

**Zeitschrift:** Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (2007)

**Heft:** 4

**Artikel:** Strutture in vetro

**Autor:** Sobek, Werner

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-133730>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 22.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Introduzione

È ferma convinzione dell'autore che tessili e vetro hanno il maggiore potenziale di sviluppo tra tutti i materiali da costruzione oggi utilizzati. I tessili affascinano per la loro resistenza alla tensione (permettendo di stendersi su lunghe distanze), per la loro capacità di respirare e di integrare differenti tipi di materiali così detti PCM (Phase Change Materials).

Il vetro da parte sua assicura una elevata resistenza alla compressione ed una perfetta trasparenza. Inoltre permette di variare il grado di trasparenza tramite l'integrazione nel vetro di materiali che hanno una trasmissione luminosa regolabile. Le attuali tecnologie di coating come pure la possibilità di rinforzare il vetro con differenti materiali irrigidenti aprono un ventaglio pressoché infinito di nuove vie per l'utilizzo del vetro. Vi è grande spazio per ulteriori ricerche e sviluppi in riferimento a questo affascinante materiale. E mentre il vetro è stato usato quale materiale da costruzione per secoli, le sue caratteristiche strutturali sono divenute materiali di seria ricerca solo nel corso degli anni Ottanta. A partire da quel periodo sia il comportamento del vetro alla sopportazione al carico come pure le sue caratteristiche al collasso e le possibilità di variare la sua trasmissività alle radiazioni sono state ampiamente studiate. Ma una serie di interessanti quesiti rimane pur sempre non ancora trattata.

## Il vetro e il suo comportamento strutturale

Le proprietà meccaniche del vetro quale materiale strutturale sono state studiate in modo esteso e ampiamente discusse nel corso degli ultimi anni. Per dirla in breve: il vetro ha un comportamento elastico perfetto, d'altra parte non dimostra alcuna capacità di plastificare oppure di piegarsi in zone puntuali sotto elevata tensione. I problemi risultanti da questo comportamento sono stati ampiamente ricercati, ma non risolti. Mentre da un lato la resistenza alla compressione non è in alcun modo affetta da microfessure, d'altra parte la resistenza alla rottura del vetro rimane

drammaticamente condizionata dall'esistenza inevitabile di tali cricche. Indurire, temperare termicamente oppure chimicamente il vetro aiuta a ridurre questo problema, ma solo in una misura molto limitata: il limite di resistenza alla rottura consentito viene spostato a 30-50 N mm<sup>-2</sup>, un valore che rimane pur sempre deludentemente basso. Inoltre, la mancanza di qualsiasi comportamento plastico limita l'estensione ad altri possibili progetti e necessita l'introduzione di scenari al punto di rottura anche nel caso di piccole e semplici strutture.

Fintanto che non potrà essere raggiunta la capacità del materiale di plastificare in zone di elevato stress puntuale, componendo o trattando il materiale base in altro modo, la limitata resistenza alla rottura e l'effetto di rottura spontanea rimangono le due principali caratteristiche che condizionano la progettazione di elementi in vetro portanti.

Un metodo per potere assicurare una certa qual capacità portante post rottura è quello di laminare lastre di vetro con PVB (Polivinilbutirale), un metodo ampiamente utilizzato negli ultimi quattro decenni. In caso di rottura le parti rotte aderiscono alla lastra non rotta tramite il film in PVB. Tuttavia, nel caso in cui le due lastre si rompessero, il comportamento viscoso del PVB non fornisce sufficiente capacità portante, in particolare modo in presenza di elevate temperature e sull'arco di un lungo periodo di tempo.

Un rimarchevole miglioramento del comportamento post rottura del vetro stratificato può essere raggiunto inserendo un rinforzo sotto forma di fibre o di sottili strati tra le due lastre di vetro. Questa idea risale a ricerche effettuate nel 1996 dall'autore e dai suoi assistenti. Ne risultò immediatamente che un certo tipo di intercalare può migliorare il comportamento post rottura del vetro in modo assai marcato. Gli intercalari sottoposti a test erano composti da fibre in acciaio inossidabile e da combinazioni di fibre in vetro e carbonio disposti parallelamente (Fig. 1). Furono pure provati sottili tessili fatti con lo stesso materiale.



