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

Herausgeber: Società Svizzera Ingegneri e Architetti

Band: - (2002)

Heft: 6

Artikel: Volte in vetro : realizzazioni, ricerche, prospettive

Autor: Blandini, Lucio

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-132472

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 17.07.2025

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

Volte in vetro

Realizzazioni, ricerche, prospettive

Lucio Blandini

Vetro: un materiale strutturale?

È possibile utilizzare il vetro come materiale strutturale? Ma soprattutto, perché mai si dovrebbe? L'immaginare una struttura realizzata in vetro, una trave in vetro, un pilastro in vetro, o addirittura una copertura, lascia non poche perplessità a partire dalla banale esperienza di una bottiglia, di un bicchiere o di un vaso in frantumi... D'altronde, proprio la vertigine insita nella contraddizione tra tali quotidiane esperienze e la constatazione della stabilità dei sistemi in vetro, nel suscitare emozione costituisce – a mio avviso – una componente valida del messaggio architettonico di una costruzione. Ma il vetro ha un potenziale ben più ampio, a partire dalla sua capacità di trasmettere immagini da un ambiente all'altro (trasparenza, fig.1), luci, colori o sagome (translucenza), sino alle molteplici possibilità di veicolare informazioni (stampe, ologrammi, proiezioni, etc.) o di variare colore, caratteristiche fisiche e termiche in funzione dell'ambiente circostante (vetri elettrocromi, gasocromi, a cristalli liquidi, etc.) senza dimenticare le proprietà di riflessione, trasmissione o rifrazione che possono essere esaltate e «indirizzate» tramite svariate tecniche di lavorazione.

Se la trasparenza ha reso il vetro un materiale architettonicamente significativo da secoli, con la funzione di realizzare un interscambio con l'esterno, riflessioni approfondite sul significato e valore filosofico, estetico, architettonico di un involucro trasparente appartengono principalmente al ventesimo secolo (Gideion, Rowe e Slutzky, etc.) fino a rendere la trasparenza totale uno dei punti fermi e dei traguardi ambiti di molte opere d'architettura contemporanea. Ma altre caratteristiche quali la potenzialità degli involucri in vetro di dialogare con l'ambiente circostante, come a voler emulare l'effetto di una pelle, così come la capacità di veicolare informazioni, tanto significativa nella società contemporanea, sono ancora quasi totalmente da esplorare.

Un così ampio spettro di applicazioni, rende auspicabile l'esaltazione del vetro come materiale unico o prevalente con molteplici funzioni, in coperture, facciate, ed altri sistemi. Fino ad oggi il vetro è stato però prevalentemente utilizzato come materiale di tamponamento, o al più come elemento strutturale locale, in grado di trasmettere le forze a strutture portanti costituite da altri materiali (acciaio, alluminio, legno, ecc.). Una tale interazione di materiali spesso smorza notevolmente la carica evocativa del vetro, continuamente interrotto, annullando l'auspicato effetto di pelle; inoltre, tali sistemi strutturali, non trasparenti, dominano lo spazio percepito e pongono il vetro in secondo piano o quanto meno non consentono di percepire a pieno sfumature e luci, sminuendone così il ruolo di possibile supporto di informazioni.

Ecco spiegato il vantaggio nell'utilizzo del vetro come materiale strutturale: una minima presenza di altri materiali, così che superfici pressoché continue possano riconquistare al vetro tutto il suo spazio evocativo. Diversi sono però i limiti fondamentali che hanno sino ad oggi ostacolato le applicazioni strutturali di questo materiale: da un lato la scarsa conoscenza sino a diversi anni fa del suo comportamento strutturale e la necessità di sviluppare per le costruzioni in vetro criteri di progettazione alternativa, che conferiscano al sistema duttilità, nonostante la fragilità dei singoli elementi; d'altra parte l'impossibilità di effettuare forme in opera come per il calcestruzzo, e quindi le difficoltà connesse alle tecnologie di giunzione delle lastre. Oggi il vetro è stato esplorato nelle sue proprietà fondamentali come materiale strutturale. D'altronde una corretta progettazione non può prescindere dal conoscere le proprietà del materiale, anzi acquista valore nel momento in cui lo valorizza, adattandosi al suo comportamento o cercando di correggerne a livello tecnologico gli aspetti indesiderati. È forse opportuno soffermarsi pertanto su alcune caratteristiche fondamentali. Il vetro ha una resistenza a compressione sorprendente, di gran lunga superiore a quella di un acciaio, e ad una resistenza a trazione teoricamente altrettanto elevata, ma inficiata dall'insorgere di microfratture superficiali.

Per ovviare all'effettiva scarsa resistenza a trazione, e quindi a flessione, sono state sviluppate tecniche

di tempera, termica o chimica, che forniscono al vetro in superficie una precompressione tale da poter sopportare una sollecitazione a trazione o a flessione superiore a quelle del cemento armato. In particolare, recentemente ai vetri temperati si preferiscono vetri parzialmente temperati o induriti, ottenuti rallentando il processo di raffreddamento: in questo modo diminuisce il valore di precompressione in superficie, ma aumenta la dimensione dei frammenti nelle lastre danneggiate (fig 2a/c). Le lastre possono così ancora sopportare una parte dei carichi (ad esempio il peso proprio) in attesa di essere sostituite.

Per incrementare la capacità portante residua in presenza di lesioni è stato inoltre introdotto il vetro stratificato dove due o più lastre di vetro aderiscono tra di loro per mezzo di resine plastiche. Grazie alla stratificazione, inoltre, si impedisce che i frammenti di una lastra danneggiata possano cadere, con conseguenti rischi per le persone e le cose.

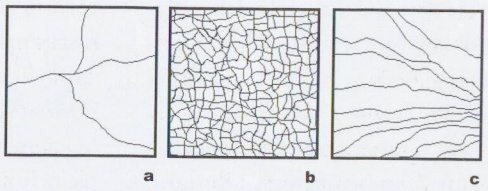
Alcuni criteri di progettazione per il vetro sono stati inoltre formulati allo scopo di conferire duttilità all'insieme, nonostante la fragilità del materiale; essi si basano sul principio, teorizzato nella progettazione aeronautica, del «fail safe», cioè di prevedere che alcuni elementi possano collassare, a condizione però che non si infici la stabilità globale del sistema. Due concetti chiave di tale approccio sono gerarchia e ridondanza. Il primo consiste nello stabilire una funzione ben definita per ciascun elemento strutturale fissandone un preciso ordine di importanza, così che gli elementi secondari possano in situazioni eccezionali collassare, mentre gli elementi primari devono essere comunque protetti. Gli elementi primari possono essere inoltre più di quelli strettamente necessari (ridondanza) così che, se un elemento primario cede, ve ne è comunque un altro ausiliare che ne svolge le funzioni. In alternativa è possibile prevedere percorsi alternativi per le forze nel caso in cui una lastra si danneggi.

Seguendo questi concetti, o sviluppandone di nuovi, con l'obiettivo di una progettazione coerente col materiale vetro, risulta così possibile esaltare il vetro al meglio delle sue molteplici potenzialità, sperimentando nuove soluzioni, generando nuove tipologie di spazi, arricchendo insomma l'Architettura di nuovi percorsi.

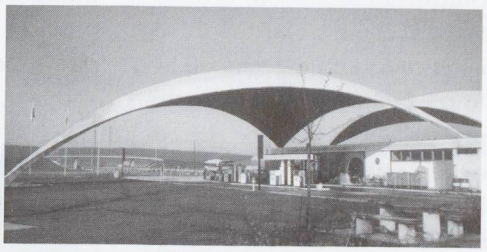
Volte: il fascino delle superfici curve

In questa sede ci si soffermerà sullo sviluppo e sulle potenzialità delle volte in vetro. Coperture in vetro o in vetro e acciaio vengono oggi sempre più richieste allo scopo di proteggere dagli agenti atmosferici e rendere così fruibili corti di edifici, con

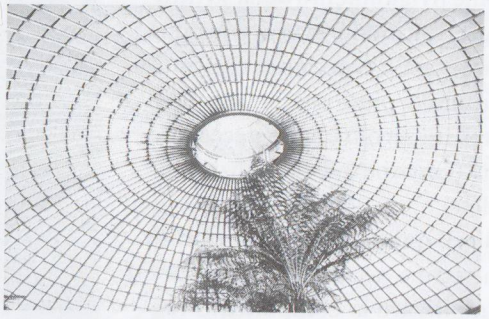
1 – Transparenza: giardino invernale, Hampstead, 1992. Arch. Design Antenna, ing. Dewhurst Macfarlane
Foto Paul Gascoigne



2 – Tipologia di frammentazioni
a) vetro Float
b) vetro temperato
c) vetro parzialmente temperato
Archivio ILEK



3 – Heinz Isler, Copertura di un distributore di benzina Deitingen
Archivio ILEK



4 – John Kibbel, Volta in vetro e acciaio, Kibbel Palace, Glasgow, 1872
Archivio ILEK

