

Lo sviluppo delle strutture miste vetro-acciaio ha subito negli ultimi anni una accelerazione enorme. La richiesta sempre più pressante di smaterializzare l'involucro architettonico verso obiettivi estremi di trasparenza e filigrana ha fatto sì che il vetro assumesse sempre di più precise funzioni strutturali di collaborazione con l'acciaio.

La perfetta simbiosi meccanica tra questi due materiali così diversi ha inizialmente consentito la realizzazione di impressionanti facciate sospese evolvendosi poi verso elementi strutturali

importanti come travi e pilastri a sostegno di coperture, passerelle, scale. Il presente articolo costituisce una introduzione alle strutture miste vetro-acciaio operata attraverso l'esame critico ed evolutivo di realizzazioni esemplari passate e recenti con uno sguardo al futuro.

The development of mixed glass and steel structures has intensified significantly in recent years. The increasingly pressing demand for the breaking down of the architectural form into extreme transparency and filigree has meant that glass has taken on increasingly precise structural functions in combination with steel. The perfect mechanical symbiosis between these two very different materials initially led to the emergence of impressive suspended facades, then went on to evolve in the direction of important structural elements, such as beams and pillars as supports for roofs, passageways and stairways. This article offers an introduction to mixed glass and steel structures, with a critical examination of exemplary past and future works and a look towards the future.

Sviluppi recenti delle costruzioni in vetro strutturale e acciaio

Recent developments in glass and steel constructions

Lucio Blandini,
Maurizio Froli,
Leonardo Lani

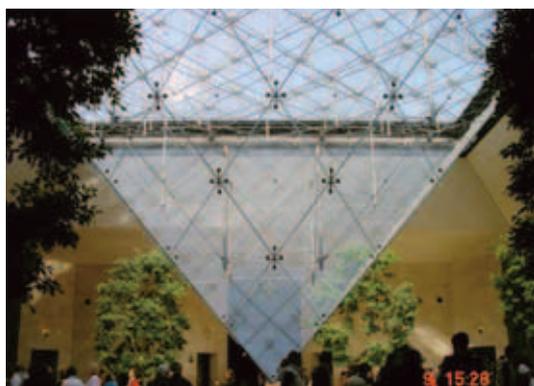


Fig. 1 - Alcuni esempi di utilizzo di strutture in vetro e acciaio volto a sfruttare le caratteristiche di trasparenza e riflettività del vetro per scopi funzionali o estetici: Pyramide inversée, Parigi; Musée des beaux arts, Lille (Tratta da Atlante del Vetro, UTET)

1. INTRODUZIONE

L'utilizzo del vetro in architettura ha subito negli ultimi anni un'accelerazione enorme, grazie alla sua trasparenza e all'aspirazione di molti architetti contemporanei di ridefinire l'idea di una demarcazione netta tra spazi interni ed esterni. Le tendenze dell'architettura contemporanea verso la "smaterializzazione" del manufatto architettonico vedono dunque il vetro quale naturale protagonista: *in primis* per la sua trasparenza, ma anche per le riflessioni, le distorsioni, i cambiamenti di colore che gli involucri in vetro offrono, interagendo in modo sempre diverso con l'ambiente circostante e arricchendo così il linguaggio formale delle superfici continue di involucro.

A partire dalle facciate vetrate continue proposte dai migliori esponenti del movimento moderno negli anni '20 e '30, da Mies van der Rohe a Walter Gropius, con lo scopo di scardinare i canoni classici della progettazione architettonica, sono stati compiuti molti progressi nell'offerta tecnologica di prodotti, cosicché oggi è possibile superare i problemi tecnici delle realizzazioni di allora, combinando alti livelli di comfort termico con le dimensioni sempre più notevoli delle superfici vetrate.

Se un tempo le superfici destinate a far penetrare la necessaria quantità di luce all'interno degli edifici costituivano solo una piccola parte dell'involucro, consentendo di "creare" lo spazio architettonico in un'alternanza consapevole di luci e ombre che facesse risaltare gli elementi volumetrici, oggi la continuità delle superfici e

la versatilità di trattamento del vetro offrono nuove potenzialità, ancora solo parzialmente esplorate. Ciò riguarda sia lo spazio architettonico interno che l'immagine che l'edificio offre di sé all'esterno, così che nell'opera di alcuni architetti contemporanei la naturale capacità del vetro di modificare la sua apparenza durante il corso della giornata viene ridefinita attraverso l'uso sapiente di moduli o immagini stampate sulla superficie vetrata stessa.

La ricerca verso un ruolo sempre più significativo del vetro trova nell'acciaio un partner ideale in grado di offrire allo stesso tempo intrusione visiva minima e resistenze elevate [Froli M.; 2004]. Gli elementi in acciaio, inoltre, consentono di garantire la duttilità necessaria al sistema

compensando in questo modo la fragilità intrinseca del vetro. In alcune delle migliori realizzazioni degli ultimi decenni ciò si traduce in un sistema filigranare dove elementi in acciaio innervano e scandiscono le facciate, aggiungendo nuova ricchezza agli involucri vetrati [Blandini L.; 2002].

L'offerta tecnologica in termini di prodotti in vetro consente di combinare diversi processi di lavorazione in modo da regolare opportunamente le proprietà di trasmissione del calore, del suono e delle radiazioni luminose. Per migliorare il confort termico si può far uso sia di vetri camera doppi o tripli, con intercapedini in aria o gas nobili quali l'Argon, che di sottili rivestimenti metallici (*coating*) sulla superficie delle lastre.



Fig. 2 - James Carpenter, facciata con vetri dicroici, Christian Theological Seminary's Chapel, Indianapolis, USA, 1987 (Immagine archivio ILEK)

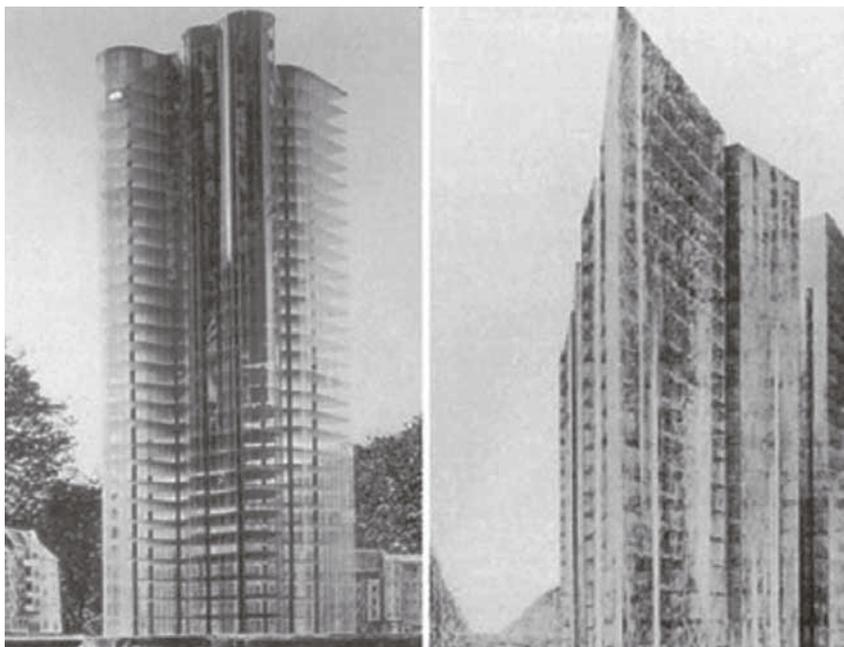
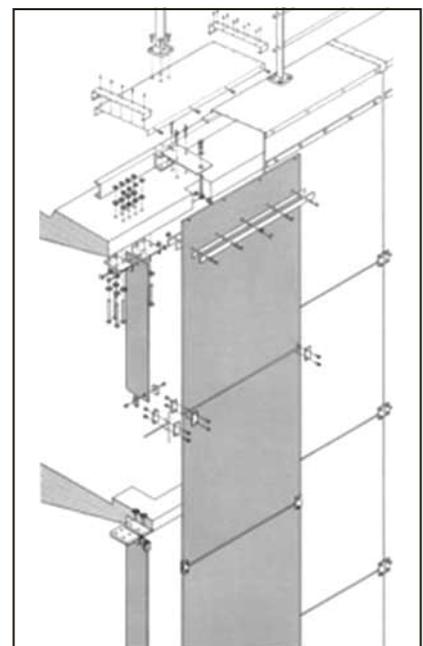


Fig. 3 - Mies van der Rohe, progetti di grattacieli a Berlino 1922; Facciata vetrata dell'edificio Willis Faber & Dumas, vista notturna ed esploso assometrico

Nella maggior parte dei casi è una accorta combinazione di queste due tecnologie a garantire i migliori risultati.