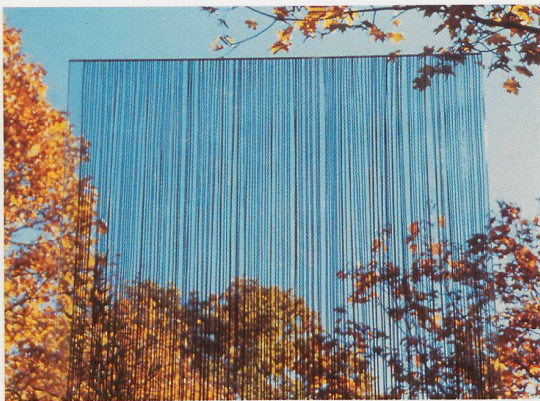


Fig. 1 – Vetro stratificato rinforzato con fibre di carbonio. Il rinforzo rigido permette di ottenere una capacità molto elevata di portata di una lastra in vetro completamente rotta.



Fig. 2 – Capacità portante di pannelli in vetro stratificato completamente rotti. Mentre la lastra in primo piano è collassata, pochi secondi dopo tutte e due le lastre sono state distrutte volontariamente. Quella in secondo piano, pure completamente rotta, resiste ininterrottamente dal 1998 sempre con un carico di 5Kg.

In un secondo tempo sono state introdotte lamiere di metallo perforate. In tutti i casi il rinforzo fu incluso tra due intercalari in PVB, i quali a loro volta furono assemblati tra due lastre di vetro.

La capacità portante di un vetro stratificato con PVB completamente rotto dipende da due fattori. Il primo punto concerne la resistenza alla compressione dei frammenti di vetro e la loro capacità di trasferire le forze di compressione tramite la rispettiva pressione di contatto. Il secondo importante aspetto è la capacità del PVB di assorbire le forze di tensione. Questa capacità è relativamente modesta e viene ulteriormente indebolita in caso di elevate temperature e umidità e in caso di deformazione permanente. Da una lato un rinforzo con speciali fibre o sottili lastre in metallo possono assorbire le forze di trazione, dall'altro il PVB è in grado di trasferire unicamente le forze di taglio. Un rinforzo con fibre o sottili lastre di metallo ha una rigidità molto più elevata rispetto al PVB. Di fatto un tale rinforzo agisce nello stesso modo di un rinforzo in acciaio nel calcestruzzo, portandolo ad un eccellente comportamento post rottura (Fig. 2).

Naturalmente ulteriori rinforzi puntuali possono essere previsti per rinforzare un vetro stratificato in caso di rottura per esempio attorno ai punti di fissaggio oppure in particolari zone laddove viene introdotta nel vetro una elevata concentrazione di forze.<sup>1,2,3,4</sup>

#### Regolamentazione della trasmissività

Vi sono particolari situazioni nelle quali una modifica non permanente della elevata trasparenza del vetro può essere utile. La ricerca di una temporanea privacy oppure la riduzione del flusso di

energia termica attraverso una facciata in vetro ne sono alcuni esempi.

La possibilità di modificare la trasmissività della luce attraverso il vetro oppure in termini più generali dell'irraggiamento, potrebbe permettere una vasta gamma di nuove interessanti applicazioni. Facciate adattabili oppure involucri dell'edificio con un flusso di luce e di energia ottimizzato diventerebbero realtà. Nel contesto della nostra ricerca su involucri di edifici adattabili e realizzati con materiale tessile abbiamo allargato il campo di ricerca e sviluppo pure al materiale vetro. Contrariamente ad altri sistemi al momento sviluppati (p. e. sistemi termocromici, gasocromici oppure elettrocromici), il nostro sistema impiega una tecnologia che permette non solo di commutare il vetro da trasparente a traslucido oppure opaco. È altresì possibile rendere la trasmissività infinitivamente variabile. Quest'ultimo può essere ottenuto usando cristalli liquidi nematici inclusi tra due lastre di vetro.<sup>8,9</sup>

Sistemi basati su cristalli liquidi nematici sfruttano le proprietà intelligenti di tali cristalli e pertanto permettono un controllo attivo e veloce dell'irraggiamento e della trasmissione luminosa. Questi sistemi derivano dalle ben note celle a cristalli liquidi utilizzati nei displays. Fino ad ora non sono stati ritenuti adatti per una analogha applicazione all'esterno di un edificio. Il motivo è da ricercare nella sensibilità di alcuni componenti del sistema di fronte ad importanti fattori esterni (come per esempio le sollecitazioni termiche e l'irraggiamento dei raggi UV) e ad elevati costi di produzione. Recenti sviluppi nelle tecnologie di produzione rendono ora possibili l'applicazione della tecnologia a cristalli liquidi anche su determinati tipi di serramento, ad un costo non più