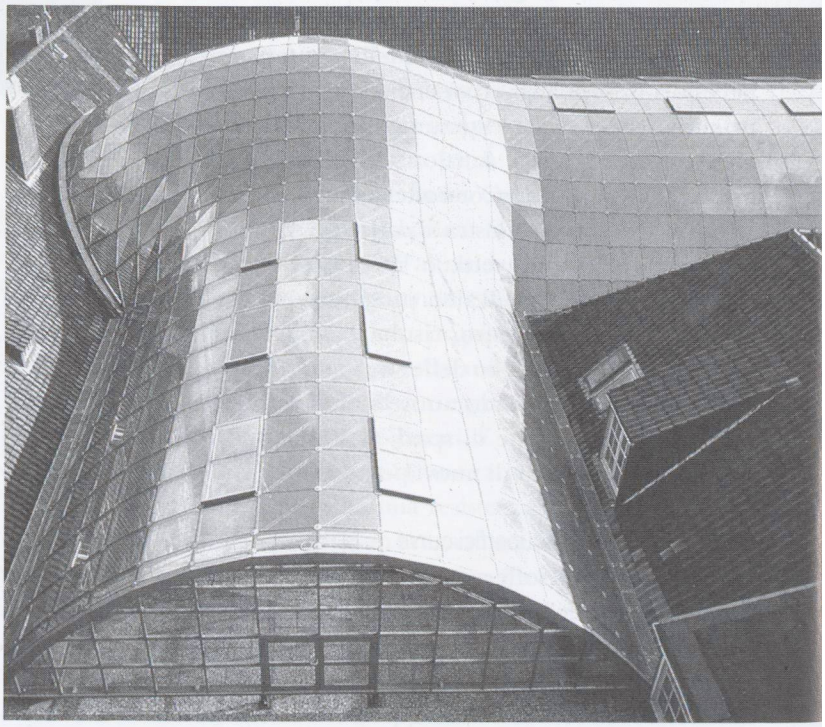
il risultato frequente di diventare un elemento di riferimento del complesso architettonico; in particolare, nel caso di edifici antichi, l'uso del vetro diventa fondamentale se non si desidera una relazione aggressiva col preesistente.
Le superfici curve, inoltre, in virtù della loro dinamicità e della molteplicità delle possibili forme, esercitano da sempre un fascino particolare, sia che si richiamino direttamente a forme naturali, sia che nascano da considerazioni astratte di carattere architettonico, statico o estetico. Se in passato ci si era limitati ad utilizzare geometrie semplici da descrivere e analizzare, come cupole, cilindri o paraboloidi in infinite variazioni e combinazioni, le nuove tecnologie di calcolo e di configurazione, così come i criteri di ricerca di forma sviluppate a partire dagli anni sessanta (ma già anticipate brillantemente da Gaudí), consentono oggi una libertà formale infinitamente superiore.
Il Novecento è legato all'esplorazione delle potenzialità di materiali quali il calcestruzzo o la muratura armata nel campo delle volte ad opera di maestri quali Nervi, Torroja, Candela, Isler (fig. 3), Dieste; oggi appare estremamente interessante esplorare il materiale vetro che, in virtù della propria notevole resistenza a compressione, si adatta particolarmente bene a queste geometrie, così come d'altronde tali geometrie si adattano certamente ad esaltare tutto il potenziale evocativo ed emotivo del vetro.
E non si deve dimenticare come coperture in vetro e acciaio hanno costituito uno dei simboli architettonici a cavallo tra Ottocento e Novecento, soprattutto per serre e gallerie cosí come per coperture di stazioni o spazi pubblici come il Kibbel Palace a Glasgow (fig. 4), la Galleria Vittorio Emanuele II a Milano, la Cupola della Borsa a Parigi, ecc. I livelli di trasparenza raggiunti in tali realizzazioni lasciano presupporre un inconsapevole utilizzo del vetro come irrigidimento della struttura portante in acciaio; d'altronde, la progettazione di tali opere era più legata a esperienza costruttiva e intuizione strutturale, piuttosto che a precisi calcoli analitici. Più di un secolo è stato necessario per passare ad un uso consapevole del vetro come materiale strutturale!
Solo negli ultimi dieci, quindici anni si è ripreso a costruire volte in vetro e acciaio: la tendenza è chiaramente di minimizzare la componente visiva e strutturale dell'acciaio. Alcuni esempi significativi di tali realizzazioni sono state analizzate e suddivise in due categorie secondo l'uso del vetro, secondario (struttura primaria metallica) o primario. In quest'ultimo campo ci si «avventura» ancora raramente a livello di sistemi costruiti, mentre esso costituisce terreno fertile per la ricerca. Infatti, con la volontà di dimostrare la validità di innovativi criteri di progettazione e la realizzabilità di coperture costituite prettamente da vetro strutturale, diversi prototipi sono stati recentemente realizzati presso alcuni istituti universitari.

Realizzazioni: vetro con funzione strutturale secondaria

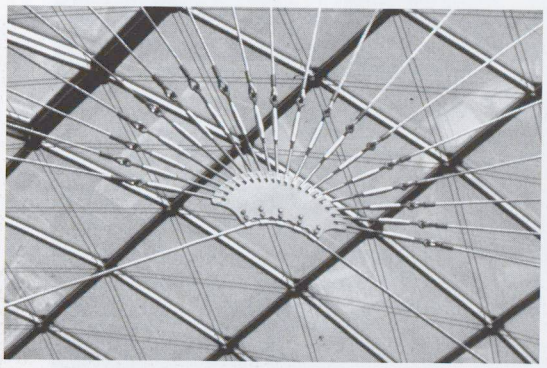
Copertura della corte del Museo della Storia, Amburgo 1989

Architetti: Gerkan, Marg e Partner
Ingegneri: Schlaich, Bergermann e Partner

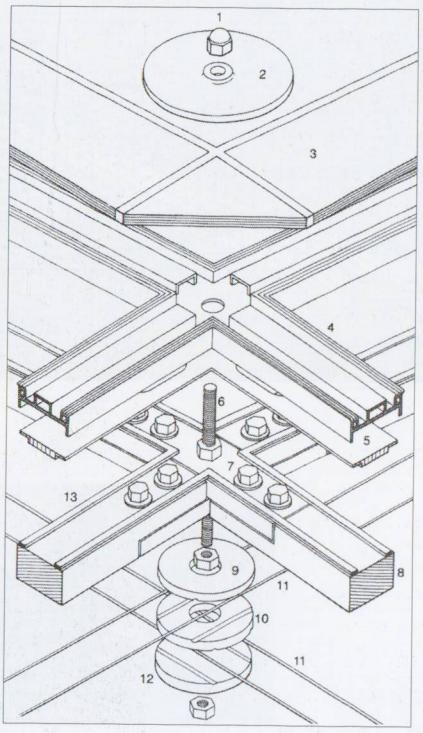
Il museo fu costruito tra il 1914 ed il 1923 da Fritz Schumacher: quattro piani intorno ad una corte a «L» con larghezza della ali di 14 e 18 metri. Tre i requisiti per la nuova copertura, costruita in occasione dell'ottocentesimo anniversario del porto di Amburgo: non modificare l'essenza storica dell'edificio; 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 (fig. 5a). La geometria a botte è naturalmente ideale per la modularità delle lastre e delle barre piene in acciaio (60 x 40 mm), quindi per l'economia dell'insieme. Una geometria ad hoc è stata invece pensata per lo spazio di transizione, a partire dai due differenti archi di imposta in corrispondenza dell'intersezione con le due volte a botte: la soluzione è una superficie a



b



c



d

5 – Copertura del Museo della Storia, Amburgo, 1989
a) vista dall'esterno
b) vista dall'interno
c) funi di irrigidimento
d) isometria del nodo:
2 - piatto (Ø 140 mm)
3 - vetro temperato 10 mm
4 - profilo in Neoprene
5 - profilo intermedio in acciaio
6 - filettatura M12
7 - bulloni M12
8 - profilo 40x60 mm
9 - piatto in acciaio (8x Ø 90 mm)
10 - piatto in acciaio (10x Ø 90 mm)
11 - funi
12 - piatto in acciaio (12x Ø 90 mm)

Archivio J. Schlaich

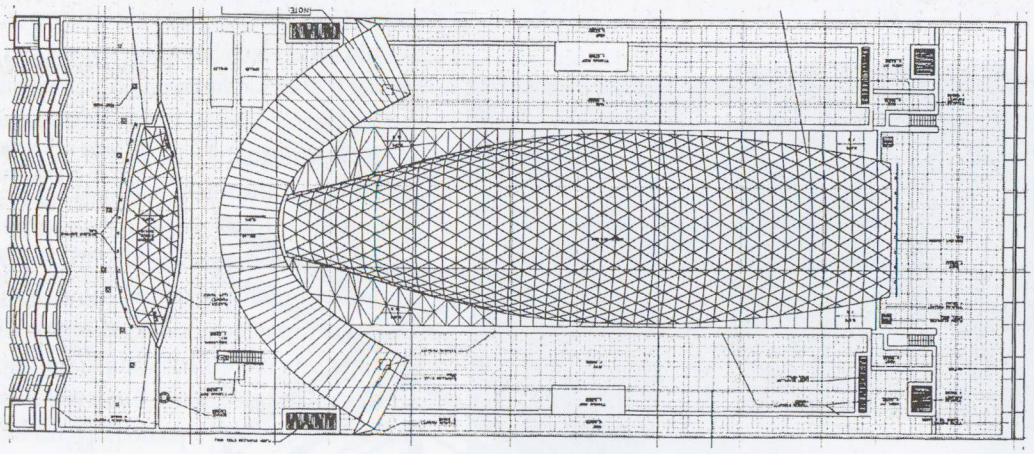
doppia curvatura in cui le due direttrici traslano una rispetto all'altra (fig. 5b). Ciò comporta la presenza di lastre di vetro con geometrie quadrangolari diversificate, dal rettangolo al rombo, mentre le barre metalliche presentano lunghezza e sezione invariate, con chiari vantaggi economici. Le lastre (vetro temperato da 10 mm), costituiscono una superficie vetrata di circa 1000 m².

