

Strutture di vetro



Costruire trasparente e resistente

Lacune normative, scarse indicazioni sui fattori di sicurezza, sui valori di deformazione ammissibili e sulle modalità di calcolo per un materiale con eccezionali potenzialità. Esempi di eccellenza espressiva e tecnologica

Sergio De Gaetano



*Una facciata di elegante leggerezza: le lastre vetro sono ancorate ai cavi pre-tensionati attraverso piatti di acciaio.
(Progetto: DS8 Canary Wharf, London (UK), 2003. Arch: Zeidler, Roberts&Partners. Engineering: Whitbybird Engineers, (UK). Immagini per cortesia di Jaap Oepkes).*



Una delle tendenze dell'architettura contemporanea è quella della trasparenza nelle costruzioni: il vetro svolge un ruolo fondamentale non solo come chiusura, ma anche come elemento strutturale: ciò offre all'ingegneria strutturale nuovi orizzonti di ricerca e di sviluppo. La diversità rispetto a tutti gli altri materiali strutturali, come cemento armato e acciaio, risiede nella sua intrinseca fragilità e questo fatto rappresenta una sfida da affrontare con la ricerca universitaria e con l'esperienza dei professionisti del settore. Certamente il vetro non ha ancora espresso tutto il suo potenziale come elemento strutturale e nell'immediato futuro lo stesso verrà usato con maggiore regolarità specie se accompagnato da un più accurato impianto legislativo.

sta metodologia è la sua semplicità di calcolo ma di fatto non rappresenta il reale comportamento membranale del vetro e in diversi casi conduce a risultati errati.

Poiché le lastre hanno sempre spessori piccolissimi (se confrontati con le dimensioni della lastra) e alti valori delle frecce, la teoria elastico-lineare non è proprio idonea ed occorre invece applicare la teoria membranale-non lineare: quest'ultima non solo rappresenta meglio il comportamento del vetro ma porta ad avere tensioni e deformazioni minori, il che si traduce in un approccio meno conservativo e più economico del progetto. Il "metodo agli stati limite" è dunque l'approccio più corretto dato che fa uso delle differenti distribuzioni statistiche della resistenza e del carico. Le normative euro-



La più recente tecnologia per volte e cupole vetrate non necessita dei tradizionali elementi metallici di tensione.

La cupola ha una luce di 8,5 m ed è assemblata incollando l'asse di vetro curvo stratificato (8 mm ricotto accoppiato con lastre di vetro temperato chimicamente di 2 mm). La cupola si appoggia alla base su di un anello in titanio, materiale scelto per la sua compatibilità col vetro nei confronti delle deformazioni e delle variazioni di temperatura. La tecnologia adesiva è stata testata a varie temperature di esercizio (da -10°C fino a 85°C) a taglio, trazione e compressione con un coefficiente di sicurezza di 5,6. Il giunto adesivo è stato ottimizzato a 10 mm garantendo una trasmissione delle forze o la regolazione delle tolleranze.

Caratteristiche del materiale e indicazioni tecnologiche sono la premessa per individuare le migliori strategie per l'uso del vetro strutturale.

Progetto strutturale del vetro

Con riferimento al solo progetto di lastre piane in vetro, non esiste nessun riferimento normativo europeo se non la bozza prEN 13471^{2,3} che aspetta una revisione sin dal lontano 1999 e che di fatto presenta numerosissime lacune, tra cui il fatto di non dare indicazione sui fattori di sicurezza, sui valori di deformazione ammissibili per carichi di breve e lunga durata e di non definire le modalità di calcolo per il vetro strutturale. Comunemente, il calcolo viene effettuato tramite la tradizionale teoria elastica ereditata da Timoshenko⁴, usando il "metodo alle tensioni ammissibili" con un fattore di sicurezza di 2.4 per il vetro non strutturale come stabilito dal DIBt^{5,6} e di 7-10 per il vetro strutturale stabilito a seconda della sensibilità del progettista. Il vantaggio di que-

Una cupola solo vetro

Vista esterna della cupola in vetro realizzata mediante incollaggio e senza alcun elemento metallico.

Prototipo realizzato all'ILEK, Università di Stoccarda (GER).

Engineering: Werner Sobek.

Immagini per cortesia di L. Blandini.

pee e quelle americane^{7,8} suggeriscono come determinare il corretto spessore di un vetro ma solo per lastre rettangolari, carichi distribuiti e intelaiature su 2 o 4 lati: di fatto, le stesse danno solo indicazione sul classico caso del vetro in una finestra soggetto al carico vento e la mancanza di altri riferimenti normativi per il vetro strutturale costringe il progettista a ricorrere al calcolo mediante programmi sugli elementi finiti. Ad oggi, nel caso di vetro strutturale, la scelta sul fattore di sicurezza da impiegare e i valori della freccia ammissibile sono elementi arbitrariamente settati dal progettista senza alcun riferimento normativo e sulla base della sua esperienza nel settore. Dipendentemente dal tipo di rischio, sta al progettista stabilire la quantità di test da eseguire per verificare la bontà della progettazione e del calcolo.