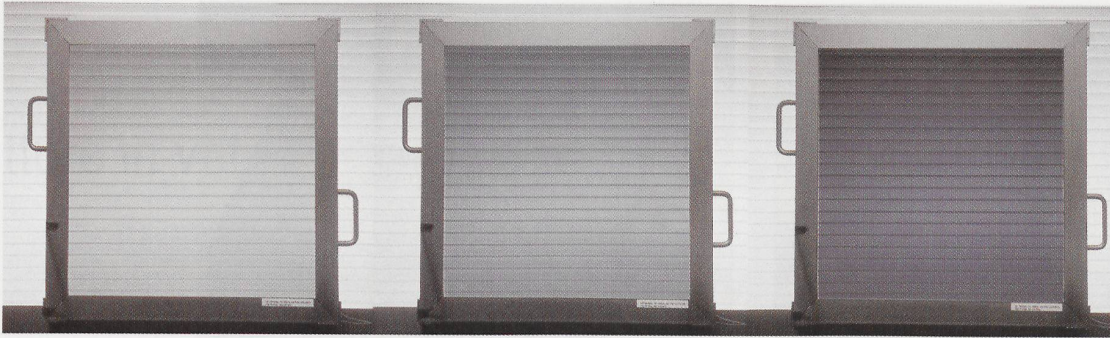


Fig. 3 – Lastre in vetro commutabili, basati su cristalli liquidi nematici.

proibitivo ed avendo nel contempo risolto i problemi di durabilità fino ad ora riscontrati.

I vantaggi di una finestra a cristalli liquidi in confronto ad una soluzione basata su principi termografici, elettrocromici oppure gasocromici sono considerevoli. Tra i principali vantaggi di questo tipo di finestra possiamo annoverare: una veloce commutabilità, un basso consumo energetico, una trasmissione infinitamente variabile all'interno di determinati limiti, una ridotta possibilità di errore del colore, come pure bassi costi di installazione e manutenzione. Vari prototipi sono stati sviluppati e prodotti dagli autori. Essi sono stati testati esponendoli all'ambiente esterno per un lungo periodo e sono pure stati sottoposti a test accelerati. I risultati dimostrano che questi nuovi sistemi sono molto stabili e mantengono le loro caratteristiche su un lungo periodo di tempo. La ricerca ha potuto pertanto essere approfondita in cooperazione con partners provenienti dall'industria del vetro (Fig. 3).

#### Giunti in vetro

Giunti in vetro studiati in modo tale da potere trasmettere il carico da un elemento all'altro vengono impiegati in particolare modo quali fissaggi puntiformi. Tuttavia un fissaggio puntuale causa sempre una concentrazione di tensioni nel vetro, ciò che riduce l'efficienza strutturale. Il fissaggio meccanico è geometricamente più ingombrante e di conseguenza rovina l'effetto di superficie liscia della vetratura. Saldare, una tecnologia ampiamente applicata nel vetro utilizzato nell'industria chimica, non è applicabile al vetro impiegato nell'industria edile. Pertanto l'unico modo per assicurare un trasferimento strutturale efficiente ed armonioso da un elemento in vetro ad un altro rimane l'incollaggio.

L'incollaggio del vetro è largamente utilizzato nelle applicazioni industriali, l'industria automobilistica ed altre ancora. I parabrezza degli autobus per esempio vengono utilizzati quali elementi

di irrigidimento della carrozzeria dell'automezzo stesso, «attivando» il giunto incollato tra il vetro ed il corpo metallico quale elemento di trasferimento del carico. Tuttavia in molti paesi, a parte qualche eccezione, l'incollaggio strutturale non è consentito nel campo edile. Le principali ragioni per tale regolamentazione sono da una parte la mancanza di una resistenza all'ambiente pienamente collaudata a lungo termine e d'altra parte la diminuzione della resistenza dei giunti incollati con l'innalzamento delle temperature fino ad annullarsi completamente, a dipendenza del tipo di colla impiegata, a circa 70-120 gradi Celsius. In ogni modo, tutti gli ostacoli precedentemente



Fig. 4 – Copertura a struttura reticolare in cavi a Bad Neustadt e rivestimento con assicelle in vetro.