Il tutto è irrigidito attraverso due sistemi di funi: il primo è costituito da raggiere verticali poste a conclusione delle volte a botte come irrigidimento delle volte (fig. 5c), mentre il secondo è costituito da funi diagonali da 6 mm che attraversano i campi in vetro. Tali funi, disposte lungo la diagonale forniscono rigidezza a taglio alle maglie della struttura in acciaio, impedendo che si deformino, e rendono la struttura, grazie ad una leggera pretensione, globalmente meno deformabile. Sia le sbarre sia le funi convergono in un nodo che presenta differenti geometrie secondo la posizione; un profilo in Neoprene tra il sistema in acciaio e le lastre in vetro garantisce l'impermeabilità (fig. 5d).

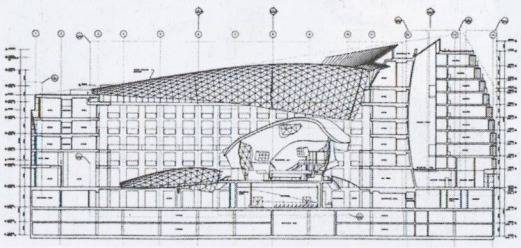
Copertura della DG Bank, Berlin, 1998

Architetti: Gehry & Associates
Ingegneri: Schlaich Bergermann e Partner

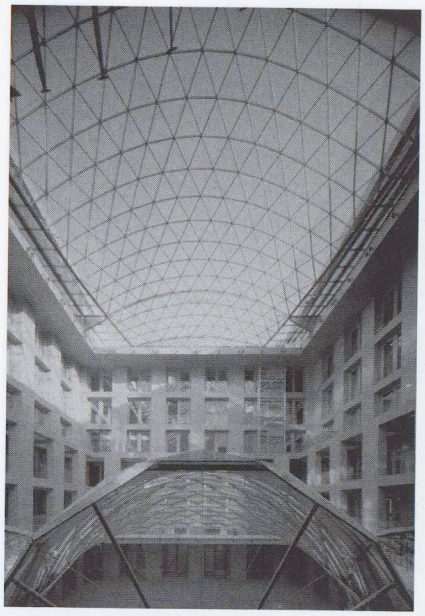
Pariser Platz, accanto la Porta di Brandeburgo: ecco la nuova filiale della DG Bank, costruita su progetto di Frank Gehry, vincitore nel 1995 di un concorso internazionale di idee. Al di là della rigorosa facciata, rivestita analogamente alla Porta di Brandeburgo è nell'interno che si libera la fantasia dell'architetto americano, celebre tra gli altri per il Museo Guggenheim di Bilbao. La corte di 61x20 m è infatti coperta da una scultorea volta in vetro e acciaio, che rompe la calma e regolare geometria delle facciate interne (figg. 6a/e). Dal punto di vista costruttivo la sfida consiste nel conciliare una simile geometria con la necessità statica di un comportamento membranale, così da minimizzare le dimensioni dei profili. In questo caso, un sistema costituito da lastre quadrangolari piane non è più immaginabile, in quanto non è in grado di descrivere così rapidi cambiamenti di curvatura. Per quanto più costoso e costruttivamente più complesso, si è quindi ricorsi ad un sistema a maglia triangolare: 2490 profili pieni in acciaio inossidabile (60x40 mm; 60x70 mm) e 826 nodi a sei bracci, ognuno diverso dall'altro, realizzati grazie ad una fresa a cinque assi regolata attraverso un sistema a controllo numerico (fig. 6f) e collegati ai profili tramite bulloni (fig. 6g). Le lastre in vetro camera (12+14+8 mm), ottimizzate secondo un angolo interno tra i 55 e i 65 gradi generano così una superficie di 1856 m². A causa della complessità della superficie si è rinunziato ad un ancoraggio continuo della volta a favore di quattro sistemi puntuali; in corrispondenza di tali punti sono stati disposti degli archi costituiti da profili a T e irrigiditi da un sistema



