
Lato inferiore:	Coestruso trasparente PE		

NORMATIVE DI RIFERIMENTO						
BS 476 parte 6	ISO 4589	ASTM D2863	DIN 4102	DIN 4701	DIN 52210-100	prEN356
DIN 52337	DIN 53479	DIN 53455	DIN 53457	DIN 53452	DIN 53460	ASTM D 648
DIN 52612						

4.2.2 Il metodo utilizzato per il Quadro di confronto delle alternative tecniche per l'involucro traslucido

Da un punto di vista operativo, il metodo utilizzato per il quadro di confronto, proposta di implemento della informazione tecnica di settore, è costituito da una matrice, basata sul confronto tra componenti costituiti da materiali *competitors*, che presenta un'interfaccia facile da comprendere e da utilizzare. La matrice trova il suo fondamento nei criteri esigenziali-prestazionali indicati dalla norma e consta di alcuni livelli informativi-descrittivi.

Il primo livello è quello delle *aree tematiche*, aspetti da considerare per la scelta del componente più adatto a determinate esigenze, e descrive le problematiche più frequentemente connesse alla realizzazione di involucri leggeri e traslucidi;

il secondo livello contiene i *requisiti tecnologici* definiti per ogni classe di requisiti relativi alle problematiche scaturite dalle esigenze definite al primo livello (benessere visivo, fruibilità, gestione);

il terzo livello contiene le *prestazioni* offerte dai componenti selezionati, costituiti da materiali *competitors*;

il quarto livello è relativo alla valutazione qualitativa e quantitativa del componente, costruita in base a *parametri* che consentono di caratterizzare ognuna delle esigenze poste;

il quinto livello è quello degli *indicatori*, che misurano con diverse modalità il livello dei parametri attraverso unità di misura quantitative, qualitative o soggettive, contribuendo ad elaborare la valutazione;

il sesto livello fornisce, per ogni indicatore, una scala di valori (*parametri numerici e soglie*: basso, medio, alto) che rimandano a indicazioni normative, laddove esistenti, che stabiliscono uno standard. Qualora le norme fossero carenti, sono stati presi in considerazione valori e limiti scaturiti dall'analisi dei casi studio o sulla scorta della letteratura scientifica e della sistematizzazione di informazioni raccolte attraverso la partecipazione a convegni, sopralluoghi, interviste, ricerche sui siti internet e del materiale tecnico documentativo fornito da aziende e imprese specializzate.

Per ogni prodotto, i parametri per la valutazione qualitativa e sintetica delle principali prestazioni relative alle fasi di progetto, realizzazione e vita di esercizio sono fissati e definiti nei loro contenuti secondo alcuni livelli qualitativi: alto, medio, basso.

Di seguito si riporta lo schema di lettura del metodo impiegato per la costruzione del Quadro di confronto delle alternative tecniche per l'involucro traslucido.

I LIVELLO	AREE TEMATICHE		Macroaree che raggruppano gli aspetti connessi all'involucro tessile: percezione visiva (ambientale) integrazione involucro-struttura (tecnologica) realizzazione/utilizzazione (tecnologica-funzionale)
II LIVELLO	REQUISITI TECNOLOGICI		Traduzione di un'esigenza in un insieme di caratteri che la connotano ed individuano le condizioni di soddisfacimento da parte di un prodotto in determinate condizioni d'uso
III LIVELLO	PRESTAZIONI		Comportamento nell'uso di un elemento riferito ai caratteri che connotano un requisito
IV LIVELLO	PARAMETRI		Criterio di misurazione e di valutazione: Dati fisici (proprietà numeriche) Dati valutativi (attributi qualitativi)
V LIVELLO	INDICATORI		Variabile quantitativa assunta come misura di un parametro attraverso una scala continua e suscettibile di assumere valori diversi
VI LIVELLO	POTENZIALITA' / LIMITI	unità di misura (parametri numerici)	Valori che definiscono e delimitano la risposta progettuale relativa ad un indicatore, che possono essere quantitativi e/o qualitativi. Il valore è stabilito in base a: -dati ricavati dalla norma e dalle aziende -dati ricavati da casi studio e esempi applicativi
		range di valori (parametri qualitativi: basso-medio-alto)	

Schema 4.a. Esempificazione del metodo utilizzato per il Quadro di Confronto delle Alternative Tecniche.

Sembra utile approfondire per grandi linee la scelta degli *indicatori*, sulla base della definizione degli stessi data da strumenti normativi concepiti allo scopo di valutare comportamenti e prestazioni di manufatti per l'edilizia. In particolare, le linee guida per le Agende 21 locali in Italia definiscono alcune tipologie di indicatori, che possono essere utili per l'indagine, in particolare:

- Indicatori descrittivi (o sistematici)
- Indicatori prestazionali

- Indicatori aggregati e indici compositi.

Gli *indicatori descrittivi* riassumono una serie di singole misure per specifiche caratteristiche, generalmente espressi in unità fisiche. Nell'esperienza operativa non sempre è possibile calcolare – per difficoltà concettuali o per indisponibilità o insufficienza di dati – indicatori che consentano una misura diretta del fenomeno indagato. In questi casi si ricorre all'utilizzo di indicatori che consentono la misurazione attraverso approssimazioni (*proxy*) con un compromesso tra l'accuratezza scientifica e la necessità di misure utili per il processo decisionale.

Gli *indicatori prestazionali* sono strumenti di comparazione che integrano un indicatore descrittivo e un valore di riferimento. Questi indicatori sono tipicamente funzionali al monitoraggio dell'efficacia rispetto a predeterminati obiettivi, che siano o meno stabiliti per via normativa.

Gli *indicatori aggregati* contengono più indicatori. Laddove si impieghino indici che aggregano aspetti diversi, l'impossibilità di una comune unità di misura comporta l'impiego di pesi soggettivi e arbitrari.

Nello specifico della presente ricerca, i criteri di valutazione individuati per le classi esigenziali di riferimento (Benessere, Fruibilità e Gestione) sono costruiti secondo la scheda 4.S, riportata nell'Allegato 1 a fine paragrafo, in cui gli indicatori sono riferiti ai requisiti tecnologici selezionati per l'indagine svolta, e in alcuni casi sono di tipo descrittivo, in altri prestazionale ed in altri ancora aggregati.

Un'osservazione sulla definizione dei *parametri* per la valutazione qualitativa e sintetica proposta (alto – medio – basso) è necessaria per comprendere i dati da cui ricavare le considerazioni sulle potenzialità e le criticità della tecnologia studiata. La *quantificazione* della manodopera, dei tempi e dei costi di realizzazione, ci consente di costruire indicatori di valutazione sulla base dei dati geometrici e dimensionali degli elementi tecnici che compongono l'involucro edilizio. Pertanto, ciascuna alternativa tecnica è stata analizzata, per i requisiti specifici della *fase costruttiva*, tenendo conto dei seguenti aspetti:

- caratteristiche del cantiere
- fasi e tempi di lavorazione
- tipo e quantità di manodopera
- costi di costruzione.

A titolo di esempio si riporta nel seguente schema 4.1a lo studio degli aspetti di cantiere per il caso studio relativo al prodotto tessile selezionato per il Quadro di confronto delle alternative tecniche.

Descrizione intervento	Periodo di messa in opera	N° operai	Prezzo al mq
Produzione	prefabbricazione in officina dei teli circa 6 mesi	20 operai in officina	80 € / mq (superficie di involucro: 14.000 mq)
Messa in opera Montaggio	installazione in cantiere circa 4 mesi	10 operai per l'installazione in opera	
Realizzazione	inizio lavori / inaugurazione 2 anni e 10 mesi		
Totale	10 mesi (per il tessile) Circa 3 anni (per l'intera opera)	30 persone	1.120.000 € (per il tessile) 48.000.000 € (per l'intera opera)

Schema 4.1a

Un primo confronto tra i costi di produzione dei prodotti selezionati indica che la membrana in fibra di vetro/silicone ha una posizione intermedia rispetto al policarbonato e al vetro. Infatti la membrana costa mediamente 80 €/mq, il policarbonato va dai 17 ai 24 €/mq (a seconda che il pannello sia di tipo alveolare o compatto), il vetro ha un prezzo molto variabile, in dipendenza del prodotto specifico scelto (a controllo solare, basso emissivo, vetri attivi ecc) e degli spessori e dimensioni richieste, che può aggirarsi intorno alle centinaia di €/mq (e comunque circa 10 volte il prezzo di un vetro singolo non trattato).

Altri parametri sono di tipo qualitativo (relativi alla *fase di gestione*), in quanto fanno riferimento ai comportamenti dei materiali nel loro inserimento in edifici dalle diverse condizioni funzionali, ambientali e tecnologiche. In relazione ai detti aspetti sono stati considerati degli *indicatori prestazionali*, ai quali sono attribuiti dei livelli qualitativi (alto – medio - basso). In termini deduttivi, dal confronto sono desumibili alcune potenzialità e criticità delle soluzioni tecniche con prodotti tessili, paragonate ad altre soluzioni (vetro e policarbonato) adottate nella prassi costruttiva convenzionale.

Nella seguente **scheda 4.S**, riportata in Allegato 1, sono presenti gli indicatori utilizzati per la valutazione qualitativa delle membrane tessili per le

chiusure verticali. All'interno della scheda ogni indicatore, riferito ad un requisito tecnologico, è definito e rapportato alle condizioni per cui una soluzione tecnica può essere definita di livello qualitativo alto.

In termini metodologici ed esemplificativi si è ritenuto di valutare l'efficacia delle soluzioni tecniche realizzate con prodotti e materiali differenti, impiegati per la realizzazione di facciate leggere e traslucide, mediante un confronto di tipo qualitativo tra tre differenti prodotti, precedentemente analizzati nelle loro prestazioni.

Bisogna però sottolineare che la valutazione qualitativa dei parametri che definiscono le prestazioni dei prodotti in vetro e in policarbonato, selezionati per il confronto, da un lato è riferita agli esempi applicativi, studiati nel corso della ricerca e documentati precedentemente, e alle schede di prodotto, con dati e prestazioni forniti dalle aziende produttrici, dall'altro fa riferimento alla scheda 4.S degli indicatori per la valutazione qualitativa delle membrane tessili per le chiusure verticali. Di tale scheda si potrebbe ottenere un'analogia elaborazione per i prodotti in vetro e in policarbonato, selezionati in base a requisiti specifici connotanti alcuni aspetti considerati, per varie ragioni, prioritari; pertanto tali prodotti, a differenza dei prodotti tessili oggetto della ricerca, sono valutati in maniera parziale in questa sede e vanno approfonditi con ulteriori ricerche.

Una breve e conclusiva osservazione sul confronto elaborato nel risultato della presente ricerca riguarda le *condizioni* che influenzano le scelte tecniche del progetto. Infatti, il progetto degli involucri edilizi è, oggi, il risultato di team di lavoro composti da architetti, ingegneri, impiantisti, progettisti di facciate e della "luce", che simulano la geometria dell'edificio attraverso modelli con cielo artificiale o tramite software dedicati. E' da sottolineare che esistono parametri progettuali fondamentali, relativi alla luce naturale, che, applicati nel caso degli involucri leggeri e traslucidi, sono stati individuati nelle seguenti voci:

- 1- *Contesto* (Località con elevate radiazioni solari e basse temperature, climi montani / Località con elevate radiazioni solari e alte temperature, climi marini / Località con radiazione solare limitata o con bassa radiazione solare, climi ad alta percentuale di cielo coperto)

- 2- *Orientamento* sulla facciata (sud, sud-ovest / sud-est / est, ovest, nord, nord-est / nord-ovest)
- 3- *Ombreggiamento* da elementi circostanti (Nessuno / Medio / Significativo)
- 4- *Forma* dell'edificio (Compatta, geometrico lineare / Mediamente complessa, integrazione tra forme geometrico lineari e forme a doppia curvatura / Articolata, forma sinclastica a doppia curvatura)
- 5- *Parti* di facciata (Ampie superfici traslucide con poche aperture / con medie aperture / ampiamente aperte)
- 6- *Dimensioni* del componente (Grandi / Medie / Piccole).

Il fabbisogno di luce, infatti, varia in relazione alla posizione geografica, ed è regolato da elementi naturali e costruiti che ne definiscono i limiti, come appunto l'ombreggiamento e le caratteristiche fisiche dell'involucro.

Ognuna di tali condizioni influisce sulla scelta del materiale e del componente più idoneo a rispondere alle richieste dell'utenza, ciò rende consapevoli della impossibilità di affermare in maniera totalizzante che un prodotto sia preferibile agli altri. Lo scopo della ricerca, infatti, è quello di dare un quadro il più possibile oggettivo sulle possibilità di impiego dei prodotti selezionati, in considerazione di alcuni requisiti tecnologici assunti come connotanti di una tecnologia leggera ed efficiente, da punto di vista funzionale ambientale e tecnologico, per la realizzazione di chiusure verticali traslucide.

Il Quadro di Confronto delle Alternative Tecniche per l'Involucro Traslucido è riportato nel seguente **Allegato 2**.

In esso si evidenziano alcune notevoli potenzialità dei componenti tessili per le chiusure verticali traslucide, insieme ai limiti da superare, e rappresenta un possibile punto di partenza per ulteriori ricerche in questa direzione, con l'obiettivo di sviluppare sempre più efficienti sistemi di chiusura traslucidi, in grado di rispondere alle rinnovate esigenze dettate dall'architettura e dall'urbanistica che <<devono conservare per le generazioni future un mondo in cui valga la pena di vivere, vale a dire non devono imprigionarlo con le loro costruzioni>>⁸³.

⁸³ Otto, Frei, *L'architettura della natura*, (1982), trad. it., Il Saggiatore, Milano, 1984, p.126.

ALLEGATO 1_4.S			
SCHEDE DEGLI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE QUALITATIVA DELLE MEMBRANE TESSILI PER LE CHIUSURE VERTICALI			
Per componente tessile si intende la membrana comprensiva di rifiniture e carpenteria di ancoraggio.			
INDICATORE: requisito connotante	DEFINIZIONE	LIVELLO QUALITATIVO – alto quando:	
PERCEZIONE VISIVA	Riduzione degli effetti di disturbo visivi	Si deve evitare il verificarsi di eventuali disturbi visivi quali per esempio l'abbagliamento, provocati dalle interazioni tra elementi del progetto e il contesto	- I materiali e i componenti tessili consentono la corretta visione dell'interno, senza fenomeni di abbagliamento o contrasti di luminanza nulli
	Illuminazione naturale	Il livello di illuminazione naturale in un ambiente confinato deve essere garantito in modo adeguato	- I materiali e i componenti tessili consentono l'utilizzo della luce naturale, evitando la richiesta di luce artificiale quando non necessaria
	Utilizzo passivo di fonti rinnovabili per l'illuminazione	Devono essere previsti sistemi captanti di luce naturale, come sistemi riflettenti e condotti di luce	- I materiali tessili sono altamente riflettenti - La possibilità di integrare elementi tecnici deflettenti consente di proteggere l'interno dalla luminanza della volta celeste, schermando la superficie traslucida - Vi è minimo contrasto tra pareti perimetrali e superfici traslucide, se si aumenta il coefficiente di riflessione delle pareti interne con colori chiari
	Controllo del flusso luminoso	Attitudine a consentire l'ingresso di energia luminosa dal suo valore massimo fino all'oscurità	- I materiali tessili consentono di modulare la luce, grazie a vari gradi di traslucidità
	Controllo del fattore solare	Attitudine a consentire l'ingresso di energia termica raggiante attraverso superfici trasparenti, adeguate alle condizioni climatiche	- I componenti tessili possono comportarsi come collettori solari, in grado di captare energia solare, grazie a speciali costituzioni fisiche
Fase del processo edilizio: REALIZZAZIONE	Trasportabilità	Attitudine di prodotti e sistemi a essere trasportati in cantiere con ridotto impiego di risorse e di tempi	- Modalità e tempi di trasporto dei componenti tessili* sono semplificati e ridotti, poiché sono leggeri, ripiegabili e imballabili (<i>packaging</i>) - E' possibile trasferire, per le caratteristiche precedenti, sistemi e prodotti tessili utilizzando mezzi di trasporto di dimensioni contenute
	Rapidità di messa in opera	Attitudine a realizzare soluzioni tecniche in tempi brevi	- I tempi complessivi di realizzazione della soluzione tecnica sono brevi, relativamente alle dimensioni della chiusura e alle tipologie di ancoraggio - Le operazioni di esecuzioni sono sequenziali, pianificabili e senza particolari tempi morti
	Facilità di montaggio	Attitudine a realizzare soluzioni tecniche caratterizzate da una esecuzione senza particolari difficoltà	- La realizzabilità della soluzione tecnica non presenta difficoltà di messa in opera, in dipendenza delle modalità di realizzazione dei componenti, ovvero: a-prefabbricati _ b- a piè d'opera _ c-montati in loco - La soluzione tecnica non richiede un elevato numero di operai, data la sua leggerezza e manovrabilità
	Comodità d'uso e di manovra	Attitudine a presentare opportune caratteristiche di funzionalità, di capacità d'uso, di manovrabilità	- La soluzione tecnica richiede un limitato ingombro per la movimentazione dei componenti e una drastica riduzione di attrezzature e impalcature, in dipendenza della posizione in cui verrà montata e delle modalità di realizzazione citate precedentemente - La soluzione tecnica non richiede specializzazioni per la messa in opera, a meno di particolari soluzioni complesse - La soluzione tecnica riduce i rischi di incidenti, per la sua leggerezza e manovrabilità
	Immagazzinabilità	Attitudine degli elementi tecnici ad essere facilmente e rapidamente stoccati, garantendo una più efficace organizzazione del cantiere	- I componenti tessili sono facilmente immagazzinabili senza particolari oneri lavorativi o economici e con minima richiesta di aree per lo stoccaggio
Fase del processo edilizio: GESTIONE E DISMISSIONE	Adattabilità tecnologica e morfologica	Attitudine di un elemento ad adattarsi a differenti forme e geometrie	- La soluzione tecnica è conformabile in maniera integrale alla morfologia e geometria del supporto, grazie alla natura flessibile del materiale
	Flessibilità tecnologica (di produzione e di impiego) dei sistemi strutturali	Attitudine all'impiego dei sistemi di assemblaggio a secco e versatilità dei sistemi di fissaggio, con possibilità di variazione di dimensioni e forme, e integrazione di costruzioni e prestazioni	- I componenti tessili si rivelano idonei a modificarsi e adattarsi a condizioni fisiche diverse - Vi è la possibilità di progettare interventi su misura e mirati solo nei punti in cui occorre - Vi è la possibilità di produrre componenti in varie forme, dimensioni e assemblaggi - I componenti tessili possono essere impiegati sia per chiusure che per partizioni
	Leggerezza strutturale	Associazione tra materiali con massa irrilevante e alta resistenza data dalla forma strutturale e dalla trasmissione degli sforzi all'interno del sistema, prevalentemente in trazione.	- La soluzione tecnica è realizzata con elementi costituiti da materiali leggeri che rendono il rapporto tra peso portante e peso portato << 1, come tali incidono minimamente sul peso della struttura generale dell'edificio
	Integrazione	Attitudine alla connessione senza adattamenti	- La soluzione tecnica consente molteplici modalità di connessione con la struttura portante o tra gli elementi tecnici, anche di diversi materiali, facenti parte della facciata - I componenti tessili consentono applicazioni diversificate integrabili con componenti costituiti da materiali diversi
	Utilizzo di materiali, elementi e componenti caratterizzati da elevata durabilità	I materiali, gli elementi e i componenti devono avere una vita utile durevole rispetto alla vita utile dell'edificio	- La soluzione tecnica presenta trattamenti protettivi dagli agenti esterni, che aumentano la durata di vita senza l'ausilio di specifiche attività di manutenzione - I componenti tessili sono resistenti contro decadimenti, rotture/lacerazioni o atti di vandalismo, se non raggiungibili dalla mano dell'uomo o da azioni esterne
	Pulibilità	Attitudine a consentire la rimozione di sporcizia e sostanze indesiderate	- La soluzione tecnica non richiede specifici trattamenti e/o prodotti per la pulizia - I materiali costituenti i componenti tessili sono autopulenti
	Manutenibilità	Possibilità di conformità a condizioni prestabilite entro un dato arco di tempo in cui è compiuta l'azione di manutenzione	- I materiali e i componenti tessili non richiedono particolari condizioni di manutenzione e il corretto funzionamento è garantito dalla soluzione tecnica adottata, in dipendenza della connessione con la struttura di supporto
	Stabilità morfologica/ dimensionale	Attitudine di un elemento tecnico di mantenere variabile entro un range di valori la sua forma nel tempo e di regolare gli stati di sforzo tensionale	- La soluzione tecnica non subisce alterazioni morfologiche significative in seguito a condizioni termiche e igrometriche o a sostituzione di elementi tecnici, tenendo conto del naturale fluage e della necessaria regolazione tensionale
	Reversibilità e Riutilizzabilità	Attitudine alla riutilizzazione di elementi tecnici dopo la demolizione e ad una facile rimozione consentendo a parti ed elementi un ritorno allo stato e alle condizioni iniziali senza subire alterazioni	- La soluzione tecnica prevede una facile rimozione senza che tale azione comprometta o alteri elementi e parti di supporto - La rimozione della soluzione tecnica non comporta elevati oneri lavorativi ed economici
	Utilizzo di materiali elementi e componenti ad elevato potenziale di riciclabilità	I materiali, gli elementi e i componenti devono avere un elevato grado di riciclabilità che dipende da: condizioni relative all'ubicazione del cantiere; disponibilità di spazi nel cantiere di demolizione per la raccolta dei rifiuti e dei materiali recuperati; tecniche costruttive con cui è realizzato il manufatto edilizio; potenzialità dei materiali di essere avviati a processi di recupero e/o di riciclaggio; vicinanza al sistema della viabilità	- Materiali e componenti tessili sono riciclabili, recuperabili e/o riutilizzabili - Vi è disponibilità di spazi nel cantiere adibiti alla raccolta dei rifiuti e/o scarti e dei materiali recuperati per successive applicazioni
	Utilizzo di tecniche costruttive che facilitino il disassemblaggio a fine vita	E' richiesto che siano adottati sistemi costruttivi in grado di facilitare la separabilità dei componenti dell'edificio durante i processi di demolizione e recupero. Le possibilità di recuperare i materiali da costruzione alla fine del ciclo di vita dell'edificio dipendono dalle caratteristiche costruttive	- La soluzione tecnica è costituita da materiali e componenti separabili (separazione tra carpenteria e membrane tessili) durante i processi di demolizione e recupero senza particolari oneri lavorativi o economici
	Sostituibilità	Attitudine a consentire la collocazione di elementi tecnici al posto di altri	- I componenti tessili sono sostituibili senza particolari oneri lavorativi e i nuovi elementi sono facilmente montabili in luogo di quelli rimossi
	Facilità di intervento	Possibilità di operare ispezioni, manutenzione e ripristini in modo agevole	- Si possono effettuare opere di manutenzione o riparazione senza difficoltà operative
Tenuta all'acqua, all'aria (controllo della portata e della velocità), alla neve, alle polveri, ventilazione	Attitudine ad evitare l'ingresso dell'acqua, a garantire un adeguato passaggio d'aria, a non trattenere e/o lasciare passare polveri	- La soluzione tecnica prevede connessioni che consentono l'integrazione tra diversi componenti chiusi o aperti, in modo da garantire un adeguato passaggio d'aria e/o evitare l'ingresso dell'acqua - I materiali sono trattati e/o rivestiti con strati protettivi, al fine di non trattenere sporco e/o lasciar passare polveri dall'esterno all'interno e viceversa	