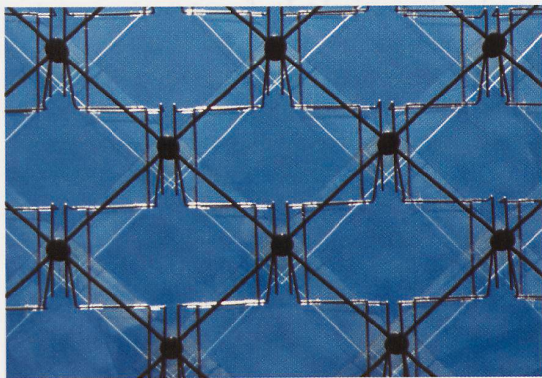


Fig. 5 – Il dettaglio della copertura di Bad Neustadt mostra l'effetto ottico supplementare ottenuto tramite fili metallici che stringono le lastre in vetro.

elencati si riferiscono a giunti incollati di piccolo spessore. Giunti incollati con uno spessore di 10-12mm (una larghezza richiesta al fine di compensare tipici effetti dovuti alle tolleranze) non sono neanche stati considerati fattibili con le tecnologie tradizionali di incollaggio.

Nell'ambito della nostra ricerca su involucri in vetro «senza metallo» ci siamo confrontati con la necessità di trovare una soluzione a questo problema. Dopo intense discussioni con i principali produttori di sistemi di incollaggio, sono stati prodotti particolari composizioni modificate di colle e quindi testate in differenti serie di test, il tutto a diverse temperature e livelli di umidità, nel breve periodo come pure sotto carico permanente. Dopo una prima valutazione dei risultati dei vari test, le colle sono state nuovamente modificate e quindi sottoposte a nuovi test. I risultati ottenuti sono alquanto incoraggianti, motivo per il quale stiamo approfondendo questo settore di sviluppo. La situazione attuale della nostra ricerca ci permette già di costruire una copertura in vetro sferica con un diametro di 8,5m, con un vetro stratificato che ha uno spessore di soli 2/8mm. I giunti tra le lastre di vetro curvo che formano la copertura hanno una larghezza di 10-20mm. La copertura è stata costruita nell'aprile del 2004 nelle immediate vicinanze del nostro istituto, rilevando tutte le temperature, nonché i carichi del vento e della neve.

#### Il vetro come elemento di rivestimento per strutture con cavi altamente flessibili

Nell'ambito della ricerca della trasparenza e luminosità i cavi e le strutture reticolate con cavi sono stati uno tra i primi strumenti utilizzati. Essi sono stati ampiamente ricercati da Frei Otto ed altri.<sup>6</sup> Le tecnologie per progettare, produrre ed installare tali strutture sono state sviluppate ad un livello molto alto.

#### Struttura reticolata con cavi

Le strutture reticolate con cavi sono un sistema molto efficace, particolarmente per ponti a campata medio-grande. L'efficienza delle strutture reticolate, tipicamente a doppia curvatura e a maglie quadrate, è basata sul fatto che esse hanno unicamente componenti in tensione. Tuttavia il rivestimento di una struttura reticolata con cavi necessario per racchiudere lo spazio interno di un edificio è difficoltoso, se è richiesta la trasparenza.

Le strutture del tetto per i giochi olimpici di Monaco nel 1972 sono state le prime ad essere realizzate con un rivestimento trasparente, a quei tempi una necessità per permettere la radiotrasmissione a colori. Tuttavia a causa della doppia curvatura del tetto e di problematiche relative alla sicurezza non risolte nel contesto dell'impiego del vetro, la copertura è stata realizzata con PMMA (Polimetilmetacrilato). Come è risaputo il PMMA ha un coefficiente di dilatazione termica relativamente elevato ed è idrofilo. Ambedue le caratteristiche richiedono dei larghi giunti in neoprene tra le lastre. Questi giunti hanno un impatto considerevole sull'aspetto architettonico.

Quando all'autore è stato chiesto di costruire una struttura reticolata con cavi di 4'000m<sup>2</sup> a Bad Neustadt, decise quindi di usare il vetro come materiale di rivestimento. La struttura ha complessivamente 24'000 maglie con uno spazio in ogni nodo di 400mm. Essendo la geometria di ogni maglia più o meno diversa dalle altre, era inevitabile usare 24'000 pezzi diversi di lastre di vetro oppure sviluppare un nuovo metodo per il fissaggio del vetro alla rete. È stata scelta la seconda soluzione al fine di rendere la costruzione più semplice. In un processo di ricerca e sviluppo è stato creato un metodo per installare assicelle di copertura in vetro usando lastre di vetro quadrate di 500 x 500mm agganciate saldamente in appositi dispositivi di contatto usando fili in acciaio inossidabile di 5mm di diametro. L'intelaiatura dei fili metallici a sua volta è fissata ai due punti nodali opposti della maglia. Il sistema patentato permette una installazione facile e veloce. Tutto il sistema è dal punto di vista dei costi molto competitivo confrontato ad altre tecniche di copertura.