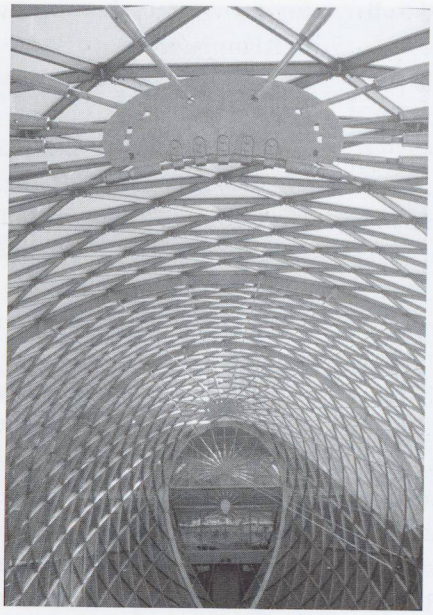
a



b



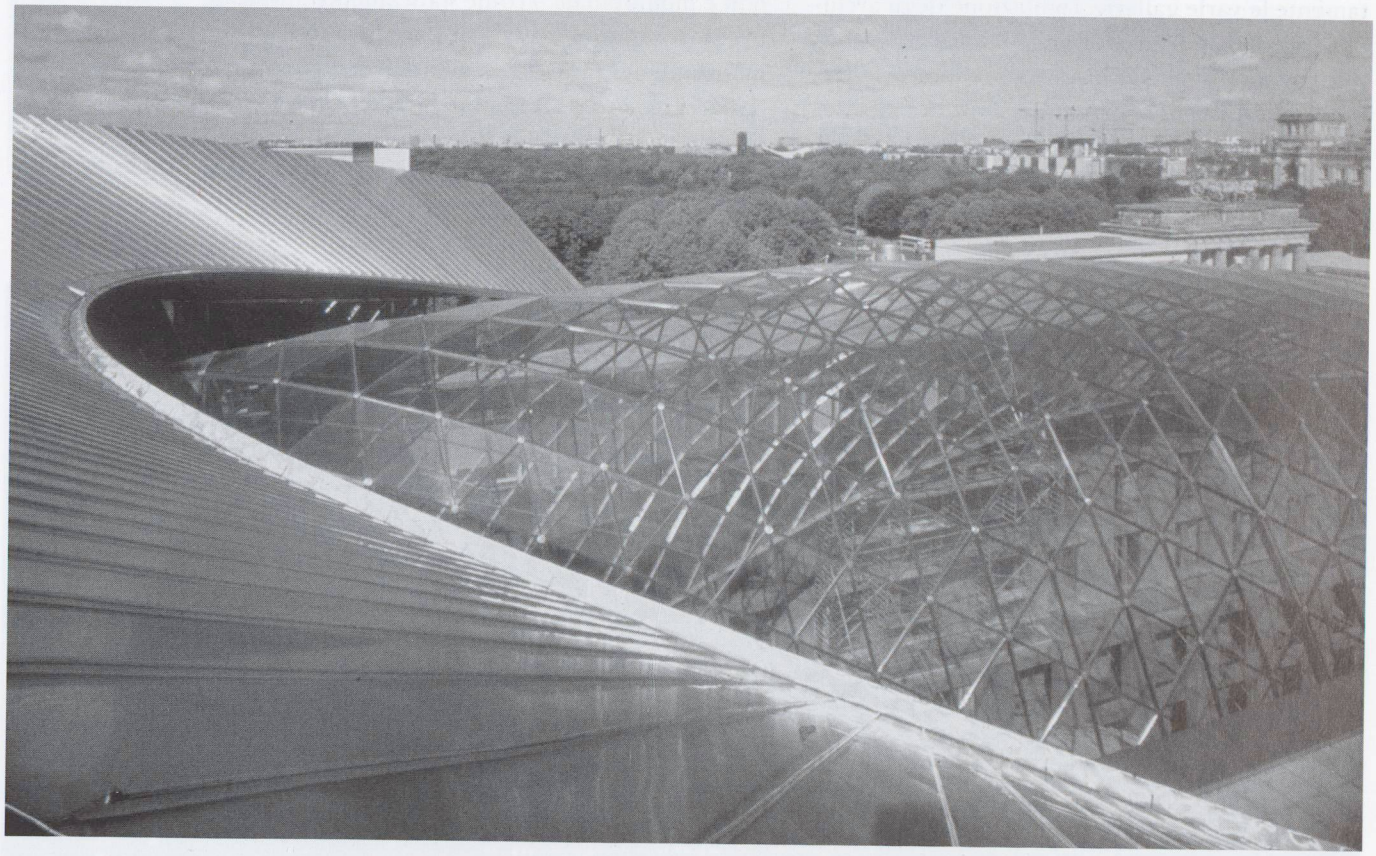
c



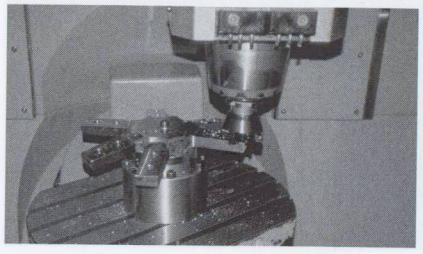
d

6 – Copertura della DG Bank, Berlino, 1998
a) pianta
b) sezione
c) fronte Nord
d) fronte Sud
e) vista dall'esterno verso Nord
f) fresatura del nodo
g) nodo

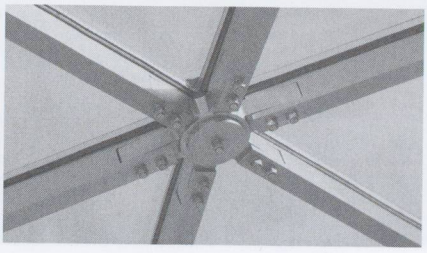
Archivio J. Schlaich



e



f



g

di cavi con diametro di 14 e 20 mm pretesi e disposti a raggiera.
La scelta di utilizzare acciaio inossidabile ha portato a quintuplicare i costi di materiale, ma costituisce da un lato un investimento nei confronti dei problemi di corrosione, e dall'altro una precisa scelta architettonica volta ad esaltare la materialità della struttura sottolineandone la qualità degli spigoli e dei collegamenti.

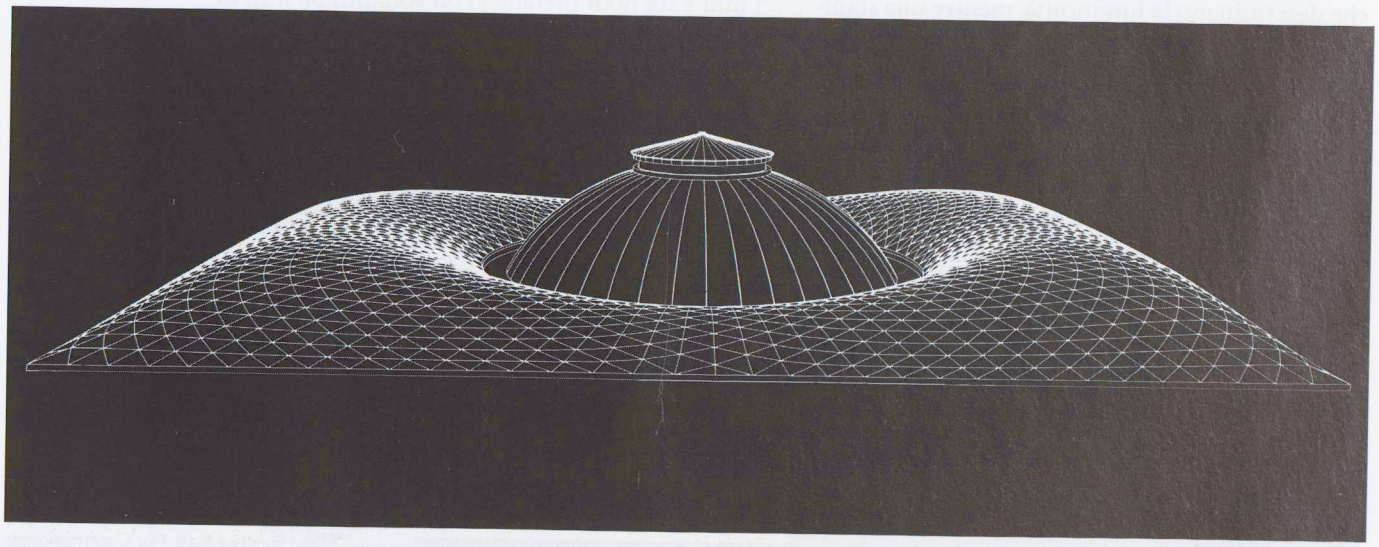
Copertura della Great Court del British Museum, Londra, 2000

Architetti: Foster e Partner
Ingegneri: Buro Happold

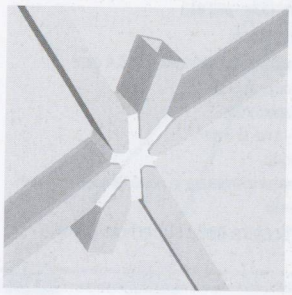
Oltre cinque milioni di persone costrette ogni anno a passare per un ingresso progettato nell'Ottocento per 100'000. Ecco il primo problema da risolvere con la copertura della corte del museo, 74x95 m, le dimensioni di un campo da calcio. Ma, oltre alla possibilità di raggiungere direttamente le varie gallerie, l'ambizione degli architetti era ben più grande: realizzare una nuova piazza coperta per Londra – la più grande d'Europa –, fruibile anche durante la chiusura del Museo, dove poter incontrarsi, mangiare o bere qualcosa (fig. 7a); e inoltre valorizzare la Sala di lettura, sovrastata da una cupola analoga a quella del Pantheon, dove studiosi come Karl Marx, Bernard Shaw, Jane Austen avevano lavorato (fig. 7b).
Sulla base di questi principi di fondo è stato sviluppato il progetto di una copertura vetrata da 6'000 m², 4'878 differenti profili metallici cavi in acciaio, così come 1'566 nodi; costo 100 milioni di sterline. Dal punto di vista geometrico la sfida è stata posta nell'individuare una superficie di transizione tra la pianta rettangolare della corte e quella circolare della Sala di lettura, i cui centri risultano peraltro leggermente slittati. I progettisti hanno, dopo ampi studi, optato per una superficie tridimensionale generata da un sistema di archi a geometria variabile (fig. 7c).
Un'analisi delle strutture preesistenti ha definito l'impossibilità per esse di sopportare carichi orizzontali nella direzione ortogonali al perimetro: per questo motivo il comportamento del sistema non è membranale – come staticamente auspicabile – comportando così un aumento della dimensione dei profili in modo da ottenere la necessaria rigidezza flessionale. Questi presentano quindi una larghezza di 80 mm ed un'altezza che varia tra gli 80 e i 200 mm. Inoltre, all'interno, i

a

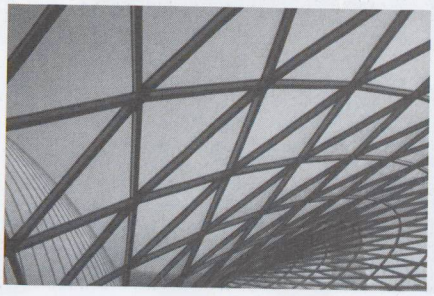
b



c



d



e

7 – Copertura della Great Court del British Museum, Londra, 2000
a) vista dall'esterno
b) vista dall'interno
c) geometria
d) rendering del nodo
e) particolare della copertura

Foster e Partner

carichi verticali non vengono trasmessi alla sala di lettura, ma ad un sistema di pilastri con le relative nuove fondazioni. I nodi, a cinque o a sei bracci, garantiscono angoli tra le aste che oscillano tra i 26 e i 110 gradi e sono ritagliati da un profilo pieno, attraverso un sistema a controllo numerico. Globalmente si tratta di 11 km di profili in acciaio, assemblati con una precisione di ±3 mm; sono collegati ai profili tramite saldatura (fig. 7d). Il peso globale della copertura è di 800 tonnellate, 478 di acciaio, 315 di vetro.