ALLEGATO 2 _ QUADRO DI CONFRONTO DELLE ALTERNATIVE TECNICHE PER L'INVOLUCRO TRASLUCIDO °

Requisiti di riferimento (Norme UNI 8290-2:1983 UNI 11277:2008 o di nuova definizione)	Prestazioni del prodotto			Potenzialità e limiti dei componenti tessili <i>(Per componente tessile si intende la membrana comprensiva di rifiniture e carpenteria di ancoraggio)</i>		
	ATEX 5000 TRL- FIBRA DI VETRO SPALMATA IN SILICONE	SGG ANTELIO- VETRI A CONTROLLO SOLARE	LEXAN EXELL D- POLICARBONATO ALVEOLARE E COMPATTO ***	Potenzialità	Limiti	
	<i>Dati</i>			<i>Potenzialità</i>		
Benessere visivo <i>Dati ricavati dalle aziende</i> (fattori di trasmissione riflessione e assorbimento luminoso τ_v ρ_l α_l fattore solare g resa cromatica Ra trasmissione raggi UV T-UV emissività ε : [%])	τ_v 20 - 40 ρ_l 52 - 75 α_l 4,2 g 36 - 45 Ra <i>paragonabile al vetro con uguale colorazione</i> T-UV 4 ε 86	τ_v 41 ρ_l 28 α_l 30 g 48 Ra 94 T-UV 14 ε 89	τ_v 83 - 87 ρ_l 12 - 17 α_l 5 g 82 - 85 Ra 95 - 90 T-UV 10 ε 89	<i>. Capaci di modulare la luce diffondendola in maniera omogenea in tutte le direzioni</i> <i>. Capaci di avvolgere l'ambiente luminoso, evitando problemi di abbagliamento se abbinati a componenti trasparenti</i> <i>. In alcuni casi la trasmissione dei raggi UV è superiore a quella del vetro e del polycarbonato, ciò consente di preferirli in involucri di serre o piscine</i> <i>. Il fattore di luce diurna è più elevato in ambienti racchiusi da componenti tessili, pari al 10% contro il 3% di edifici "tradizionali"</i>	<i>. Non presentano livelli di trasparenza tali da permettere la completa visibilità tra interno ed esterno</i> <i>. Variabili in base al colore: più è chiaro migliore è la percezione visiva, grazie alla linearità della trasmissione dello spettro luminoso visibile</i>	
Benessere termico <i>Dati ricavati dalle aziende</i> (trasmissione termica U : [W/mq K] fattori di trasmissione riflessione e assorbimento solare τ_g ρ_g α_g : [%])	U 1.6 - 2.0* τ_g 18 - 30 ρ_g 50 - 68 α_g 12	U 2.8** τ_g 40 ρ_g 21 α_g 39	U 2.8 - 2.7*** τ_g 82 ρ_g 9 α_g 9	<i>. I sistemi multilayer con camera d'aria o isolanti traslucidi assicurano valori di isolamento termico pari a quelli del vetro e del polycarbonato</i> <i>. I bassi fattori di trasmissione e assorbimento solare permettono una buona qualità dell'ombra ed evitano il surriscaldamento della superficie di involucro</i>	<i>. La singola membrana non presenta valori tali da garantire il richiesto comfort termico, con conseguente rischio di effetto serra negli ambienti racchiusi da componenti tessili</i>	
Benessere acustico <i>Dati ricavati dalle aziende</i> (riduzione del suono Rw : [dB])	Rw* 34	Rw** 31 - 41	Rw*** 39 - 44	<i>. Sistemi a doppia membrana o sistemi MAW (membrane additional weight) raggiungono valori ottimali di riduzione del suono</i>	<i>. La singola membrana non presenta valori tali da garantire il richiesto comfort acustico, comportando condizioni di discomfort evitabili solo aumentando lo spessore di separazione tra interno ed esterno o tramite particolari accorgimenti fisici e meccanici</i>	
	<i>Valutazioni qualitative</i>					
percezione visiva	Riduzione degli effetti di disturbo visivi	Medio	Medio	Medio	<i>. Assicurano un livello luminoso elevato senza determinare alti contrasti</i> <i>. Evitano l'abbagliamento, diminuendo il contrasto tra pareti interne e superfici traslucide</i>	<i>. Possono provocare appiattimento della visione per eccessiva uniformità del campo luminoso</i>
	Illuminazione naturale	Medio	Alto	Alto	<i>. Permettono il passaggio della luce naturale, modulando ed attenuando il flusso luminoso, secondo le diverse richieste progettuali</i>	<i>. Pongono una mediazione della luce naturale che attraversa la superficie di involucro, poiché la luce, resa uniforme, entra diversa rispetto alle condizioni della volta celeste</i>
	Utilizzo passivo di fonti rinnovabili per l'illuminazione	Medio	Alto	Alto	<i>. Permettono di usufruire di luce naturale per un periodo di tempo considerevole, evitando elevati costi energetici in ambienti molto ampi, grazie al passaggio di luce naturale diffusa</i>	<i>. Presentano una riduzione di captazione del flusso luminoso in entrata, in quanto, non essendo completamente trasparenti, riflettono buona parte della luce naturale esterna</i>
	Controllo del flusso luminoso	Alto	Alto	Medio	<i>. Consentono l'ingresso di energia luminosa, variabile in dipendenza della tipologia dei materiali costituenti le membrane e dell'orientamento della facciata su cui sono impiegati</i>	<i>. Riducono il contrasto tra oggetti piani, comportando una differenza tra la luminosità dell'involucro traslucido e quella delle superfici interne, che appaiono cupe, evitabile con finiture riflettenti interne e componenti trasparenti localizzati sulla parte inferiore dell'involucro</i>
	Controllo del fattore solare	Medio	Alto	Basso	<i>. Garantiscono il controllo del flusso radiante, con una elevata riflessione solare, se vi è integrazione con sistemi apribili, multistrato con isolanti traslucidi o adattivi riflettenti, riducendo gli apporti di calore</i>	<i>. La singola membrana non garantisce un adeguato controllo solare</i>

Valutazioni qualitative						
integrazione involucro-struttura	Adattabilità (tecnologica e morfologica)	Alto	Medio	Medio	<ul style="list-style-type: none"> . Conformabili secondo diverse forme, geometrie e modalità di connessione . Capaci di variare l'assetto iniziale a vantaggio di una configurazione diversa in risposta a determinate richieste progettuali 	<ul style="list-style-type: none"> . Poiché il materiale tessile tende a dilatarsi e restringersi, occorre considerare alcune tolleranze sulla superficie dei lembi saldati (0,5 – 1% della lunghezza totale), sui lembi bloccati (0,25 – 0,5 %) e sui giunti perimetrali (0,5%)
	Stabilità morfologica/dimensionale	Alto	Alto	Medio	<ul style="list-style-type: none"> . Si deformano in presenza di sforzi di trazione assorbendo parte della tensione, e, revisionando periodicamente lo stato tensionale, la membrana non perde resistenza meccanica 	<ul style="list-style-type: none"> . In relazione alla strategia di manutenzione, si determina il valore-soglia per il quale attivare il ritensionamento del telo
	Flessibilità tecnologica (di produzione e di impiego) dei sistemi strutturali	Alto	Alto	Alto	<ul style="list-style-type: none"> . La produzione flessibile di tipo industriale, di piccola impresa o artigianale, comporta vari gradi di complessità dei componenti . Presentano sistemi di fissaggio versatili, che rendono indipendente il rivestimento dal supporto strutturale . Si possono fissare direttamente per punti al supporto strutturale o mediante strutture di aggancio, o combinando le due tecniche, in quanto si può progettare la resistenza meccanica in funzione del sistema di fissaggio . La flessibilità prestazionale è data dalla diffusione di componenti industrializzati, che consente di variare le relazioni tra gli elementi 	<ul style="list-style-type: none"> . La flessibilità tecnologica dipende dalle tecniche di produzione, dalle caratteristiche dei materiali e dalle tecniche di assemblaggio, pertanto non sempre raggiunge i livelli richiesti
	Integrazione	Alto	Alto	Alto	<ul style="list-style-type: none"> . Si adeguano facilmente ad una funzionale integrazione, essendo predisposti alle connessioni senza necessità di speciali adattamenti . Una volta ingegnerizzato il dettaglio, l'involucro tessile può avere qualsiasi dimensione, in quanto non presenta problemi di ordine costruttivo o strutturale, di messa in opera e resistenza agli urti o danni accidentali 	<ul style="list-style-type: none"> . Impiegati in integrazione con altri componenti necessitano di una particolare attenzione al rapporto/passaggio tra strutture flessibili e strutture rigide (integrazione morfologica), che comporta complessi problemi di attacco in termini tecnici e spaziali

Dati e Valutazioni qualitative						
realizzazione e utilizzazione	Leggerezza strutturale	<p>Materiale plastico - peso: 1160 g/mq \pm 1kg/mq - resistenza a trazione: 34600 kg/cmq</p> <p style="text-align: right;">Alto</p>	<p>Materiale rigido - peso: 20 kg/mq - resistenza a trazione: 400 kg/cmq</p> <p style="text-align: right;">Basso</p>	<p>Materiale rigido - peso: 10-30 kg/mq - resistenza a trazione: 700 kg/cmq</p> <p style="text-align: right;">Medio/Basso</p>	<p>Materiali tessili, iper-leggeri ed altamente resistenti, consentono la riduzione:</p> <ul style="list-style-type: none"> . dei costi di costruzione e di gestione, . di materiale ed energia nella fase di produzione e messa in opera, . di rifiuti nella fase di dismissione finale 	
	Rapidità di messa in opera	Alto	Medio	Medio	<p>Consentono:</p> <ul style="list-style-type: none"> . di realizzare opere con rapidità esecutiva e attrezzatura di cantiere minima . di ridurre i tempi di costruzione, grazie alla leggerezza e al minimo ingombro . di ripartire le tensioni attraverso l'individuazione di un numero di punti di ancoraggio sufficienti ad assicurare la distribuzione del carico, garantendo la maneggevolezza e la facilità di installazione senza macchinari complessi . di impiegare supporti interni per facilitare le operazioni di montaggio <p>←</p>	<ul style="list-style-type: none"> . I mezzi di sollevamento richiedono condizioni di fondo ottimali, in caso di fondi non livellati è necessario ricorrere a macchine speciali . Il tipo di materiale richiede attenzione nelle operazioni di svolgimento e innalzamento del telo, per evitare lacerazioni dovute ad asperità sul fondo . Pongono difficoltà di lavorazione: il silicone non può essere saldato direttamente con il metodo ad alta frequenza, è necessario l'utilizzo di nastri adesivi speciali mediante incollaggio, che comporta però un significativo risparmio energetico . Le condizioni climatiche, in particolare il vento, influiscono sull'efficacia del montaggio e sulla sicurezza. La rapidità del montaggio assume un carattere di priorità anche al fine di anticipare l'insorgere di condizioni impreviste
	Trasportabilità	Alto	Medio	Medio	<p>Garantiscono:</p> <ul style="list-style-type: none"> . facile trasportabilità in cantiere . facile movimento e manovra in fase di lavorazione e messa in opera . limitazione sulle spese di trasporto, in quanto materiali continui e flessibili, avvolgibili in rulli lunghi fino a 200 m, e trasportabili con un solo autocarro per quantità pari a circa 2.500 mq 	<ul style="list-style-type: none"> . Prima dell'imballaggio per il trasporto, deve essere controllato il confezionamento relativamente alle dimensioni minime, alla lunghezza delle giunzioni e dei bordi, all'ingombro di trasporto . Lo sfregamento durante il trasporto è da evitare con un rivestimento protettivo per ogni componente preassemblato
	Facilità di montaggio	Alto	Basso	Medio	<p>Il cantiere è leggero e pulito, in quanto:</p> <ul style="list-style-type: none"> . non prevede lavorazioni ad umido, con la possibilità di lavorare contestualmente varie fasi di lavorazioni . riduce le attrezzature di cantiere nonché i tempi di lavorazione e di montaggio . limita l'ingombro nello stoccaggio dei materiali e nella movimentazione . non impone opere provvisorie impegnative o laboriose 	<ul style="list-style-type: none"> . Richiedono precisione nella produzione degli elementi e nel montaggio. Il sollevamento della membrana, la messa in tensione e l'aggiustaggio sono operazioni delicate, nello stabilire l'entità e il criterio dei tiri . Molti progetti sono concepiti o modificati in funzione del montaggio, che in alcuni casi diventa necessario progettare . Fragili al ripetuto piegamento a causa della presenza delle fibre di vetro e non adatti alla realizzazione di strutture temporanee o trasformabili
	Facilità di intervento	Medio	Medio	Medio	<ul style="list-style-type: none"> . Quando costituiti da pannelli, sono facilmente ispezionabile, grazie alla facilità di smontaggio e rimontaggio dei pannelli 	<ul style="list-style-type: none"> . Più problematico risulta l'intervento su facciate costituite da un involucro a membrana continua, che deve essere rimossa totalmente, laddove non siano possibili riparazioni localizzate, per poi reintegrarla nella costruzione
	Immagazzinabilità	Alto	Medio	Medio	<p>←</p> <ul style="list-style-type: none"> . Presuppongono facile immagazzinabilità dei prodotti e componenti, grazie al peso e al volume contenuti, in quanto leggeri e imballabili facilmente 	<ul style="list-style-type: none"> . Le fibre di vetro, presentando una struttura più fragile delle fibre polimeriche, pongono qualche problema nel ripiegamento delle membrane

Comodità d'uso e di manovra	Alto	Basso	Medio	← . Presuppongono un limitato ingombro nello stoccaggio dei materiali e della loro movimentazione . Il ridotto peso diventa un vantaggio considerevole in termini di manovrabilità e facilità di impiego, le operazioni di assemblaggio sono a carico di pochi uomini e ogni elemento del sistema risulta esser maneggevole	.A causa della fragilità della membrana a contatto con superfici altamente aspre e non livellate, nel suo dispiegamento è necessario adagiarla su un telo protettivo, per evitare eventuali danni
Sostituibilità	Alto	Medio	Medio	. Prevedono la facile rimozione e sostituzione delle membrane o porzioni di esse, grazie alla modularità e intercambiabilità delle parti	. Se non sono più disponibili le dimensioni dei rotoli di membrana usati originariamente e da sostituire, devono essere realizzati nuovi modelli di taglio e potrebbe essere necessario trovare una nuova forma della membrana, a partire dalle misurazioni della struttura di supporto esistente . Prima di sostituire il tessuto bisogna controllare che gli altri componenti del sistema di chiusura siano riutilizzabili o meno
Riutilizzabilità e reversibilità dei prodotti e componenti	Alto	Medio	Medio	. Consentono il riuso delle membrane dismesse, una volta terminata la fase di vita utile nel manufatto e dopo un semplice processo di pulizia, senza che i materiali subiscano trasformazioni . Prevedono diverse modalità di reimpiego, grazie ad un elevato grado di adeguamento funzionale. La natura delle membrane tessili presuppone la mutevolezza funzionale, per cui l'adeguamento dei componenti ad altra funzione è legato all'alta flessibilità di tali tipologie strutturali . Garantiscono reversibilità e temporaneità, in termini di permanenza limitata in un dato contesto o in un medesimo assetto	
Utilizzo di materiali elementi e componenti ad elevato potenziale di riciclabilità	Medio	Alto	Medio	. Per i prodotti multi-componente (tessuto + rivestimento), la separazione a fine vita degli strati rende attuabile il riciclo meccanico delle materie prime e la disponibilità di materia prima seconda . Presentano un volume di rifiuti assai trascurabile	
Utilizzo di tecniche costruttive che facilitino il dis-assemblaggio a fine vita	Alto	Basso	Medio	. La tecnologia a secco favorisce il disassemblaggio dei componenti . La facilità di raccolta e trasporto del materiale dopo la dismissione è data dal fatto che tali componenti sono leggeri, imballabili e ripiegabili	. Prevedono, per la fase di disimballaggio, un telo protettivo su cui va appoggiata la membrana da dispiegare secondo le indicazioni, per evitare danneggiamenti al tessuto
Utilizzo di materiali, elementi e componenti caratterizzati da elevata durabilità	Alto (Oltre 20 anni)	Alto (illimitato, se si evita il contatto del deposito con agenti atmosferici)	Medio (10 anni)	. Grazie ai trattamenti superficiali protettivi, vengono allontanati gli agenti atmosferici inquinanti, senza l'ausilio di particolari attività di manutenzione	. Possibili atti di vandalismo possono provocare gravi danni alla membrana e in alcuni casi solo un'opportuna collocazione inaccessibile alla mano dell'uomo può ridurre tale rischio; eventuali danni, comunque, non incidono sulla sicurezza della struttura . Umidità e temperatura compromettono le caratteristiche meccaniche della tela, mentre le radiazioni ultraviolette possono danneggiare le fibre
Pulibilità	Medio	Alto	Alto	La pulitura è semplice e veloce, in quanto: . i materiali costituenti i componenti tessili sono autopulenti . non si prevede l'utilizzo di prodotti specifici per la pulizia localizzata	. La pulitura va effettuata da ditte specializzate . Vanno utilizzati detersivi e strumenti non aggressivi (spazzole morbide, acqua e sapone) . Vanno evitate pistole a spruzzo ad alta pressione e il contatto di detersivi col tessuto non oltre 10 minuti, per evitare reazioni chimiche con la spalmatura . Va effettuata periodicamente la pulizia in quanto il silicone attira lo sporco
Manutenibilità	Medio	Alto	Medio	. Necessitano di poche e semplici opere di manutenzione, che incidono sui costi di gestione in maniera irrilevante . Sono facilmente riparabili mediante adesivi, quando vi sono piccole rotture di diametro inferiore ai 5 cm, sulla parte esterna del tessuto	. Influenzabili dagli agenti climatici come temperatura e umidità per le caratteristiche meccaniche e dalla radiazione solare per la durabilità delle fibre . Necessitano di regolazione della tensione per mantenere costante la resistenza a trazione, che tende a diminuire del 20% circa nei primi dieci anni
Tenuta all'acqua, all'aria (controllo della portata e della velocità), alla neve, alle polveri, ventilazione	Alto	Alto	Alto	.Prevedono connessioni che consentono l'integrazione tra diversi componenti chiusi o aperti, in modo da garantire un adeguato passaggio d'aria e/o evitare l'ingresso dell'acqua .I materiali sono trattati e/o rivestiti con strati protettivi, al fine di non trattenere sporco e/o lasciar passare polveri dall'esterno all'interno e viceversa	. Necessitano di protezione ai bordi per evitare la capillarità dell'acqua nelle fibre, che provocano fenomeni di degrado sulle superfici . Necessitano, in alcuni casi, di sistemi meccanici di riscaldamento per ovviare al problema del carico della neve

* La valutazione qualitativa dei prodotti in vetro e policarbonato è riferita , da un lato, agli esempi applicativi e alle schede di prodotto delle aziende produttrici, dall'altro, agli indicatori elaborati nella scheda 4.S.

* Con sistemi di chiusura a doppia membrana, camera d'aria interposta e rivestimento protettivo ai raggi solari.

** Con sistemi di chiusura a doppio vetro e camera d'aria interposta.

*** Con sistemi di chiusura a pannelli dello spessore di 4 e 8 mm rispettivamente alveolari e compatti.

APPENDICE 1T

Lo stato dell'arte sui materiali tessili: produzione, classificazione e definizioni

I materiali tessili sono i costituenti fisici dei sistemi tecnologici leggeri a membrana pretesa. Con la sempre maggiore disponibilità di materiali metallici, quali gli acciai ad alta resistenza, le leghe di alluminio ed il titanio, laminati, compositi a matrice metallica (MMC) epossidica e polimerica (FRP), fibre aramidiche e di carbonio, gli avanzatissimi *smart materials* che modificano le loro caratteristiche fisico-meccaniche se sottoposti a sollecitazioni elettromagnetiche e termodinamiche, associati a tipologie strutturali che lavorano essenzialmente in regime membranale di trazione, è stato possibile sviluppare una nuova tradizione costruttiva: le "strutture leggere", nate dall'associazione di materiali ad alta tecnologia con schemi ottenuti scientificamente dalle possibili configurazioni geometrico (iperboliche) tensionali (ellittiche).

La ricerca sui materiali avanzati caratterizza la storia dell'evoluzione sociale e tecnica, in quanto l'introduzione di una nuova tecnologia che riguarda i metodi di lavorazione delle materie prime, o di nuove materie prime che presuppongono più sofisticate tecniche di lavorazione, ha segnato l'evoluzione di società e culture fin dai tempi più remoti: Età della Pietra, Età del Bronzo, Età del Ferro, fino all'uso del vetro e del ferro durante la Rivoluzione Industriale¹. La maggior parte dei materiali moderni sono nati proprio all'inizio del XX secolo, creati principalmente da ingegneri e scienziati.