La distanza tra le assicelle sovrapposte può variare fino a 20mm. Una sovrapposizione sufficiente delle assicelle deve quindi essere assicurata. Inoltre le assicelle devono essere disposte in modo tale che il deflusso della pioggia non penetri nella copertura. Questo punto è assicurato disponendo la rete di cavi sulla superficie del tetto in modo tale che un regolare deflusso dell'acqua ne sia



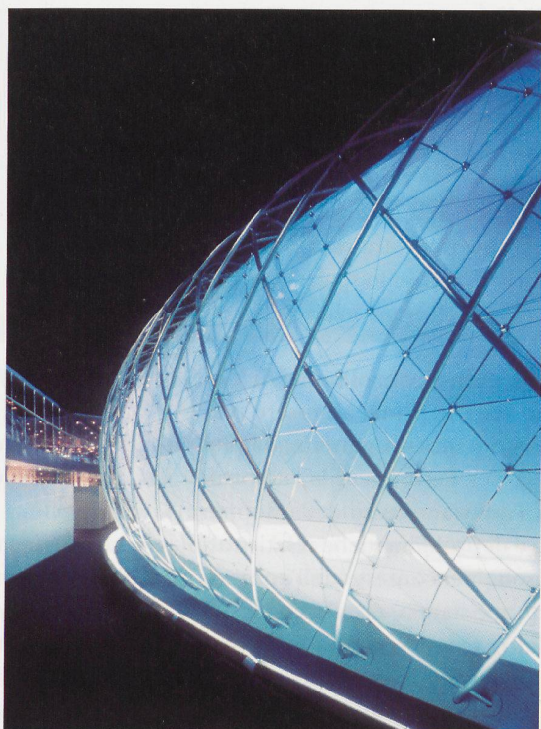


Fig. 6 – Parte del padiglione AUDI di Tokyo

garantito. Il programma informatico necessario per rotare in fase progettuale una rete di cavi a maglia rettangolare su una sagoma a doppia curvatura è assai complesso, seppure basato su principi di per se semplici (Fig. 4, 5).

La soluzione a assicelle in vetro è stata indubbiamente un successo, pur tuttavia decidemmo di usare un'altra soluzione per le pareti a struttura in vetro reticolata con cavi a doppia curvatura del padiglione espositivo di AUDI. In questo caso, trattandosi di una applicazione all'interno non era richiesta l'impermeabilità all'acqua. Ma la superficie in vetro avrebbe dovuto essere più piana possibile. Pertanto 13'500 pezzi triangolari di vetro, raggruppati in 350 differenti geometrie furono installate in un modo tale che gli angoli dei pezzi in vetro potessero scivolare in un apposito dispositivo di contatto in gomma ai punti nodali della rete, evitando in tal modo qualsiasi tipo di fissaggio meccanico. La velocità di posa fu così rapida che i 13'500 pezzi hanno potuto essere installati in meno di 96 ore (Fig. 6).

#### Sistemi a cavi paralleli

Strutture reticolate con cavi perdono una importante parte della loro possibile rigidità se non sono a doppia curvatura bensì piani. Una rete di cavi piana in vetro è stata progettata per la prima volta da Jörg Schlaich per la facciata dell'atrio di un albergo a Monaco. La rete mostra cavi che

scorrono in orizzontale e in verticale. Le forze nei cavi orizzontali sono tipicamente difficili da ancorare (essi richiedono una parete di appoggio oppure delle soluzioni equivalenti) e la progettazione degli angoli in vetro è più o meno impossibile.

L'autore di conseguenza decise di sviluppare un sistema che richiedesse solo l'utilizzo di cavi verticali.<sup>7</sup> Il primo edificio con questo tipo di soluzione è il Foyer centrale dell'Università di Bremen (Fig. 7). L'edificio è una hall vetrata che in pianta misura 22 x 43.5m. L'edificio e la sua parete vetrata è alta 15m. I cavi che formano la struttura portante si stendono dalla copertura fino al pavimento e quindi ancorati tramite speciali molle. Le molle garantiscono uno stato di precompressione nei cavi più o meno costante, indipendentemente dalle variazioni della temperatura e dall'assessamento delle fondamenta. I cavi hanno una suddivisione ogni 1'800mm. I pannelli in vetro sono fissati ai cavi usando un sistema di fissaggio che evita di dovere forare il vetro.

Le deformazioni orizzontali della rete di cavi a Bremen sono di 350mm sotto un estremo carico vento. Al fine di evitare qualsiasi tensione secondaria nel vetro, il sistema di fissaggio delle lastre in vetro deve permettere alla lastra di rotare entro certi limiti. Siccome le flessioni della parete potrebbero causare conflitti geometrici agli angoli, gli angoli sono stati disgiunti rimanendo strutture autoportanti. Tutti i relativi movimenti avvengono nei giunti tra loro e la facciata a cavi flessibili.