Le lastre in vetro vengono inoltre stratificate con materiali plastici, come ad esempio il PVB (polivinilbutirale), sia per motivi di sicurezza che per migliorare il livello di isolamento acustico dell'involucro. Dal punto di vista delle radiazioni luminose è possibile infine realizzare vetri selettivi capaci di essere permeabili solo ad alcuni valori di lunghezza d'onda, come ad esempio i vetri dicroici, usati sapientemente



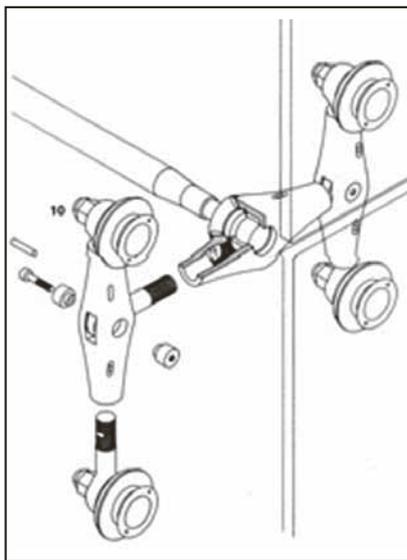


Fig. 4 - Vista della facciata e particolare del ragno articolato che collega 4 rotules e sua funzione

da James Carpenter nelle sue facciate. I pannelli di vetro possono infine essere trattati in modo da avere circuiti elettrici incisi sulla superficie o venire stratificati con sottilissimi pannelli fotovoltaici in modo da utilizzare gli involucri come sorgente di energia rinnovabile. Le facciate in vetro si guadagnano così sempre più l'appellativo di "involucro evoluto". Alle richieste estetiche, illuminotecniche, acustiche e termo-igrometriche poste alle strutture vitree occorre necessariamente aggiungere anche quelle statiche. Gli elementi in vetro possono essere progettati per assolvere essi stessi funzioni strutturali sia come lastre sollecitate nel e fuori del loro piano medio, ma anche come travi, colonne, gusci. Iniziano così a comparire le prime realizzazioni totalmente in vetro strutturale, realizzando così una visione antica, descritta ripetutamente in letteratura e fantasiosamente rappresentata in pittura [Haag Bletter R.; 1981]. L'intrinseca fragilità del vetro, ovvero quella bassissima resistenza alla propagazione delle cricche, ne ha impedito a lungo il suo utilizzo diffuso come materiale strutturale se si eccettuano alcune famose realizzazioni del XIX secolo come il *Palm House* presso Devon, o la *Halle aux Blés* a Parigi, nelle quali il vetro svolge effettivamente un ruolo attivo in quanto irrigidisce e collabora alla stabilità della ossatura metallica, altrimenti troppo deformabile se non

addirittura labile [Schlaich J.; 2001]. Questi esempi di coperture testimoniano certamente l'ingegno e il grande intuito dei progettisti di allora, ma in esse l'utilizzo del vetro come materiale strutturale resta un fatto quasi involontario, legato più all'istinto e alla pratica costruttiva che ad un atto di consapevole valutazione dei rischi. L'uso del vetro come materiale dichiaratamente strutturale è invece una novità introdotta di recente in architettura grazie agli sviluppi dell'ingegneria strutturale nell'ultimo quarto del XX secolo. Nel seguito si è cercato di fornire un quadro sintetico dei progressi più recenti subiti da questo settore di punta delle costruzioni civili.

2. SVILUPPO DELLE STRUTTURE IN VETRO E ACCIAIO: ALCUNE REALIZZAZIONI ESEMPLARI

2.1 FACCIATE SOSPESSE

2.1.1 Edificio Willis Faber & Dumas, Ipswich, 1971-75

Si deve a due celeberrimi progetti di Mies van der Rohe del 1919 e del 1922 la concezione architettonica di parete perimetrale continua completamente vetrata. Non realizzati, i due progetti di grattacieli riproducevano su grande scala le forme di un cristallo trasparente, spigoloso al primo, dalle forme curve il secondo, e furono all'epoca rivoluzionari ma non ancora tecnicamente fattibili, pur in un periodo in cui cresceva

l'interesse per il vetro e le sue qualità in architettura, come testimoniato dall'opera di Bruno Taut [Atlante del vetro; 2002]. Mies descrisse egregiamente le motivazioni del suo interesse per il vetro: "Il mio impiego del vetro è volto non alla ricerca di effetti di luce e ombra, ma di una molteplice interazione tra luce diretta e riflessa" [Neumeyer F.; 1991]

Direttamente ispirato a tali progetti è l'edificio Willis Faber & Dumas progettato dall'architetto Norman Foster ad Ipswich, in Inghilterra [Wigginton M.; 2002]. La facciata continua è costituita da 6 file di lastre di vetro temperato dal colore bronzio dello spessore di 12 mm interamente appesa in sommità. La trasmissione dei carichi da una lastra all'altra è affidata ad un sistema bullonato di piastra e contro-piastra mentre l'impermeabilizzazione è garantita da cordoni di silicone. Il tutto è stabilizzato rispetto ai movimenti fuori dal piano da mensole verticali di vetro, sollecitate principalmente a flessione ed incastrate in corrispondenza dei solai, così da aumentare ulteriormente la trasparenza dell'insieme.

2.1.2 Serre bioclimatiche della Cité des sciences et de l'industrie, quartiere de La Villette, Parigi, 1981-86

Le Serre Bioclimatiche de La Villette costituiscono un notevole passo avanti nel percorso di smaterializzazione delle facciate avviato da Mies sessant'anni prima. Per ottenere la trasparenza richiesta dall'architetto Adrian Fainsilber, interessato a realizzare spazi di transizione tra l'edificio della *Cité des sciences et de l'industrie* ed il parco circostante, l'ingegnere Peter Rice, insieme agli architetti Martin Francis e Ian Ritchie introdussero una serie di novità dal punto di vista progettuale e costruttivo [Rice P., Dutton H.; 2004].

Le lastre utilizzate sono di vetro temperato dello spessore di 12mm, di dimensioni 2x2 metri; sedici lastre compongono un pannello, sedici pannelli a loro volta costituiscono la facciata quadrata, alta ben 32 metri. Per minimizzare la presenza della struttura metallica il telaio metallico tubolare con maglia di 8 m è irrigidito da un sistema di cavi che trasferiscono i carichi orizzontali dalle lastre di vetro, sfruttando una tecnologia mutuata dall'industria navale.

I cavi hanno una funzione simile alle mensole in vetro del progetto precedente, con il vantaggio però di essere meno intrusivi. Le mensole infatti disposte perpendicolarmente al piano della vetrata non risultano completamente trasparenti, a causa della luce riflessa; inoltre, la collocazione orizzontale dei cavi garantisce all'osservatore posto all'interno una visuale non interrotta verso l'esterno.

Anche il collegamento tra le lastre è qui più sofisticato, grazie all'introduzione delle "rotules", articolazioni sferiche poste in corrispondenza del piano baricentrico della lastra in modo da evitare l'insorgere nelle lastre di momenti flettenti parassiti. Le "rotules" trasmettono le azioni dalle lastre di vetro ai cavi a mezzo di ragni articolati composti da bielle, consentendo in primo luogo lo spostamento relativo tra le lastre, ed in secondo luogo evitando l'insorgere di tensioni nel vetro dovute a movimenti della struttura metallica.

Per aumentare il controllo dei carichi cui le lastre di vetro sono soggette, molle di sospensione vengono aggiunte in corrispondenza dei nodi dove la facciata trasferisce i carichi verticali alla struttura tubolare metallica. Nella eventualità in cui una o più lastre vengano danneggiate, alle molle è affidato non soltanto il compito di ridistribuire gli sforzi ai nodi ma anche di attutire l'impulso dovuto alla rottura (*shock absorbers*).