Lo studio dei polimeri si è evoluto in maniera molto rapida dopo la Seconda Guerra Mondiale, portando gradualmente gli scienziati al concepimento di un nuovo campo interdisciplinare conosciuto oggi con il nome di Scienza dei Materiali. L'impatto della tecnologia ed il fiorire dell'industria aerospaziale hanno generato una nuova consapevolezza nell'uso dei materiali, creando nuove potenzialità formali e tecnologiche per l'architettura ed il design. All'inizio degli anni '60 le materie plastiche sono state introdotte su larga scala, portando conseguenze (tecnologiche e culturali) molto profonde, grazie alla possibilità di creare oggetti completamente

¹ Cfr. Filagrossi Ambrosino, Cristian, *Strumenti per la verifica dei livelli di ecosostenibilità e biocompatibilità dei prodotti edilizi realizzati con materiali avanzati*, Tesi di Dottorato, Napoli, 2010.

omogenei ed isotropi. Quando i costi di produzione crollarono e la plastica divenne un "materiale di massa", l'attenzione generale fu attratta dal fascino di un materiale che consentiva una sorta di "democrazia del consumo". Dopo la parentesi degli anni '80, in cui si è registrata una ricerca frenetica sui metalli, culminata nello sviluppo delle superleghe, a partire dagli anni '90 sono le tematiche ambientali ed ecologiche a modellare la ricerca dei nuovi materiali verso i parametri della sostenibilità.

L'evoluzione storica dell'architettura può essere identificata, tra l'altro, dalla riduzione di tipo esponenziale dei pesi propri o portanti². L'impiego di materiali che lavorano essenzialmente in regime di soli sforzi di compressione, associati a schemi strutturali e tipologie costruttive basate sull'effetto stabilizzante della gravità agente su masse strutturali di notevoli dimensioni, individuano una tradizione costruttiva "massiva", dove il rapporto tra "peso portante" e "peso portato" è molto maggiore dell'unità comportando, in senso energetico, un basso rendimento strutturale. Il passaggio dalla tradizione costruttiva "massiva" a quella "leggera" avviene con la seconda rivoluzione industriale e l'avvento dell'acciaio nelle costruzioni. Con i materiali ad alta resistenza ed i sistemi tensostrutturali il rapporto si riduce drasticamente: il peso strutturale è cento volte minore rispetto a quello delle strutture in cemento armato e dieci volte minore delle convenzionali strutture metalliche.

Nella tabella 1T.a sono riportati i dati relativi alle resistenze a trazione e compressione insieme al peso specifico, allo scopo di confrontare le proprietà meccaniche dei materiali da costruzione.

² Cfr. Diagramma di Renè Sarger.

MATERIALI	σ_t^R (Trazione) N/mm ²	σ_c^R (Compressione) N/mm ²	γ_k (Peso specifico) N/m ³ 10 ³
Laterizi		3	18
Legno	85	37.5	5
Cemento		30	25
Acciaio 52	520		79.5
Acciaio 105	1050		79.5
Titanio	900		45

COMPOSITI

Fibre di carbonio unidirezionali	1400		15.5
Fibre di carbonio tessute	800		15.5
Fibre aramidiche unidirezionali	1600		13
Fibre aramidiche tessute (Kevlar)	750		13
Fibre di vetro unidirezionali	1100		20
Fibre di vetro tessute	450		20

Tabella 1T.a

La tensostruttura è un sistema statico-resistente composto da elementi sottili (funi o membrane) sollecitati unicamente da sforzi di trazione, impiegata soprattutto nelle grandi coperture. Oggi, grazie all'innovazione tecnologica di materiali e prodotti, è possibile impiegare questa tecnologia anche in altre tipologie funzionali. Le tensostrutture si propongono come strutture molto leggere e, in caso di deformabilità per effetto di carichi asimmetrici, non provocano effetti pericolosi, inoltre permettono ogni possibile configurazione prestandosi ad ottenere suggestivi effetti morfologici. L'impiego di membrane in materiale sintetico ha reso possibile un diffuso impiego per le loro elevate caratteristiche tecnico-prestazionali.

La membrana è un materiale da costruzione flessibile, stabilizzata solo sotto tensione, per questo motivo le caratteristiche essenziali sono la resistenza a trazione e il comportamento elastico. Le membrane, come indicato in tabella 1T.b, possono essere costituite da:

tessuto, tessuto spalmato con resine polimeriche, laminato (o pellicola).

Tessuto	Fibre di vetro Fibre di cotone Fibre di polimeri fluorurati
Tessuto spalmato	Fibre di poliestere/PVC Fibre di poliestere/silicone Fibre di vetro/PTFE Fibre di vetro/silicone
Laminato	ETFE (etilenefluoroetilene) THV (tetrafluoroetilene, ex afluoropropilene e vinili-denfluoruro) PVC (polivinilcloruro)

Tabella 1T.b

I filati utilizzati per i *tessuti* sono prevalentemente fibre di vetro o di polimeri fluorurati (PTFE, poliestere o cotone). I tessuti in fibre di vetro sono incombustibili e possono essere prodotti in diversi colori e tessitura. I tessuti in PTFE (politetrafluoroetilene) presentano migliori caratteristiche di ripiegabilità della membrana e ottima impermeabilità alla pioggia, con alta resistenza alle macchie e allo sporco e alta diffusione luminosa senza alterarne la tonalità. I tessuti in cotone, infine, trattati con ritardanti di fiamma, possono essere utilizzati per scopi temporanei sia in interni che in esterni.

I *tessuti spalmati* con resine polimeriche sono formati da una struttura interna fibrosa, uno strato superficiale di rivestimento (spalmatura) e un ulteriore rivestimento finale esterno (vernice).

Il tessuto di base, o supporto, è l'elemento che conferisce le caratteristiche meccaniche al prodotto finito. Le fibre, in forma di fili, sono assemblate grazie a un processo di tessitura continua con incrocio dei fili tra ordito e trama. La spalmatura rende il tessuto impermeabile e resistente agli agenti esterni e al fuoco, e caratterizza la membrana per gli aspetti estetici. Il rivestimento la protegge dagli agenti atmosferici ed in particolare dai raggi UV, dannosi per l'invecchiamento precoce della membrana. Il tessuto grezzo, dopo una serie di pre-trattamenti, è ricoperto su ambedue le facce con PVC (cloruro di polivinile) o silicone, nel caso di tessuti in fibre di poliestere, con PTFE (politetrafluoroetilene) o silicone, nel caso di tessuti in fibre di vetro. Ambedue i tipi di membrane rispondono molto bene all'utilizzo all'esterno.

I tessuti in poliestere spalmati con PVC, rifiniti con una vernice a base di fluoropolimeri, sono i più comuni e presentano bassa infiammabilità, notevole

economicità, buone proprietà meccaniche e notevole resistenza alla fessurazione quando sono ripiegati. Presentano, inoltre, buona resistenza alla sporcizia, ma non sono indicati quando l'esposizione ai raggi UV è molto intensa o quando si è in presenza di forti variazioni della temperatura esterna, in quanto non sono in grado di resistere adeguatamente. Il poliestere ha catene principali d'idrocarburi contenenti legami esteri, da cui il nome. Una particolare famiglia di poliesteri sono i *policarbonati*, materiali trasparenti utilizzati per realizzare laminati leggeri o vetri infrangibili.

I tessuti di *fibre di vetro spalmati con PTFE* sono caratterizzati invece da ottima durabilità e incombustibilità. Inoltre, il basso coefficiente di adesione conferisce loro una superficie autopulente. Un nuovo sviluppo dei tessuti in vetro prevede che su ambedue le facce sia posto un film trasparente di PTFE, che ne permette l'aumento del grado di traslucidità (fino al 50%). Il mediocre comportamento alle piegature e la maggiore tendenza all'abrasione delle fibre di vetro, rispetto al poliestere, richiede maggiore attenzione nella fabbricazione, nell'installazione e nella gestione del materiale.

Le *lamine*, in genere, sono pellicole di ETFE, THV, PVC, estrusi e calandrati allo scopo di realizzare materiali con spessore costante, in questo modo si assicura anche uniformità di trasparenza. I laminati a base di fluoropolimeri, quali l'ETFE, sono utilizzati anche in due o più strati nelle costruzioni pneumatiche. Rispetto ad altri materiali polimerici trasparenti, essi offrono molti vantaggi, tra cui il basso peso specifico (meno di 1 kg/ml), la riciclabilità completa, l'alta traslucidità ai raggi UV e l'auto-pulizia. Esistono poi membrane microperforate in ETFE con buone proprietà acustiche in termini di assorbimento dei suoni.

I laminati in THV, polimero simile all'ETFE, sono molto meno utilizzati, poiché pur essendo trasparenti, elastici e di facile lavorazione, sono meno resistenti allo strappo.

I laminati in PVC sono idonei per uso interno e per piccole campate, per la loro bassa resistenza e un notevole scorrimento viscoso. I polivinili costituiscono una classe di composti, a basso costo, ottenuti dalla polimerizzazione di molecole contenenti il radicale vinile. Il PVC, essendo piuttosto rigido, può essere usato per un numero esiguo di applicazioni se al materiale di base non sono aggiunte

sostanze che lo rendano processabile e convertibile in prodotti finiti, come stabilizzanti (indispensabili per evitare la degradazione del polimero durante la lavorazione o allorché è esposto all'aria), lubrificanti (aggiunti per facilitare la trasformazione del polimero e per ridurre l'attrito durante la lavorazione), plastificanti (aggiunti per rendere il materiale più flessibile).

I fluoropolimeri possiedono prestazioni straordinarie, compensate però dall'alto costo. La principale caratteristica di questi polimeri risiede nel fatto che gran parte dei legami chimici presenti è del tipo C-F (carbonio-fluoro), uno dei legami covalenti a più alta energia. Ne consegue che le molecole sono molto stabili, in grado di sopportare alti livelli di sollecitazione termica e aggressione chimica. Le caratteristiche delle membrane in fluoropolimeri possono essere così riassunte:

- Bassa adesione di sostanze estranee e basso coefficiente di attrito e bassa abrasione
- Resistenza ambientale, per la trasparenza ai raggi UV, all'ossidazione e all'attacco di microrganismi
- Elevata trasmissione della luce e indice di rifrazione basso
- Resistenza al degrado e agli aggressivi chimici in un ampio intervallo di temperatura
- Resistenza al calore, a una temperatura di servizio superiore a 200 °C
- Resistenza al fuoco e all'usura.

La durabilità dei prodotti citati dipende da diversi fattori, in particolare le membrane utilizzate per uso esterno, sia in laminati sia in tessuti spalmati, devono essere resistenti ai raggi UV e all'esposizione all'atmosfera. Materiali che non contengono plasticizzanti e sono costituiti solo da fluoropolimeri, come i tessuti in vetro spalmati con PTFE o laminati di ETFE, non mostrano segni di deterioramento apprezzabile, in seguito all'esposizione al sole e all'atmosfera, anche dopo 25 anni di utilizzo. I tessuti in poliesteri spalmati con PVC hanno, invece, una vita più breve, che oscilla dai 15 ai 20 anni. Tali membrane offrono, d'altra parte, elevata sicurezza all'incendio, per il lento collasso della membrana alle alte temperature. Grazie alla loro struttura molecolare e alle caratteristiche delle superfici, i fluoropolimeri sono superiori a tutti gli altri materiali in termini di resistenza alla sporcizia, fondamentale per la gestione dei costi di manutenzione e l'estetica, cui contribuisce la varietà di

colori offerta dalle membrane in poliestere/PVC , mentre nel caso dei tessuti in fibre di vetro/PTFE è possibile l'utilizzo di pochi colori poiché, per l'elevata temperatura raggiunta in fase di produzione, occorre adoperare solo pigmenti resistenti al calore.

Relativamente alla classificazione dei materiali oggetti di studio è utile sottolineare le principali classificazioni dei materiali che negli ultimi anni studiosi ed esperti hanno elaborato e che risultano molto divergenti tra loro: da una semplice classificazione “per natura del materiale” a quelle basate “sulle prestazioni” dei prodotti, ai tentativi di classificazione che riassumono le due tipologie di classificazione, fino a una classificazione basata sulla “natura fisica” dei materiali³.

La classificazione dei tessuti per l'edilizia avviene essenzialmente in due direzioni: le *membrane* e le *scocche*. Le membrane sono propriamente i *tessuti*, mentre le scocche sono *film non tessuti*; entrambe possono essere costituite da un solo componente o da più componenti, vengono definite perciò *monocomponente* (sottoposte a un processo industriale avanzato riferito ad un'unica componente chimico-fisica) o *multicomponente* (sottoposte a un processo industriale avanzato riferito ad un mix di componenti materiali differenti). I principali componenti dei tessuti sono il *supporto*, la *spalmatura* e il *rivestimento* esterno.

Il tessuto di base, o supporto, è l'elemento che assicura le caratteristiche meccaniche del prodotto finito. Le fibre che costituiscono il tessuto di base sono legate tra di loro in forma di fili e sono assemblate grazie al processo di tessitura continua con l'incrocio dei fili tra *ordito* e *trama*⁴. Il filo più comunemente usato per il supporto è in fibra di poliestere ad alta tenacità, con vari titoli (dtex, unità di misura della massa espressa in grammi di un filo di lunghezza 10.000 m, con 1gr./10.000 m = 1/10 Tex) a seconda della resistenza richiesta: il filato più comune è il 1100 dtex (con una resistenza alla trazione di circa 8 kg per filo), mentre per membrane di grandi dimensioni, o membrane a cui si richiedono particolari resistenze meccaniche, il filato può essere il 1670 dtex o il 2200 dtex. La costruzione del

³ Cfr. B. Brownell (a cura), *Transmaterial*, Princeton Architectural Press, New York 2006 e C. Langella, *Nuovi Paesaggi Materici. Design e Tecnologia dei materiali*, Alinea Editrice, Firenze 2003.

In **Appendice 1A** sono allegate le tabelle di classificazione dei materiali degli autori citati.

⁴ Trama: insieme di fili orizzontali che concorrono nel formare un tessuto.

Ordito: insieme di fili verticali che aprendosi creano un varco chiamato passo che permette di far passare la navetta con il filo di trama.

tessuto varia da 8 fili per cm in trama ed ordito a 9 o 12 fili per cm. Negli ultimi anni sono comparse nuove qualità di filo (denominate *low wicking*, un nuovo filato a basso effetto di capillarità, realizzato in Poliestere Alta Tenacità che, in caso di "brasatura" del tessuto durante la fase di montaggio di una tensostruttura, non permette il propagarsi dello sporco lungo il filo, poiché il materiale di cui si compone contrasta l'assorbimento dello sporco e ne ostacola l'espansione) che impediscono all'umidità di penetrare per capillarità all'interno del supporto, evitando la formazione di macchie in trasparenza che potrebbero influire sulla vita delle membrane.

La membrana è costituita dall'intreccio di più fili, ognuno dei quali è formato da circa 220 bavette, fili sottilissimi avvolti tra di loro, a formare la tessitura della membrana. Il *Weft Inserted* è un particolare tipo di tessitura in cui gli orditi e le trame sono sovrapposti e poi cuciti con un filo più sottile, detto "di legatura", nei punti di contatto, in modo che quando la membrana viene tirata i fili sottili si spezzano e l'orditura della membrana si compatta, diventando più resistente alla lacerazione e al taglio. Per realizzare questo tipo di tessitura, che prende il nome di "tessitura panama", occorre un telaio speciale. La tessitura costituita da trama e ordito intrecciati semplicemente, in modo che il filo di trama passi alternativamente sopra e sotto quello di ordito (ciò fa sì che l'allungamento nella direzione della trama sia maggiore rispetto a quello dell'ordito, a causa del percorso più complesso fatto dalla trama), si chiama "tessitura piana". La tessitura triassiale, invece, si ha quando vengono intessuti tre fili di ordito insieme a tre fili di trama.

Il secondo componente della membrana è la *spalmatura*, la cui funzione principale è di rendere il tessuto impermeabile e contiene tutti i prodotti necessari a caratterizzare la membrana per gli aspetti estetici e di resistenza agli agenti esterni ed al fuoco. Le formule per il PVC di spalmatura contengono oltre 20 componenti: plastificanti, ignifuganti, agenti contro le muffe, agenti anti raggi UV, pigmenti colorati devono essere della migliore qualità per poter garantire il comportamento della membrana durante la sua vita. Altro aspetto fondamentale è che la spalmatura consente la giunzione delle membrane tra di loro mediante termosaldature ad aria o ad alta frequenza, infatti il semplice tessuto di base non può essere saldato ma solo assemblato tramite cucitura.

Il terzo componente della membrana è lo strato di *rivestimento* esterno, o vernice, chiamata anche *finish*, il cui scopo è di proteggere la spalmatura dai raggi UV, allungandone così la vita e consentendo una migliore pulizia della membrana, essenziale per l'aspetto estetico e per la manutenzione del tessuto. I primi rivestimenti sono stati realizzati a metà degli anni 60 con resine e vernici acriliche che conferivano al tessuto un aspetto laccato lucido. Questo tipo di vernice viene ancora utilizzato nella produzione di tessuti destinati alla confezione di teloni per camion o altre applicazioni generiche. Nel settore delle membrane per l'architettura tessile, invece, dai primi anni '90 vengono sempre di più impiegate vernici a base di PVDF (fluoruro di polivinilidene), un prodotto che consente di raggiungere risultati di gran lunga superiori rispetto alle vecchie vernici acriliche. Il PVDF viene applicato sulla spalmatura mescolato in varie percentuali alle vernici acriliche, sino alla possibilità di avere il tessuto con strato esterno di PVDF al 100%. Un' alternativa all'uso di vernici in PVDF è l'applicazione sulla spalmatura di un film di protezione, tra cui il più conosciuto è il Tedlar, realizzato da DuPont, che offre al tessuto uno scudo antiaderente su cui la polvere scivola via in presenza della pioggia e facilita le eventuali operazioni di pulizia; inoltre resiste ai raggi UV e conserva l'aspetto originale per un periodo di almeno 5-6 volte più lungo rispetto ai normali tessuti.

Proprietà, processi e tecnologie di produzione

L'evoluzione delle membrane impiegate in edilizia comincia dalle più antiche costruzioni tessili, le tende nomadi, i velaria e i circhi delle civiltà romane e greche, che utilizzavano tessuti generalmente a base di cotone, con trattamenti superficiali di varia natura in grado di ottenere l'impermeabilità necessaria alla loro durata nel tempo.

Il successo della moderna architettura tessile è strettamente connesso allo sviluppo dei tessuti tecnici, utilizzati nei settori scientifici più diversi, e da qui mutuati in architettura, basti pensare alla medicina o alla chimica, all'industria meccanica o alla nautica. I cosiddetti tessili innovativi avanzati sono conosciuti anche con la sigla T.U.T., acronimo che indica i Tessili per Usi Tecnici. Le membrane impiegate negli edifici moderni e contemporanei sono materiali compositi, costituiti da un supporto di base, una spalmatura vinilica ed un rivestimento finale esterno. Aspetti significativi

del processo produttivo delle membrane riguardano l' ampia preparazione in fabbrica dei componenti, che consente di ridurre i tempi di costruzione sul cantiere e permette il montaggio più rapido di tutte le operazioni nonché un miglior controllo delle fasi di lavorazione.

I tessuti tecnici sono in grado di offrire una serie di soluzioni di grande aiuto per i progettisti, poiché sono materiali ad elevate prestazioni di resistenza meccanica, per impieghi nei rinforzi strutturali, nell'isolamento termico ed acustico, per la tenuta agli agenti atmosferici e la protezione alle radiazioni solari, alla resistenza al fuoco e all'elettricità statica, fino alle problematiche relative alla resistenza in zone sismiche. La loro diffusione tuttavia è ancora in qualche modo rallentata, sia per l'andamento ciclico del settore, sia per la diffidenza ad adottare nuove tecniche e nuovi materiali che richiedono competenze e capacità differenti da quelle più consolidate e diffuse, da parte dei progettisti e degli utilizzatori.

Il settore delle applicazioni riferibili all'ingegneria civile si presenta estremamente vario ed eterogeneo: prodotti ed applicazioni sono spesso molto differenti tra di loro. Una prima grande suddivisione pone da un lato i prodotti che vanno a contatto col terreno, i cosiddetti *geotessili*, e dall'altro tutto quello che rientra nelle costruzioni vere e proprie. Alcune aree specifiche del settore sono i materiali per rinforzi come le fibre di polivinilalcol (PVA), utilizzabili per il rinforzo del cemento in alternativa al metallo, e i materiali compositi a base tessile che rispondono in maniera ottimale in termini di resistenza e multifunzionalità (isolamento termico o acustico).

I nuovi materiali consentono di costruire in maniera rapida strutture destinate a durare nel tempo, che necessitano di sistemi di messa in opera standard e ripetitivi per economizzare le tecniche e quindi diffonderne gli impieghi.

Si avverte oggi una tendenza ad ottimizzare le prestazioni dei materiali, come nel caso della resistenza all'idrolisi e la resistenza al fuoco, caratteristiche fondamentali per gli impieghi strutturali. La ricerca scientifica sta proponendo sempre più soluzioni innovative, mettendo a punto nuove fibre e nuovi processi di trasformazione e punta sugli edifici biomimetici e intelligenti, nati dalla ricerca continua del comfort e del risparmio energetico, grazie alla sperimentazione di tecnologie di produzione industriale dei tessuti e dei rivestimenti e soprattutto grazie a una rinnovata attenzione di architetti e ingegneri per le costruzioni leggere, montabili e smontabili

in breve tempo, traslucenti e, in alcuni casi, anche più economiche rispetto alle strutture “convenzionali”. I tessuti sono costituiti da fibre di diversa natura, riassunte nel grafico 1T.c.