La superficie vetrata è costituita da 3'312 lastre di vetro camera: 12 mm di vetro temperato esternamente, 16 mm di spazio interno e 12 mm di vetro stratificato float internamente (fig. 7e). I due requisiti architettonici erano la realizzazione di una pelle continua esternamente e un comportamento termico tale da non rendere necessari sistemi di schermatura. Il primo è ottenuto attraverso il fissaggio delle lastre in corrispondenza del vetro interno, nascosto quindi da profili in silicone; il fissaggio della lastra superiore è realizzato invece tramite uso di silicone strutturale. Per ottenere inoltre una temperatura interna così come una illuminazione confortevole, è stato utilizzato esternamente vetro colorato verde che filtra le radiazioni, assorbendo le onde lunghe responsabili del surriscaldamento, e lascia passare quelle corte che determinano la luminosità, mentre una stampa con punti bianchi da 4 mm copre il 56% della superficie vetrata, senza però generare ombre sul pavimento; il vetro interno è trattato invece in modo da emettere poche radiazioni (low-E). In questo modo si raggiunge un valore di trasmissione della luce pari a circa il 30% ed una quota dell'energia trasmessa pari solo al 23% (K = 1.9 W/m^2 °K).

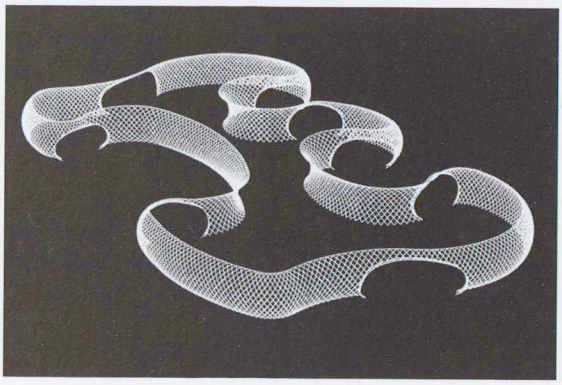
Stand fieristico Audi, Fiera Internazionale di Francoforte, 1999

Architetti: Ingenhoven Overdiek e Partner
Ingegneri: Werner Sobek Ingenieure

Una superficie curva in vetro per l'esposizione di auto. Non solo: la volontà di creare un'atmosfera, di suscitare impressioni, emozioni, di trasmettere una filosofia aziendale. Alla luce di questi obiettivi architetti e ingegneri si sono cimentati nello sviluppo di una complessa geometria curva, minimale nell'impiego dei materiali e attentissima alla progettazione dei dettagli, così come all'esaltazione del materiale vetro, a volte trasparente a volte satinato secondo esigenze funzionali così come estetiche (fig. 8a).

Una superficie curva di 1'800 m^2 alta sei metri, costituita da 12'000 lastre di vetro temperato da 4 mm in 3'000 differenti formati; una superficie che funge altresì da schermo dove proiettare metamorfosi di forme e colori, estrapolate da immagini naturali: è la dimostrazione di quanto possa essere polivalente l'uso del vetro nel mondo delle costruzioni così come la conferma del fascino di una superficie curva (fig. 8b).

La costruzione si basa su due profili circolari in acciaio inossidabile (48,3 mm diametro, 4 mm spessore) stabilizzati attraverso funi in acciaio da 3 mm e collegate alle lastre per mezzo di funi da 3 mm e da nodi metallici con soltanto 50 mm di diametro, nonostante le tolleranze (fig. 8c). Le lastre sono stabilizzate attraverso un altro sistema di funi da 3 mm parallelo alla superficie curva. Un sistema complesso, che risulta tuttavia comprensibile se si riesce a «leggerlo» come in filigrana, cogliendo in tal modo la sua potenzialità evocativa (fig. 8d).

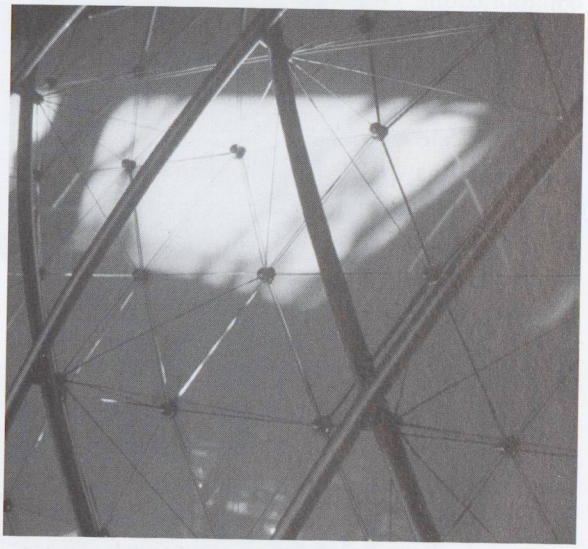


a

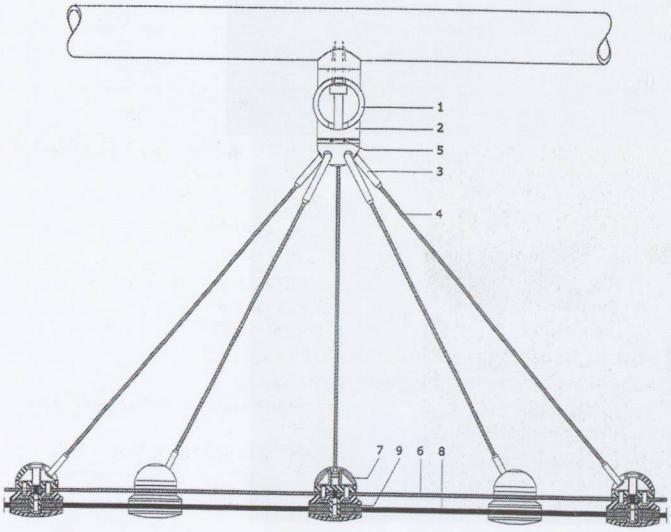
8 – Stand fieristico Audi, Fiera Internazionale di Francoforte, 1999
a) geometria
b) superficie vetrata
c) particolare:
1 - profilo in acciaio inox Ø 48,4 mm
2 - nodo girevole
3 - capocorda
4/6 - fune Ø 3 mm
7 - nodo
8 - lastra triangolare in vetro temperato 4 mm
9 - EPDM
d) particolare della superficie vetrata

Archivio ILEK

b



d



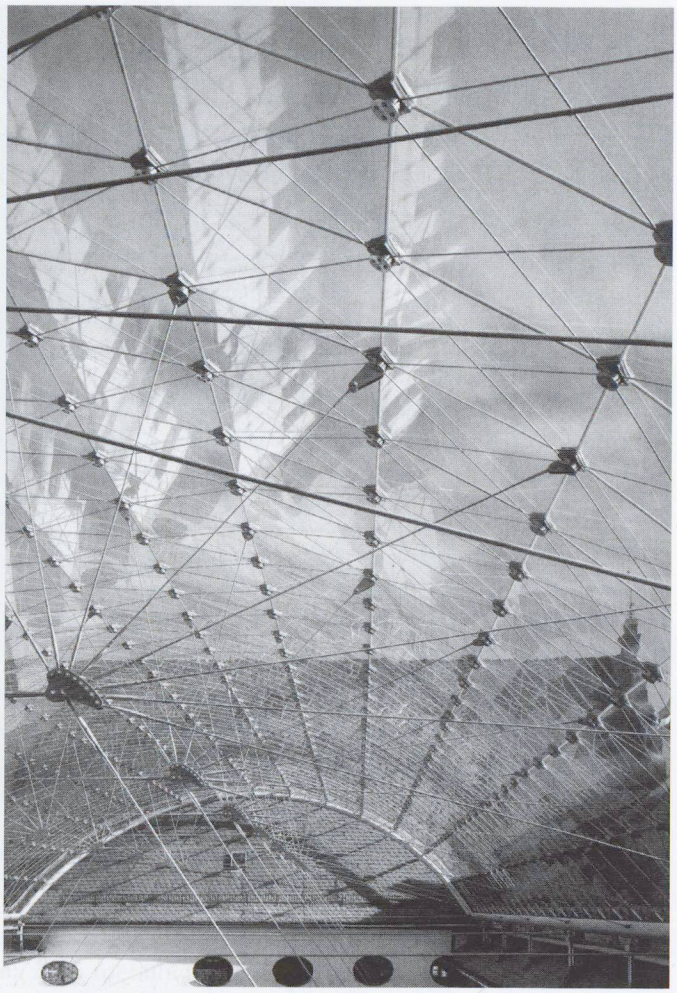
c

Realizzazioni: vetro con funzione strutturale primaria

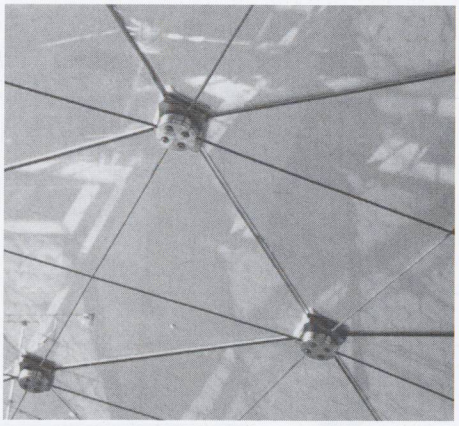
Copertura del Maximilian Museum, Augusta (Germania) 1999