Tutto il progetto è volto quindi a definire con esattezza il ruolo di ciascun componente e ad evitare effetti parassiti non considerati. A questo uso rigoroso del concetto di gerarchia si aggiunge un'applicazione brillante del concetto di ridondanza, moltiplicando il numero di elementi necessari e considerando una molteplicità di possibili scenari dovuti alla rottura di uno o più elementi. Questa intensa attività progettuale viene però ripagata pienamente in un'opera che, a ragione, è considerata una pietra miliare delle realizzazioni in vetro strutturale, rivoluzionando l'approccio a tale materiale.

2.1.3 Facciata dell'Airport Hotel Kempinski, Monaco, 1993

Un'opzione alternativa alla facciata appesa è quella, più recente, della facciata composta da lastre aggan- ciate puntualmente a dei cavi sottili

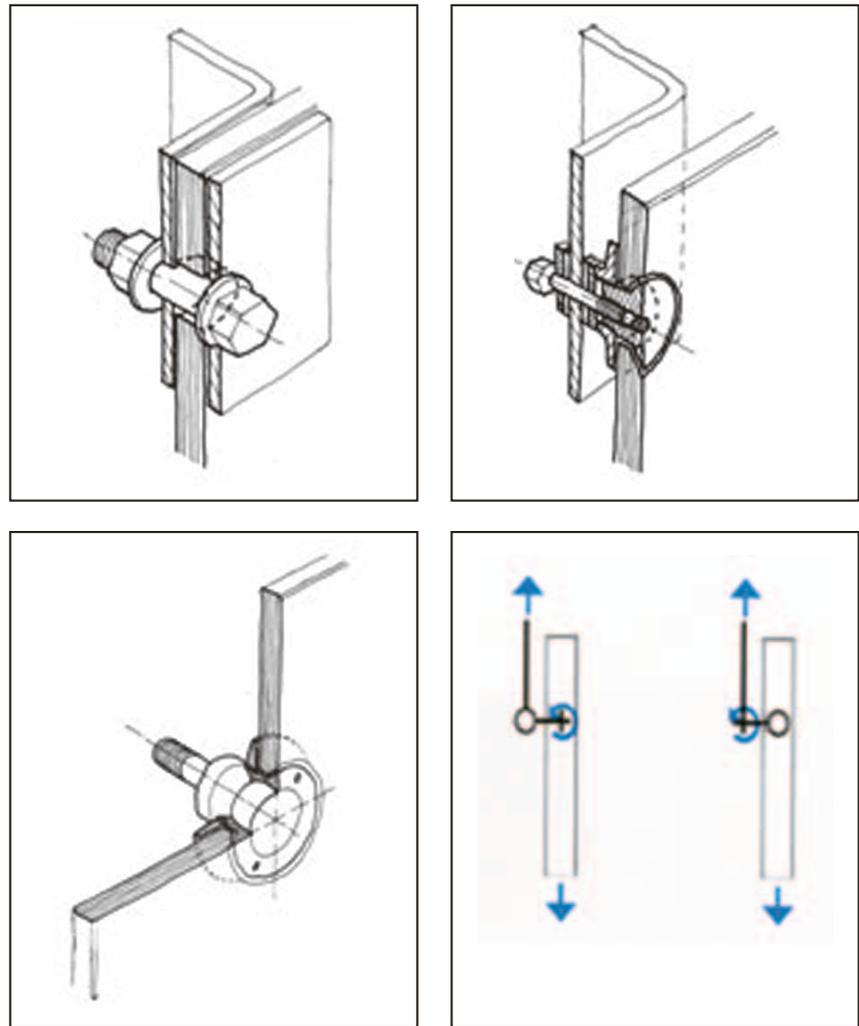


Fig. 5 - Tipologie di connessione: 1. piastra e contro-piastra; 2. Pilkington Planar; 3. Rotule. Nella immagine a destra, la differenza tra il sistema Pilkington e la rotule: quest'ultima non induce momenti flettenti parassiti

inseriti dentro le giunzioni di silicone. L'evoluzione più spinta di questa tipologia è quella che sfrutta i cavi di acciaio sia per sospendere le lastre di vetro, che per contrastare le azioni fuori dal piano, con un funzionamento strutturale non lontano da quello di una enorme racchetta da tennis.

In questa tipologia rientra la facciata vetrata alta 25 metri e lunga 40 dell'Hotel Kempinski presso l'aeroporto di Monaco di Baviera. La struttura, progettata da Jörg Schlaich [Schlaich J., Bergermann R.; 2003], è costituita da una maglia quadrangolare di lati 1.5x1.5 metri composta da cavi di acciaio inossidabile di 22 mm di diametro che sostengono lastre di vetro temperato e stratificato dello spessore di 10 mm.

Il sistema di fissaggio puntuale adot-

tato consiste in morsetti ad attrito di acciaio inossidabile connessi ai cavi mediante inbullonatura. Tale sistema, afferrando le lastre di vetro ai quattro vertici (con interposto uno strato di silicone) consente di evitare l'esecuzione di fori per l'inserimento delle rotule, e garantisce al contempo una sufficiente tolleranza nei confronti delle deformazioni fuori dal piano; per contro, le elevate sollecitazioni in corrispondenza degli angoli impongono comunque l'impiego di vetro temperato; l'utilizzo della laminazione garantisce poi un buon isolamento acustico, oltre al vantaggio della ridondanza strutturale.

I cavi verticali hanno la quasi esclusiva funzione di sostenere il peso delle lastre, e sono solo debolmente pre-sollecitati, per evitare di carica-

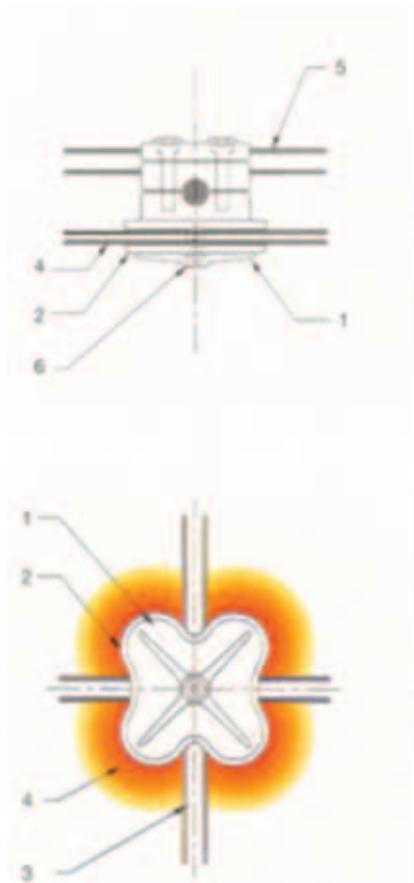


Fig. 6 - La facciata dell'Hotel Kempinski vista dall'interno e particolari dei morsetti

re eccessivamente la struttura del tetto a cui sono collegati. I cavi orizzontali invece, connessi alle due ali dell'edificio, sono fortemente pretesi (85kN), in modo da assolvere al compito di limitare a valori accettabili le comunque elevate deformazioni dovute all'azione del vento.

Questo tipo di struttura a rete piana di cavi è stato poi riproposto in altre realizzazioni di facciate, e persino in una variante a "cavo singolo", realizzato per le Cantine piemontesi Ceretto dove i soli cavi verticali hanno il duplice ruolo di sostenere il peso delle lastre e, mediante pre-tensione, di contrastare le azioni del vento [Bassignana M.; 2004].

2.2 COPERTURE IN VETRO E ACCIAIO

Nel seguito viene presentata una rassegna di alcune recenti esemplari realizzazioni nel campo delle coperture vetrate selezionate in base alla qualità e quantità delle innovazioni che ciascuna di esse presenta [Blandini L., 2002]. La copertura del Chiostro dell'Abbazia di Neumünster

non verrà trattata in questo articolo, nonostante le interessanti novità introdotte, in quanto sarà oggetto di un articolo monografico nei numeri successivi.

2.2.1 Corte del Museum für Hamburgische Geschichte, Amburgo, 1989: volta sottile a maglie quadrate irrigidite da funi, appoggio diretto dei vetri

L'edificio che ospita il Museo di Storia della Città di Amburgo risale ai primi del '900 ed ha al suo interno una corte dalla forma ad L, per la quale era prevista una copertura già nel progetto originale. Tre i requisiti forniti agli architetti Gerkan Margund Partner per progettare la nuova copertura in occasione dell'ottocentesimo anniversario del porto di Amburgo: non modificare l'essenza storica dell'edificio; non fornire alla copertura una direzione unica dell'ordito; non assegnarle un ruolo architettonicamente dominante. Questa copertura in vetro e acciaio le soddisfa tutte brillantemente.