Va detto che, se a livello di normative europee ci sono tantissime lacune, il quadro normativo italiano è praticamente inesistente per quanto riguarda la progettazione strutturale del vetro e la sola UNI 7143-72⁹ relazio-

na sul calcolo degli spessori di vetri piani per carico vento e neve. Tale normativa è stata però disegnata per il caso tipico di un vetro intelaiato in una finestra o in una facciata (ossia il caso del vetro supportato sui quattro lati) e non può essere assolutamente presa a riferimento per il calcolo delle strutture in vetro.

Attualmente, nel caso di elementi strutturali in vetro e a seconda dello Stato in cui si sta operando, è necessario ricevere un "approvazione tecnica" da parte di istituti riconosciuti e qualificati, come ad esempio il CSTB francese ed il DIBT tedesco.

Diversamente da tutti gli altri materiali comunemente impiegati nelle strutture, il vetro non è sottoposto a fatica, data la perfetta linearità tensioni e deformazioni e la rottura è di tipo fragile. Carichi ciclici possono causare microfessure che, a fatica, si potrebbero estendere ed è perciò più opportuno parlare di "crescita temporale di microfessure" più che di vera e propria resistenza a fatica del vetro. La velocità di propagazione delle stesse è proporzionale all'intensità dei carichi, alla temperatura ed è, come già detto, fortemente dipendente dalla composizione chimica del vetro e del tipo di produttore. Il fenomeno è approfondito da diversi autori¹¹ ed è tutt'oggi in corso di definizione.

Va ricordato che, nel progettare una struttura in vetro, non si può tener conto di una serie di fattori che, pur non essendo propriamente strutturali, finiscono per pilotare le scelte progettuali. Tra questi, le sollecitazioni termiche svolgono un ruolo primario: si tratta di forze interne generate dalla differenza di temperatura tra il centro e l'estremità della lastra soggetta all'esposizione solare. Una differenza di temperatura di 1°C tra le due superfici crea uno stress di circa 0.6 N/mm² e l'esperienza ha dimostrato che un vetro ricotto di spessori comuni si rompe per una differenza di temperatura di 40°C. La rottura del vetro per shock termico dipende da una serie di fattori come l'orientamento della lastra, le condizioni ambientali (temperatura, altitudine, ecc...), la presenza di elementi riflettenti (veneziane, tende o neve e acqua), il tipo di vetro e spessori, l'eventuale trattamento del vetro (colorazioni, coatizzazioni, ecc...) ed il tipo di supporto e intelaiatura della lastra.

La formula empirica di Rice

Al di là del tradizionale controllo delle tensioni e deformazioni, è indispensabile indagare sugli effetti dinamici di una struttura in vetro. Pertanto, accanto all'analisi statica non lineare, occorre abbinare un'analisi dinamica non lineare facendo uso dei software oggi a disposizione. Come pre-dimensionamento, è possibile controllare il valore della frequenza naturale F secondo la relazione empirica suggerita di P.Rice¹⁰:

$$F = 16 / (d^{1/2}) \text{ (Hz)}$$

essendo d (mm) la deformazione in mezzera per carichi permanenti. E' buona norma fare in modo che F sia sempre maggiore di 5 Hz per evitare qualsiasi fenomeno di risonanza.

Pilastri e colonne in vetro

Normalmente, a seconda della altezza della facciata e della geometria in gioco, si costruiscono in più pezzi da 8 metri circa uniti tra di loro mediante rotules o piatti in acciaio.

Si tratta di elementi verticali comunemente usati per supportare facciate e per conferire resistenza all'azione del vento o a qualsiasi momento flettente. Sono schematizzate come "travi semplicemente appoggiate" incernierate in estremità e dilatanti in basso in modo da evitare qualsiasi carico di punta o svergolamento. Se il pilastro o colonna sono dunque disegnati per non instabilizzarsi, occorre solo controllare il carico assiale ma soprattutto gli eventuali carichi laterali (come la spinta della folla) che possono cau-

Progetto strutturale delle lastre piane

Metodo di calcolo	Fattore di sicurezza	Vantaggi	Svantaggi
Tensioni ammissibili	Vetro non strutturale = 2,4 Vetro strutturale = 7 - 10	Semplicità di calcolo	Non rappresenta il reale comportamento membranale del vetro. Possibili errori.
Agli stati limite	Per i vetri strutturali vengono settati dal progettista (non ci sono riferimenti normativi). A seconda del tipo di rischio si stabiliscono dei test per verificare calcoli e progetto	Approccio meno conservativo e più economico; utilizza le differenti distribuzioni statistiche della resistenza e del carico; rappresenta meglio il comportamento del vetro	

L'influenza dello shock termico

Shock termico	Cause	Effetti (esempio)
Sollecitazioni termiche generate dalla differenza di temperatura tra il centro e l'estremità della lastra soggetta all'esposizione solare	Orientamento della lastra; condizioni ambientali; presenza di elementi riflettenti; tipo di vetro e spessori; trattamento del vetro; tipo di supporto e intelaiatura della lastra	D 1°C fi 0.6 N/mm ² (fattore di stress). Il vetro ricotto ad esempio si rompe per un D 40°C