Architetti e Ingegneri: Ludwig e Weiler

Il livello di trasparenza che si puó raggiungere se si utilizzano le potenzialità strutturali del vetro, è dimostrato da questa straordinaria copertura (fig. 9a). Si tratta di una volta a botte, con luce di 14 m e lunghezza pari a 37 m, composta da moduli costanti di 117 x 97 cm. Le lastre, costituite da vetro parzialmente temperato stratificato (2 x 12 mm), non sono supportate da alcuna intelaiatura metallica, ma portano se stesse e i carichi esterni, trasmettendo le azioni membranali in corrispondenza degli spigoli, grazie ad un nodo metallico in cui converge un sistema di funi di irrigidimento (fig. 9b). Lungo i bordi le lastre sono semplicemente collegate da silicone strutturale, in modo da garantire la tenuta all'acqua e agli agenti atmosferici e resistere localmente alle azioni del vento; un altro sistema verticale di funi a doppia raggiera compensa i problemi di deformabilità e instabilità connessi alla geometria a botte. L'effetto di leggerezza è semplicemente strabiliante.
Una tale innovazione non può non essere legata ad una fase di sperimentazione, volta a verificare la validità delle soluzioni proposte e condotta in collaborazione con alcune università tedesche (Darmstadt, Monaco). Le prove sono state realizzate sia su singole lastre di vetro che su singoli moduli della volta per verificare i problemi di instabilità locale e globale (figg. 9c/d): si pensi che si tratta di una «pelle» in vetro spessa solo 2 centimetri e mezzo. Analiticamente come sperimentalmente è stata inoltre verificata la possibilità che alcune lastre di vetro si rompano contemporaneamente intorno ad un nodo o, in alternativa, che alcune funi si rompano secondo il principio «*fail safe*», precedentemente descritto.
Il successo di una tale costruzione caratterizzata da un impiego così estremo dei materiali, è fondato, oltre che sul rigore dei calcoli e della sperimentazione, sulla precisione di produzione e montaggio di ogni elemento: infatti una variazione della geometria dovuta ad imperfezioni può portare la struttura al collasso. La volta è stata pertanto costruita su un'impalcatura in legno (fig. 9e) e la procedura di montaggio e di pretensionamento delle funi ha seguito un ordine ben preciso; misure di controllo della posizione effettiva dei nodi, così come della freccia della volta hanno dimostrato una variazione rispetto ai valori di calcolo all'interno dei margini prestabiliti.



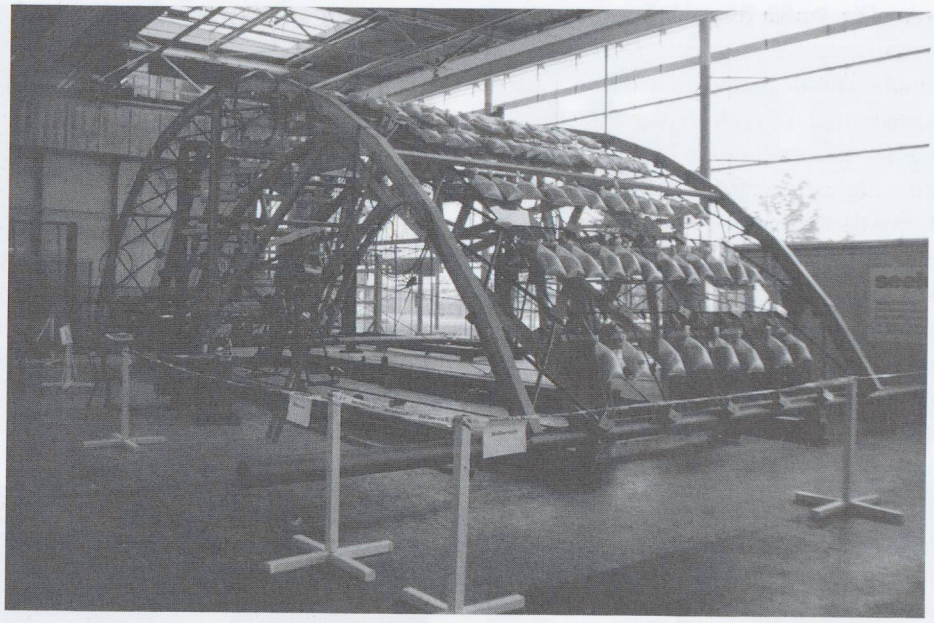
a



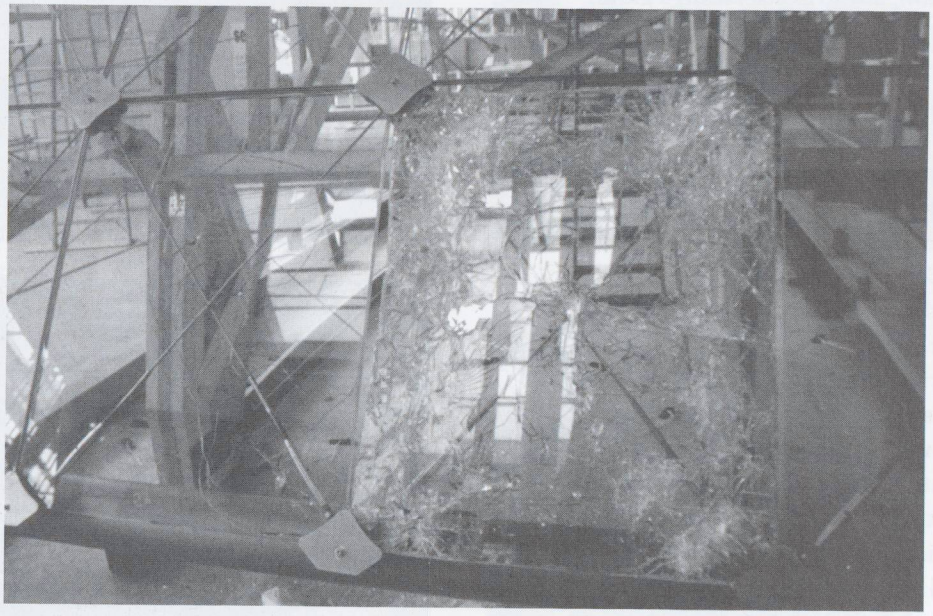
b

9 – Copertura del Maximilian Museum, Augusta, 1999
a) vista dall'interno
b) particolare
c) prova di carico su modulo della volta
d) prova di carico con lastra danneggiata
e) montaggio