Un altro sistema è stato sviluppato per gli angoli della hall d'entrata vetrata alla sede mondiale della Bayer a Leverkusen (Fig. 8). In questo caso una colonna d'acciaio è stata posizionata all'interno dell'area dell'angolo. La colonna sostiene esili profili in acciaio, i quali rimangono orizzontalmente a sbalzo con una lunghezza di 3m su ogni lato. I due cavi verticali sulla destra e sulla sinistra della colonna vengono in tal modo irrigiditi orizzontalmente. Tuttavia la relativa leggerezza dei profili permette una traslazione morbida delle deformazioni dall'area centrale della facciata agli angoli. Nell'area centrale le deformazioni possono arrivare fino a 350mm, nella zona degli angoli rimangono nulle.

Questa semplice ed elegante soluzione è stata pure implementata nella facciata di cavi attualmente in costruzione nei progetti di ampliamento all'aeroporto O'Hare di Chicago. Presso il cantiere O'Hare sono stati impiegati per la vetratura del sistema elementi in vetro isolante. Queste unità (che di per se sono molto più sensibili a rotazioni



e deformazioni) hanno dovuto essere progettate pure per resistere in caso di esplosioni. I calcoli come pure i test di deformazione e di esplosione eseguiti hanno dimostrato che la facciata è in grado di lavorare perfettamente anche in condizioni di carico critiche.

Il più grande sistema di cavi parallelo attualmente in costruzione è quello per la sede mondiale a Francoforte della Lufthansa. In questo caso ben 10 pareti a cavi sono in fase di costruzione, ognuna con una larghezza di 19m ed una altezza di 20m.

#### Strutture costruite in vetro

Naturalmente un obiettivo nell'ambito dell'engineering strutturale del vetro potrebbe essere la creazione di strutture perfettamente trasparenti ovvero strutture completamente vetrate.

La fermata dei bus che è stata progettata nel 1995 per una ditta leader nel campo dei sistemi dell'arredo urbano era, a suo tempo, una costruzione in vetro all'avanguardia. Tutte le lastre in vetro usate erano parte del sistema strutturale. La congiunzione delle lastre fu eseguita tramite dei fissaggi puntiformi ridotti al minimo. Tuttavia questi fissaggi puntiformi richiesero di prevedere fori nel vetro. Ciò causa inevitabilmente una concentrazione di tensioni sui bordi del foro, un effetto che non è certamente adatto dal punto di vista della sopportabilità al carico del vetro. Il nostro lavoro di ricerca ha dimostrato infatti che le concentrazioni di tensioni calcolate per un materiale perfettamente omogeneo e isotropico si sovrappongono con una tensione addizionale causata da cricche superficiali e microfessurazioni dovute al processo di foratura. Hanno pertanto dovuto essere ricercati altri tipi di connessioni al fine di permettere l'uso di vetro portante su larga scala.

La elevata resistenza alla compressione e la altrettanto limitata resistenza alla tensione del vetro ci ha portato all'idea di usare il vetro solo per elementi strutturali in compressione. Costruire una arcata fatta in lastre di vetro vorrebbe significare che la pressione di contatto venga trasferita solo nei giunti. Stabilità e rigidità richiesti nel caso di un carico non simmetrico potrebbero essere assicurati tramite un leggero sostegno superiore ed un'asta sotto tensione posta in diagonale. Il «Glass Arch I» progettato e costruito in base a questi principi ha reso possibile una campata di 10m. Lo spessore del vetro stratificato è 6/6mm (Fig. 9). L'eccezionale leggerezza strutturale, la elevata capacità di portata del carico e la elevata rigidità della struttura ci ha incoraggiato a progettare e

costruire Glass Arch II con una campata di 20m. Lo spessore del vetro in questo caso era di 6/8mm, la larghezza dell'arcata era di 4m. Il peso totale dei pannelli in vetro era approssimativamente di 5 tonnellate<sup>10</sup>. Glass Arch II fu presentato alla fiera internazionale della tecnologia del vetro Glasstec a Düsseldorf (Fig. 10). Al termine della fiera è stato sottoposto ad una distruzione controllata in modo tale da studiare il comportamento alla rottura di strutture in vetro stratificato di sicurezza LSG's (Laminated Safety Glass) in compressione sotto elevati carichi. L'esperimento ha dimostrato le eccellenti qualità dopo la rottura della struttura.