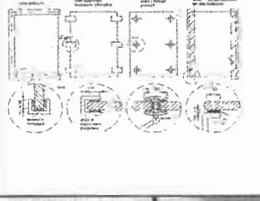
sare una flessione sulla superficie laterale della colonna, la quale amplifica l'effetto della trazione generata dal momento flettente. Per ragioni di sicurezza, si è obbligati ad usare sempre vetri stratificati, accoppiando vetri temperati (se l'altezza lo consente) oppure semi temperati o in ultima analisi due o più vetri ricotti. A seconda dei suddetti carichi e della geometria in gioco, si dimensiona dunque lo spessore del vetro ed un eventuale precompressione può conferire benefici contro i carichi laterali e soprattutto quando, per difetti costruttivi, la colonna non è completamente piatta nella sua altezza. Quando poi il pilastro o la colonna in vetro

supportano un tetto in vetro oltre che la flessione generata da una facciata, allora il progettista deve considerare attentamente cosa succede alle lastre del tetto se una colonna cede.

Come già detto, occorre sempre prevedere percorsi alternativi del carico per le lastre presenti nel tetto e va da se che anche una eccessiva flessione delle lastre in vetro è preferibile al collasso intero della colonna.

Travi in vetro

Si tratta di elementi orizzontali normalmente lunghi massimo 8 metri se costruiti in un singolo pezzo, altrimenti, se accoppiate mediante

Applicazioni	Caratteristiche	Materiale	Esempi	
Pilastri e colonne	Elementi verticali per supportare facciate: travi semplicemente appoggiate incernierate in estremità e dilatanti verso il basso	Vetro stratificato con PVB accoppiando temperati o semitemperati	Dettaglio delle Fin in vetro e della connessione. Progetto: Restauro della Maison de la radio, Paris (Far), 2002. Engineering: RFR (Fra). Immagini per cortesia di N.Baldassini	
Travi in vetro	Elementi orizzontali: max 8 m se in un pezzo unico; 12-15 metri se accoppiate con rotules.	Vetro stratificato con PVB accoppiando temperati o semitemperati	Travi in vetro a sbalzo sostenenti un tetto in vetro. Engineering: Asidesign (USA). Immagini per cortesia di F.Safford	
Tetti e pensiline	Elementi adeguati a sopportare la caduta di oggetti, il carico neve, l'esigenza di pulizia, la manutenzione e l'esposizione ai raggi solari	Vetro stratificato con PVB accoppiando temperati o semitemperati	Progetto: Hurlingham Club, London (UK), 2003. Arch: Squire&Partners Engineering: Whitbybird Engineers, (UK). Immagini per cortesia di W.Stevens	
Scale, balaustre e passerelle	Elemento soggetto a carico dinamico (peso proprio dell'uomo e spinta della folla)	Vetro stratificato con PVB accoppiando temperati o semitemperati	Una scala con le pedate in vetro	
Facciate: vetrate a silicone strutturale	Incollaggio strutturale di lastre di vetro al telaio con silicone. Le lastre non lavorano come elemento strutturale, è fondamentale la tenuta meccanica del silicone	Vetri stratificati e siliconi compatibili con i PVB degli stratificati	Tipologie di supporto strutturale di lastre in vetro. Immagini per cortesia di W.Laufs	
Facciate: vetro a fissaggi puntuali	Ancoraggio delle lastre di vetro tramite vincoli strutturali (rotules). I carichi vengono trasferiti alla struttura secondaria	Vetri stratificati temperati e rotules	Dettaglio fissaggio ad elementi puntuali. Progetto: Nuova sede della BBC, London (UK), in costruzione. Arch. MJP. Engineering: Whitbybird Engineers (UK). Immagini per cortesia di B.Beer	
Facciate: Glass Net	Lastre di vetro ancorate ai cavi pre-tensionali con piatti in acciaio. Il vetro non ha funzione strutturale: stabilizza la maglia di cavi e trasferisce il carico flettente del vento ai cavi e alla struttura di supporto	Vetrocamera consente di non avere eccessive dispersioni termiche e acustiche e silicone	Vista Interna della facciata con sistema Glass Net One North Wacker Drive, Chigago (USA), 2002. Engineering: Asidesign (USA). Immagini per cortesia di F.Safford	

piatti in acciaio o mediante rotules, possono raggiungere una lunghezza totale anche di 12-15 metri. Sotto carichi crescenti, le travi in vetro si deformano elasticamente fino alla improvvisa rottura e il comportamento a flessione è principalmente governato dalla resistenza alla flessione del vetro. Il carico a flessione lungo l'asse principale genera tensioni alle estremità della sezione (compressione in alto e trazione in basso) e generalmente il vetro ha proprio agli spigoli la resistenza minore, intesa sempre come probabilità di fessura causata dalla propagazione di microfessure superficiali. Pertanto, l'uso del vetro temperato è una scelta obbligata per fare leva sulle sue maggiori qualità meccaniche e, per ragioni di sicurezza, lo si stratifica con del PVB. La trazione generata dalla flessione può essere ridotta aumentando l'altezza della trave in vetro ma ciò va bilanciato col rischio di avere l'instabilità laterale.