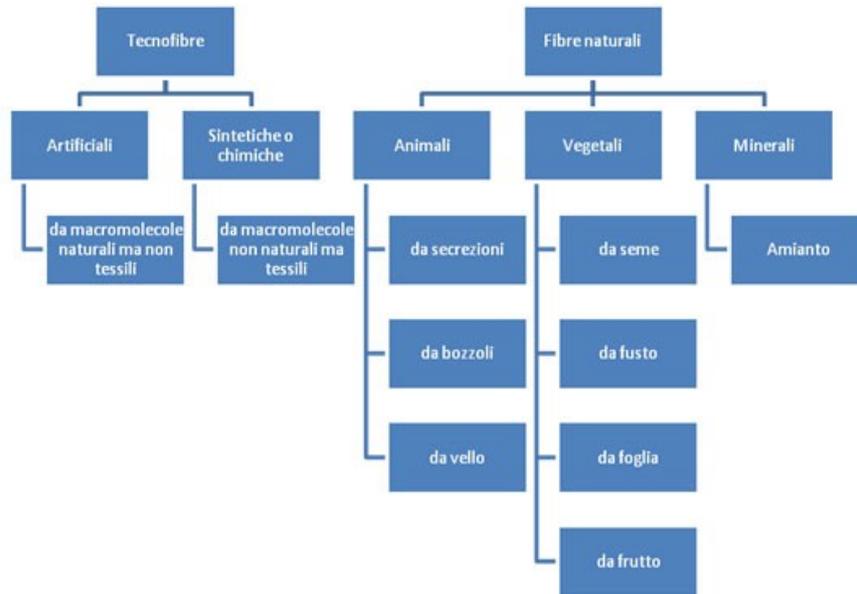


Grafico 1T.c

La filiera produttiva che porta al confezionamento finale del prodotto tessile avviene attraverso cinque distinte fasi, successive al processo progettuale a monte dell'intero percorso realizzativo:

- 1- produzione del materiale base
- 2- prima lavorazione (tessitura/estrazione)
- 3- seconda lavorazione (rivestimento/laccatura)
- 4- confezionamento della membrana (dopo il taglio dei teli o dei laminati, manuale meccanico, le superfici sono unite per cucitura, per saldatura ad alta frequenza o termica, o con adesivi)
- 5- installazione del sistema tessile.

Nello specifico, la produzione delle membrane avviene a ciclo continuo, attraverso una serie di fasi che costituiscono il processo mediante il quale si realizzano i prodotti necessari al confezionamento di tensostrutture di varie dimensioni, colori, caratteristiche che si adeguano volta per volta alle diverse

esigenze del mercato. Le fasi del ciclo produttivo di una membrana in poliestere spalmato in PVC possono essere così riassunte:

a- *Preparazione del Plastisol*, miscela di PVC con resine e pigmenti; in questa fase si utilizza un degassificatore, per evitare che l'aria entri nella miscela

b- *colorazione* (eventuale) dei tessuti mediante raffinatrice tricilindrica, che all'interno della miscela di PVC aggiunge pigmenti colorati

c- *controllo* della qualità della miscela appena plastisol ha assunto la sua densità definitiva, per schedarlo prima della spalmatura della membrana in poliestere

d- sistemazione del rullo di *poliestere* all'interno della filiera meccanica, per la preparazione alla spalmatura

e- *spalmatura* in PVC del tessuto in fibra di poliestere in più fasi:

-la prima spalmatura non presenta alcuno spessore sulla membrana e viene chiamata strato di "*fondo*", mentre la sua messa in opera si chiama "a lame in aria"

-la *seconda spalmatura* conferisce alla membrana uno spessore di circa 0,5 mm

-la *terza spalmatura* conferisce uno spessore sul retro della membrana, mediante regolazione di una lama con cui si ottiene lo spessore voluto

-la *quarta spalmatura* è il secondo e ultimo strato sul retro della membrana.

f- prima *asciugatura* della membrana spalmata

g- *gelificazione*, attraverso la ventilazione mediante calore, che non viene somministrato nell'apposito forno a 180 °C, ma utilizzando aria calda sulla membrana in modo da ottenere un tessuto con una certa resistenza. Maggiore è lo spessore della membrana più lentamente deve essere effettuata l'asciugatura, in modo da ottenere una resistenza omogenea

h- *raffreddamento* tramite shock termico, in modo da ottenere un tessuto liscio, passando dal calore al brusco raffreddamento ad opera di cilindri in cui passa acqua fredda, posti a contatto con la membrana

i- applicazione di uno strato di finitura per protezione del PVC, chiamato *finish*;

l- *avvolgimento* su rullo del tessuto prodotto, pronto per il magazzino.

Una volta conclusa la produzione, il prodotto viene sottoposto ad alcune prove per verificare i valori tecnici richiesti dalla normativa. Aspetto particolarmente interessante per la presente ricerca è il comportamento delle membrane tessili alla luce naturale ed artificiale che incide sulla loro superficie.

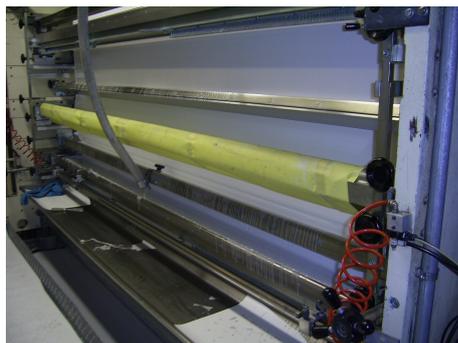
Le prove sulle caratteristiche ottiche delle membrane possono essere sintetizzate nel modo seguente:

- 1- prova alla *trasmissione luminosa*, effettuata su campioni di colore bianco, dove le differenze di comportamento si notano maggiormente. La grandezza cui si fa riferimento è il fattore di trasmissione, rapporto tra il flusso luminoso trasmesso da una superficie e il flusso luminoso incidente.
- 2- prova alla *riflessione luminosa*. La grandezza cui si fa riferimento è il fattore di riflessione, rapporto tra il flusso luminoso riflesso da una superficie e il flusso luminoso incidente.

Lo strumento di controllo utilizzato per le suddette prove è lo *spettrofotometro*; un esempio è il modello *Color-Eye 3100*, ditta Macbeth, per il controllo del colore in riflessione luminosa, in relazione ai controlli del plastisol formulato prima della spalmatura in linea. Per quanto riguarda il controllo del colore in trasmissione luminosa, viene utilizzato un confronto, basato sulla *percezione visiva dell'occhio umano*, tra i vari campioni di tessuto spalmato appartenenti tutti ad uno stesso lotto di produzione, verificando che ci sia omogeneità tra i lotti quando si attuano le prove. Per effettuare queste verifiche, se non si è in possesso di uno spettrofotometro, si utilizza una specola al neon.

Altre prove fotometriche possono essere eseguite per la *trasmissione dei raggi UV*, importante per la resistenza all'invecchiamento e la durata, e per l' *emissività ai raggi IR*, utilizzata soprattutto in campo militare. Altre prove non meno importanti sono quelle relative alla resistenza della membrana, in particolare alla *adesione*, *lacerazione* e *trazione*.

Lo strumento di controllo in questo caso è il *dinamometro*: si utilizza un elettrodo per effettuare la saldatura di un provino di membrana, tra lato dritto e lato rovescio, per ottenere un provino formato da due parti di membrana saldate tra loro, su cui si effettua la prova all'adesione. I provini hanno in genere larghezze che variano da 2 a 5 cm. E' da ricordare un'altra caratteristica che influenza la resistenza del materiale, ovvero la *denatura*, il peso di un singolo filo per 10.000 ml, la quale insieme al numero di fili che costituisce la membrana stessa determina la sua *resistenza*⁵.



Alcune fasi di lavorazione: preparazione del plastisol, controllo del plastisol, applicazione del primo strato di PVC sulla membrana in poliestere, spalmatura, asciugatura, gelificazione.

⁵ I dati sul ciclo produttivo e le prove effettuate sui campioni di tessuto sono stati ricavati in occasione di una visita alla NAIZIL S.p.a. presso CAMPODARSEGO (PD) il 10/03/2008.

Le materie plastiche utilizzate per la realizzazione di facciate leggere in architettura sono classificate, in base alle loro proprietà e ai metodi di lavorazione che subiscono, secondo i seguenti grafici.

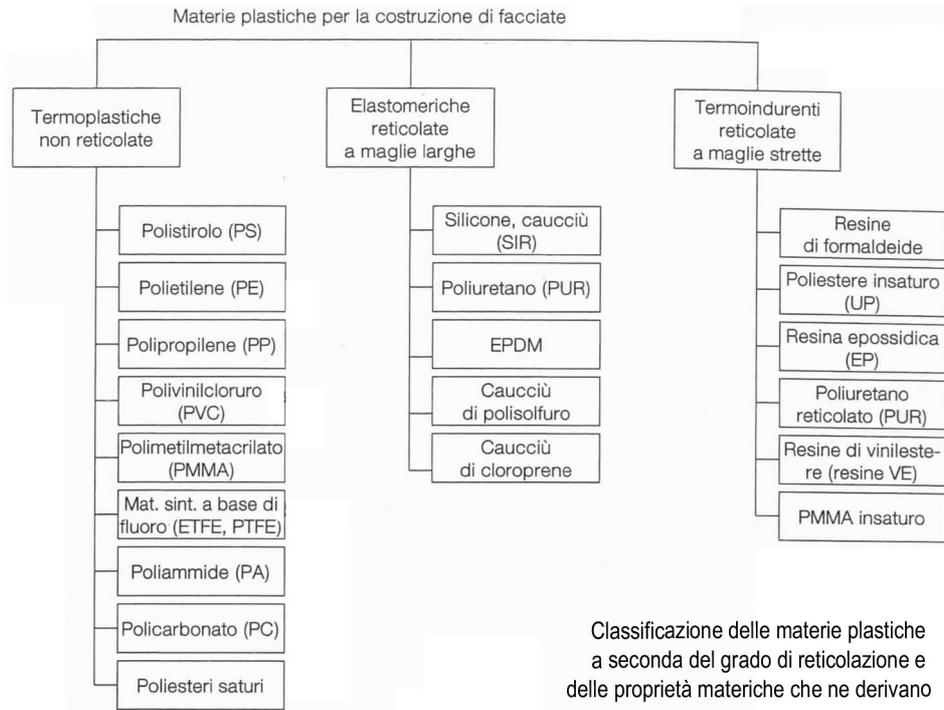


Grafico 1T-d Classificazione delle materie plastiche. (Fonte: Herzog T. et al., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005)



Grafico 1T-e Metodi di lavorazione di elementi in materiali plastici. (Fonte: Herzog T. et al., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005)

I principali tessuti tecnici impiegati in edilizia, in particolare come sistemi chiusi a membrana pretesa per involucri esterni, sono riportati nella tabella 1T.e, che mostra l'evoluzione dei prodotti tessili (dal poliestere/PVC, conosciuto da decenni, alle più recenti fibre aramidiche), consentita non solo dalla ricerca e sperimentazione nel settore edile, ma anche dal trasferimento tecnologico possibile

grazie alla interazione tra le varie scienze, in particolare derivante dal campo medico e nautico, che non può prescindere dalla conoscenza dei percorsi innovativi che la comunità scientifica sta percorrendo anche in ambito non tessile, ma che sul tessile possono avere importanti ricadute.

Poliestere spalmato con PVC o PVDF
Fibre di vetro spalmate con PTFE, FEP o silicone
PTFE (nomi commerciali: Tenara, Teflon)
ETFE (pellicola o film)
THV (pellicola o film)
Fibre di carbonio
Fibre aramidiche (nome commerciale: Kevlar)

Tabella 1T.e

In un primo momento, quando comincia a diffondersi l'architettura tessile con le prime tensostrutture realizzate in centro-Europa, il materiale più utilizzato è la fibra di *poliestere spalmata in PVC*, che ben si presta a impieghi di diverse dimensioni e funzioni. Dal poliestere spalmato in PVC molti passi avanti sono stati fatti dall'industria produttiva e diverse sono state le applicazioni di materiali tessili, che oggi entrano a far parte dei cosiddetti tessuti tecnici, materiali altamente avanzati che sono in grado di rispondere efficacemente a requisiti di sicurezza e comfort, grazie a tecnologie di produzione innovative e a impieghi di materiali provenienti da altri settori industriali, quali la chimica, l'aeronautica, la nautica e la medicina.

Il *poliestere* è una classe di polimeri ottenuti per polimerizzazione a stadi via condensazione che contengono il gruppo funzionale degli esteri lungo la catena carboniosa principale. La loro maggiore applicazione è nei tessuti tecnici (trasporti, geotessili, medicale, dispositivi di sicurezza...). I poliesteri sono combustibili, ma, a causa dell'intrinseca termoplasticità, tendono a ridursi fino ad estinguersi. Essi possono essere suddivisi in:

- poliesteri saturi: polimeri termoplastici a catena lineare;
- poliesteri insaturi: contengono al loro interno dei legami carbonio-carbonio doppi o tripli; vengono rinforzati con fibre di vetro, trovando applicazione nel settore nautico e automobilistico;

- poliesteri modificati o resine alchidiche: polimeri reticolati, utilizzati nella produzione di vernici.

Le caratteristiche dei fili di poliestere sono, oltre ad un'ottima tenacità e resilienza, un'elevata resistenza all'abrasione, alle pieghe e al calore, un elevato modulo di elasticità e una minima ripresa di umidità nonché una buona resistenza agli agenti chimici e fisici. Tutte queste caratteristiche fanno in modo che il poliestere sia impiegato puro o misto con altre fibre naturali, artificiali o sintetiche. I prodotti sono resistenti all'usura, hanno stabilità dimensionale (non si restringono) e si tingono bene. Il poliestere, è un materiale dotato di flessibilità, leggerezza ed alta resistenza. Il basso coefficiente di trasmissione del calore permette di trattenere il calore del corpo con caratteristiche di poco migliori a quelle della lana che, però, ha un maggiore potere coibente. I tessuti di poliestere, grazie al basso coefficiente di assorbimento dei liquidi, non assorbono l'umidità il che li rende impermeabili e resistenti allo sporco.

Poliestere rivestito di PVC o PVDF

Conosciuto per la sua inattività chimica, è meno resistente alla temperatura rispetto alla maggior parte delle materie plastiche. Ottima è la sua resistenza agli alcali forti, agli acidi minerali, ai sali e a molti prodotti chimici che attaccano la maggior parte dei materiali.

Questo materiale ad alta tenacità è stato utilizzato per più di 30 anni in coperture e facciate di edifici sia per costruzioni temporanee che per esposizioni. La grande varietà di diversi tipi disponibili con diversi gradi di resistenza e in una grande varietà di colori permette un ampio campo di applicazione. Inoltre, l'alta flessibilità del tessuto lo rende ideale per sistemi retrattili. E' un materiale economico, diventato molto popolare per la sua facile applicabilità e l'ampia gamma di tessiture e spalmature che offre, dalle membrane standard a quelle di alta qualità ingegneristica. Presenta un'aspettativa di vita di 15 anni. Il materiale è auto estinguibile e resistente al fuoco, secondo le normative internazionali, e presenta il vantaggio di avere una densità molto bassa rispetto ai materiali più comuni, essendo il suo spessore compreso tra i 0.5 e i 1.5 mm.

L'aggiunta di rivestimenti anti-adesivi in PVDF (Polyvinyl di-fluoride) ha significato una riduzione della colorazione, paragonata con i semplici rivestimenti acrilici. Inoltre, il materiale è abbastanza resistente allo sporco, e la pulizia può essere effettuata con detergenti ecologici, perciò esente da manutenzione, comunque le ispezioni sono sempre raccomandate, per identificare e riparare difetti o danni da impatti meccanici.

La compatibilità ambientale è assicurata dalla riciclabilità del PVC, che può essere separato dalla base di poliestere e riutilizzato per altri prodotti, una volta sottoposto a lavorazioni meccaniche.

A seconda delle caratteristiche del materiale, la traslucenza (ovvero il fattore di trasmissione visiva) varia dal 5 al 35%.

Fibre di vetro rivestite di PTFE

Materiali di qualità elevata, con una durata di almeno 25-30 anni. Il tessuto è composto da filamenti di vetro di diverso diametro (circa 4nm, 6 nm, 9 nm ecc). Grazie all'impregnazione del tessuto di vetro, nelle intercapedini del tessuto non può

penetrare umidità, né possono depositarsi particelle di sporco ed è esclusa anche la penetrazione di microbi o funghi. Possono penetrare il rivestimento microporoso in PTFE solo liquidi con bassa tensione superficiale, gas e vapori. La resistenza del tipo standard pesante, da 7500 N/5cm è minore di quella del poliestere rivestito in PVC. La dilatazione del materiale (allungamento a rottura dal 3 al 10%) e la resistenza alla lacerazione (fino a circa 500) sono basse, a causa del tessuto di vetro relativamente fragile. I tessuti rivestiti interamente di PTFE possono raggiungere una traslucidità di circa il 13 % e come tessuto reticolato permeabile o impermeabile raggiungono circa il 65%, ma a spese della resistenza. Sono classificati come materiali non combustibili. A causa della relativamente bassa resistenza alla deformazione non sono adatti per strutture pieghevoli o mobili. L'alta resistenza a trazione permette costruzioni di ampie luci, in particolare in tensostrutture o pressostrutture permanenti, con aspettative di vita fino a 25-30 anni. Grazie alla struttura molecolare del rivestimento, il materiale è estremamente resistente alle aggressive temperature ambientali, e dimostra eccellenti prestazioni tecniche e visive a lungo termine. Il materiale è incombustibile e raggiunge i più alti requisiti tra le membrane utilizzate nelle tensostrutture, resiste poi a temperature di 260°C senza perdite considerevoli di resistenza. Il materiale è esente da manutenzione, comunque le ispezioni sono sempre raccomandate, per identificare e riparare difetti o danni da impatti meccanici. I sistemi di assemblaggio sono facilmente separabili dalla membrana e sono riciclabili al 100%. La trasmissione luminosa dipende dallo spessore del materiale e varia dal 5% al 25 %. Un livello di luce uniforme del 5 % è sufficiente per sostituire la luce artificiale durante il giorno. Usando pellicole di fluoropolimeri combinate alle fibre di vetro si raggiunge una traslucenza del 65%.

Fibre di vetro rivestite di silicone

Hanno un comportamento meccanico simile a quelli rivestiti in PTFE, ma il rivestimento di silicone, che non consente la diffusione del vapore, protegge il tessuto meglio del PTFE, che è microporoso. Inoltre, la combinazione tra rivestimento di silicone e fibre di vetro ha una traslucidità nettamente superiore (oltre il 20%). Soddisfano la classe di resistenza a I fuoco. I singoli elementi della

membrana possono essere giuntati in modo duraturo e altamente resistente solo per mezzo di adesivo, essendo impossibile la saldatura termica del silicone. Il comportamento rispetto all'accumulo di sporco e le tecniche di unione sono state migliorate negli ultimi anni, tanto che queste membrane sono oggi un prodotto standard in edilizia, e anche più economiche di quelle con PTFE.

Le membrane in fibra di vetro spalmate in silicone presentano inoltre facilità nell'impiego e lunga durata. La spalmatura viene integrata da trattamenti specifici volti a prevenire la penetrazione di umidità e la conseguente formazione di muffe. Le membrane sono disponibili in altezze di 200 o 300 cm, per facilitare la realizzazione di tensostrutture anche di grandi dimensioni. I pesi sono funzionali all'applicazione richiesta e variano da 370 a 1500 g/mq, per rispondere alle esigenze di resistenza meccanica (Tipo 1, 2, 3 e 4). Hanno una vita media di circa 25 anni e oltre ad avere una buona flessibilità a temperature comprese tra i -50 °C e i 200 °C, sono insensibili all'azione degradante dei raggi ultravioletti e resistenti allo sporco. Il tessuto in fibra di vetro e silicone, chimicamente inerte, insolubile e non soggetto ad alterazioni dovute all'aggressione degli agenti atmosferici non presenta ingiallimenti tipici del PVC causati dal passaggio dei raggi ultravioletti. L'utilizzo del supporto fibra di vetro garantisce un'ottima resistenza meccanica e stabilità dimensionale. L'adesione del silicone al supporto è molto buona in quanto il vetro e il silicone sono compatibili naturalmente. La traslucenza può arrivare ad un 35% ma si può avere anche un tessuto opaco al 100%. Trattandosi di un materiale pigmentabile, non ci sono limiti di colorazione e non produce gas tossici in caso di incendio. L'unione del tessuto in fibra di vetro/silicone avviene attraverso un nastro di silicone frapposto fra i due lembi di materiale. Attraverso l'introduzione di alte temperature il nastro di silicone si attiva e un processo di reticolazione ne provoca l'incollaggio. Essendo il nastro di silicone attivato con un incremento di temperatura esso va conservato al fresco ed è soggetto ad una scadenza. Per unire il materiale si utilizzano macchine con barre termiche saldanti sia superiori che inferiori; la temperatura delle barre supera i 200 °C e la saldatura avviene in circa 30 secondi più un tempo di raffreddamento di circa 20 secondi.

ETFE - Etilenetetrafluoroetilene

L'etilene tetrafluoroetilene è un polimero a base di fluorocarbonio, un tipo di plastica, con alta resistenza alla corrosione e alle alte temperature.

Le membrane realizzate con ETFE ad alte prestazioni sono usate sempre più frequentemente per coperture e facciate trasparenti. Le membrane trasparenti stanno diventando sempre più importanti, in particolare dove è richiesta la trasparenza all'intero spettro della luce naturale, e devono essere combinate con strutture leggere per ottenere soluzioni economiche e sostenibili.

L'ETFE è usato principalmente in strutture pneumatiche, a singolo o multiplo strato. La massima luce che può coprire dipende dai carichi dati e dalla geometria dei singoli elementi. L'ETFE è una delle più stabili combinazioni organiche, perciò la resistenza a tutte le influenze ambientali è molto alta. L'aspettativa di vita è oltre i 20 anni, se il materiale viene impiegato secondo le sue specifiche caratteristiche. L'ETFE rispetta gli standard di resistenza al fuoco, e i test hanno dimostrato che, grazie alla bassa massa del materiale (da 0.08 a 0.25 mm di spessore) il danno è minimo in caso di incendio.

Inoltre, la membrana è auto pulente, grazie alla sua composizione chimica, e quindi mantiene la sua alta traslucenza nel corso della sua vita. Nei climi dove le piogge sono scarse, o quando è richiesta una pulizia specifica, si possono utilizzare detergenti ecologici.