Il sistema è costituito da due volte a

botte e da una superficie di transizione tra le due. La geometria a botte è naturalmente ideale per la modularità delle lastre e delle barre piene in acciaio (60x40 mm). La geometria di transizione, le cui caratteristiche saranno approfondite in dettaglio in un prossimo articolo, comporta geometrie per le lastre per lo più variabili tra il rettangolo ed il rombo, mentre i profili in acciaio mantengono lunghezza e sezione invariate, con chiari vantaggi economici [Schlaich J., Schober H.; 1999].

Il tutto è irrigidito attraverso due sistemi di cavi: il primo è costituito da raggi verticali poste a conclusione delle volte a botte come irrigidimento delle volte, mentre il secondo è costituito da cavi da 6 mm che attraversano i moduli in vetro lungo la diagonale. Tali cavi forniscono rigidità a taglio alle maglie della struttura in acciaio e rendono l'insieme, grazie ad una leggera pre-tensione, globalmente meno deformabile.

Il vetro è posato su appoggi di neoprene conformati in maniera tale da costituire una "seconda linea di di-

fesa" contro le infiltrazioni di acqua, ed è bloccato in corrispondenza dei nodi da una piastra circolare. Le giunzioni tra le lastre sono chiuse con silicone, ed è previsto lungo le aste un sistema di resistenze elettriche per evitare, per l'effetto Joule, possibili condense. La struttura appoggia lungo il suo intero perimetro su un profilo HEB 160 poco discosto dal tetto esistente, sorretto puntualmente da profili tubolari che riportano le sollecitazioni ad un'altra trave disposta nel sottotetto. Alcune maglie sono provviste di aperture comandabili a distanza per l'evacuazione dei fumi e il ricambio d'aria.

2.2.2 Vela e Logo della Nuova Fiera di Milano, 2002-05: copertura mista, maglie triangolari e quadrangolari, appoggio diretto dei vetri

La "Vela" della nuova Fiera di Milano [Havemann K., Düster H.; 2005] è un'enorme superficie di vetro lunga 1.3km, progettata dall'architetto M. Fuksas per collegare i vari padiglioni tra loro. Questa ampia superficie piana, sorretta da ca. 180 snelle colonne in acciaio, presenta lungo il percorso frequenti ondulazioni, fori ed irregolarità, e si snoda per tutta la Fiera, coprendo un percorso pedonale e "avvolgendo" edifici più piccoli destinati a servizi. È attualmente la più grande superficie vetrata d'Europa, ed è divisa in più sezioni da giunti trasversali.

La struttura è costituita da una maglia di profili a T collegati con nodi capaci di una elevata rigidità flessionale, e presenta maglie quadrate nelle zone senza irregolarità geometriche; le lastre rettangolari sono direttamente appoggiate su questa maglia e fermate con piastre di serraggio. Nelle zone caratterizzate da geometrie più complesse invece, il reticolo di aste è formato da maglie triangolari, ottenute dividendo le maglie composte da quattro aste con un'ulteriore asta, più snella delle altre.

In questo modo solo il minimo numero di aste è progettato per assorbire sollecitazioni flettenti (profili a T uniti in corrispondenza del nodo con due bulloni), le altre aste (profili rettangolari connessi al nodo con un unico bullone), collaborano al comportamento globale solo con sforzi assiali (ad esclusione della flessione locale necessaria per sostenere un

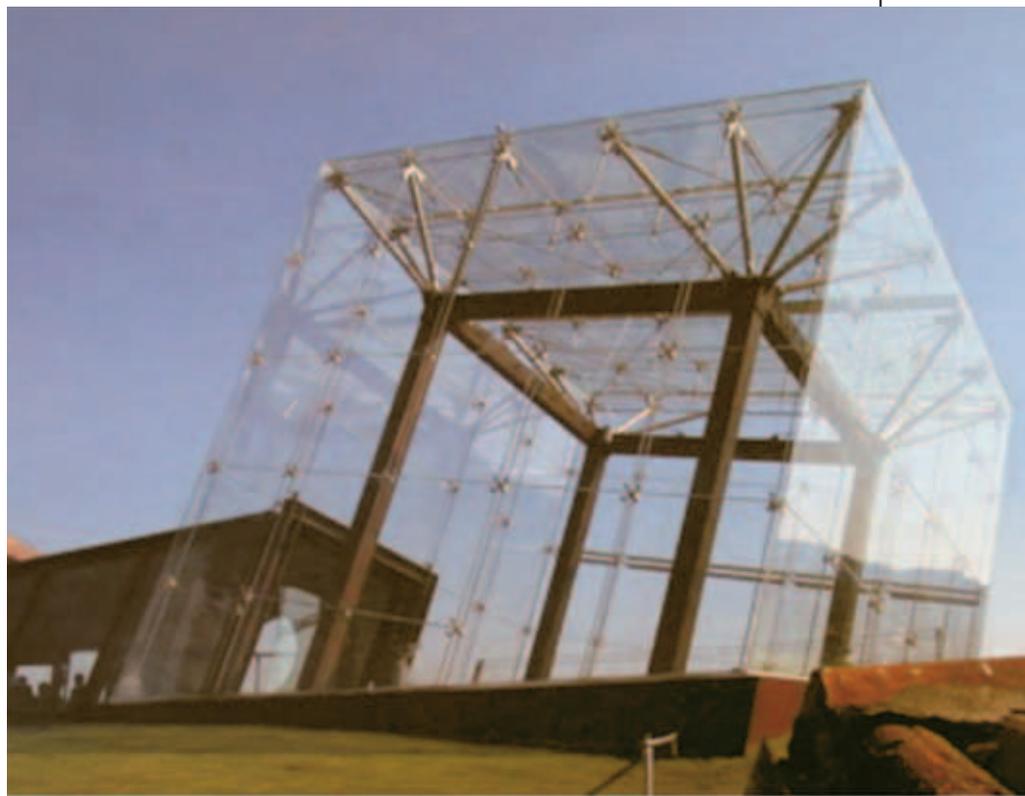


Fig. 7 - Il Cubo delle Cantine Ceretto

lato del vetro). Questo permette di aumentare il livello di trasparenza, oltre a diminuire i costi grazie alla semplificazione dei nodi. Le colonne di sostegno della copertura sono realizzate con profili cavi, al cui interno viene fatta defluire l'acqua meteorica raccolta a mezzo di fori creati in alcuni nodi posti in corrispondenza di piccole depressioni.

Il "Logo" è una struttura dalle forme complesse che emerge sopra i padiglioni nella zona centrale della Fiera. Così come la Vela, è costituita da aste con sezioni a T disposte a maglie triangolari. Il manto di copertura è solo in parte trasparente: una parte delle lastre infatti è in vetro, l'altra è opaca per meglio regolare la distribuzione della luce all'interno del volume.

2.2.3 Copertura della corte interna del Maximilian Museum, Augsburg, 1999: Volta a botte interamente in vetro, irrigidita da reti di cavi

La copertura del Maximilian Museum di Augsburg, realizzata dallo studio di ingegneria Ludwig & Weiler è probabilmente la soluzione di copertura in vetro più ardita tra quelle a tutt'oggi costruite [Ludwig J.J., Weiler H.U.; 2002]. Si tratta di una volta a botte con luce di 14 m e lunghezza pari a 37 m, che utilizza

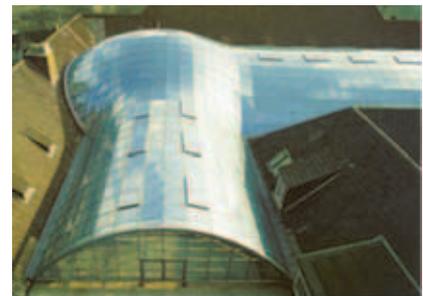


Fig. 8 - Vista delle due volte a botte e della zona di transizione (Immagine archivio ILEK)



Fig. 9 - Particolare del nodo di collegamento (Tratto da *Konstruktive Lösungen in der High-Tech-Architektur*, Brookes A.J., Grech C.)