La luce di una trave in vetro può essere aumentata se si combina il vetro, forte alla compressione, con altri materiali duttili aventi elevata resistenza alla trazione. Questo può essere realizzato ad esempio combinando un vetro stratificato a tre lastre con un cavo di acciaio o un piatto

di FRP posizionati sul lato teso.

Particolare attenzione va data ai materiali a diretto contatto col vetro che debbono essere elastici abbastanza da evitare punte tensionali e accomodare possibili gradienti termici: le travi in vetro sono, infatti, fortemente influenzate dalla presenza di punte tensionali e rotture agli estremi sul lato in tensioni possono avvenire anche prima del valore ammissibile. Già a livello di pre-dimensionamento, occorre controllare il "local buckling" ed un metodo semplificato è suggerito da Yoxon:

$$M_{max} < E t^3 / 6 (1 + \mu)$$

Essendo M_{max} il valore massimo del momento flettente (senza fattore di sicurezza), t lo spessore del vetro e μ il coefficiente di Poisson.

Tetti e pensiline in vetro

Il progetto di tetti o di pensiline in vetro richiede sicuramente maggiore attenzione per una serie di fattori, tra i quali la possibilità di caduta di oggetti, il carico neve, l'esigenza di pulizia, la manutenzione e la maggiore esposizione solare che può provocare

Note

- 1, DIN 18516, part 4, Fassadenplatten aus Einscheiben-Sicherheitsglas.
- 2, prEN 13471-1, Glass in Buildings – Design of glass panes – part 1: General basis of design, 1999 (draft).
- 3, prEN 13471-2, Glass in Buildings – Design of glass panes – part 2: Part 2: Design for uniformly distributed loads, 1999 (draft).
- 4, Timoshenko, S.P., Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.
- 5, DIBt: Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen, DIBt-Mitteilungen, 3/2001.
- 6, DIBt: Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen, DIBt-Mitteilungen, 12/1998.
- 7, BSI 6262, Glazing for Buildings, 1982.
- 8, ASTM, Standard practice for determining the minimum thickness and type of glass required to resist a specific load, 1994.
- 9, UNI 7143-72: Vetri piani, Spessore dei vetri piani per vetrazioni in funzione delle loro dimensioni, dell'azione del vento e del carico neve, UNI, 1972.
- 10, Rice, P., Structural use of glass in buildings, IstructE, 1999.
- 11, Sedlacek, G., Blank, K., Laufs, W., Gúsen, J.: Glas im Konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn, 1999 (to be re-published in 2005).
- 12, EN12600, Glass in building - Pendulum test - Impact test method and classification for flat glass, 2002.
- 13, UEAtc (Union Européenne pour l'agrement

Proprietà meccaniche e tipologie di vetro strutturale

Il vetro si comporta in maniera diversa rispetto ai materiali strutturali usati comunemente nelle costruzioni (acciaio, alluminio, cemento armato, ecc...): infatti esso non ha una fase di snervamento ma si rompe in maniera fragile e la sua frattura è stocastica. Se soggetto a flessione, possiede un ottimo comportamento a compressione ed una limitata resistenza alla trazione. La resistenza meccanica del vetro non è una proprietà costante ed assoluta ma anzi è dipendente da una serie di fattori tra cui, in primis, il grado di difetti superficiali (inclusi spigoli ed eventuali fori) che inevitabilmente si creano durante la sua produzione. Maggiore è la quantità dei difetti superficiali, maggiore sarà la probabilità di rottura, intesa come propagazione di più microfessure.

La resistenza del vetro è, inoltre, fortemente influenzata dalla dimensione

della lastra. Una lastra piccola ha resistenze maggiori rispetto ad una più grande: più grande è la lastra, maggiori sono le probabilità di difetti e microfessure che possono portare ad una completa frattura ed alla sua propagazione. Gli studi di A.A. Griffith hanno mostrato che, diminuendo lo spessore del vetro, si aumenta la sua resistenza alla trazione: filamenti di vetri con diametri di pochi micron hanno resistenze di circa 14.000 N/mm². Uno dei settori più interessanti della attuale ricerca internazionale è proprio quello dell'uso di filamenti di vetro accoppiati con polimeri rinforzati.

Altro elemento da considerare nel valutare la resistenza meccanica del vetro è la durata di applicazione del carico. Ad esempio, la resistenza alla trazione di un vetro ricotto è circa 26 N/mm² per un carico della durata di 1 secondo e di 6 per un carico della durata di 30 anni.

Questo aspetto è tenuto in considerazione dalla bozza europea prEN1347 dato che il calcolo agli stati limite è basato sulla divisione di due fattori di sicurezza diversi, uno per il carico a breve durata e l'altro per quello a lunga durata.