La traslucenza dell'ETFE è di circa il 95 %, con illuminazione diffusa in proporzione del 12 % e con luce diretta dell'88 %. Per un modulo di tre strati (esterno di 200µm, intermedio di 100µm, interno di 200µm), il grado di trasmissione luminosa per incidenza verticale è pari a 0.7. Questo intervallo rappresenta le caratteristiche di traslucenza fondamentali per la vita (di uomini, animali e piante). Le pericolose radiazioni UV-B e UV-C sono considerevolmente ridotte. I valori della trasmittanza termica variano in base a:

- membrane a singolo strato $\approx 5.1 \text{ W/m}^2\text{K}$
- membrane a doppio strato $\approx 3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- membrane a tre strati $\approx 2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$
- membrane a quattro strati $\approx 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Le membrane in ETFE sono riciclabili al 100%. La loro massa è molto bassa, circa 1/40 del vetro, e hanno spessore minimo di soli 250µm. Il materiale può anche essere fornito in una varietà limitata di colori. Allo scopo di ridurre il guadagno solare o di mantenere la trasparenza, disegni bidimensionali possono essere stampati sulla membrana. Le pellicole in ETFE sono auto pulenti, auto estinguibili, resistenti alla grandine, con trasmissione luminosa fino al 90% e aspettativa di vita di 20 anni. Paragonate al vetro hanno un peso dell'1 %, trasmettono più luce e l'installazione costa dal 24% al 70% in meno. Sono anche elastiche e capaci di sopportare circa 400 volte il proprio peso, e riciclabili, hanno una tenacità meccanica e resistenza chimica migliori rispetto al PTFE, inoltre presentano un'alta resistenza alle radiazioni energetiche.

THV

Le pellicole di THV sono trasparenti e resistenti quanto le pellicole di ETFE, e possono anche essere impiegate all'esterno. Hanno però una minore resistenza alla lacerazione con allungamento a rottura ugualmente elevato, per cui non vengono prese in considerazione come elementi portanti per grandi luci. Il loro spessore varia da 0,08 mm ad alcuni mm, con larghezza standard tra 500 e 1500 mm. Presentano estrema inerzia chimica, un ampio intervallo di temperature di esercizio, resistenza alla radiazione UV e agli agenti atmosferici, resistenza alla fiamma e possibilità di essere riciclati. Inoltre le pellicole in THV sono facilmente lavorabili a bassa temperatura, accostabili a elastomeri e altre materie plastiche, sono flessibili e trasparenti. I principali settori applicativi sono, oltre all'edilizia, l'industria chimica, tubi e condotte multistrato, semiconduttori, fibre ottiche e rivestimenti protettivi. Le pellicole sono prodotte in fogli, tubolari e nastri con spessori fino a 0,200 mm.

PTFE

La materia plastica denominata politetrafluoroetilene (PTFE) è un polimero di addizione formato dall'unione di tante "unità" fondamentali di tetrafluoroetilene, che si legano l'una all'altra in lunghe catene, meglio conosciuta col nome commerciale di Teflon. Dotato di proprietà termoplastiche, per cui può essere fuso e raffreddato più volte, è un prodotto sintetico la cui scoperta si deve al chimico statunitense Roy J.

Plunkett nel 1938; il composto fu però commercializzato solo nel 1946 dall'azienda statunitense DuPont. Si tratta di un materiale praticamente inerte, cioè non reagisce con altre sostanze, in virtù della presenza degli atomi di fluoro che possiedono una stabile. Ha il più basso coefficiente di frizione fra tutti i solidi conosciuti, il che significa che oppone una bassissima resistenza allo sfregamento. Il punto di fusione è elevato, essendo compreso tra i 260 e i 327 °C; inoltre è un ottimo isolante elettrico, non viene disciolto da alcun solvente, è inodore e non è infiammabile. Il Teflon è stato adottato per i più svariati utilizzi, grazie alle sue proprietà fisico-chimiche: conosciuto soprattutto come rivestimento per pentole antiaderenti, viene usato anche per la realizzazione di cavi ed elementi di cablaggio, per la copertura di alcuni tipi di proiettili, per il rivestimento di componenti meccanici con ottime caratteristiche di scorrimento, per la produzione del Gore-Tex, materiale sintetico largamente usato nei capi sportivi e in molti altri ambiti. Il Teflon si trova negli oggetti più disparati, come le lampade a infrarossi, ferri da stiro, bruciatori di cucine a gas, mestoli e altri utensili antiaderenti da cucina, caffettiere, stufe e assi da stiro, negli smalti, nelle lenti e in alcuni tipi di pavimentazioni.

PTFE espanso

Il PTFE espanso è dalle 2 alle 3 volte più resistente del PTFE tradizionale, combina flessibilità e totale immunità ai raggi UV ed eccezionali qualità estetiche, inclusa un'alta trasmissione luminosa e diverse colorazioni. Può essere impiegato con un'ampia varietà di tecniche costruttive, strutture spaziali, a cavi tesi, geodetiche.

La trasmissione luminosa raggiunge il 40%, con eccezionale brillantezza di notte, ed è immune ai raggi UV, all'inquinamento e agli agenti chimici. E' naturalmente resistente alle macchie, facile da pulire, riciclabile, resiste ad estreme temperature e ha ottime proprietà di resistenza al fuoco. L'aspettativa di vita è di 25 anni, con garanzia di 15 anni. Inoltre, non contiene cloro, non emette diossina né CFC, non contiene plastificanti, stabilizzanti o catalizzatori, è innocuo per la pelle e inodore.

Poiché il tessuto è al 100% costituito da fluoropolimeri e non degrada durante il suo utilizzo, perché resiste ottimamente ai raggi UV, può essere ritrattato e utilizzato in altre applicazioni. Gli impianti di incenerimento dei materiali contenuti all'interno del

tessuto li convertono in CO₂ e idrocarburi di acido fluoridrico (HF). Le emissioni sono di gran lunga inferiori ai livelli dannosi per le persone o per l'ambiente.

Fibre di carbonio

La fibra di carbonio è una struttura filiforme, molto sottile, realizzata in carbonio con la quale si costruiscono una grande varietà di materiali compositi in quanto le fibre sono "composte" ad una *matrice*, in genere di resina la cui funzione è quella di tenere in "posa" le fibre resistenti (affinché mantengano la corretta orientazione nell'assorbire gli sforzi), di proteggere le fibre e di mantenere la forma del manufatto composito. Per la realizzazione di strutture in composito le fibre di carbonio vengono dapprima intrecciate insieme a organizzare panni in tessuto di carbonio e poi, una volta messi in posa, vengono immersi nella matrice. Tra le sue caratteristiche spiccano l'elevata resistenza meccanica, la bassa densità, la capacità di isolamento termico, resistenza a variazioni di temperatura e all'effetto di agenti chimici, buone proprietà ignifughe. Di contro il materiale risulta non omogeneo e presenta spesso una spiccata anisotropia.

Il carbonio è un materiale molto rigido e presenta solo la colorazione nera. Le fibre di carbonio hanno pressappoco le stesse caratteristiche delle fibre metalliche, i filamenti risultano scarsamente competitivi rispetto ad altri materiali normalmente usate per le membrane pretese, quali il poliestere e le fibre di vetro. I tessuti in fibra di carbonio possono essere classificati come indicato nella tabella 1.e, che classifica il materiale in base alla costituzione fisica e alla sua resistenza meccanica.

Unidirezionali Alta Resistenza FIDCARBON UNIDIR 200 HT 240 FIDCARBON UNIDIR 320 HT 240 FIDCARBON UNIDIR 400 HT 240
Unidirezionali Alto Modulo FIDCARBON UNIDIR 300 HM 390
Bidirezionali Alta Resistenza FIDCARBON BIDIR 400 HT240
Bidirezionali Alto Modulo

Tabella 1.e

Kevlar (fibra aramidica)

Il kevlar deriva dalla policondensazione dell'acido tereftalico e della p-fenilendiammina. La sua caratteristica principale è l'alta resistenza alle trazioni e agli urti. Viene usato in svariati campi, dalle corde per gli alpinisti ai giubbotti antiproiettile. La sua combinazione unica di caratteristiche - resistenza e rigidità sorprendenti, elevato assorbimento delle vibrazioni e resistenza al calore e alla fiamma - ha permesso a progettisti e ingegneri di trovare soluzioni a problemi considerati oltre gli ambiti delle fibre organiche.

Il Kevlar è una fibra innovativa sintetica, inventata nel 1965 da Herbert Blades e Stephanie Kwolek, ricercatori della ditta DuPont, che combina alta resistenza e peso leggero per contribuire al miglioramento di una varietà di prodotti industriali e di consumo. Il Kevlar è una fibra organica della famiglia delle aramidi, abbreviazione di aromatic polyamide. Gli aramidi fanno parte della famiglia dei nylon. I nylon normali non dispongono di proprietà strutturali molto buone, perciò la distinzione para-aramidica è molto importante. Grazie all'anello delle aramidi, il Kevlar ha una grande stabilità termale (resistenza al calore). La struttura para è responsabile della forza e la resistenza agli urti e alle vibrazioni della fibra, cinque volte più resistente dell'acciaio.

Il Kevlar è il materiale preferito per sostituire l'amianto nei rivestimenti di freni, guarnizioni e frizioni, all'avanguardia nel campo delle applicazioni per protezioni balistiche e, per le sue caratteristiche di leggerezza, è impiegato in applicazioni di protezione personale per forze di pubblica sicurezza, forze armate, diplomatici e altre figure pubbliche ad alto rischio.

Infine, il materiale può essere utilizzato nell'equipaggiamento sportivo per avere elevate prestazioni. Altri esempi di impiego sono per pneumatici per biciclette anti-foratura e scarpe sportive che massimizzano l'energia dei corridori, per la produzione di imbarcazioni leggere ma robuste, vele leggere e in grado di resistere a forti venti e acqua salata. Quello delle telecomunicazioni è un altro settore a rapido sviluppo in cui la fibra KEVLAR è utilizzata come componente di grande affidabilità e robustezza per cavi a fibre ottiche.

Presenta un modulo elastico comparabile a quello del poliestere ma meno variabile con la temperatura.

In funzione delle caratteristiche dei monomeri possono essere ottenuti polimeri aramidici con diverse caratteristiche meccaniche. Fra i più comuni vi sono il Kevlar 29 e 49. Il modulo elastico del Kevlar 49 è di 135 GPa e la resistenza a rottura di 3,6 GPa: questo materiale risulta 5 volte più resistente di un filo di acciaio di pari peso in quanto la sua densità è di solo 1,4 g/cm³. La struttura altamente anisotropa di queste fibre aramidiche le rende, comunque, molto deboli nelle altre direzioni ed adatte solo ad applicazioni dove siano presenti solo carichi di trazione.

I materiali da costruzione presentano peculiari proprietà fisiche e meccaniche, grazie alle quali vengono scelti e selezionati per gli usi più adeguati alla loro natura.

I tessuti tecnici rivelano ottime proprietà meccaniche, grazie alla loro grande resistenza a sforzi di trazione, nonché alla elevata elasticità che permette il loro impiego in diverse modalità e componenti tecnologici.

Gli aspetti che in questa prima fase maggiormente si vogliono evidenziare sono relativi alla *traslucidità, modalità e costi di costruzione* (fase di Realizzazione), *durabilità* (fase di Gestione/Dismissione), di questi prodotti, che insieme alle proprietà fisico-meccaniche consentono il loro impiego in unità tecnologiche quali le chiusure. Dalla tabella 1.f, elaborata allo scopo di fornire una prima lettura incrociata delle caratteristiche dei tessuti descritti, si evince un primo confronto tra i materiali tessili oggetto di studio, in relazione alla loro costituzione materica (materiale di base, spalmatura e rivestimento esterno) e alle proprietà relative al loro confezionamento, messa in opera ed esercizio.

PRODOTTO	PES- PVC- Acrylic	PES- PVC- PVDF	FIBRE DI CARBONIO	FIBRE ARAMIDICHE	ETFE	THV	PTFE	FIBRE DI VETRO- PTFE	FIBRE DI VETRO- SILICONE
Tessuto	Poliestere	Poliestere	Carbonio	Fibra organica (famiglia dei nylon)	Film	Film	Fibre di vetro	Fibre di vetro	Fibre di vetro
Spalmatura	PVC	PVC		PTFE o silicone				PTFE	Silicone
Rivestimento Esterno	Acrilico	PVDF							
Durata garantita dai produttori	10 anni	15 anni	-	20 anni	30 anni	25 anni	25 anni	30 anni	20 anni
Resistenza invecchiamento	..	...	-	....	...	....	....	.....	....
Resistenza sporco	.	..	....	....	...	...	...	...	..
Traslucenza	12%	12%	nessuna	nessuna	90%	90%	5-40%	17%	20-40%
Resistenza fuoco	...	...	.....	....	....	....	..	...	...
Ritorno alla piegatura	....	...	-	-	.	.	.	..	..
Saldatura	HF	HF con abrasioni	-	-	Hot bar	Hot bar	Hot bar con nastro	Hot bar con nastro	Hot bar con nastro
Costi realizzazione	Molto bassi	Bassi	Molto Alti	Alti	Alti	Alti	Medi	Medi	Medi

Tabella 1.f

APPENDICE 1A

Alcune proposte di classificazioni dei materiali per l'edilizia, elaborate negli ultimi anni da studiosi ed esperti:

TABELLA 1- per "natura fisica" dei materiali (Beylerian e Dent)

TABELLA 2 - "per prestazioni" dei prodotti (S. Pèrez Arroyo, R. Atena, I. Kebel; B. Brownell e Carla Langella)

TABELLA 3 - tentativi che riassumono le due tipologie (Graham Dodd, Arup Group).

CATEGORIA	MATERIALI/PRODOTTI
Carbonio (a base di)	Grafite, Fibre di carbonio, etc.
Cemento	Cementi colorati, permeabili, refrattari, fibro-rinforzati, etc.
Ceramica	Ceramiche argillose, Ceramiche a base di pietra, Piezoceramiche, etc.
Metalli	Superleghe, laminati, a memoria di forma, fibers + textiles + mesh, etc.
Naturali	Bambù, Fibre, Laminati, Biocompositi, Pelle, Cellulosa, Compensati, Riciclati, Resine + Pietra, etc.
Polimeri	Tessili, Fibro-rinforzati, Film, Schiume, Resine, etc.
Vetri	Vetri intelligenti (fotocromici, elettrocromici, aerogel), etc.

Tabella 1

CATEGORIA	DESCRIZIONE	PRODOTTI
Shape Performance	Materiali capaci di assumere determinate resistenze meccaniche in rapporto ad una specifica conformazione tridimensionale. Sono generalmente caratterizzati da una grande leggerezza	Materiali con struttura a nido d'ape, Metalli sagomati
Optical Performance	Materiali capaci di produrre determinati effetti ottici e/o di regolazione della luce in varie condizioni	Vetri intelligenti (fotocromici, elettrocromici, T.I.M., Kapilux)
Sustainable Performance	Materiali che garantiscono, in primo luogo, un ciclo di vita chiuso del prodotto e che, inoltre, risultano vantaggiosi in termini di produzione, lavorabilità, disassemblaggio, riuso, sostenibilità e protezione dell'ambiente	Impiallacciati di legno, bambù, etc.
Integrated Performance	Materiali compositi high-tech che integrano differenti tecnologie al fine di migliorare le prestazioni	Polimeri fibrorinforzati, Materiali Compositi, etc.
Responsive Performance	Materiali che possiedono la capacità di evolvere semplicemente interagendo con gli utenti o altri fattori esterni, fino a diventare un'interfaccia che reagisce agli stimoli apportando modifiche allo stato fisico della materia.	PCM, etc.

Tabella 2 – (Gruppo di studio del Berlage Institute: S. Pèrez Arroyo, R. Atena, I. Kebel)

CATEGORIA	DESCRIZIONE	MATERIALI
Ultrapperforming	Quei materiali che sono più resistenti, leggeri, duraturi e flessibili rispetto ai loro rispettivi materiali convenzionali.	Cementi e pietre tralucenti, Fibre di carbonio, etc.
Multidimensional	Materiali che registrano un evidente sviluppo secondo l'asse z (maggiore profondità) o una particolare complessità della struttura interna.	Materiali con struttura a nido d'ape
Repurposed	Materiali utilizzati al posto di altri, ritenuti più convenzionali, in una specifica applicazione.	
Recombinant	Combinazione di due o più materiali che agiscono in armonia al fine di creare un prodotto finale che garantisca maggiori prestazioni.	Compensati, Laminati, etc.
Intelligent	Materiali che hanno la capacità di migliorare le proprie prestazioni, spesso la loro progettazione prende ispirazione dai sistemi biologici (<i>biomimicry</i>). Possono agire in maniera attiva o passiva ed essere a basso o alto contenuto di tecnologia.	Vetri intelligenti (Kapilux, Okasolar, etc.), Materiali biomimetici, Smart materials, etc.
Transformational	Materiali progettati allo scopo di modificarsi in maniera dinamica a seconda di differenti condizioni ambientali.	PCM
Interfacial	Materiali, prodotti e sistemi che impiegano le ultime tecnologie informazionali per il controllo dell'andamento di fenomeni fisici, processi produttivi, etc.	Muri olografici, Vernici con sensori, etc.

Tabella 2 – (B. Brownell, a cura di, *Transmaterial*, Princeton Architectural Press, New York 2006)

CATEGORIA	DESCRIZIONE	MATERIALI
Bulk	Materiali con proprietà omogenee nella propria massa, la cui essenza coincide con una o più proprietà semplici che costituiscono una caratteristica immutabile del materiale	Polimeri di massa
Materiali Compositi	Materiali ottenuti dalla combinazione di due o più materiali possedenti proprietà diverse.	Laminati, Superleghe polimeriche
Materiali Funzionalizzati	Materiali che, oltre ad integrare diverse prestazioni, inglobano comportamenti "semplici" e predeterminati	Metalli a memoria di forma, Vetri intelligenti
Materiali "quasi biologici"	Materiali che inglobano comportamenti complessi e processi informativi, caratterizzati da proprietà biologiche (auto-organizzazione, ridondanza, autonomia, compatibilità con i cicli naturali)	Materiali biomimetici

Tabella 2 – (Carla Langella, *Nuovi Paesaggi Materici. Design e Tecnologia dei materiali*, Alinea Editrice, Firenze 2003)

CATEGORIA	DESCRIZIONE	MATERIALI
Materiali Superficiali	Materiali utili ad ottenere superfici o rivestimenti con particolari proprietà e/o prestazioni.	Vetri idrofobi ed idrofilo, Superfici isolanti, Rivestimenti nanostrutturati per PV
Materiali traslucidi	Materiali per componenti strutturali (e non) caratterizzati contemporaneamente da una grande resistenza e da una buona trasparenza.	Compositi vetro e pietra (onice, alabastro, marmo e alcuni tipi di granito), Vetri intelligenti
Materiali riciclabili	Materiali ottenuti riutilizzando componenti/prodotti /materiali	Schiuma di vetro, Cartongesso
Materiali Naturali	Materiali di origine naturale con un basso livello di trasformazione	Resine vegetali, Fibre vegetali e minerali,
Materiali Ingegneristici	Materiali progettati a livello nanometrico, per l'ottenimento di specifiche prestazioni	Schiuma di alluminio, Compositi metallo/plastica, Fibre di carbonio
Materiali adattabili	Materiali capaci di adattarsi al variare delle condizioni esterne cambiando il proprio stato fisico e molecolare.	Elastomeri con proprietà "water swelling", Vetri elettrocromici, Metalli con memoria di forma

Tabella 3

APPENDICE 1B

Tessili ecologici

Per essere sostenibile, ogni proposta deve rispondere ad una serie di requisiti, tra i quali:

- basarsi su risorse rinnovabili, garantendone al tempo stesso la ulteriore rinnovabilità;
- ottimizzare l'impiego delle risorse non rinnovabili (comprese aria, acqua e territorio);
- non nuocere alla salute del pianeta (o produrre rifiuti che l'ecosistema non sia in grado di rinaturalizzare);
- non nuocere alla salute delle persone;
- garantire un livello prestazionale soddisfacente.

E' compito dei ricercatori e dei progettisti cogliere i reali aspetti di ecosostenibilità e di biocompatibilità dei prodotti, non solo durante le fasi di produzione e di trasporto, ma anche durante la fase di utilizzo, che rappresenta la più lunga e la più inquinante, sia per il pianeta che per le persone⁶.

Una breve premessa ai tessili ecologici riguarda la definizione di *materiali biologici*, che includono due categorie di materiali avanzati:

- *materiali biomimetici*, progettati prendendo spunto da organismi viventi, capaci di comportarsi in maniera dinamica al variare di condizioni sia interne che esterne, tramite lo studio dei processi biologici e biomeccanici della natura, vista come Modello (*Model*), Misura (*Measure*) e Guida (*Mentor*) della progettazione degli artefatti tecnici. I sistemi "naturali" rispettano le regole degli ecosistemi: funzionare secondo cicli chiusi, non produrre rifiuti, fondarsi su interdipendenza e cooperazione, funzionare ad energia solare, rispettare la diversità.

La biomimesi (in inglese Biomimicry) è una disciplina che cerca di imparare dalla natura il modo in cui sono fatti i materiali e le costruzioni, prendendo da essi ispirazione per risolvere questioni di edilizia contemporanea.

⁶ Cfr. Manzini, E. e Vezzoli, C., *Lo sviluppo di prodotti sostenibili. I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Rimini, Maggioli 1998.

La mimesi della natura non è statica, ma è un processo che evolve insieme al cambiamento tecnologico. Dagli anni '90 l'interesse per l'industria sintetica di fibre ha permesso a biologi e chimici di scoprire materiali con alte prestazioni nel mondo naturale: piante e animali possono ispirare ingegneria avanzata. Già negli anni '70 infatti il tedesco Barthlott ha scoperto che le proprietà auto-pulenti delle foglie di loto e nasturtium non sono la conseguenza della loro levigatezza ma derivano dalle minuscole spicole (struttura microscopica di natura inorganica presente nell'endoscheletro delle spugne) sulla loro superficie che producono acqua. In epoca più recente, nel 2003 l'azienda svizzera Schoeller ha lanciato sul mercato le nanosfere, tessuto di rivestimento repellente all'acqua, all'olio e anche al miele, che non influenza il comfort tattile dato dal tessuto⁷.

- *materiali naturali*, caratterizzati da grande disponibilità in natura, alta rinnovabilità e da impatti ambientali minimi o addirittura nulli. Ne fanno parte ad esempio l'intera classe di nuovi materiali biodegradabili.