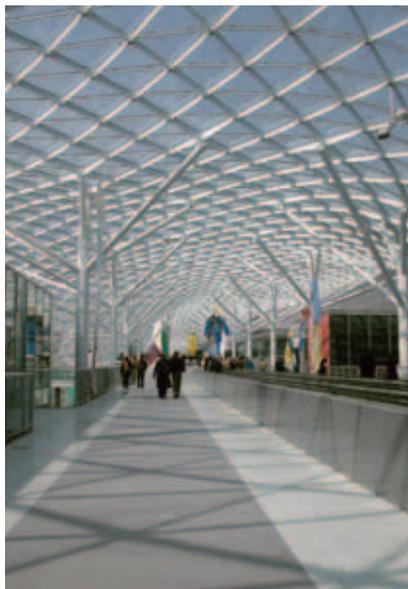


Fig. 10 - La Vela della Nuova Fiera di Milano è composta da parti piane e da zone a forma libera (foto di Giovanni Uguccioni)

a pieno le proprietà strutturali delle lastre in vetro, riducendo la struttura di acciaio ad un insieme di nodi che trasferiscono gli sforzi di compressione tra una lastra e l'altra e da due sistemi di cavi pretesi di irrigidimento. Le lastre, costituite da vetro indurito e stratificato (2 x 12 mm), sono semplicemente collegate con silicone strutturale, in modo da garantire l'impermeabilità della copertura.

La corretta e dettagliata progettazione del nodo è fondamentale in un'opera del genere. Oltre a connettere le lastre tra di loro, infatti, per

ogni nodo passano i cavi di irrigidimento nel piano della volta, disposti lungo le diagonali delle lastre e mantenuti in tensione costante. Agli stessi nodi sono ancorati dei diaframmi verticali di cavi, posti a distanze ravvicinate in modo da irrigidire la volta ed aumentarne resistenza e stabilità. Tali diaframmi poi, tesi verso il basso a mezzo di cavi collegati con la parete perimetrale del cortile, consentono di applicare uno stato di precompressione all'insieme della volta.

Ovviamente in una struttura di questo tipo è essenziale disporre di

un notevole livello di ridondanza e comprendere la ridistribuzione delle forze in caso di rottura locale di una o più lastre. Perciò sono state eseguite prove di laboratorio in scala 1:1 presso le università di Darmstadt e Monaco sia su una singola lastra in vetro che su una parte della volta, compresa tra due diaframmi di cavi. Nelle prove è stato inoltre studiato il rischio di instabilità locale e globale della volta.

2.2.4 Prototipo di volta interamente in vetro strutturale, ILEK, Stoccarda, 2004:

Ancora più radicale e ardito è il prototipo sperimentale di una volta interamente in vetro strutturale progettata e costruita nell'ambito di un dottorato di ricerca svolto da Lucio Blandini [Blandini L.; 2005] presso l'Istituto di Strutture Leggere e Progettazione Strutturale dell'Università di Stoccarda, sotto la supervisione del Prof. Werner Sobek.

L'idea di base è quella di sostituire i nodi metallici con un giunto adesivo situato lungo tutto il bordo della lastra: i giunti adesivi infatti hanno larghezze ridotte, risultando persino meno otticamente invadenti di semplici nodi metallici; inoltre il collegamento lineare delle lastre consente un utilizzo più razionale delle risorse strutturali del vetro, diminuendo la concentrazione locale di tensioni, ed un maggiore livello di sicurezza nel caso di cricche locali.

Tre anni di ricerche e prove sperimentali sugli adesivi strutturali [Blandini L.; 2003] sono stati necessari per adattare le caratteristiche di tali giunti, già utilizzati da decenni con successo nell'industria automobilistica e aeronautica, alle prestazioni richieste nelle costruzioni architettoniche, differenti soprattutto in termini di tolleranze ed esecuzione dei giunti. Il prototipo realizzato al termine di tali ricerche dimostra ancora una volta come proprio i collegamenti siano la frontiera da esplorare per migliorare la qualità delle costruzioni in vetro strutturale.

Un impiego ottimale e appropriato dei materiali ha consentito di ridurre al minimo essenziale il loro impiego risultando infatti solo di 1 cm è lo spessore delle lastre curve di vetro. Una tale snellezza, 1/850, è consentita non solo dall'uso di adesivi e dalla geometria del prototipo,

che permette un livello ottimale delle sollecitazioni [Sobek W., Blandini L.; 2004], ma anche dall'utilizzo di lastre curvate sfericamente da 2 mm, temperate chimicamente e poi stratificate con vetro "float". L'impiego di titanio per l'anello di supporto consente alla cupola in vetro di deformarsi e contrarsi in base alle variazioni termiche senza dover subire alcuna sollecitazione supplementare, grazie alla corrispondenza tra il coefficiente di dilatazione termica dei due materiali. Ne consegue una straordinaria leggerezza dell'insieme esaltata dalle esili colonnine in acciaio inossidabile poste a sostegno dei carichi verticali.

2.3 TRAVI E COLONNE IN VETRO

L'utilizzo del vetro sotto forma di lastre in coperture o facciate è stata storicamente la prima e principale applicazione strutturale dello stesso ma non l'unica. Al giorno d'oggi possiamo infatti citare molteplici realizzazioni di elementi in vetro che svolgono le funzioni statiche più varie: pilastri, puntoni, travi inflesse, etc..

2.3.1 Municipio di St. Germain-en-Laye, 1995

Uno dei primi esempi di uso di pilastri in vetro è il Municipio di St. Germain-en-Laye realizzato nel 1995 (architetti Brunet & Saunier, ingegneri O.T.H./Alto - M. Malinowski), dove 12 pilastri di vetro sostengono un tetto di 500 m² con un modulo di 5,4 x 5,4 m [Schittich G. et al.; 1999]. La sezione cruciforme conferisce duttilità all'insieme, in quanto nell'eventualità che una lastra si rompa, le altre lastre del pilastro saranno comunque in grado di sopportare i carichi. Inoltre, ciascun elemento è costituito da un vetro stratificato formato da tre lastre, in modo che quella esterna, disposta fuori calcolo (10 mm vetro temperato), protegga l'interna (15 mm vetro temperato). Sono stati così combinati con maestria più criteri contemporaneamente, in modo da garantire una gradualità della risposta alle differenti eventualità di danno. Il risultato architettonico è non solo un ambiente dove gli elementi strutturali non disturbano la visuale, ma un cangiante gioco di riflessi che arricchisce di significati ed esperienze lo spazio vitale.