Vetro ricotto, "annealed glass"

Si ottiene per colata su un bagno metallico ad atmosfera controllata: quando è ancora allo stato liquido, subisce un raffreddamento lento ("annealing") che lo libera dalle tensioni interne. Esso è disponibile in spessori variabili da 3 a 25 mm e comunemente in lastre fino a 3.2 x 6 metri. Questo tipo di vetro può essere facilmente tagliato e lavorato ma ha lo svantaggio di avere resistenze a rottura limitatissime ($\sigma_{rott} = 45 \text{ N/mm}^2$) e di rompersi in pezzi molto grandi e quindi potenzialmente pericolosi. Non è dunque un vetro di sicurezza e non trova quasi mai applicazione a livello strutturale se non accoppiato nella tipologia di vetro stratificato descritto successivamente.

Vetro temperato "toughened glass"

Il vetro temperato è prodotto riscaldando il vetro ricotto a circa 650-700°C e quindi raffreddandolo rapidamente in modo tale che il centro della sezione sia a più alte temperature rispetto alle estremità superficiali. Di conseguenza, la parte centrale si raffredda e si contrae producendo quindi delle tensioni di compressione alle estremità superfi-

Glass Net: effetto assoluto

Dettaglio della connessione tra vetro e cavi post test One North Wacker Drive, Chicago (USA), 2002 Engineering: Asidesign (USA). Immagini per cortesia di F. Safford.



technique), Rapport technique UEAtc pour l'agrement des ouvrages realises en vitrages extérieurs attaches, 2000.
 14, EN 1364 Fire resistance of Non Load Bearing Elements, 1999.
 15, EN 13501 Fire Classification, 2003.
 16, EN 356, Glass in building - Security glazing: Testing and classification of resistance against manual attack, 2000.
 17, EN 1063, Glass in building - Security glazing: Testing and classification of resistance against bullet attack, 2000.

shock termici. E' importante poi che si calcolino accuratamente le frecce delle lastre sia per carichi a breve durata sia per quelli a lunga durata: una deformazione eccessiva in estremità può compromettere la durabilità dei sigillanti mentre una freccia eccessiva in mezzeria può arrestare il corretto drenaggio dell'acqua e della condensa.

Per ragioni di sicurezza, il vetro è opportuno

ciali e di trazione al centro della lastra. Lo scopo principale del processo di tempra sta nell'introduzione di tensioni di compressione alle estremità dello spessore da cui il nome di "vetro pre-compresso".

Ciò produce una distribuzione parabolica attraverso lo spessore che favorisce il buon comportamento alla compressione del materiale vetro e il pessimo comportamento a trazione: infatti, la tempra riduce la tensione ad un'estremità del vetro e si aumenta la compressione all'altra estremità.

Il risultato e' quello di avere un vetro con resistenze fino a 5 volte superiori rispetto al vetro ricotto ($\sigma_{rott.} \approx 120 \text{ N/mm}^2$). Inoltre, se rotto, si frattura in piccoli pezzi che provocano una pioggia innocua di frammenti per l'uomo: per tale motivo, il vetro temperato è per normativa considerato "vetro di sicurezza". Occorre però sottolineare che, nel caso di eventi esplosivi (come i carichi "bomba"), l'eventuale rottura di vetri temperati può provocare una raffica di frammenti che si trasformano in letali proiettili per l'uomo: basti pensare che l'80% della perdita di vite umane nel caso di carichi bomba è proprio dovuta a lacerazione da fram-

PROPRIETA'	SIMBOLO	UNITA'
Densità a 18°C	-	2500 kg/m ³
Modulo di Young	E	70000 N/mm ²
Coeff. di Poisson	μ	0,22
Coeff. di espansione termica (medio)	-	9 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹

menti di vetro temperato. In tali casi, è preferibile usare il vetro temperato accoppiato nella tipologia vetro stratificato dopo descritta.

I vetri temperati possono essere prodotti fino a 19 mm di spessore e comunemente fino a 4 metri di dimensione. Qualsiasi lavorazione (taglio, creazione di fori, ecc.) deve essere fatta prima del processo di tempra. Dopo la tempra è consigliabile sottoporre la lastra all' "heat soak test"¹, ossia ad un successivo riscaldamento fino a 290°C per verificare la presenza di NiS che potrebbe causare la rottura del vetro se esposto ad alte temperature.

Alternativamente al processo termico di tempra sopra descritto, esiste l'alternativa delle più costosa tempra chimica: essa consiste nella sostituzione di ioni di sodio in superficie con grossi ioni di potassio. La diversità di gran-

che sia stratificato, combinando due o più lastre di vetro semi-temperato o temperato a seconda dei carichi e della geometria in gioco: questo per assicurare che, nell'eventualità di rottura della lastra, non ci sia la caduta di frammenti dato che gli stessi rimangono incollati al PVB per un tempo sufficientemente lungo. Il comportamento del vetro rotto dipende dalla propria grandezza, dal tipo, dallo spessore e dalle condizioni di supporto: sebbene non esiste alcuna normativa al riguardo, è sempre bene prevedere un "post failure test" a scala reale per i casi più critici. Il test si considera soddisfacente se, sotto i carichi agenti sul tetto o sulla pensilina, la lastra rotta rimane in posizione per almeno 24 ore (la durata solitamente si concorda con le autorità locali): questo assicura un tempo sufficiente per la sicurezza al di sotto della lastra e la totale evacuazione delle persone prima della rimozione e sostituzione in sicurezza di una nuova lastra.