Lo sviluppo dei tessuti "ecologicamente intelligenti" ha previsto inevitabilmente un riassetto di tutti i materiali e processi usati nella catena di produzione e messa in opera del tessuto. "Si può pensare ad una analogia tra i tessili e il cibo: ci sono ingredienti biologici - tessili naturali dove ogni componente del confezionamento del tessile si produce nel ciclo naturale di crescita e decadimento - e ingredienti tecnici, che possono essere riciclati senza un declino sostanziale nella qualità del prodotto e che si producono nei sistemi a circuito chiuso della produzione industriale, quindi limitando la domanda di combustibili fossili"⁸.

I biopolimeri

A causa di questioni ambientali ed economiche, legate queste ultime a possibili incrementi dei prezzi dei prodotti petroliferi, le aziende stanno sviluppando negli ultimi anni polimeri sintetizzabili da materie prime rinnovabili o facilmente biodegradabili e smaltibili negli impianti di compostaggio. Per biopolimeri si intende

⁷ *Ibidem*

⁸ Cfr. Colchester, Chloe, *Textile today: A Global Survey of Trends and Traditions*, London, Ed. Thames & Hudson, 2007. Traduzione della scrivente.

“polimeri biodegradabili, approvati secondo norma EN 13432, e polimeri basati su materie prime rinnovabili ma non biodegradabili”⁹.

Si definisce “biodegradabile” un polimero progettato per andare incontro a cambiamenti di struttura chimica, mentre si definisce “compostabile” il riciclaggio organico che deve avvenire in determinate condizioni e non in discarica. Inoltre, il CEN definisce gli standard qualitativi del compost, come la massima percentuale di metalli pesanti contenuti, nessuna eco-tossicità, nessun residuo ancora distinguibile. Perché un materiale possa essere definito come biodegradabile è necessario che si degradi almeno per il 90% in meno di 6 mesi. Con “disintegrabilità” si intende invece la frammentazione e la perdita di visibilità nel compost finale.

Le classi di polimeri derivati da fonte rinnovabile possono essere così indicate:

- Polimeri naturali (polimeri da amido e cellulose);
- Polimeri di origine batterica (Poliesteri Acido Polilattico – PLA e Polidrossialcanoati - PHA);
- Polimeri derivati da monomeri di origine batterica.

L'amido è il principale immagazzinatore di carboidrati (polisaccaride) ed è disponibile in abbondanza. Si compone di una miscela di due polimeri, un polisaccaride lineare (amilosio) e un polisaccaride altamente ramificato (amilopectina). I polimeri sono ottenuti dall'amido per trattamenti chimici, termici e meccanici. L'amido viene ricavato dal mais, dal frumento, dalla patata, dalla tapioca e dal riso. I polimeri da amido sono materiali fortemente cristallini. Possono essere trasformati e complessati con altri copolimeri dando luogo a materiali flessibili come il PE o rigidi come il PS. I maggiori produttori di questo materiale sono Novamont (Mater-bi), Biotec (Bioplast) e Rodenburg (Solanyl). Le tecnologie di trasformazione comprendono il soffiaggio di film, l'estrusione, la termoformatura, lo stampaggio ad iniezione ed espansi.

Le caratteristiche meccaniche dei polimeri da amido sono, in generale, inferiori rispetto a quelle dei polimeri da fonte petrolchimica, ed inoltre sono sensibili alla degradazione. La densità dei polimeri da amido è più alta e ciò riduce la sua competitività economica sulla base dei volumi.

⁹ Cfr. ricerca condotta sul mercato dei biopolimeri da Inter-Plast.

I film derivati da amido hanno una buona trasparenza ma i polimeri hanno bassa resistenza ai solventi ed agli oli, che può essere notevolmente migliorata attraverso la miscelazione con altri biopolimeri. La possibilità di impiego è limitata dalla loro sensibilità all'umidità ed al contatto con l'acqua e dalla elevata permeabilità al vapor d'acqua, infatti oggi la principale applicazione è nell'uso di schiume, in alternativa al PS espanso per la produzione di contenitori per l'imballaggio. I vari materiali prodotti da amido hanno una densità che va da 1,2 a 1,5 g/cm³, un modulo elastico che va da circa 1000 a 3500 MPa, un punto di fusione dai 65°C ai 150°C.

Tra i tessuti ecologici troviamo il **Nylon 6**, che può essere impiegato per ottenere tessuti durevoli e riciclabili, perché facilmente depolimerizzato nel caprolattame (lattame dell'acido 6-amminoesanoico. A temperatura ambiente è un solido che si presenta in forme di scaglie bianche), che può tornare ad essere ripolimerizzato e riprodotto anche in una migliore versione del Nylon 6.

Altro tessile naturale è il **Lactron**, fibra sintetica biodegradabile, costituita da acido lattico, ottenuto tramite fermentazione dall'amido del granturco: un nuovo tipo di fibra sintetica derivante da una pianta e non dal petrolio, su cui i microrganismi dell'acqua e del suolo sono in grado di agire, decomponendola in anidride carbonica ed acqua e rendendola completamente riciclabile ed ecologica. Il ciclo di vita del Lactron è molto breve (meno di un anno) e l'anidride carbonica che si libera viene ritrasformata in amido tramite il processo della fotosintesi clorofilliana. La fibra può essere realizzata in varie forme, quali il multifilamento, il monofilamento, il fiocco. Grazie alla sua buona tenacità iniziale, può essere utilizzata sia per impieghi industriali che per abbigliamento ed ha proprietà fisiche quasi identiche alle fibre sintetiche nylon e poliestere.

PROPRIETA'	Lac tron		Poliestere
	Multifilamento	Monofilamento	
Tenacità [g/den]	4,5-5,5	4,5-5	4,5-5
Allungamento [%]	30-40	25-35	30-40
Modulo di Young [kg/mm ²]	400-600	400-600	1100-1300
Cristallinità [%]	70	70	50-60
Punto di fusione [°C]	175	175	265

Le variazioni della tenacità e del peso sono state monitorate dopo trattamento di biodegradazione nel suolo, in acqua marina e in fanghi attivi, in considerazione delle varie applicazioni. Pur non essendo state osservate grandi variazioni di peso, nei test di sepoltura nel terreno e di immersione in acqua marina la fibra perde la sua resistenza ed è praticamente decomposta entro due anni, mentre nei fanghi attivati si decompone rapidamente, grazie all'intervento di batteri e di altri microrganismi.

Nel febbraio 2009 viene annunciato l'insediamento a San Marco Evangelista (CE) della Novamont, multinazionale leader nel settore chimico per la produzione di biopolimeri, che porterà all'apertura di due impianti: il primo dedicato alla produzione di monomeri a partire da olio vegetale e il secondo dedicato alla produzione di un polimero da un mix di monomeri e additivi. La multinazionale detiene un esclusivo brevetto per la produzione di *plastiche biodegradabili* per l'agricoltura e il largo consumo, derivate dall'amido di mais. Sebbene studiate da molti anni le materie plastiche biodegradabili non sono mai state ampiamente utilizzate per svariati motivi: elevati costi di produzione, sfiducia dei consumatori nell'efficacia del prodotto, mancanza di incentivi politici alla loro diffusione.

I tessuti biodegradabili

La posizione attuale dei materiali biodegradabili nel mercato dei non-tessuti non è rassicurante. Il grafico 1B-1 mostra come le fibre basate su combustibili fossili abbiano rimpiazzato le fibre basate su polimeri naturali biodegradabili nell'ultimo secolo, secondo le statistiche CIRFS sul consumo mondiale di fibre in tutti i mercati¹⁰.

¹⁰ Cfr. Calvin Woodings Consulting, "Nuovi sviluppi nei non-tessuti biodegradabili", in <http://www.technica.net>.

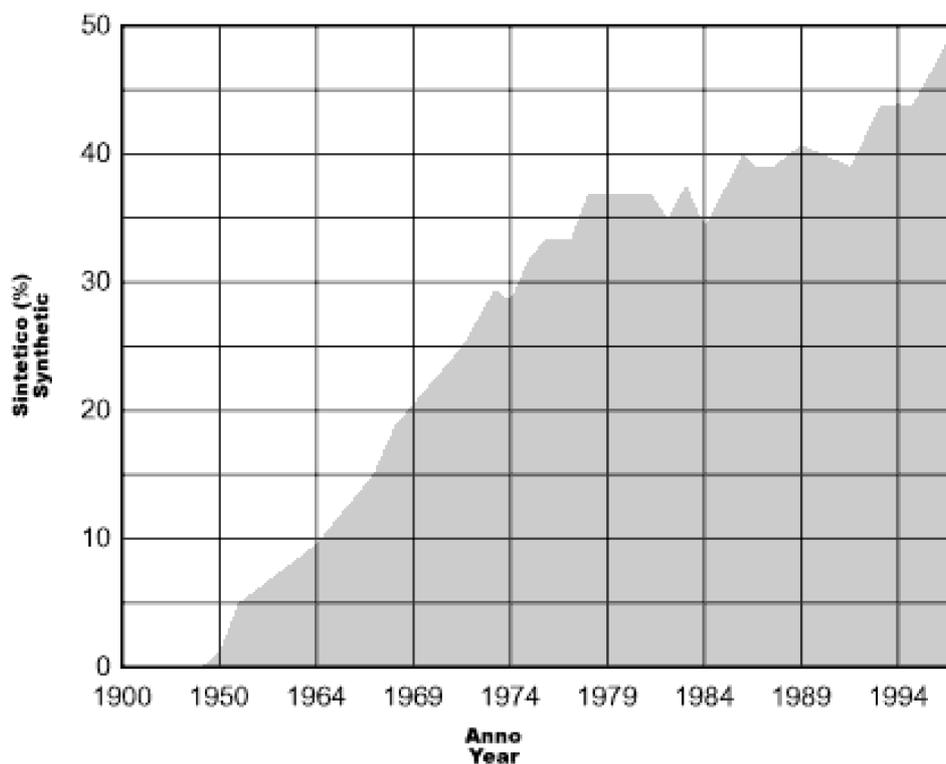


Grafico 1B-1

Circa la metà del totale di fibre consumate annualmente nel mondo sono costituite da polimeri sintetici.

Mentre la quantità di fibre chimiche cellulosiche vendute in Europa per i nontessuti si è mantenuta costante per 30 e più anni, il **rayon viscosa** quasi non ha partecipato alla massiccia crescita dell'industria dei nontessuti. Le fibre in fiocco di rayon viscosa erano, nel 1966, le fibre chimiche più a buon mercato. Oggi costano due volte le principali fibre sintetiche, senza peraltro essere facilmente filabili o termo-coesionabili.

Bisogna allora analizzare alternative per lo sviluppo di nontessuti biodegradabili.

Sembra utile una breve delucidazione sul funzionamento dei tessuti biodegradabili.

La degradazione biologica delle fibre avviene quando si depolimerizzano i polimeri che le costituiscono, in genere per l'azione di enzimi secreti da certi microrganismi.

Questi enzimi idrolizzano o ossidano il polimero e possono agire sulle estremità della catena (esoenzimi) o in un qualsiasi punto della catena stessa (endoenzimi).

Per far ciò l'enzima deve essere capace di legarsi alla fibra e di arrivare ai centri che possono essere idrolizzati o ossidati. Pertanto le fibre maggiormente biodegradabili sono quelle idrofile e formate da catene corte e flessibili con un basso livello di

cristallizzazione. Spesso hanno la catena principale con legami ossigeno o azoto e/o diramazioni laterali contenenti atomi di ossigeno o azoto. Questa descrizione corrisponde alla maggior parte delle fibre naturali e delle fibre formate da polimeri naturali. I polimeri non biodegradabili hanno caratteristiche opposte e sono utilizzati per le fibre con maggior resistenza e durata. I polimeri senza ossigeno, come *polipropilene* e *polietilene*, resistono completamente alla degradazione biologica. Il *poliestere aromatico* (polietilentereftalato) nonostante contenga ossigeno resiste alla biodegradazione grazie alla catena rigida, simile ad una bacchetta. Lo stesso vale per le *poliammidi*, nonostante contengano azoto. Contrariamente agli aromatici, i *poliesteri alifatici* sono in genere biodegradabili. Si conoscono oltre cento specie di batteri in grado di sintetizzare e conservare poliesteri alifatici per utilizzarli in seguito come fonte di energia. Questi poliesteri sono anche termoplastici e con essi, come con ogni altro poliestere, si possono formare film e fibre. I poliesteri alifatici sono ancora basati principalmente sulla polimerizzazione industriale di monomeri come acido glicolico (PGA), acido lattico (PLA), acido butirrico (PHB), acido valerico (PHV) e caprolattone (PCL).

L'*acido polilattico* (PLA), realizzato per la prima volta da Carothers nel 1932 con un processo di condensazione e polimerizzazione diretta in solvente e sotto vuoto spinto dell'acido lattico, è stato riproposto come legante alternativo per nontessuti cellulose per la facilità di degradazione idrolitica rispetto all'acetato polivinilico. I laboratori Galactic (Belgio) hanno analizzato i polimeri dell'acido polilattico 6. Cargill Dow Polymers LLC produce il *PLA NatureWorks™*, una famiglia di polimeri derivata da risorse rinnovabili annualmente, a prezzi competitivi rispetto alle fibre e ai materiali per imballaggio tradizionali. Il processo prevede l'estrazione di zuccheri da farina di granturco, barbabietole da zucchero o amido di frumento e la successiva fermentazione ad acido lattico, convertito nel dimero (lattide) che è purificato e polimerizzato ad acido polilattico senza bisogno di solventi. Fermentato, l'acido lattico è per il 99,5% in forma L-isomero e per lo 0,5% in forma D-isomero. La polimerizzazione del lattide verso polimeri ricchi di L-isomero dà prodotti cristallini, mentre quelli che contengono più del 15% di D-isomero sono più amorfi. La resina PLA risultante può essere estrusa come le altre resine termoplastiche per formare fibre, film, ecc. Le fibre prodotte a partire dal polimero EcoPLA™ sono

completamente biodegradabili in condizioni di compost, convertibili in nontessuto con sistemi a secco, ad aria, ad umido, per filatura diretta, per deposizione, e capaci di conferire maggior resilienza, traspirabilità e resistenza all'umidità.

Recentemente sono stati dimostrati altri vantaggi per i tessuti NatureWorks™, che presentano maggior comfort tattile, uniscono il comfort delle fibre naturali con le prestazioni delle fibre sintetiche, presentano degradabilità controllata e capillarità migliorata, nonché un eccellente recupero elastico e resistenza ai raggi UV, insieme ad una ridotta infiammabilità e scarsa generazione di calore. Le applicazioni più comuni nei nontessuti riguardano: fibre per imbottiture, geotessili, prodotti igienici e medicali, fibre leganti.

Il PLA è stato il secondo biopolimero (2002) commercializzato e venduto su larga scala. Presenta eccellenti proprietà fisiche e meccaniche che lo rendono il miglior candidato per la sostituzione di polimeri termoplastici da fonte petrolchimica. Il prezzo elevato ha lungamente limitato l'uso di questo materiale che ha una forte ripresa d'umidità, non è biodegradabile naturalmente ma necessita di idrolisi.

Il peso molecolare del PLA varia da 100.000 – 300.000. Con l'aumento del peso molecolare si ha un aumento della resistenza dovuta alla diminuzione del movimento relativo delle catene che diventano più lunghe. Il PLA è trasparente, ha elevata lucentezza e bassa opacità, ma le sue proprietà ottiche sono sensibili agli additivi aggiunti ed agli effetti della lavorazione. Il PLA può essere trasformato a prodotto finale per mezzo di macchinari per materiali termoplastici standard apportando modifiche mediante termoformatura, stampaggio ad iniezione, soffiaggio, estrusione. La prima fase del processo di produzione è l'estrazione dell'amido dalla biomassa ottenuto dalla macinazione del mais. L'amido viene quindi convertito in zucchero tramite idrolisi e viene fatto fermentare attraverso batteri. L'acido lattico viene separato dalla miscela che si è formata durante la fermentazione e purificato prima di essere polimerizzato. Per convertire l'acido lattico in polimero ad alto peso molecolare si utilizza il lattide o un processo di policondensazione. Il PLA ha buone proprietà meccaniche ma bassa resistenza all'urto e degrada rapidamente in condizioni di umidità elevata. Durezza, rigidità, resistenza all'urto ed elasticità sono simili a quelli del PET. L'alto modulo a flessione e l'elevata trasparenza fanno del film in PLA un materiale paragonabile al film

cellofan. Oggi il 70% del PLA viene utilizzato nel settore dell'imballaggio. La tendenza attuale è di sintetizzare polimeri tradizionali come il PUR (Poliuretano) e le PA (Poliammidi) o il PMMA (Polimetilmetacrilato) sviluppando monomeri a base bio. Tecnicamente i biopolimeri potrebbero sostituire il 34% delle materie plastiche da fonte petrolifera.

La Tabella 1B-2 riporta un confronto fra dati relativi alle proprietà delle fibre biodegradabili.

Proprietà	CDP PLA	Kuraray PLA	Rayon	Lyocell	Poliestere
Densità (g/cm ³)	1.25	1.27	1.51	1.52	1.38
Punto di fusione (°C)	120-170	170	nessuno	nessuno	260
Titolo (dtex)	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
Tenacità (cN/tex)	50	25-45	20-25	40-45	35-65
Allungamento (%)	35	N/A	18-22	14-16	15-40
Ripresa di umidità (%)	0.4 - 0.6	0.48	13	12	0.4

Tabella 1B-2

Nontessuti biodegradabili esistono già in molte forme e una delle migliori è il **rayon interlacciato ad acqua**. Molti produttori di fibre di cellulosa hanno tentato di migliorare il rapporto prestazioni/costo producendo da sé i nontessuti, tra cui:

- Acordis e Rhone-Poulenc hanno sviluppato nontessuti di rayon su scala pilota negli anni '60 e '70.
- Asahi ha lavorato con linee pilota di viscosa e cuproammonio prima di commercializzare il marchio di nontessuti Bemliese®.
- Mitsubishi Rayon ha sviluppato un processo basato sullo xantato di idrossimetilcellulosa.
- L'istituto di ricerca Tachikawa ha sviluppato un processo per viscosa polinosica.

Fra le numerose alternative per fibre cellulosiche biodegradabili, il **carbammato**, nato dagli studi di Turunen e Struszczyk che facendo reagire la cellulosa con urea

ottennero una pasta stabile che poteva essere conservata indefinitamente e che si scioglieva facilmente in soda caustica, è facilmente filabile in acido o alcali diluiti formando fibre di carbammato di cellulosa o cellulosa rigenerata (o una miscela delle due). Le fibre, contenenti il 2% di azoto, resistono alla biodegradazione senza essere tossiche per gli organismi. Hanno anche una maggior assorbenza dell'acqua e sono solubili in soda caustica all'8%. Inoltre, le fibre diventano più biodegradabili ed insolubili in alcali man mano che si riduce il tenore di azoto (e la cellulosa rigenerata). Il processo è stato realizzato su scala pilota da Saeteri (Finlandia).

Il processo **Lyocell**, invece, impiega n-metilmorfolina-n-ossido per solubilizzare la cellulosa prima di filare la soluzione in acqua ed è stato sviluppato ed industrializzato per applicazioni tessili da Enka e Courtaulds negli ultimi 20 anni. Offre un sistema di conversione della cellulosa naturale in un rayon di alta qualità completamente biodegradabile con caratteristiche meccaniche simili a quelle del poliestere.

Inoltre questa tecnologia può convertire la pasta in fibra a costi competitivi nei confronti di cotone e poliestere. Il Lyocell produce nontessuti eccellenti, con alta resistenza, assenza di ritiro e elevata stabilità ad umido. La fibrillazione, cioè la formazione di microfibre sulla superficie ottenuta per abrasione ad umido o mediante getti d'acqua ad alta pressione, crea nuove possibilità per la produzione di nontessuti. La semplicità del processo produttivo ha il potenziale, finora inesplorato, di utilizzare paste a basso costo.

Le fibre termoplastiche e biodegradabili fatte dal PLA possono incrementare la produzione e la commercializzazione di prodotti usa e getta biodegradabili. La possibilità di modificare le proprietà del PLA selezionando accuratamente la miscela di isomeri e il metodo di polimerizzazione sembra consentire la realizzazione di fibre, da amorfe a cristalline, con una grande varietà di punti di fusione, velocità di biodegradazione e resistenza meccanica.

Polimero		Monomero			Monomero
Nome Chimico	Nome Commerciale	A base bio			Petrochimico
Poli(trimetilen tereftalato) PTT	Sorona™ (DuPont) Corterra® (Shell)	PDO <i>1,3-propandiolo</i>			PTA/DMT
Poli(butilen tereftalato) PBT	vari	BDO <i>1,3-butanediolo</i>			PTA/DMT
Poli(butilen succinato) PBS	Bionolle 1000® (Showa Denko)	BDO	Acido Succinico		
Poli(butilen succinato adipato) PBSA	Bionolle 3000® (Showa Denko)	BDO	Acido Succinico	Acido Adipico	
Poli(butilen succinato tereftalato) PBST	Biomax® (DuPont)	BDO	Acido Succinico		PTA/DMT
Poli(butilen adipato tereftalato) PBAT	Ecoflex® (BASF)	BDO		Acido Adipico	PTA/DMT

Tabella 1B-3. Polimeri presenti sul mercato

Le fibre naturali costituiscono circa il 38% della produzione totale mondiale di fibre tessili. Tra queste ve ne sono alcune che crescono senza l'impiego di fertilizzanti e pesticidi; si tratta di piante con capacità antimicrobiche intrinseche, come il bambù e la soia. Negli ultimi anni è stata rivalutata, poi, la tradizionale esperienza nella coltura del lino ed in modo analogo si sono incentivate le produzioni di canapa, ortica e ginestra. Queste piante hanno una buona efficienza ambientale: in confronto alla produzione del cotone, fibra naturale per eccellenza, necessitano del 40% in meno di acqua e dell' 80% in meno di nutrienti e pesticidi.

L'attenzione del mercato a queste ed altre fibre naturali risponde a necessità quali:

1. rispetto dell'ambiente (cicli di produzione che abbiano un basso impatto ambientale);
2. minor impiego di sostanze chimiche tossico nocive o loro eliminazione in tutta la filiera.