Dato il fatto che l'involucro caricato con un peso morto rimane sotto uno stato biassiale di compressione al di sopra del punto di collasso della congiunzione e tenuto conto dell'eccellente pro-



Fig. 7 – Facciata in vetro a cavi paralleli all'Università di Bremen

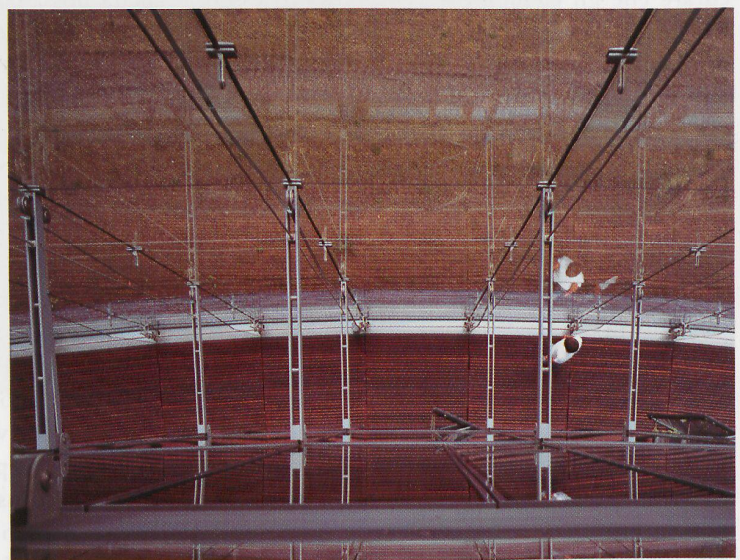


Fig. 8 – Facciata vetrata a cavi paralleli con vetri isolanti alla sede Bayer di Levenkusen





Fig. 9 – Glass Arch nr.1 con una campata di 10m

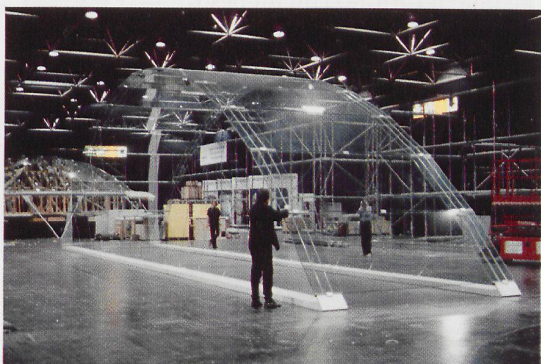


Fig. 10 – Glass Arch nr.2 con una campata di 20m

prietà alla portata del carico delle due arcate in vetro, abbiamo deciso di studiare l'edificabilità di un involucro sferico in vetro con una snellezza all'eccesso.

Il «Glass Shell I» con un diametro di 2.5m fu costruito come un prototipo di piccole dimensioni usato per testare la tecnica dei giunti e per assicurare che gli elementi sferici potessero essere prodotti nell'ambito dei limiti delle tolleranze richieste. La colla usata per «Shell I» era una colla poliuretana modificata. Lo spessore del vetro era di 2/8mm e la larghezza dei giunti era tra i 6 e 10mm.

In base a queste positive esperienze, «Glas Shell II» con una campata di 8.5m ed uno spessore di 10mm fu costruito nell'aprile 2004 nelle immediate vicinanze del nostro istituto (Fig. 9). Glass «Shell II» fu un esperimento a lungo termine per i nostri studi sul comportamento nel tempo di una copertura incollata in condizioni ambientali naturali /5/.

Mentre le coperture in vetro «Shell I» e II usano LSG's, per una copertura con un diametro di 20m, attualmente in fase di ricerca, verrà impiegata una combinazione di PMMA e vetro temperato chimicamente. In questa costruzione si inten-

de usare il PMMA quale matrice portante, contenente a sua volta PCM's per potere regolare la trasmissione di luce. Tra l'altro la nostra ricerca attuale focalizza sulla possibilità di usare microsferre con incluso PCM's con proprietà termotopiche. Il sottile strato superiore protettivo della copertura (composto di vetro temperato chimicamente) verrà usato solo per resistere ai graffi, per migliorare la resistenza all'ambiente e per le sue qualità antistatiche.

#### Progettare stabilità dopo la rottura

Tutte le proprietà del vetro utilizzato in edilizia mostrano un comportamento alla rottura spontaneo. L'utilizzo del vetro quale elemento portante in una struttura primaria richiede pertanto un approccio diverso rispetto ai tradizionali metodi di progettazione.