Scale, balaustre e passerelle in vetro

La particolarità della progettazione delle scale, balaustre e passerelle in vetro risiede nella diversità del carico da considerare rispetto ai casi finora visti. Infatti, il carico

dezza degli ioni crea una compressione in superficie e quindi allo stesso concetto espresso dalla tempra termica. La tempra chimica viene usata per aumentare la resistenza di lastre di vetro molto sottili (2-3 mm) e trova applicazione soprattutto nell'ingegneria aerospaziale.

Vetro semi-temperato, "heat strengthened glass"

Il vetro semi-temperato è prodotto con un processo simile alla tempra ma il raffreddamento è più lento. Rispetto al temperato, la resistenza di un semi temperato è quasi dimezzata ($\sigma_{rott.} = 70 \text{ N/mm}^2$) e esso può essere prodotto fino a 12 mm di spessore. Il vantaggio è che la rottura dei semi-temperati è simile a quella dei ricotti ed inoltre non sono state riscontrate rotture per inclusioni di solfuro di nickel come invece accaduto per il vetro temperato.

dinamico dell'uomo (peso proprio e "spinta della folla) è qui l'elemento determinante e, in accordo alla normativa¹², occorre sempre testare la struttura perché resista all'accidentale "human impact". Il test consiste nell'impatto di un pendolo di 50 kg rilasciato da diverse altezze allo scopo di determinare quando il vetro si rompe e se la rottura della lastra può essere pericolosa per l'uomo. Va detto che il suddetto test previsto dalla norma europea è riferito al solo caso di una lastra di vetro intelaiata sui quattro lati e quindi, ancora una volta, non esiste nessuna specifica che dia indicazione su come comportarsi nel caso di un vetro strutturale che, per sua definizione, non possiede una struttura di supporto o sostegno. E' dunque ancora compito del progettista definire il tipo di test e normalmente si specifica un test a pieno carico, un "post failure test" (simile a quello descritto per i tetti e le pensiline in vetro) e un test dinamico per verificare il comportamento a lungo termine e la durabilità.

E' opportuno che la superficie calpestabile sia trattata per evitare che il vetro si deteriori nel tempo e che quindi si abbia un significativo cambio di estetica: per tanto è bene

sempre "sabbare" la lastra esterna per dare resistenza allo scivolamento che potrebbe essere letale specie per una superficie bagnata durante operazioni di pulizia. La sabbiatura, inoltre, conferisce quel minimo grado di opacità nel gradino vetrato che serve ad impedire la completa visione dal basso. Il dettaglio tecnico deve essere curato al massimo ed anche la semplice presenza di un bullone sporgente può favorire la caduta.

Vetrare al silicone strutturale

Questa tipologia di facciate è oramai largamente usata da più di 40 anni e consiste nell'incollaggio strutturale di lastre di vetro al telaio in alluminio mediante del silicone: quest'ultimo finisce di essere soltanto un elemento di tenuta all'acqua ma porta il peso delle lastre di vetro e trasferisce i carichi alla struttura secondaria. Il vantaggio è di avere una facciata a "tutto vetro" con il telaio nascosto dietro la lastra stessa.

I siliconi attualmente in commercio sono stabili ai raggi ultravioletti, compatibili con i PVB dei vetri stratificati ed hanno eccellenti proprietà meccaniche: resistenza a trazione di 0.90-1.0 N/mm², 130% di allungamento a rottura, modulo di Young pari a 0.35 N/mm² e

Vetro stratificato, "laminated glass"

La stratificazione del vetro consiste nell'accoppiare due o più lastre di vetro attraverso un layer incollante, comunemente il polivinil butirale (PVB), in un autoclave riscaldata elettronicamente fino a 140°C con una pressione di 12 bars per 6 ore.

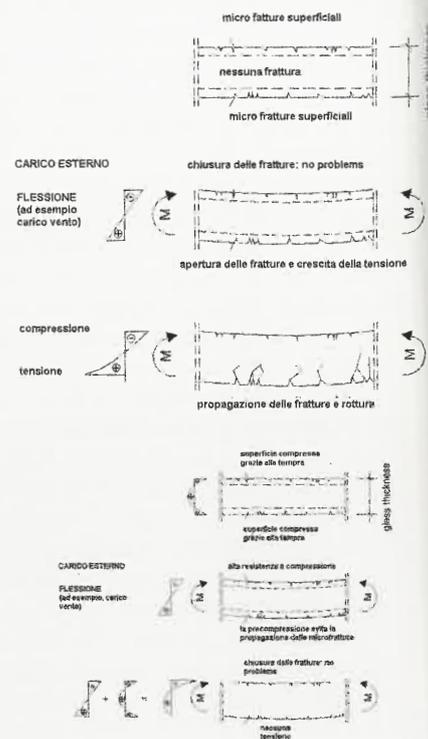
E' possibile accoppiare vetri ricotti, semi-temperati o temperati in una qualsiasi configurazione con differenti trattamenti superficiali e colorazioni per incontrare requisiti acustici e energetici. Riguardo al collante, il PVB offre una buona resistenza avendo 20-23 N/mm² di resistenza a trazione e 250-300% di allungamento elastico ed è sempre bene richiedere dati tecnici dai produttori data la grande quantità di prodotti esistenti in commercio. Il PVB è spesso 0.38 mm e solitamente si è soliti specificare due fogli di PVB (0.76 mm) per applicazioni standard o 4 fogli (1.52 mm) per requisiti particolari di sicurezza (miglioramento anti-bomba, anti-proiettile, anti-vandalismo, ecc.). Il limite del PVB risiede nella sua riduzione della resistenza alla trazione per temperature superiori a 50°C e, nell'eventualità di fuoco, può non

garantire l'incollaggio delle lastre.