L'evoluzione prevede l'impiego di biotecnologie per:

- intervenire sul processo di estrazione delle fibre, modificando gli attuali trattamenti con processi enzimatici, impiegandoli sulle fibre cellulosiche (catalisi enzimatica con enzimi in grado di sostituirsi all'azione dei prodotti chimici impiegati nella filiera produttiva);
- migliorare il processo di produzione, diminuendo i costi di estrazione delle fibre;
- sviluppare metodi biotecnologici per incapsulare sostanze funzionalizzanti.

La rinnovata Strategia di Sviluppo Sostenibile dell'Unione Europea del 2006 ha individuato la produzione e il consumo sostenibili tra le priorità strategiche su cui operare. L'obiettivo è quello di incidere sui sistemi di produzione e consumo

invertendo le tendenze in atto, dannose sia per l'ambiente che per la collettività, e incentivando l'affermazione di modelli di produzione e consumo compatibili. Tra i presupposti sui quali si basa un tale approccio vi è la diffusione di strumenti di analisi ed informazione sulle prestazioni ambientali di beni e servizi nel loro intero ciclo di vita, e lo sviluppo e la diffusione di tecnologie innovative in grado di incentivare l'adozione di processi produttivi che riducano in modo progressivo l'intensità materiale ed energetica, diffondendo prodotti caratterizzati da basso consumo e alta efficienza, recuperabili e riciclabili.

Nella Strategia dell'Unione Europea si afferma l'impiego di strumenti essenziali per seguire tale approccio. Si sostiene che l'**LCA** (Life Cycle Assessment) dovrebbe essere presa come metodologia di riferimento per i modelli di produzione e consumo sostenibili, essendo uno strumento usato per valutare il potenziale impatto ambientale di un prodotto, di un processo o di un'attività durante il suo intero ciclo di vita, tramite la quantificazione dell'utilizzo delle risorse ("immissioni" come energia, materie prime, acqua) e delle emissioni nell'ambiente (nell'aria, nell'acqua e nel suolo). Per un determinato prodotto, la LCA considera la fornitura di materie prime, la produzione dei prodotti intermedi ed il prodotto stesso compreso l'imballaggio e il trasporto, l'utilizzo e la successiva eliminazione. L'**EPD** (Environmental Product Declaration), invece, è un documento pubblico, che riporta la valutazione di tutte le prestazioni ambientali di un prodotto/servizio e di tutti i relativi impatti, sviluppato utilizzando la LCA come metodo di identificazione, qualificazione e quantificazione degli impatti. Si tratta di un'etichetta volontaria di prodotto che ha lo scopo di fornire informazioni sull'impatto ambientale e può essere verificata da un organismo terzo e successivamente registrata da un ente internazionalmente riconosciuto (in Europa: lo SEMC – Swedish Environmental Management Council). Il **PCR** (Product Category Rules), infine, è un documento che identifica gli elementi che influenzano l'impatto ambientale di un certo gruppo di prodotti simili e fissa i parametri che assicurano la confrontabilità tra le EPD di più prodotti funzionalmente equivalenti inseriti nello stesso gruppo.

Appendice 1N

Il quadro normativo di riferimento sulle tensostrutture a membrana: panorama nazionale ed internazionale

Il quadro normativo relativo all'impiego delle membrane in architettura presenta oggi alcune lacune; in particolare risulta evidente che la legislazione italiana è alquanto carente rispetto a quella internazionale. Nel presente contributo si raccolgono le norme di riferimento per i materiali tessili, relativi agli standard di qualità, alle prove e i metodi di calcolo per la rispondenza ai requisiti di riferimento, agli aspetti termooptici e alle prestazioni energetiche dei prodotti, allo scopo di definire un chiaro quadro di riferimento normativo da cui partire per evidenziare gli aspetti da inserire - laddove manca una norma - o da implementare - qualora ci sia insufficienza di dati -, in modo da incrementare la produzione e la progettazione di opere che impiegano i materiali tessili per diverse applicazioni.

Il progetto di norma UNI U50.00.299.0 redatto nel luglio 1995 dal titolo "Tendostrutture, tenso-strutture, presso-strutture. Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo, l'uso e la manutenzione" si riferisce "...ai requisiti di resistenza, servizio, sicurezza e durata delle strutture..." ed è la norma più specifica in tema di strutture membranali. La norma definisce l'utilizzo *temporaneo itinerante* che è "riferito a strutture destinate ad essere montate nello stesso luogo per un periodo non superiore a 45 giorni. Se con presidio attivo: fino a 180 giorni" e *temporaneo stagionale* "riferito a strutture destinate ad essere montate nello stesso luogo da 45 giorni a 180 giorni (senza presidio attivo)". Dopo la classificazione del tipo di strutture in *rimovibili e fisse* e la successiva categorizzazione che definisce l'*utilizzo* (permanente, stagionale o itinerante) e l'*impiego* (pubblico e privato, domestico o magazzino) degli elementi in membrana, vi è la lista dei *pericoli* a cui sono sottoposte dette strutture tessili, suddivisi in classi di appartenenza (ad esempio di natura meccanica, metereologica, geologica, sismica, elettrica, termica, ecc.). La sezione 5, "Azioni di calcolo, materiali, verifiche, regole pratiche di progettazione" è quella direttamente pertinente il *processo progettuale* attraverso l'analisi di carichi e sollecitazioni, geometrie e materiali.

Le *Regole pratiche di progettazione e costruzione* individuano le caratteristiche degli elementi tecnici utilizzabili nella costruzione di una tensostruttura quindi funi,

cerniere, ancoraggi e telo, e termina con le *Prescrizioni per la durabilità*, si conclude poi con il *Collaudo interno e la Sicurezza nelle fasi di montaggio e smontaggio*. Le ultime due parti "Trasporto, montaggio e/o smontaggio, uso e manutenzione e istruzioni in caso di emergenza" e "Omologazione e collaudo statico, verifiche periodiche, libretto della struttura" riguardano il *processo costruttivo* della tensostruttura, la *manutenzione* nel suo ciclo di vita e la *valutazione* della stabilità strutturale attraverso collaudi e monitoraggi.

Vi sono infine 13 appendici per tutti gli elementi e le casistiche che non sono state normate in precedenza, ad esempio la mappatura del territorio italiano per il calcolo dell' *azione del vento* (fattore determinante per la stabilità di un sistema a membrana pre-tesa), per i *valori di pretensione* applicabili a poliestere e PVC, per il calcolo delle sollecitazioni in cavi e funi.

La legislazione italiana per le costruzioni a membrana pre-tesa integrate con altri sistemi costruttivi si divide in base al tipo di costruzioni. Per le costruzioni a carattere *permanente*, si specifica con i decreti seguenti:

- D. M. 09.01.1996: "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione e il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche";
- D. M. 16.01.1996: "Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e di carichi e sovraccarichi";
- D. M. 16.01.1996: "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche";
- D. M. 18.03.1996: "Norme di sicurezza per la costruzione e l'esercizio degli impianti sportivi";
- Circolare n. 156 AA.GG/STC del 04.07.1996: istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica della sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi di cui al D.M. 09.01.1996";
- D.M. del 19.08.1996: "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio dei locali di intrattenimento e di pubblico spettacolo";
- Circolare n. 252 AA.GG/STC del 15.10.1996: istruzioni per l'applicazione: "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione e il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche" di cui al D. M. 09.01.1996;

- CNR 10027/27: “Strutture in acciaio per opere provvisorie. Istruzioni per il calcolo, l’esecuzione, il collaudo e la manutenzione”;
- ORDINANZA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO N. 3274 del 20 marzo 2003: “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.

Per costruzioni a carattere *temporaneo* invece i requisiti fondamentali diventano la possibilità di rapido assemblaggio/smontaggio e la trasportabilità unite ad una buona capacità di adattamento alle diverse condizioni ambientali. Lo specifico riferimento è rappresentato da:

- NORMA UNI 10949 (aprile 2001): “Sicurezza nelle attrezzature per fiere e parchi di divertimento. Tende, strutture tessili temporanee e/o itineranti. Progettazione, costruzione, montaggio e manutenzione”.

Secondo la necessità di integrare le tensostrutture con sistemi costruttivi e materiali diversi sono da segnalare le indicazioni degli Eurocodici tra cui:

- EUROCODICE 1: “Basi di calcolo ed azioni sulle strutture”, 1996-2000;
- EUROCODICE 2: “Progettazione delle strutture di calcestruzzo”, 1992-2000;
- EUROCODICE 3: “Progettazione delle strutture di acciaio”, 1994 -2002;
- EUROCODICE 5: “Progettazione delle strutture di legno”, 1995-2003;
- EUROCODICE 8: “Sismica”, 1997-2000.

Per i *tessuti*, che devono essere ignifughi, le norme di riferimento sono le DIN, standard di qualità riconosciuti a livello internazionale, che ne definiscono le caratteristiche fisiche, ed altre norme EN e UNI, certificate da enti europei o nazionali, che definiscono i metodi di calcolo e le prove sui tessuti.

Si propone una lista di riferimento delle norme con relativo argomento per un'utile consultazione:

DIN 3418	Punto di fusione
DIN 4102: 1998	Comportamento al fuoco dei materiali edili
DIN 53352	Peso totale
DIN 53353	Spessore totale

DIN 53354: 1981	Allungamento
DIN 53357	Adesione
DIN 53359	Resistenza ai piegamenti
DIN 53363: 2003	Propagazione della rottura
DIN 53479	Densità
DIN 60001: 2004	Sigla del materiale – tessuto di supporto
DIN 51635	Resistenza ai solventi
DIN 53830: 1981	Titolo del filo
DIN 53853	Numero dei fili
DIN 53886	Impermeabilità/tenuta all'acqua
DIN 75200	Resistenza alla fiamma
EN ISO 2060:1997	Tessili. Filo da confezioni.
UNI EN ISO 1421/MET1:1998	Resistenza a trazione ordito-trama
UNI EN ISO 2286-2: 1998	Metodo per la determinazione del peso totale
UNI EN 495-5: 2002	Membrane per impermeabilizzazione. Piegabilità e resistenza a temperatura
NF P 92-505	Sicurezza in caso di incendio
NFPA 701:2004	Test di propagazione delle fiamme
UNI 4818-4/31 1992	Supporti rivestiti con materiali polimerici
UNI 8099 1980	Tessuti. Armature. Termini e definizioni
UNI 8986 1987	Tessuti e Non-Tessuti
UNI EN 1049-2 1996	Tessili. Tessuti ortogonali

Le norme sulle *prestazioni* dei prodotti fanno riferimento ai *requisiti* definiti dalla UNI 10838 e la classificazione delle *esigenze* dell'utenza finale redatta dalla UNI 8289: 1981 Edilizia:

Sicurezza
Benessere
Fruibilità
Aspetto
Gestione
Salvaguardia dell'ambiente

Mentre la Norma UNI 7867 definisce le classi di requisiti del sistema tecnologico:

Di adattabilità di finiture e organi meccanici
Di adattabilità degli spazi
Di aspetto degli elementi tecnici
Di aspetto degli spazi
Di disponibilità ed utilizzazione delle risorse
Di economia
Di funzionamento
Di integrabilità degli elementi tecnici
Di manutenibilità
Di protezione da azioni
Di salvaguardia dell'ambiente
Di sicurezza al fuoco
Di sicurezza di utente
Di stabilità
Di tenuta
Auditivi
Olfattivi
Tattili
Termici ed igrotermici
Visivi

La UNI "Esigenze e requisiti di eco compatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione" 11277:2008 integra la precedente con ulteriori definizioni:

CLASSI DI ESIGENZE

Salvaguardia ambientale (SAM).....
Utilizzo razionale delle risorse (URR).....
Benessere, igiene e salute dell'utente (BIS).....

REQUISITI

Utilizzo di materiali, elementi e componenti a ridotto carico ambientale.....
Utilizzo di materiali, elementi e componenti riciclati.....
Utilizzo di materiali, elementi e componenti ad elevato potenziale di riciclabilità.....
Gestione ecocompatibile del cantiere.....
Utilizzo di tecniche costruttive che facilitino il disassemblaggio a fine vita.....
Riduzione degli impatti negativi nelle operazioni di manutenzione.....
Utilizzo di materiali, elementi e componenti caratterizzati da un'elevata durabilità.....
Gestione ecocompatibile dei rifiuti.....
Riduzione dell'emissione di inquinanti dell'aria climalteranti (gas serra).....
Massimizzazione della percentuale di superficie drenante.....
Contenimento dell'area di sedime degli edifici.....
Recupero ambientale del terreno di sbancamento.....
Protezione delle specie vegetali di particolare valore ed inserimento di nuove specie vegetali.....
Tutela e valorizzazione della diversità biologica del contesto naturalistico.....
Adeguate inserimento paesaggistico nel contesto, anche in relazione al rispetto delle visuali e alla compatibilità con la morfologia del terreno.....
Raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani.....
Riduzione del consumo di acqua potabile.....
Recupero, per usi compatibili, delle acque meteoriche.....
Utilizzo passivo di fonti rinnovabili per riscaldamento.....
Utilizzo passivo di fonti rinnovabili per il raffrescamento e la ventilazione igienico-sanitaria.....
Utilizzo passivo di fonti rinnovabili per l'illuminazione.....
Isolamento termico.....
Inerzia termica per la climatizzazione.....
Riduzione del fabbisogno d'energia primaria e sostituzione di fonti energetiche da idrocarburi con fonti rinnovabili o assimilate.....
Riduzione di scambi termici radiativi tra persona e superfici circostanti in periodi di sovrariscaldamento.....
Aumento di scambi termici radiativi in periodi di sottoriscaldamento.....
Controllo degli effetti del vento dominante invernale.....
Controllo degli effetti del vento dominante estivo.....
Controllo adattativo delle condizioni di comfort termico.....
Riduzione degli effetti di disturbo visivi.....
Illuminazione naturale.....
Protezione degli spazi d'attività esterni da fonti di rumore esterne agli spazi stessi.....
Protezione degli spazi interni da fonti di rumore.....
Protezione degli ambienti e degli spazi esterni da variazioni del fondo elettromagnetico generato da fonti artificiali.....
Impianto elettrico e disposizione degli elettrodomestici, in modo da esporre gli utenti a valori minimi di campo elettromagnetico.....
Riduzione delle emissioni tossiche/nocive di materiali, elementi e componenti.....
Riduzione della concentrazione di radon.....

Inoltre esistono norme tecniche, definite da organismi internazionali, che sono presenti nelle *schede tecniche dei prodotti* membranali come parametri normati:

-ASTM D 882:2002 (Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting – resistenza a trazione)

-ASTM D 1922:2003 (Standard Test Method for Propagation Tear Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting by Pendulum Method – Propagazione della rottura)

-ASTM E 84 (Test generazione dei fumi)

-ASTM E 903:1996-09 (Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Material Using Integrating Spheres. Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Windborne Debris in Hurricanes).

Relativamente agli *aspetti energetici* e di *comfort ambientale*, la norma si suddivide in base ai tre principali tipi di comfort ambientale: termico, acustico e visivo, ovvero relativi alle caratteristiche termo-igrometriche, acustiche, ottiche e luminose dei materiali. Ai fini della presente ricerca si propone un elenco di riferimenti normativi relativi in particolare alle caratteristiche termo-ottiche dei materiali membranali.

I *requisiti visivi* sono definiti come “attitudine dell’edificio a mantenere stabile il livello di illuminazione mediante sorgenti luminose naturali o artificiali ed elementi di oscuramento”. Le norme UNI che regolano detti aspetti sono le seguenti:

-UNI EN 12464-2: 2008 Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro Parte 2: posti di lavoro in esterni

-UNI 10840: 2007 Luce e illuminazione - Locali scolastici – Criteri generali per l’illuminazione artificiale e naturale (con definizione di fattore di luce diurna: rapporto tra il valore di illuminamento puntuale interno e l’illuminamento di una superficie orizzontale esterna illuminata dalla volta celeste in assenza di ostacoli- medio: rapporto tra la media dei valori di illuminamento interni ed esterni del locale considerato)

-UNI EN 14255-4:2007 Misurazione e valutazione dell’esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti - Parte 4: Terminologia e grandezze utilizzate per le misurazioni delle esposizioni a radiazioni UV, visibili e IR

- UNI EN 14255-1 e 2 :2005/06 Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti - Parte 1: Radiazioni ultraviolette emesse da sorgenti artificiali nel posto di lavoro
- UNI 11165:2005 Luce e illuminazione - Illuminazione di interni - Valutazione dell'abbagliamento molesto con il metodo UGR
- UNI EN 12464 -1: 2004 Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro – Parte 1: posti di lavoro in interni (con definizione di compito visivo: insieme degli elementi visivi del lavoro effettuato)
- UNI EN 12665: 2004 Luce e illuminazione - Termini generali e criteri per specificare i requisiti illuminotecnici
- UNI 10530: 1997 Principi di ergonomia della visione. Sistemi di lavoro e illuminazione
- UNI 10380:1994 + A1: 1999 Illuminotecnica. Illuminazione di interni con luce artificiale
- UNI EN 15251: 2008 Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica
- UNI 8477-1: 1983 Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta (ritirata senza sostituzione)
- CIE 16, Daylight: 1970 norma internazionale.

L'apparato normativo internazionale risulta assai diversificato. Ogni paese adotta norme che, seppure seguono indicazioni e metodi simili, si adeguano alle caratteristiche ambientali specifiche (territorio, condizioni climatiche, ecc.). Punto di riferimento, per l'esperienza maturata nel tempo e per la quantità di opere realizzate, sono paesi come gli Stati Uniti ed il Giappone, dotati di strumenti normativi all'avanguardia e costantemente aggiornati. Le norme più specificatamente relative alle tipologie strutturali a membrana pre-tesa sono spesso redatte come "raccomandazioni" elaborate da comitati di studiosi e tecnici, indicazioni su modalità progettuali e costruttive che, nel tempo, sono assimilate dai progettisti e diventano consuetudine da parte di tecnici ed operatori del settore. Tra queste alcune risultano particolarmente interessanti anche perché elaborate da gruppi di ricerca internazionali come lo IASS (International Association of Shell and Spatial

Structures - Spagna), l' ASCE (American Society of Civil Engineers - USA), il MSAJ (Membrane Structures Association of Japan - Giappone) o il Tensinet (Bruxelles, Belgio). Si segnalano pertanto le seguenti:

- "Guide for specific membrane structures", MSAJ, 1990
- "Technical standards for specific membrane structure building", MSAJ, 1996
- "Tensioned Fabric Structures", ASCE Task Committee on Tensioned Fabric Structures, 1996
- "Tensile Membrane structures", ASCE, 2002
- "European design guide for tensile surface structures", Tensinet, 2004.

Una questione di grandissima importanza oggi è la messa a punto di una normativa che stabilisca standard di qualità minimi da rispettare in caso di uso permanente. La mancanza di norme precise, associata alla scarsa presenza di esperti, lascia un ampio margine di libertà a chi opera nel settore portando alcune volte alla realizzazione di strutture senza qualità. Per questo motivo la normativa può assumere un ruolo fondamentale nella diffusione della tecnologia delle tensostrutture a membrana. Merito delle principali aziende del settore, riunite intorno all'ASLI (Associazione Produttori Italiani di Strutture Leggere), è di aver affrontato il problema, mettendo a punto un documento oggi al vaglio della commissione sicurezza dell'UNI e destinato a diventare in breve tempo progetto di norma.

RIFERIMENTI NORMATIVI SUL TEMA "INVOLUCRO TESSILE E COMFORT AMBIENTALE"

- **NORME E "RACCOMANDAZIONI" INTERNAZIONALI** elaborate da gruppi di ricerca internazionali relativamente alle tensostrutture a membrana:

"Guide for specific membrane structures", Membrane Association of Japan, 1990

"Technical standards for specific membrane structure building", Membrane Association of Japan, 1996

"Tensioned Fabric Structures", ASCE Task Committee on Tensioned Fabric Structures, 1996

"Tensile Membrane structures", ASCE, 2002

“European design guide for tensile surface structures”, Tensinet, 2004

- **RENDIMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI**

Legge Europea: D.P.R. 02.04.2009 n° 59 (att. direttiva 2002-91-CE)

- **INQUINAMENTO LUMINOSO E CONSUMO ENERGETICO**

Legge Regionale: 12/2002 (contenimento dell'inquinamento luminoso e del consumo energetico da illuminazione esterna pubblica e privata a tutela dell'ambiente)

- **NORME UNI**, criteri generali di progettazione ed azioni sulle strutture:

UNI U50002990 1996 : “Tende-strutture, tenso-strutture, presso-strutture. Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo, l'uso e la manutenzione”

UNI 8289: 1981 Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione

UNI 7867 Definizione di classi di requisiti del sistema tecnologico

UNI 10838 Definizione di requisiti e prestazioni

UNI 11277: 2008 Esigenze e requisiti di eco compatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione

- **NORME UNI**, prodotti e componenti di natura polimerica:

UNI 4818-4/31 1992 Supporti rivestiti con materiali polimerici

UNI 8099 1980 Tessuti. Armature. Termini e definizioni

UNI 8986 1987 Tessuti e Non-Tessuti

UNI EN 1049-2 1996 Tessili. Tessuti ortogonali

UNI EN 17341998 Supporti tessili rivestiti di gomma o materie plastiche. Resistenza alla penetrazione dell'acqua

UNI EN 22296 1996 Supporti tessili rivestiti i gomma o materia plastiche. Caratteristiche della pezza

UNI EN ISO 1421 2000 Supporti tessili rivestiti i gomma o materia plastiche. Resistenza a rottura e allungamento a rottura

UNI EN ISO 7854 1999 Supporti tessili rivestiti i gomma o materia plastiche. Resistenza al danneggiamento per flessioni ripetute

UNI ISO 4582 1985 Materie plastiche. Variazioni di colore e di proprietà dopo esposizione alla luce naturale sotto vetro, agli agenti atmosferici o alla luce artificiale

UNI ISO 4892 1985 Materie plastiche. Metodi di esposizione a sorgenti di luce di laboratorio

- **BENESSERE TERMICO**, metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici:

UNI/TS 11300 – 1: 2008 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale

UNI/TS 11300 – 2: 2008 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria

UNI EN 15193: 2008 Certificazione energetica ed impianti di illuminazione

UNI EN ISO 6846: 2008 Componenti ed elementi per l'edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodi di calcolo

UNI EN ISO 13786: 2008 Prestazione termica dei componenti per l'edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo

UNI EN ISO 13790: 2008 Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento

UNI EN 15251: 2008 Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica

UNI EN ISO 10077-1: 2007 Prestazioni termiche di finestre porte e chiusure oscuranti. Calcolo della trasmittanza termica. Generalità

UNI EN ISO 7730: 2006 Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV (Voto Medio Previsto) e PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) e dei criteri di benessere termico locale

UNI EN 832: 2001 Prestazione termica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento – Edifici residenziali

UNI 10350: 1999 Componenti edilizi e strutture edilizie – Prestazioni igrotermiche. Stima della temperatura superficiale interna per evitare umidità critica superficiale e valutazione del rischio di condensazione interstiziale

UNI 10351: 1994 Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore

UNI 10349: 1994 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici

UNI 10345: 1993 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Trasmittanza termica dei componenti edilizi finestrati. Metodo di calcolo

UNI 10344: 1993 Riscaldamento degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia

- **BENESSERE ACUSTICO:**

UNI EN ISO 3882-2:2008, Acustica. Misurazione dei parametri acustici negli ambienti. Parte 2: tempo di riverberazione negli ambienti ordinari

UNI ISO 226:2007, Acustica. Curve normalizzate di equal livello di sensazione sonora

- **CRITERI DI ILLUMINOTECNICA:**

UNI 10840:2007 Luce e illuminazione. Locali scolastici – Criteri per l'illuminazione artificiale e naturale

UNI EN 12464 -1:2004 Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro in interni

UNI EN 12464 -2:2008 Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro in esterni

UNI EN 14255-4:2007 Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti - Parte 4: Terminologia e grandezze utilizzate per le misurazioni delle esposizioni a radiazioni UV, visibili e IR

UNI EN 14255-1 e 2 :2005/06 Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti - Parte 1: Radiazioni ultraviolette emesse da sorgenti artificiali nel posto di lavoro

UNI 11165:2005 Luce e illuminazione - Illuminazione di interni - Valutazione dell'abbagliamento molesto con il metodo UGR

EN 12665: 2004 Luce e illuminazione - Termini generali e criteri per specificare i requisiti illuminotecnici

UNI 10530: 1997 Principi di ergonomia della visione. Sistemi di lavoro e illuminazione

UNI 10380:1994 + A1: 1999 Illuminotecnica. Illuminazione di interni con luce artificiale

CIE 16, Daylight: 1970 norma internazionale

- **VALUTAZIONE LCA** (Life cycle assessment):

UNI EN ISO 14040: 2006 *"Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento"*

UNI EN ISO 14040: 2006 *"Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida"*

BIBLIOGRAFIA TEMATICA E RAGIONATA

- *TENSOSTRUTTURE _ tecnologie della leggerezza*

I testi raccolti in questa sezione sono fonti di consultazione fondamentali per comprendere la tecnologia del tessile. Si sviluppano, quindi, come introduzione all'argomento di tesi e come approfondimento scaturito dalla constatazione di una serie di criticità attuali, i concetti di leggerezza strutturale, ricerca della forma, materiali leggeri e traslucidi con i relativi processi di produzione e classificazione. Inoltre, alcuni testi presentano spunti interessanti per avvalorare la tesi della ricerca, nonché per approfondire, ed applicare al caso delle tensostrutture a membrana, i concetti esplicitati da alcuni requisiti tecnologici di riferimento.