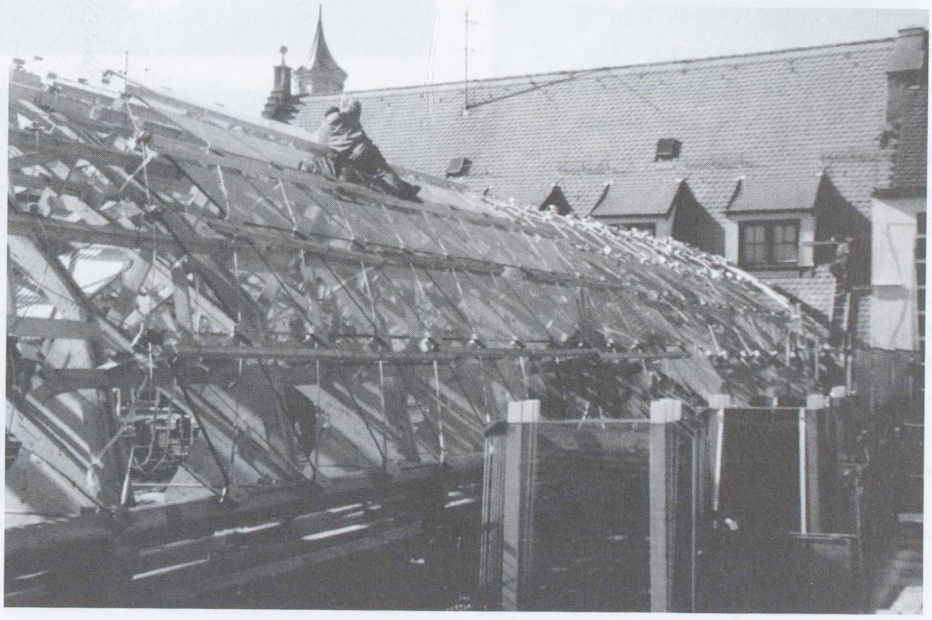
Ludwig e Weiler



c



d



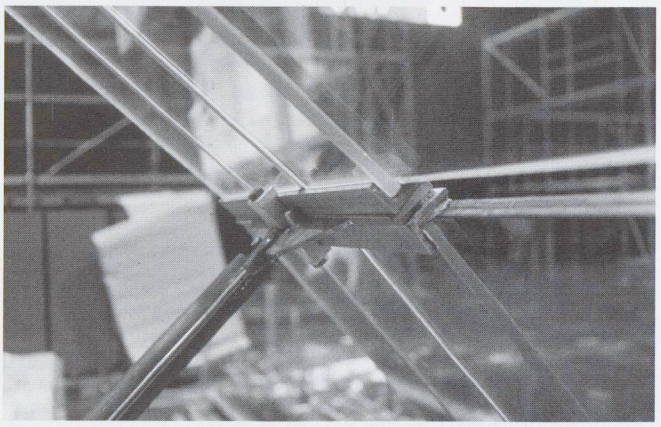
e

Prototipo di Arco in vetro, Glastec 98, Düsseldorf

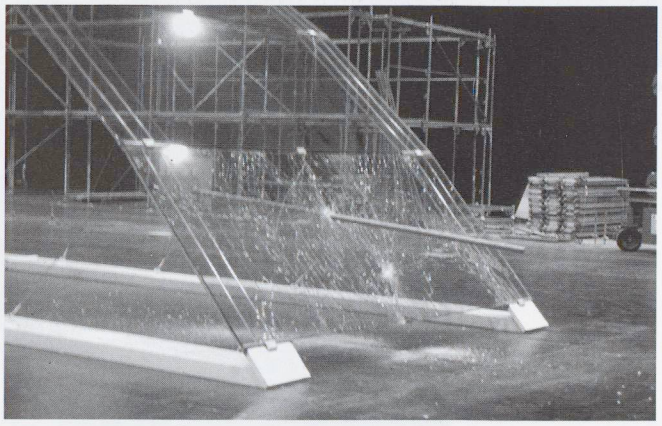
Werner Sobek, Matthias Kutterer, Università di Stoccarda

Per dimostrare le potenzialità legate all'uso del vetro strutturale e per verificare i criteri di gerarchia e ridondanza, il prototipo di un arco interamente in vetro è stato ideato e realizzato da Werner Sobek e Matthias Kutterer presso l'Istituto di Strutture Leggere dell'Università di Stoccarda e presentato quindi a Düsseldorf in occasione dell'esposizione internazionale sul vetro Glastec 98.
L'arco è concepito come modulo per la copertura di superfici rettangolari secondo una geometria a botte e presenta una luce di 20 m, una larghezza di 4 m e un'altezza massima di 5 m (fig. 10a). È costituito da lastre piane di vetro parzialmente temperato stratificato (2x10 mm), di dimensioni 1,62 m x 4,00 m, rinforzate su ciascun bordo da tre «strisce» di vetro parzialmente temperato spesse 12 mm; tali strisce servono a garantire la capacità portante nel caso in cui le lastre piane vengano danneggiate, fornendo così duttilità al sistema (fig. 10b). Una serie di cavi metallici, disposti a raggiera secondo due piani verticali, fungono da irrigidimento, mentre il collegamento strutturale tra le lastre è assicurato da elementi metallici. Uno strato di EPDM (Etilene-Propilene-Terpolimero-Caucciù) garantisce una trasmissione omogenea della tensioni tra vetro e acciaio ed evita l'insorgere di fratture a causa del contatto tra i due materiali.
Al termine dell'esposizione, l'arco è stato sottoposto a progressivi danneggiamenti in modo da dimostrare la duttilità globale del sistema. Inizialmente si è fatto oscillare un elemento metallico di 1.5 kg, lasciandolo urtare ripetutamente la lastra di base, sulla quale tuttavia non sono risultati danni significativi. Quindi è stato lanciato un tubolare di acciaio di circa 15 kg: al terzo colpo il tubolare ha penetrato la lastra, rimanendovi conficcato (fig. 10c). Ciononostante, la stabilità globale della struttura non è stata inficiata. Dopo aver ulteriormente colpito la lastra, sono state quindi danneggiate le strisce di rinforzo sul lato destro e, infine, solo in seguito alla rottura delle strisce di rinforzo sul lato sinistro, l'arco è crollato (fig. 10d). Si è così dimostrato l'alto livello di sicurezza di potenziali sistemi di copertura in vetro, laddove siano utilizzati criteri di progettazione quali gerarchia e ridondanza.

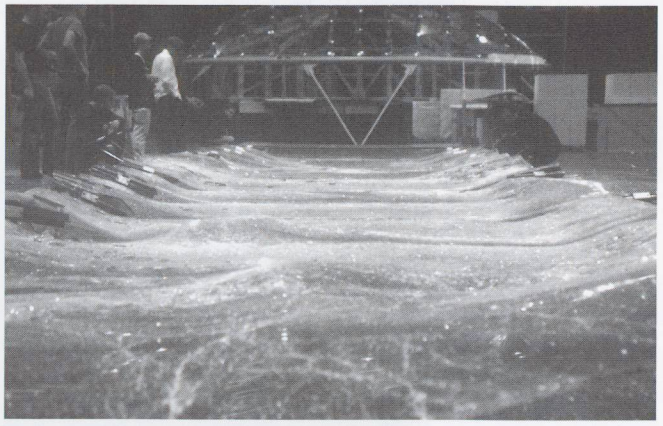
a



b



c



d

10 – Prototipo di arco in vetro, Glastec 98, Düsseldorf
a) vista
b) particolare dei rinforzi in vetro
c) prova di danneggiamento con tubolare
d) crollo dell'arco

Archivio ILEK

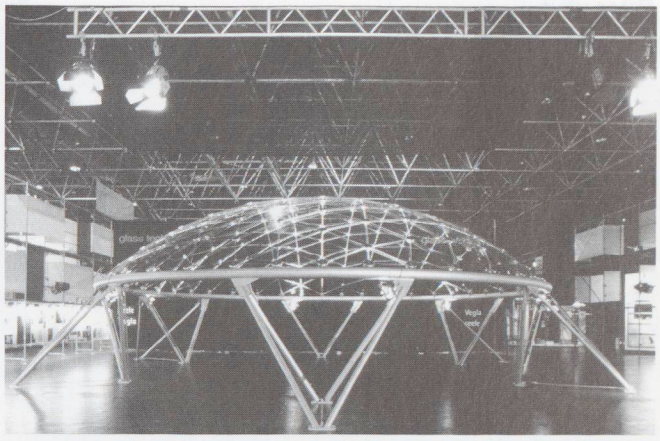
Prototipo di volta in vetro, Glastec 98, Dusseldorf

Progetto: Stefan Behling, Università di Stoccarda
Statica: Ludwig e Weiler

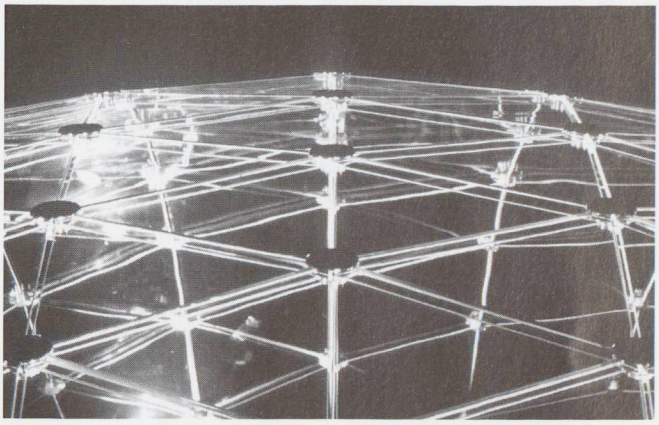
Chiaramente col vetro è anche possibile realizzare superfici a doppia curvatura: rispetto a sistemi a singola curvatura il vantaggio è una maggiore resistenza in virtù della forma. A tale soluzione corrisponde però una difficoltà di concezione geometrica, soprattutto nel caso in cui la superficie sia generata da elementi piani (estremamente più economici): ciò si traduce, comunque, nella necessità di utilizzare lastre di dimensioni variabili, aumentando i costi rispetto ad equivalenti geometrie a botte. Risulta pertanto estremamente significativo il prototipo realizzato da Stefan Behling presso l'Istituto di Costruzione dell'Architettura dell'Università di Stoccarda con la collaborazione dello studio Ludwig e Weiler. Si tratta di una volta sferica con luce di 12,3 m e un altezza di 2,5 m, costituita da 282 lastre triangolari di vetro parzialmente temperato, stratificato (2x10 mm): la simmetria ed un processo di ottimizzazione della geometria consentono di utilizzare «soltanto» 27 differenti formati, con un lato massimo di 1,1 m (figg. 11a/b).

Le lastre trasmettono le forze in corrispondenza dei vertici del triangolo, mediante dei piatti circolari metallici in cui convergono funi in acciaio da 8 mm con funzione stabilizzante (fig. 11c); in acciaio è anche la struttura che confina ai bordi la cupola e scarica le azioni a terra. Per garantire la sicurezza nei confronti di possibili danni, è stato esaminato analiticamente il caso in cui, contemporaneamente, le sei lastre intorno ad un nodo si danneggino, o, in alternativa, che due cavi d'acciaio si rompano. Si è inoltre verificato, sperimentalmente, l'eventuale presenza di instabilità locale di singole lastre, così come, analiticamente, l'instabilità globale. In ogni caso la cupola mantiene la propria capacità portante.