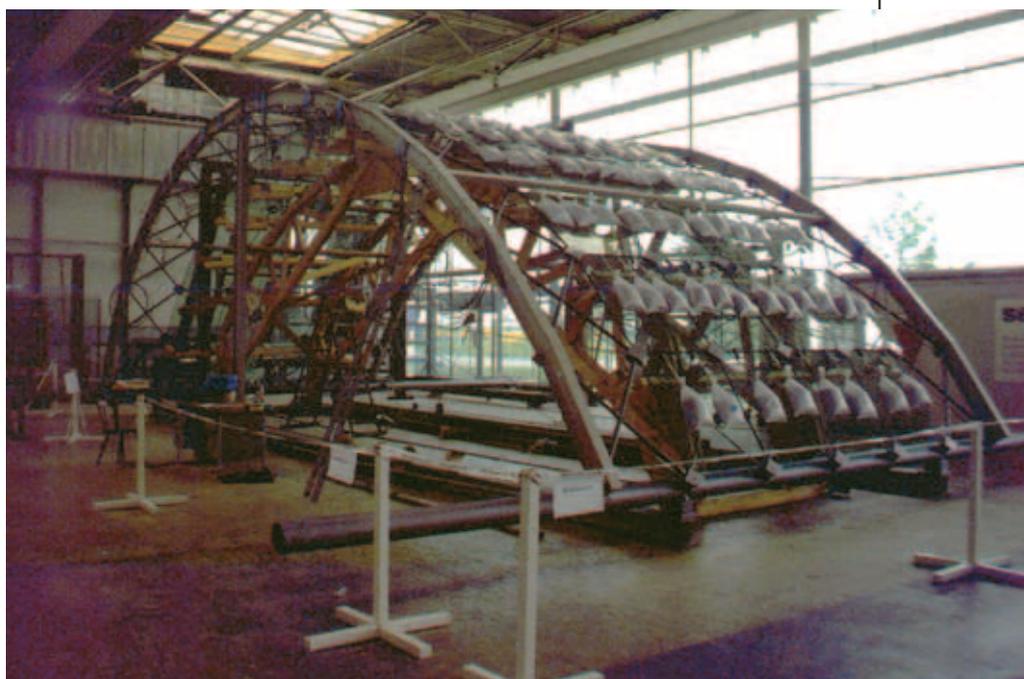
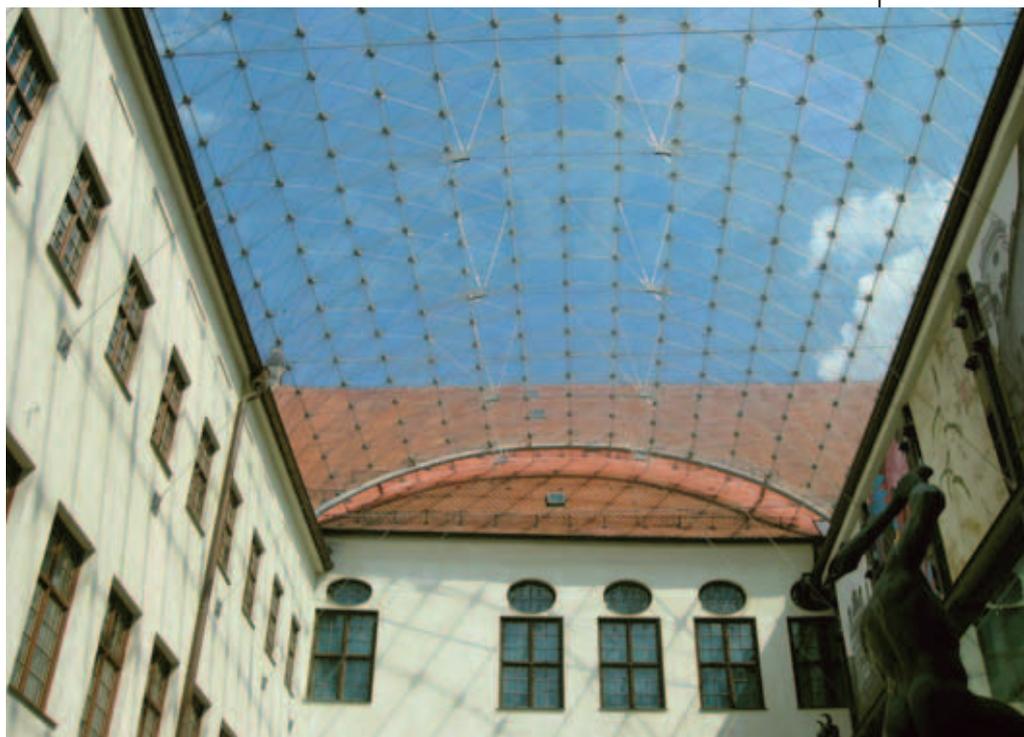


Fig. 11 - Vista d'assieme della copertura (Autore immagine L. Blandini) e prove di carico su un modulo della volta (Autore immagine Ludwig&Weiler Ing.)

2.3.2 Passerelle di vetro, Rotterdam, Arnhem, 1994, 1996

Un altro esempio particolarmente interessante, sebbene di dimensioni limitate, è la passerella di vetro realizzata da Rob Nijse a Rotterdam nel 1994, e l'evoluzione di questa costruita nel 1996 ad Arnhem [Nijse R.; 2003]. La passerella di Rotterdam

ha luce di soli 3.5m e collega in quota tra loro due edifici. La struttura portante - una trave costituita da due lastre disposte di taglio collegate da una terza lastra che funge anche da piano di calpestio - è realizzata interamente in vetro laminato di sicurezza, con elementi di connessione in acciaio inossidabile. Sopra di essa,



Fig. 12 - Vista del prototipo all'università di Stoccarda e dettaglio costruttivo (Immagine archivio ILEK)

due pareti ed una copertura, sempre in vetro laminato, per riparare il passaggio dalla pioggia.

La seconda passerella si differenzia dalla prima per la forma curva della lastra in copertura, per la maggiore luce (3.8m), ma soprattutto perché non presenta elementi di connessione in acciaio: tutti gli sforzi di taglio sono affidati ai giunti in silicone.

2.3.3 Scale di vetro per i negozi Apple, New York / Los Angeles, 2003

Altri esempi interessanti di impiego delle travi in vetro riguardano la costruzione di scale. In particolare, negli anni 2003-2005 sono state sviluppate scale interamente in vetro per alcuni negozi Apple negli USA ed in Giappone grazie alle intuizioni dell'ingegnere Tim MacFarlane. Anche in queste strutture, così come nelle passerelle viste in precedenza, le

parti più delicate sono le connessioni, realizzate in acciaio inossidabile con interposizione di altri materiali più deformabili quali neoprene, alluminio, etc.. Le lastre portanti, così come i gradini, sono costituite da vetro laminato.

Le prime scale a struttura vitrea sono state realizzate in retto, ma gli esempi più recenti comprendono anche scale elicoidali, in ogni caso tutte di estrema leggerezza e trasparenza, tanto che il maggior problema riscontrato è stato paradossalmente quello di vincere la naturale riluttanza degli utenti a camminare sopra una struttura così diafana ed eterea.

2.3.4 Franz Schmitz Haus Pavilion, Rheinbach 2003

Nell'edificio progettato in Rheinbach dagli architetti Marquardt & Hieber e dagli ingegneri Ludwig & Weiler tutti gli elementi portanti verticali sono costituiti da pannelli in vetro stratificato e temperato. Anche se il vetro è un materiale estremamente resistente alle azioni di compressione, l'estrema snellezza di queste lastre associata alla possibilità di rotture localizzate di tipo accidentale hanno imposto ai progettisti di studiare con particolare attenzione la stabilità a carico di punta dei pannelli in vetro stratificato.

È stato inoltre necessario studiare i vari scenari che possono presentarsi in seguito al collasso accidentale di ciascuna di queste colonne controllando in ogni caso che fosse scongiurato l'innescò di meccanismi di collasso globale tipo "domino" dell'intera struttura. Una speciale atten-

zione da parte dei progettisti è stata quindi riservata alla valutazione di tutte le possibili azioni eccezionali che possono investire l'edificio come ad esempio eventuali impatti di persone o di corpi scagliati per atti vandalici. Per risolvere in modo sistematico ed approfondito i numerosi problemi strutturali è stata sviluppata un'intensa attività sperimentale [Wellershoff, F., Sedlacek G.; 2003], nel corso della quale elementi in scala reale sono stati sottoposti a prove distruttive e non distruttive.

3. CENNI SUL COMPORTAMENTO STRUTTURALE DEL VETRO E SULLE TECNICHE DI PROGETTAZIONE

3.1 LA RESISTENZA MECCANICA DEL MATERIALE

Per rompere i legami chimici interatomici di un comune vetro al silicio occorrerebbe teoricamente applicare tensioni di trazione intorno ai 14000 MPa [Kelly A.; 1973]. La resistenza a trazione delle fibre di vetro risulta invece appena superiore a 2000 MPa e misure di resistenza a trazione di lastre di vetro mostrano, oltre alle ben note caratteristiche di rottura fragile, valori massimi non superiori a circa 200 MPa accompagnati da una notevole dispersione dei dati. Il comportamento fragile del vetro e la enorme riduzione di resistenza che si osserva aumentando le dimensioni dei campioni possono essere attribuite essenzialmente alla incapacità del materiale di ridistribuire plasticamente le concentrazioni di sforzo

e quindi al fatto che anche cricche superficiali microscopiche, che gli attuali processi produttivi non sono in grado di emendare, abbiano profondità tale da innescare propagazioni instabili della fessura (cricche di *Griffith*). Ovviamente, in presenza di uniforme densità dei difetti, tanto maggiore è la estensione superficiale di un campione, tanto maggiore è la probabilità che almeno una cricca raggiunga la profondità critica [Menčík J.; 1992].