Armijos, Samuel J., *Fabric architecture*, Norton, Londra, 2008

Aymonino, Aldo, Mosco, Valerio Paolo, *Spazi pubblici contemporanei. Architettura a volume zero*, Skira, Milano, 2006

Berger, Horst, *Light structures – Structures of light*, AuthorHouse, Bloomington, 2005

Campioli, Andrea, Zanelli, Alessandra, "Membrane e scocche per l'architettura", 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 di architettura*, Gangemi Editore, Napoli, 2008

Campioli, Andrea, Zanelli, Alessandra, (a cura di), *Architettura tessile. Progettare e costruire membrane e scocche*, Il Sole24ore, Milano, 2009

Canobbio, Roberto, Lombardi, Stefania, "Translucency and Artificial Light", in Atti del Tensinet Symposium, *Ephemeral Architecture. Time and textiles*, CLUP, Milano, 2007 pp. 37-46

Capasso, Aldo, (a cura di), *Architettura e leggerezza*, Maggioli, Rimini, 1999

Capasso, Aldo, (a cura di), *Strutture tessili per l'architettura*, Cuen, Napoli, 1991

Capasso, Aldo, (a cura di), *Le tensostrutture a membrana per l'architettura*, Maggioli, Rimini, 1993

Capasso, Aldo, "Light of lightness. Lightness to light", in Atti del Tensinet Symposium, *Ephemeral Architecture. Time and textiles*, CLUP, Milano, 2007 pp. 227-236

Cetica, Pier Angelo, *R.B. Fuller: uno spazio per la tecnologia*, Cedam, Padova, 1979, CAP. 2, pp. 33-52

Colchester, Chloe, *Textile today: A Global Survey of Trends and Traditions*, Ed. Thames & Hudson, London, 2007

Drew, Philip, *Tensile Architecture*, Granada, Toronto, 1979, pp. 147-187

Falasca, Carmine, *Architetture ad assetto variabile*, Alinea, Firenze, 2000

Forster, Brian, Mollaert, Marijke, Zanelli, Alessandra, *Progettare con le membrane*, Maggioli, Rimini, 2007

Glaeser, Ludwig, *The work of Frei Otto*, MoMa (catalogo della mostra), New York, 1972

Hatton, E. M., *The tent book*, Houghton Mifflin, Boston, 1979, pp. 113-137

Ishii, Kazuo, *Membrane structures in Japan*, SPS, Tokyo, 1995

Kaltenbach, Frank, *Trasparenze. Vetri plastiche metalli*, UTET Scienze Tecniche, Torino, 2007, pp. 58-78

Kronenburg, Robert, *FTL Softness movement and light*, Academy editions, Chichester, 1997

Krüger, Sylvie, *TEXTILE ARCHITECTURE / Textile Architektur*, Jovis, Berlin, 2002

Lamacchia, Alba, "Facades Tressees: Building facades redevelopment as the means of textile-screens", in *Atti del Tensinet Symposium*, CLUP, Milano, 2007

Lynch, C.T., "Non-metallic materials and application", in *Handbook of materials science*, volume III, , CRC Press, Boca Raton, 1975

Majowiecki, Massimo, *Tensostrutture: progetto e verifica*, CISIA, Milano, 1985

Mcquaid, Matilda, *Extreme textiles*, Ed. Smithsonian Princeton Architectural Press, 2005

Olivetti, Catia, *La forma e i materiali della trazione*, FrancoAngeli, Milano, 1995, pp. 30-47 e 129-147

Otto, Frei, *Natürliche Konstruktionen*, Deutsche Verlag-Anstalt GmbH, Stuttgart, 1982, (trad. It. Roberta Madoi, *L'architettura della natura*, Il Saggiatore, Milano, 1984)

Otto, Frei, Rasch, Bodo, *Finding form*, Axel Menges, Stuttgart, 1995

Pompas, Renata, *Textile Design*, Hoepli, Milano, 1994, pp. 3-5 e 103-118

Reinhard, Edgar, *Nomadic architecture*, Lars Muller Publishers, Baden, 1998

Santomauro, Roberto, (a cura di), *Lighting comfort*, in "Atti del Tensiostrucutras desde Uruguay", Mastergraf, Montevideo, 2008

Scheuermann, Rudy, Boxer, Keith, *Tensile architecture in the urban context*, Bath Press Colourbooks, Glasgow, 1996

Shock, Hans-Joachim, *Atlante delle tensostrutture*, UTET, Torino, 2001

Zanelli, Alessandra, *Trasportabile/trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Clup, Milano, 2003, pp. 40-94

- *TECNOLOGIA _ sostenibilità e materiali tessili*

I testi raccolti in questa sezione sono inerenti la tecnologia del tessile, in particolare le proprietà dei materiali membranali e le modalità di assemblaggio e montaggio degli stessi, indagando anche le opportunità di impiegare prodotti sostenibili e innovativi nel sistema tecnologico, e la questione del form finding, che chiama in causa la leggerezza strutturale, l'ottimizzazione morfologica, il contributo delle superfici geometriche sulla percezione degli spazi, e, di conseguenza, sul benessere abitativo.

Allen, Edward, *Come funzionano gli edifici*, Dedalo, Bari, 1983

Bellomo Mariangela, D'Ambrosio Valeria, (a cura di), *Fibrorinforzati in architettura*, Clean, Napoli 2009, pp.45-52 e 142-149

Campioi, Andrea, "Oltre il vetro. Le tecniche esecutive della trasparenza" in Perriccioli, Massimo, (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Libreria Rinascita, Ascoli Piceno, 1998, pp. 101-117

Capasso A., La Creta R. e Vitale A., (a cura di), "Edilizia a struttura in legno", Prolegno e SEN, Roma, 1982

Claudi de Saint Mihiel, Claudio, *Le forme dell'innovazione*, Arti grafiche Stefano Pinelli, Milano, 1998 pp. 7-18

Dato, Maria Rosaria, "I processi di innovazione tecnologica nella progettazione e costruzione del < sistema involucro >" in Claudio de Saint Mihiel, Claudio, *Le forme dell'innovazione*, Arti grafiche Stefano Pinelli, Milano, 1998 pp. 161-167

Guazzo, Giovanni, introduzione "Leggero/trasparente: appunti per una ricerca di cultura progettuale" in Perriccioli, Massimo, (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Libreria Rinascita, Ascoli Piceno, 1998, pp. 101-117

Hegger, Manfred et al., *Atlante della sostenibilità*, UTET, Torino, 2008 (tr. it. George Frazzica)

Pottmann, Helmut et al., *Architectural Geometry*, Bentley Institute Press, 2008, pp. 214-705

Losasso, Mario, *Progetto e innovazione*, CLEAN, Napoli, 2005

Morabito, Giovanni, *Forme e tecniche dell'architettura moderna*, Officina Edizioni, Roma, 1990, pp. 10-25, 39-45, 79-99, 169-200

Nardi, Guido, *Le nuove radici antiche. Saggio sulla questione delle tecniche esecutive in architettura*, FrancoAngeli, Milano, 1987

Paoletti, Ingrid, *Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, CLUP, Milano, 2006

Perriccioli, Massimo, (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Libreria Rinascita, Ascoli Piceno, 1998, pp. 29-43

Perriccioli, Massimo, *Richard Horden. Through space*, Kappa, Roma, 2003

Perriccioli, Massimo, Rossi, Monica, *Thomas Herzog. Reacting skin*, Kappa, Roma, 2005

Pone, Sergio, "Luce e grande luce. Innovazione tecnologica e trasparenza nelle grandi coperture" in Perriccioli, Massimo, (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Libreria Rinascita, Ascoli Piceno, 1998, pp. 63-73

Salvadori, Mario, Heller, Robert, *Le strutture in architettura*, Etaslibri, Milano, 1964

Sicignano, Enrico, "L'utilizzo dei materiali plastici ai fini della riciclabilità" in Gangemi, Virginia, (a cura di), *Riciclare in architettura. Scenari innovativi della cultura del progetto*, Clean, Napoli, 2004, pp. 91-98

Vittoria, Edoardo, "La natura maestra, la natura spettacolo, nella visione leggera della tecnologia", in *Architettura delle vele*, in corso di pubblicazione

Wachsmann, Konrad, *Una svolta nelle costruzioni*, Il Saggiatore, Milano, 1960

- **INVOLUCRO EDILIZIO**

I testi raccolti in questa sezione trattano dell'involucro edilizio, come subsistema del più ampio sistema tecnologico. Gli argomenti trattati sono relativi alla tecnologia dell'involucro, alla problematica della sua interazione con le altre parti dell'edificio, ai sistemi di involucro leggeri, soffermandosi su questi ultimi

relativamente agli aspetti del comfort ambientale. Si approfondiscono i temi dell'innovazione tecnologica degli involucri di ultima generazione, filtri dinamici che interagiscono con l'ambiente, grazie all'impiego di nuovi materiali e tecnologie che permettono il soddisfacimento di requisiti tecnologici con minimo impiego di materiali ed energie.

Altomonte, Sergio, *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, Alinea, Firenze, 2004

Beccu, Michele, Spartacu, Paris, *L'involucro architettonico contemporaneo tra linguaggio e costruzione*, Design Press, Roma, 2008

Claudi de Saint Mihiel, Alessandro, *Superfici mutevoli. Le tecnologie innovative dei vetri cromogenici per il progetto di involucri a prestazioni variabili*, CLEAN, Napoli, 2007

Fanelli, Giovanni, Gargiano, Roberto, *Il principio del rivestimento*, Laterza, Roma, 1994, pp. 3-14

Herzog, Thomas, Krippner, Roland, Lang, Werner, *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005, pp. 211-231

Imperadori, Marco, Zambelli, Ettore, *Costruzione stratificata a secco. Tecnologie edilizie innovative e metodi per la gestione del progetto*, Maggioli, Rimini, 1998

Pedrotti, Laura, *La flessibilità tecnologica dei sistemi di facciata. Evoluzione delle tecniche di produzione e di assemblaggio*, Ed. Angeli, Milano, 1995, pp. 33-81 e 118-148

Rossi, Monica, *Prodotti e sistemi di involucro innovativi per il progetto di edifici energeticamente efficienti*, Simple, Macerata, 2009

- **ILLUMINOTECNICA**

I testi raccolti in questa sezione analizzano l'illuminazione degli ambienti interni ed esterni, i requisiti illuminotecnici e i metodi di calcolo utilizzati per verificare gli standard normativi. Inoltre, un particolare approfondimento è riservato ai meccanismi di trasmissione della luce per irraggiamento, i criteri per progettare con la luce, e il concetto di qualità nella definizione del comfort ambientale, con riferimento specifico alla percezione visiva. Argomenti utili ai fini della ricerca sono i criteri adottati nella progettazione con la luce naturale e artificiale, in particolar modo in termini di rispondenza dei materiali adottati come superfici di involucro al passaggio dei flussi luminosi.

AA.VV., *La luce. Funzione della luce sull'ambiente e sulle attività umane e progetti di illuminazione naturale-artificiale per spazi architettonici privati e pubblici*, Over, Milano, 1989, Vol.1

Bottero, Maria, *Architettura solare. Tecnologie passive e analisi costi-benefici*, Clup, Milano, 1984

Bianchi, Francesco, *L'architettura della luce*, Kappa, Roma, 1991, pp. 9-19 e 135-160

Brandi, Ulrike, *Luce naturale e artificiale*, UTET Scienze Tecniche, Torino, 2007

Capasso, Aldo, (a cura di), *LUCE E AMBIENTE. Le tecnologie della luce artificiale per il progetto dei luoghi dell'abitare. Dalla produzione alla creatività*, Clean, Napoli, 2010

Cremonini, Lorenzo, *Luce naturale – Luce artificiale*, Alinea Editrice, Firenze, 1992

Fabbi, Kristian, Conti, Michele, *Progettazione energetica dell'architettura*, DEI, Roma, 2008

Gioli, Alessandro, *Il sole e la città*, Alinea editrice, Firenze, 1990

Marocco, Marcello, Orlandi, Fabrizio, *Qualità del comfort ambientale*, Librerie Dedalo, Roma, 2000

Moncada Lo Giudice, Gino, De Lieto Vollaro, Andrea, *Illuminotecnica*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2007, CAP. 4-6-8

Palladino, Pietro, *Manuale di illuminazione*, Tecniche Nuove, Milano, 2005

Rogora, Alessandro, *Luce naturale e progetto*, Maggioli, Rimini, 1997, pp. 87-226

Schittich, Christian, (a cura di), *Architettura solare. Strategie visioni concetti*, Detail, Berlino, 2007, pp. 63-97

Torricelli, Maria Chiara, *Daylight. La luce del giorno*, Alinea, Firenze, 1995

Yunus, A. Cengel, "La trasmissione del calore per irraggiamento", CAP. 14 in *Termodinamica e trasmissione del calore*, McGraw-Hill, Milano, 1998

TESI DI DOTTORATO

- Claudi De Saint Mihiel, Alessandro, *Superfici mutevoli. Le tecnologie innovative dei vetri cromogenici per il progetto di involucri a prestazioni variabili*, Dottorato in Tecnologia dell'Architettura, Napoli, A.A. 2005-2006
- Filagrossi Ambrosino, Cristian, *Strumenti per la verifica dei livelli di ecosostenibilità e biocompatibilità dei prodotti edilizi realizzati con materiali avanzati. Confronto tra un pannello fotovoltaico in silicio amorfo a film sottile e uno a celle solari organiche*, Dottorato in Tecnologia dell'Architettura, Napoli, A.A. 2009-2010
- Marino, Delia, *L'involucro nell'organismo architettonico. Note metodologiche per l'integrazione in chiusura delle membrane pretese*, Dottorato in Tecnologia dell'Architettura, Napoli, A.A. 2001-2002
- Mazzola, Cristina, *Proprietà formali e qualità ambientale dei materiali molli per l'architettura*, Dottorato in Tecnologia dell'Architettura, Milano, A.A. 2008-2009
- Rossi, Monica, *Prodotti e sistemi di involucro innovativi per il progetto di edifici energeticamente efficienti. Procedure, Simulazioni termodinamiche e criteri progettuali per una applicazione nel sud Europa*, Dottorato in Tecnologia dell'Architettura, Napoli, A.A. 2008-2009
- Saboia De Freitas, Cristiana, *Architettura sostenibile in zone tropicali: le tensostrutture. Una scelta tecnologica*, Dottorato in Tecnologia dell'Architettura, Napoli, A.A. 2002-2003

ARTICOLI SCIENTIFICI (in ordine cronologico)

Capasso Aldo e Pinto Vincenzo, "Tensostrutture a membrana", *Costruire*, ottobre 1998

"Nature's education", *Fabric ARCHITECTURE*, maggio/giugno 2000

Dall'O' Giuliano e Galante Annalisa, "Le "vecchie" frontiere della luce", *Modulo*, maggio 2004

Poli, Tiziana, "Leggero e indeformabile come una vela", *Arketipo*, luglio 2006

Frederickson, Steve, "It's a wrap! Making the case for textile facades", *Fabric ARCHITECTURE*, gennaio/febbraio 2006

Goldsmith, Nicholas, "Building skin", *Fabric ARCHITECTURE*, maggio/giugno 2006

Heshmati, Ali, "Screen test", *Fabric ARCHITECTURE*, marzo/aprile 2007

Pronk, A., "Innovative sheltering", *Tensinews*, dicembre 2007

Houtman Rogier e Werkman Harmen, "App Church with double layer insulated membrane covering", *Tensinews*, dicembre 2007

Holzbach, Markus, "Experimental building PAUL- adaptive textile building envelopes", *Tensinews*, dicembre 2007

Schmid, G., Lombardi, S., "Modern Tea House 2007 for Mak Frankfurt", *Tensinews*, dicembre 2007

Giagnoni, Jacopo Maria, "Juniper house", *Materia*, dicembre 2007

Cutroni, Fabio, "Costruire la trasparenza", *Materia*, dicembre 2007

"Materiali plastici", *Detail* 2008, serie speciale 5

Stimpfle, Bernd, "The Zenith de Strasbourg", *Tensinews*, luglio 2008

Carmody John e Haglund Kerry, Yu Joe Huang, "Let the sun (not) shine in", *Fabric ARCHITECTURE*, gennaio/febbraio 2008

Riddle, Mason, "Living lightly on the land", *Fabric ARCHITECTURE*, gennaio/febbraio 2008

Huntington, Craig G., "Bright(er) shiny day", *Fabric ARCHITECTURE*, marzo/aprile 2008

Concept "Edificio Media Tic Barcellona", *Solaria*, numerootto, 2008

Dossier Clima ed Energia "La schermatura solare nell'architettura", *Solaria*, numerootto, 2008

Chesini, Gianluca, "Il tessile nell'involucro edilizio", *Solaria*, numeronove, 2008

Mazzola, Cristina, "Architettura tessile: nuove frontiere per un costruire leggero", *Solaria*, numeronove, 2008

Zanelli, Alessandra, "Luminosità tessile", *Arketipo*, marzo 2008, *IlSole24ore*, Milano

Zanelli, Alessandra, "Wall House", *Arketipo*, ottobre 2008, *IlSole24ore*, Milano

Baymiller, Joanna, "Inside the big tent", *Fabric ARCHITECTURE*, marzo/aprile 2009

Willmert, Todd, "Lighting the way", *Fabric ARCHITECTURE*, marzo/aprile 2009

Grunwald, Gregor, "ETFE Façade", *Tensinews*, aprile 2009

Riddle, Mason, "Provisional Housing", *Fabric ARCHITECTURE*, settembre/ottobre 2009

Venturelli, Giuliano, "Ingegneria dell'involucro. Tensostrutture a membrana", *FRAMES*, novembre/dicembre 2009

Prati, Alessandro, "Luci e ombre sulle case", Modulo, febbraio 2010

Armijos, Samuel J., "How much does it cost, anyway?", *Fabric ARCHITECTURE*, gennaio/febbraio 2010

Zeh, Mark, "Dressing the apartment from outside in", in *Fabric ARCHITECTURE*, novembre/dicembre 2010, pp. 6-7

SITOGRAFIA

AZIENDE PRODUTTRICI	MATERIALI E PRODOTTI	RICERCA
www.tensoforma.it www.tenarafabric.com www.ferrari-textiles.com www.gore.com www.naizil.com www.arup.com/italy www.invista.com www.fffna.saint-gobain.com www2.dupont.com www.canobbio.com www.giovanardi.com www.kastilo.de www.profil-ts.com	www.techtextil.com www.technica.net www.tessileesalute.it www.fabricarchitecture.com www.tenso.ws www.hightexworld.com www.pvcforum.it www.hiplastmilano.it www.ceno-tec.de www.fibersource.com www.fidiaglobalservice.com www.matech.it www.texclubtech.it www.textileitaly.it www.bitec.it www.texti.org www.wwcomposites.com www.textiles.com www.irc-irene.org www.netcomposites.com www.technical-textiles.net/ www.texdev.com/index.htm www.okalux.de	www.architetturatessile.polimi.it www.iass-structures.org www.asce.org www.membrane-guide.com www.tensinet.com www.contex-t.eu www.itv-denkenorf.de/ www.avantex.messefrankfurt.com www.membrane.or.kr www.unirc.info/PRIN2005