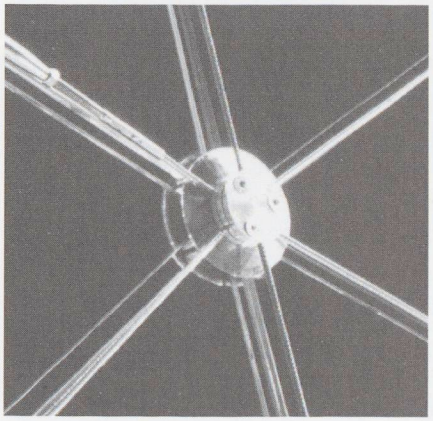
La geometria a doppia curvatura consente in questo caso di sfruttare la duttilità già presente nel sistema, senza ricorrere a moltiplicazioni o a gerarchizzazioni di elementi: infatti, i percorsi interni delle forze possono variare nell'ambito della superficie secondo infinite alternative, senza incidere sulla capacità resistente.



a



b



c

11 – Prototipo di volta in vetro, Glastec 98, Düsseldorf
a) vista
b) particolare
c) dettaglio del nodo

Archivio ILEK

Prospettive

Considerando ciò che è stato realizzato negli ultimi cinque anni grazie al vetro strutturale nel campo delle coperture e le conquiste raggiunte in termini di trasparenza e in generale di qualità del messaggio architettonico, si intravede già un percorso caratterizzato da una presenza minimale di altri materiali. In questa direzione si è ancora realizzato poco, per mancanza di esperienza pratica e di confidenza sia con il vetro che con i livelli di precisione necessari alla riuscita di simili progetti, che si avvicinano più al settore industriale che civile.

Già alcuni significativi esempi nel campo delle strutture miste in vetro e acciaio ne hanno dimostrato le grandi potenzialità e verificato le problematiche connesse alla progettazione di volte estremamente sottili, superando ogni problema di stabilità, alla ricerca di un comportamento di carattere membranale che minimizzi le dimensioni delle strutture portanti. Per alcune soluzioni, sistemi di produzione e di montaggio sono stati progettati e messi a punto, riuscendo inoltre ad ottimizzare le tolleranze. Ciononostante esse non hanno ancora una diffusione corrispondente al loro potenziale.

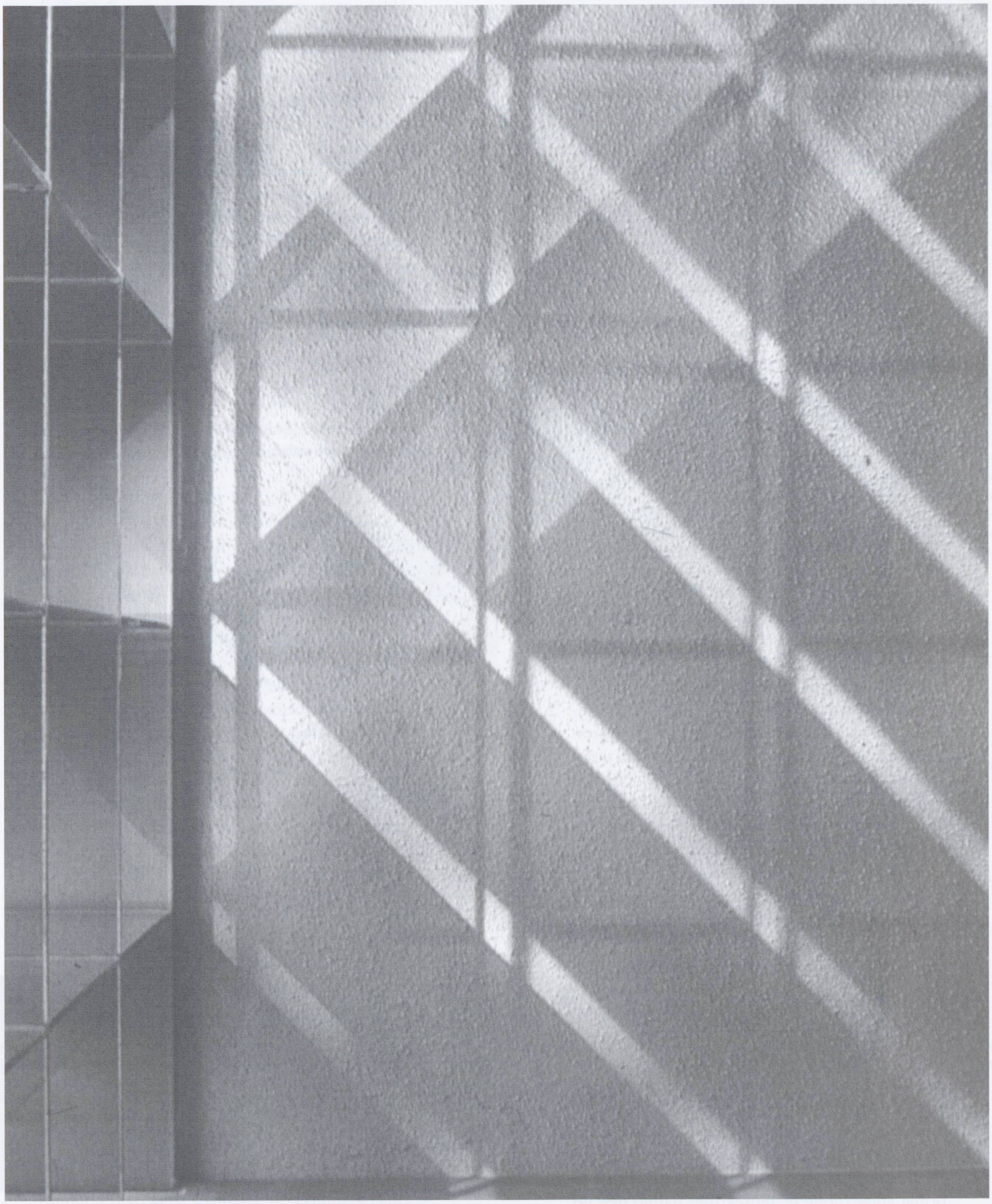
Ma a voler fare un ulteriore passo avanti, i prototipi di ricerca e alcune isolate realizzazioni hanno dimostrato che è possibile spingersi ancora oltre utilizzando le proprietà strutturali del vetro e consentendo così un ulteriore salto di qualità nel risultato architettonico globale. L'utilizzo del vetro, inoltre, è tanto più interessante quanto più se ne impiegano le molteplici qualità, in termini strutturali, ma anche di rapporti con la luce, di trasmissione delle informazioni, di adattabilità; mentre la ricerca della trasparenza è per molti un obiettivo riconosciuto, ancora poco si indaga sia a livello teorico che pratico sulle altre eppure notevolissime qualità. (fig. 12)

Vale quindi la pena di investire ulteriormente in questa direzione, sulla base di una sinergia indispensabile tra progettazione, produzione e ricerca, quest'ultima con lo scopo di sperimentare percorsi nuovi, ma contemporaneamente di stimolare e supportare la voglia di innovazione del mondo delle costruzioni.

Relazione tenuta nell'ambito de «Le giornate del vetro di Venezia», 2. edizione, Venezia 2002.

Bibliografia

- S. Gideion, *Space, Time and Architecture*, Harvard University Press, 1967
- C. Rowe, R. Slutzky, *Transparency: Literal and Phenomenal*, ed. Birkhauser, 1997
- Schittich, Staib, Balkow, Schuler, Sobek, *Glasbau Atlas*, ed. Detail, München, 1998
- J. Schlaich, H. Schober, *Recent glass roofs, Journal of the international association for shells and spatial structures*, 1999, n. 131
- J. Schlaich, H. Schober, T. Helbig, *Eine verglaste Netzschale: Dach und Skulptur*, Bautechnik, 2001 n. 78, pp. 457-463
- *British Museum Courtyard in London*, Detail, 2001 n. 6, pp. 1042-1049
- J. Sischka, *Formvollendung in Stahl und Glas*, Architektur & Bauforum, 2001 n. 5, pp. 97-107
- *Audi Messestand auf der IAA 99 in Franfurt/Main*, Glas, 2000 n. 1, pp. 24-31
- J. J. Ludwig, H. U. Weiler, *Tragstrukturen aus Glas am Beispiel einer Ganzglastonne*, Bautechnik, 2000, n. 77, pp. 246-249
- W. Sobek, M. Kutterer, *Arches et voutes – New Glass techniques*, L'Arca International, 1999, n. 29
- Sophia and Stefan Behling, *Glass, Structure and technology*, ed. Prestel, München, 1999



12 – J. Carpenter: Facciata con vetri dicroitici, Christian Theological Seminary's Chapel, Indianapolis, USA, 1987
Archivio ILEK