Per questo motivo la distribuzione statistica della resistenza di lastre di vetro semplice (*Float glass*) è molto dispersa, implicando resistenze di calcolo di 21 MPa sotto condizioni di carico di breve durata, e di soli 10MPa per carichi di lunga durata secondo quanto indicato nel progetto di norma prEN13474-3 (CEN/TC129/WG8). Alcuni autori inoltre ritengono per questo motivo che il vetro non possa essere classificato semplicemente in base alla resistenza, quanto piuttosto in base alla probabilità di successo in funzione del livello tensionale, il che rende necessaria un'analisi di tipo probabilistico condotta normalmente utilizzando distribuzioni alla Weibull [Weibull W.; 1951].

2.2 LA TEMPERA

Per migliorare la resistenza del vetro si può ricorrere a processi di tempera termica o chimica [Hess R.; 2004] grazie ai quali si induce uno stato di precompressione delle zone prossime alla superficie che neutralizza l'effetto delle cricche superficiali, inibendone la propagazione. Le tensioni di compressione sono equilibrate da tensioni di trazione di minore entità all'interno della lastra dove risultano meno pericolose.

La tempera termica viene realizzata mediante riscaldamento uniforme della lastra oltre la temperatura di rammollimento e successivo veloce raffreddamento delle superfici mediante getti d'aria; le zone in prossimità delle superfici, raffreddate, si contraggono e la parte interna, ancora a temperatura elevata, segue plasticamente la deformazione. Quando anche la parte interna inizia a raffreddare e contrarsi, le parti esterne, già rigide, oppongono resistenza e sviluppano tensioni di compressione che possono giungere fino a 150 MPa.



Fig. 13 - Municipio di St. Germain-en-Laye, 1995. Vista d'insieme e dettaglio (Tratte da *Glass in Structures*; Rob Nijse)

La tempera chimica [Macrelli G.; 2002] consiste nell'immergere il manufatto di vetro in un bagno di sali fusi di potassio. Alla temperatura di circa 450 °C, inferiore alla temperatura di rammollimento, avviene lo scambio tra gli ioni Na⁺ presenti nel vetro con gli ioni K⁺ presenti nella soluzione chimica; questi ultimi, di volume maggiore, conferiscono alla superficie uno stato di compressione residuo che può arrivare oltre a 300 MPa. La tempera chimica, al contrario di quella termica, può essere applicata a vetri molto sottili (< 2.5 mm) oppure con caratteristiche di-

mensionali e curvature complesse [Lani L., Bernardini F.; 2004].

Il vantaggio del vetro temperato è quello di esibire oltre ad una buona resistenza agli urti ed alle azioni termiche, una resistenza di calcolo a trazione più elevata; in genere pari a circa 75 MPa per carichi di breve durata secondo la prEN 13474 [M. Froli, L. Lani; 2005]. Per contro, oltre ad un maggior costo, il vetro temperato è suscettibile di rottura spontanea [Bordeaux F.; 1997] dovuta ad inclusioni di solfuro di nichel. Per prevenire tale pericoloso fenomeno il vetro può essere sottoposto a *heat*

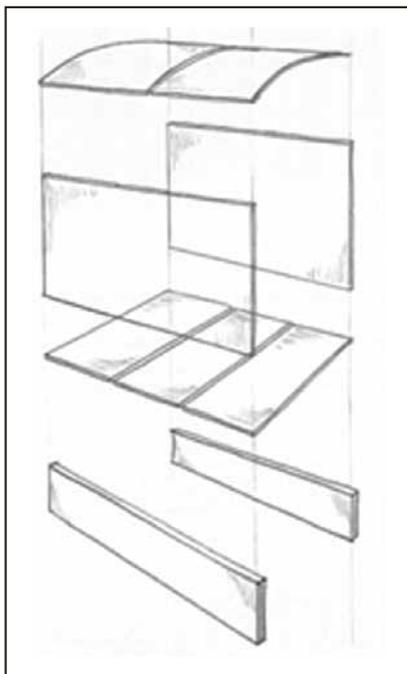


Fig. 14 - La passerella di Rotterdam vista da sotto ed esploso assometrico di quella di Arnhem. Nella terza immagine un puntone di vetro
(Tratte da *Glass in Structures*; Rob Nijse)



Fig. 15 - Scale integralmente vitree: Joseph Shop in Slogane Street, London; Apple Store, Los Angeles

sock test (bagno termico) tramite il quale si riesce a selezionare le lastre difettose sottoponendole per un certo tempo ad elevate temperature.

In ogni caso è necessario effettuare tutte le lavorazioni, quali ad esempio forature, tagli, cianfrinature, prima del processo di tempera, in quanto quest'ultimo determina un grande accumulo di energia elastica da autotensioni che si libererebbe istantaneamente se il vetro venisse tagliato o forato in un punto. Proprio per l'accumulo di energia in questione il

comportamento a rottura del vetro temperato differisce sostanzialmente da quello non temperato. Quest'ultimo si rompe infatti in scaglie di grandi dimensioni, che consentono per un verso di mantenere una certa capacità portante residua in presenza di accoppiamento con altri materiali plastici ma che risultano per altro verso più pericolose in caso di crollo. Il vetro temperato si frantuma invece in tante piccole componenti, perdendo quindi ogni capacità portante ma risultando meno pericoloso per l'incolumità delle persone che potrebbero trovarsi al di sotto di esso. Per tale motivo alcune norme specificano le dimensioni massime consentite delle particelle di vetro temperato dopo la rottura.

Un compromesso tra le qualità del vetro temperato e di quello non temperato è il vetro parzialmente temperato, detto anche "indurito" (*heat-strengthened glass*): esso è ottenuto con un processo simile a quello di tempera termica completa, ma il raffreddamento avviene più lentamente. La resistenza di calcolo è inferiore a quella del vetro temperato (~40 MPa), ma la modalità di rottura è simile a quella del vetro non temperato, ed è molto poco suscettibile a rotture per inclusione di solfuro di Nichel.

2.2 METODI DI PROGETTAZIONE STATICA IN VETRO STRUTTURALE

Il comportamento fragile, unito alla forte aleatorietà delle caratteristiche di resistenza, è tale da pregiudicare la sicurezza anche della lastra



Fig. 16 - F.Schimtz Haus Pavilion
(Tratta www.workshop-archiv.de)

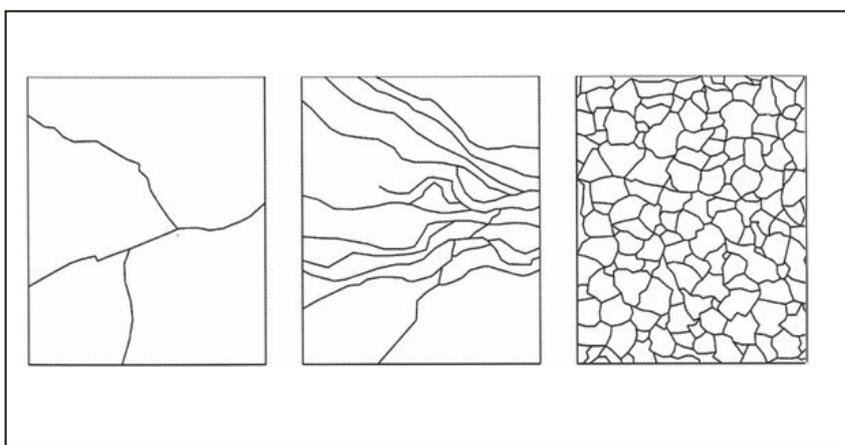


Fig. 17 - Meccanismi di frattura in diversi tipi di lastre di vetro
(Float, indurito, temperato) (Immagine archivio ILEK)

più cautelativamente dimensionata. Questo fatto, che ha escluso per lungo tempo il vetro dal novero dei materiali strutturali "ingegnerizzabili", può essere superato solo ricorrendo ai concetti [Rice P., Dutton H.; 2004] di gerarchia e ridondanza. Mediante la prima vengono assegnate con precisione indici di importanza ai diversi elementi strutturali (primario, secondario, etc.), mentre la seconda consiste nel moltiplicare gli elementi essenziali in modo che in caso di rottura dell'uno, altri continuino ad esercitarne la funzione [Blandini; 2002].