I metodi di progettazione tradizionali si basano infatti sulla premessa fondamentale che i singoli elementi portanti non collaseranno fintanto che il loro livello di carico non superi un certo livello di tensione massima. Con il vetro si può verificare una rottura spontanea al di sotto del «livello massimo di resistenza consentito», per esempio in seguito a vandalismo, a danneggiamento puntiforme, ecc. Creare una qualità «salva vita» all'interno di un elemento in vetro risulta quindi impossibile. Ogni scenario di progettazione con strutture in vetro oppure strutture che usano il vetro quale elemento portante, devono pertanto sempre prendere in considerazione il collasso di un singolo elemento strutturale in vetro come pure di un intero gruppo di elementi. Di conseguenza il metodo di progettazione deve dimostrare come una struttura parzialmente danneggiata possa comunque rimanere sicura. Tale tecnica viene chiamata progettazione «sicura in caso di indebolimento».

Naturalmente alla domanda quale elemento deve essere considerato indebolito o quanti di essi devono essere considerati danneggiati allo stesso tempo è difficile rispondere. Vandalismo e terrorismo complicano ulteriormente tali premesse. In genere in questi casi è indispensabile prefigurare differenti scenari e sviluppare di conseguenza un'adeguata progettazione strutturale.

Mentre singole lastre di vetro perdono immediatamente la loro capacità di portata appena si rompono, il vetro stratificato di sicurezza può continuare a portare un carico. La capacità residua di tale trasferimento di forze dipende dal numero effettivo di lastre rotte (una oppure tutte le lastre LSG's). Nel caso di una rottura totale di una unità LSG la capacità residua di portata è retta dal



film in pvb il quale è in grado di tenere uniti i pezzi rotti anche in funzione della temperatura, del tempo e del grado di umidità. Tuttavia è risaputo che la capacità residua di portata di una LSG totalmente rotta è alquanto limitata. Contrariamente a ciò una LSG rinforzata mostra un eccellente comportamento post rottura con una capacità eccezionale di portata residua che si accompagna con relativamente piccole deformazioni. Un metodo progettuale per un trasferimento delle forze in presenza di una LSG completamente rotta è attualmente in sviluppo presso il nostro istituto. Una volta interamente sviluppato, la progettazione di strutture in vetro parzialmente rotte, ma pur sempre portanti, diverrà a quel punto possibile.

\* Ha studiato architettura e ingegneria all'università di Stoccarda. Nel 1991 è diventato docente all'università di Hannover e un anno dopo ha aperto il suo studio di progettazione a Stoccarda. Nel 2001 ha fondato l'istituto di strutture leggere e di design concettuale (ilek) presso l'università di Stoccarda.

#### Note

1. Sobek, W.; Maier, F.; Kutterer, M.: Versuche an Verbund-sicherheitsgläsern zur Beurteilung der Resttragfähigkeit und des Verbundverhaltens. Forschungsbericht 1/98, Institut für Leichte Flächentragwerke, University of Stuttgart, November 1998.
2. Sobek, W.; Maier, F.; Kutterer, M.: Bewehrtes Verbund-sicherheitsglas. Forschungsbericht 1/99, Institut für Leichte Flächentragwerke, University of Stuttgart, June 1999.
3. Sobek, W.; Maier, F.; Kutterer, M.: Tragverhalten von bewehrtem Verbund-sicherheitsglas. Forschungsbericht 2/99, Institut für Leichte Flächentragwerke, University of Stuttgart, October 1999.
4. OGI (FMPA), University of Stuttgart: Forschungsbericht Nr. 25-27686. Untersuchung der Resttragfähigkeit von Verbund-glas-elementen mit Bewehrungsschichten, May 1999.
5. Sobek, Werner; Blandini, Lucio: Structural gluing - A prototype glass shell. in: Kaltenbach, Frank (ed.): Translucent Materials. Glass - Plastic - Metals. Munich: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2004. pp. 30-31.
6. Netze in Natur und Technik. IL Mitteilungen 8. Stuttgart: ILEK, 1985.
7. Sobek, Werner; Rehle, Norbert: Beispiele für verglaste Vertikalseiffassaden. in: Stahlbau 4/04, pp. 224-9.
8. Haase, Walter: Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen. Doctoral dissertation, University of Stuttgart, 2004.
9. Sobek, Werner; Haase, Walter: Adaptive Systeme und Materialien. in: Deutsches Architektenblatt 1/2005. pp. 14-17.
10. Sobek, W.; Kutterer, M.: Experimenteller Glasbogen auf der glasstec 98. in: Glas: Architektur und Technik, 3/1999, pp. 34-38.



Fig. 11 – Glass Shell nr.2, con una campata di 8.5m