La natura visco elastica del PVB è influenzata da diversi parametri come la temperatura, la durata del carico, il valore del carico, l'angolo di taglio, la durabilità rispetto alla radiazione ultravioletta e all'umidità. Se per carichi a breve termine (come il vento e la spinta della folla), il vetro stratificato può considerarsi alla stessa stregua dei monolitici, ciò non accade per i carichi a lungo termine: recenti esperimenti hanno dimostrato che il modulo a taglio G del PVB decresce all'aumentare della durata del carico e anche al crescere della temperatura, indipendentemente dal valore del carico e dall'angolo di taglio. Inoltre, la radiazione ultravioletta e l'umidità portano ad una diminuzione del modulo di taglio G del PVB.

Alternativamente al PVB, esistono altri tipi di layer incollanti come resine e composti a base di solfato di cadmio che, sebbene apportino effetti benefici da un punto di vista acustico, non sono raccomandabili nel caso di vetro strutturale data la loro debolezza a tensione e la scarsa resistenza a taglio in caso di rottura delle lastre.

Una reale alternativa al PVB è oggi



In alto, meccanismo di rottura di un vetro ricotto. Immagini per cortesia di W.Laufs.

Sopra, comportamento a flessione di un vetro temperato. Immagini per cortesia di W.Laufs.

I test per la sicurezza

Post failure test per un vetro a sbaizo sottoposto a 150 kg concentrati.
Progetto: Nuova sede della BBC, London (UK), in costruzione.
Engineering: Whitbybird Engineers, UK.



resistenza termica tra -50°C e 150°C. In realtà, non si tratta di una vera e propria struttura in vetro in quanto le lastre non lavorano come elemento strutturale dato che tutto è affidato alla tenuta meccanica del silicone.

Vetro a fissaggi puntuali

Per definizione una vetrata a fissaggi puntuali consiste nell'ancoraggio delle lastre di vetro mediante vincoli strutturali, le "rotules", che hanno il compito di trasferire i carichi alla struttura secondaria, solitamente chiamate "ragni". Le rotules sono dei bulloni con uno snodo sferico che evita la connessione rigida nel piano vetrato e realizzando di fatto una vera propria cerniera. Grazie alla maggiore trasparenza rispetto alla più tradizionale fac-

ciata intelaiata, questa tipologia è diventata estremamente popolare oggi ed esistono in commercio numerose alternative, anche a basso prezzo, con diversità di prestazioni e comportamento strutturale. A livello normativo, nonostante l'impiego di questa tipologia oramai da più di 20 anni, non esiste nessun riferimento europeo se non una guida tecnica della UEAtc¹³. Il vetro temperato è solitamente preferito per questioni di maggiore resistenza nei confronti delle punte tensionali che nascono nei fori per bulloni, fori che vengono realizzati mediante una punta diamantata prima della tempra del vetro. Magari, specie per carichi elevati, si preferisce accoppiare due o più vetri temperati e già da diversi anni esistono rotules capaci di accomodare anche vetrate isolanti. La progettazione, produzione e installazione del sistema a fissaggi puntuali devono tener conto delle possibili "fuori tolleranza" come della dilatazione termica e dei possibili movimenti della struttura.

Glass Net

Il costante desiderio di trasparenza ha negli ultimi 10 anni portato a sviluppare un altro tipo di struttura, nota come "glass net", nella quale il quantitativo di elementi metallici è

Tipologia	Lavorazione	Spessori	Dimensioni lastre	Resistenza a rottura	Applicazioni strutturali
Vetro ricotto	Per colata su un bagno metallico ad atmosfera controllata, raffreddamento lento allo stato liquido	3 mm < S < 25 mm	Max 3,2x6 m	srott=45 N/mm ²	Non è un vetro di sicurezza. Ha applicazioni strutturali solo se accoppiato al vetro temperato. Rottura in grossi pezzi
Vetro temperato	Ottenuto riscaldando il vetro ricotto a circa 700°C e raffreddandolo rapidamente	S < 19 mm	Max 3x6 m	srott=120 N/mm ²	E' un vetro di sicurezza. Rottura in frammenti
Vetro semi-temperato	Processo simile alla tempra, con raffreddamento più lento	S < 20 mm	Max 3x6 m	srott=70 N/mm ²	E' un vetro di sicurezza. Rottura in grossi pezzi
Vetro stratificato	Accoppiamento di due o più lastre di vetro attraverso un layer incollante (PVB o SentryGlas - adatto per requisiti antibomba)	Variabile a seconda degli strati di vetro e dello spessore e del numero di fogli di PVB interposti	Max 3x6 m	Variabile a seconda delle tipologie di vetro che si accoppiano: srott stratificati > srott ricotti	E' un vetro di sicurezza, può essere anche antibomba. In caso di rottura i pezzi rimangono incollati grazie al PVB