È questo un approccio usato da decenni con successo nella progettazione aeronautica dove è accettato che alcuni componenti possano collassare in situazioni estreme senza però influenzare la stabilità globale del sistema (*fail safe*). L'applicazione dei concetti di gerarchia e ridondanza consente di ottenere, a livello di struttura, quella duttilità mancante a livello di materiale e di singolo elemento strutturale. A quest'ultimo livello, l'applicazione del concetto di ridondanza può ad esempio portare all'utilizzo del vetro laminato o stratificato (*laminated glass*). Oltre all'uso di PVB o di altre sostanze sintetiche nella laminazione è possibile aggiungere [Sobek W. et al.; 2004] anche sottili reti in metallo o in fibre di vetro o ancora in fibre di carbonio per migliorare la resistenza residua della lastra dopo la rottura di uno o più componenti. Un'altra tecnica per aumentare la resistenza residua delle lastre è quella di avere nella lastra stratificata almeno una componente in vetro non temperato o comunque temperata parzialmente, in modo che il vetro conservi capacità portante anche a seguito della rottura di tutte le lastre.

Il comportamento flessionale del vetro laminato varia con la durata dei carichi: per sollecitazioni di breve durata e a 10-20 °C si possono ragionevolmente assumere che gli strati di materiale di interfaccia si mantengano rigidi a taglio e perciò considerare tutto lo spessore monolitico. Per carichi di maggiore durata o per temperature più elevate invece questa assunzione non è valida, per via del comportamento viscoplastico delle resine sintetiche ed occorre considerare le singole lastre che lavorano in parallelo o valutare

opportunamente una situazione intermedia. D'altra parte, la maggiore duttilità dell'elemento laminato rispetto all'elemento singolo consente di considerare coefficienti di sicurezza inferiori e perciò dimensioni inferiori delle singole lastre.

Nella progettazione in vetro diventa pertanto fondamentale il contributo della statistica, che indica con quale probabilità si possano rompere un certo numero di lastre; la verifica strutturale verrà quindi effettuata escludendo tali elementi dalla zona maggiormente sollecitata. È importante verificare quindi che la strut-

tura sia in grado di redistribuire i carichi eventualmente progettando a priori possibili percorsi alternativi per le sollecitazioni. Per tale motivo è necessaria nella progettazione in vetro strutturale una precisione molto maggiore rispetto al consueto. Un errore di valutazione o l'ambiguità nella definizione dei ruoli degli elementi, può portare con facilità a comportamenti impreveduti ed inficiare così la capacità portante della struttura. Ma tale complessità di progettazione strutturale, se superata, si traduce in un notevole contributo alla qualità architettonica



Fig. 18 - Due esempi di ridondanza strutturale: 1. Confronto tra la resistenza residua di lastre stratificate temperate con e senza armatura metalliche (Immagine archivio ILEK); 2. vetro anti-sfondamento ottenuto con l'accoppiamento a mezzo di laminazione di più lastre di cui almeno una non totalmente temperata: il vetro rimane al suo posto anche a seguito della rottura di tutte le lastre

dell'insieme: la costruzione in vetro, in virtù della sua leggibilità, acquista così un notevole valore estetico e architettonico.

4. CONCLUSIONI

Gli esempi riportati mostrano come il campo delle costruzioni in vetro strutturale e acciaio apra nuovi percorsi e opportunità alla costruzione metallica nei quali sia l'approccio architettonico agli spazi che quello strutturale ai sistemi statici e ai dettagli costruttivi vengono ridefiniti

in modo produttivo. Questo settore consente ai progettisti di riconquistare il ruolo e l'attitudine di dare risposte diversificate e innovative, in quanto le esigenze sono sempre nuove. La visione rivoluzionaria di superfici continue vetrate con qualità che raggiungano obiettivi collocati oltre la semplice trasparenza risale già agli anni 20 ma è ben lontana dall'essere compiutamente esplorata. Vale quindi la pena di investire in questa direzione, sulla base di una sinergia indispensabile tra progetta-

zione, produzione e ricerca.

Prof. dr. ing. Maurizio Froli

Dr. ing. Leonardo Lani

Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa

Dr. ing. Lucio Blandini

Istituto di Strutture Leggere e Progettazione Strutturale (ILEK), Università di Stoccarda

Ove non diversamente specificato il materiale fotografico è stato fornito direttamente dagli autori.

Bibliografia

AA.VV., *Structural use of glass in buildings*, The Institution of Structural Engineers, 1999.

Bassignana M., *La concezione strutturale delle costruzioni in vetro*, Workshop "Costruire con strutture in vetro", Pisa 19-20 Marzo 2004, TEP, 2004.

Blandini L., *Vetro strutturale, presente e futuro*, La concezione strutturale nel progetto di architettura, ed. Siviero E., Benedetti A, Editrice Compositori, Bologna, 2002

Blandini L., *Volte in vetro: realizzazioni, ricerche, prospettive*, Archi, n. 6, Edizioni Casagrande, Bellinzona, Svizzera, 2002.

Blandini L., *Structural use of adhesives in glass shells*, Proceedings of Glass Processing Days 2003, Tampere, 2003.

Blandini L., *Structural use of adhesives in glass shells*, PhD Thesis, D 93 University of Stuttgart, Verlag Grauer, Stuttgart, 2005.

Bordeaux F., Kasper A., *Optimized heat soak test to eliminate dangerous nickel sulphide stones in heat strengthened and tempered glasses*, Proceedings of the ESG annual meeting "Fundamentals of Glass Science and Technology".

CEN/TC129/WG8 – N176E, European Standard (draft), *Glass in Building – Design of glass panes – Part. 3: General basis of design, design of glass by calculation for non-fenestration use and design of glass by testing for any use*, May 2003.

Froli M., *Relazione introduttiva del Workshop "Costruire con strutture in vetro"*, Pisa 19-20 Marzo 2004, TEP, 2004.

Froli M., Lani L., *Determinazione probabilistica della resistenza a flessione di campioni di vetro temperati chimicamente e termicamente*, Rivista del Vetro, n°7, 2005.

Haag Bletter R., *The Interpretation of the glass dream – expressionist architecture and the history of the crystal metaphor*, J. of the Society of Architectural Historians, Vol. XL, n.1, 1981, p. 21.

Havemann K., Düster H., *Neue Messe Mailand – Verglasung der Freiformfläche, Stahlbau*, Heft 5, 2005.

Hess R., *Material glass*, Structural Engineering International 2/2004.

Kelly A., *Strong solids*, Clarendon Press, 1973.

Lani L., Bernardini F., *Tempera chimica, produzione di lastre piane stratificate a semplice e doppia curvatura*, Workshop "Costruire con strutture in vetro", Pisa 19-20 Marzo 2004, TEP, 2004.

Loughran P., *Falling Glass, problems and solutions in contemporary architecture*, Birkhäuser, Basel 2003.

Ludwig J.J., Weiler H.U., *Tragstrukturen aus Glas am Beispiel einer Ganzglastonne*, Bautechnik 77, Helft 4, 2002.

Macrelli G., *Process control methods for chemical strengthening of glass on industrial scale*, Glass Technology, Vol. 43 C, 2002.

Menčík J., *Strength and fracture of glass and ceramics*, Elsevier, 1992.

Neumeyer F., *The artless word: Mies Van Der Rohe on the building art*, MIT Press, 1991.

Nijssse R., *Glass in structures, elements, concepts, design*, Birkhäuser, Basel 2003.

Rice P., Dutton H., *Structural glass*, Spon Press, II° edition, London 2004.

Schittich G., Staib G., Balkow D., Schuler M., Sobek W., *Atlante del vetro*, UTET, 1999.

Schlaich J., Bergermann R., *Leicht Weit, light structures*, Prestel Verlag, München 2003.

Schlaich J., Schober H., *Recent glass roofs*, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) vol.40, n°131, 1999.

Schlaich J., Schober H., Knippers J., *Detail*, n. 4, 1999.

Sobek W., Blandini L., *Prototype of a frameless structural glass shell*, Proceedings of the IASS International Symposium on "Shell and spatial structures from models to realization", Montpellier, 20-24 September 2004.

Sobek W., Maier F., *Reinforced laminated safety glass*, Translucent Materials, ed. Frank Kaltenbach, Edition Detail, Munich, Germany, 2004.

Weibull W., *A Statistical distribution function of wide applicability*, J. Appl. Mech, 18, 293-297.

Wellershoff, F., Sedlacek G., *Glass Pavilion Rheinbach, stability of glass columns*, Proceedings of Glass Processing Days 2003, Tampere, 2003.

Wigginton M., *Glass in architecture*, Phaidon Press, paperback edition, London, 2002.