rappresentata dall'incollante ionoplastico, commercialmente noto come SentryGlas® prodotto dalla Dupont: esso possiede maggiore resistenza a trazione (35 N/mm²) e maggiore allungamento (400%). Come il PVB, esso è auto adesivo, resiste ai raggi ultravioletti e non ingiallisce col tempo, problema comune invece ad altri polimeri. Il suo costo è però giustificato solo da casi particolari, dove ad esempio

siti di miglioramento anti-bomba. Oggi il vetro stratificato consente di usare il materiale in condizioni di sicurezza dato che, in caso di rottura, le lastre ed i frammenti rimangono incollati tra di loro attraverso il PVB. La fragilità del vetro e il comportamento elastico lineare vengono compensati dall'azione del vetro stratificato il quale aggiunge quelle doti di plasticità deformativa proprie dei mate-

Ovviamente, le proprietà del vetro stratificato variano a seconda dei tipi di vetro che si accoppiano: infatti, l'accoppiamento di due vetri temperati ha sicuramente maggiore beneficio in termini di resistenza rispetto all'accoppiamento di due vetri ricotti anche se, in linea generale, un vetro stratificato ottenuto mediante l'accoppiamento di due vetri ricotti ha resistenze migliori nella fase "post failure", ossia dopo

ridotto al minimo: si tratta di una elegante soluzione architettonica nella quale le lastre in vetro sono ancorate ai cavi pre-tensionati attraverso piatti di acciaio. In realtà, anche per questo caso, il vetro non svolge una vera e propria funzione strutturale se non quella di stabilizzare la maglia di cavi e di trasferire il carico flettente del vento ai cavi e quindi alla struttura di supporto. Difatto, per le glass nets, il vetro rimane solo un elemento di rivestimento e tutta la progettazione di questa tipologia risiede principalmente nella ricerca dell'optimum geometrico della maglia, nell'equilibrio del pre-tensionamento dei cavi e nella cura del dettaglio del fissaggio puntuale. Va, inoltre, sottolineato che, sia per le glass net come per le vetrate a fissaggio puntuale, l'unico elemento che conferisce resistenza termica e acustica è proprio il vetro e la scelta del vetrocamera è difatto un obbligo per non avere eccessive dispersioni termiche e acustiche: in entrambi i casi, se da un lato il concetto di trasparenza è garantito, dall'altro questi tipi di facciate hanno basse capacità di isolamento e il ponte termico attraverso il silicone, che unisce le lastre verticalmente e orizzontalmente, è una realtà che va accettata. Inoltre, la tenuta all'acqua è garantita solo dal silicone presente tra le lastre e ciò rappresenta un altro punto di debolezza: occorre sempre verificare che le deformazioni della lastra in vetro siano compatibili con le capacità di allungamento e deformazione del silicone.

Sicurezza delle strutture in vetro

Nel disegnare una struttura in vetro, il progettista deve sempre tener presente la sua natura fragile e la possibilità di rotture accidentali o deliberate. La rottura del vetro deve essere sempre prevista e, perché la struttura sia in sicurezza, è necessario sempre prevedere dei percorsi alternativi del carico. La cura del dettaglio è essenziale per la sicurezza di una struttura in vetro ed occorre assolutamente evitare concentrazioni tensionali: a differenza di altri materiali con comportamento plastico, il vetro si rompe senza preavviso per overstress. I carichi devono essere trasferiti secondo un percorso ben definito da un materiale all'altro ed è sempre bene usare elementi interstiziali con un certo grado di compressibilità (guarnizioni fibrose, setting blocks, rondelle plastiche,

Le origini del vetro strutturale

La nascita del vetro nel concetto moderno del termine si può far risalire al 1952 con l'invenzione del processo "float" da parte di Sir Pilkington che rivoluzionò il modo di produrre il vetro a livello industriale.

L'uso strutturale del vetro iniziò ad essere indagato negli anni Sessanta e l'esempio pionieristico si ritrova nel foyer della Centro Televisivo di Parigi (arch. H. Bernard, 1963) dove lastre di 4 metri sono rinforzate per resistere a flessione attraverso "pinne" di vetro incollate al vetro.

La prima applicazione a grande scala si ritrova nelle vetrate degli uffici Willis, Faber e Dumas ad Ipswich (arch. N. Foster, 1982) dove il produttore di vetri Pilkington sospese le lastre mediante piatti in acciaio rinforzate grazie a colonne di vetro. Il passo successivo fu poi l'uso dei fissaggi puntuali ("rotules") al posto dei piatti di ritegno in acciaio: Pilkington brevettò il sistema Planar che rappresenta tutt'oggi la pietra miliare nel campo dei fissaggi sospesi strutturali: le prime applicazioni si trovano nel Centro Renault a Swindon (arch. N. Foster, 1982) e nelle serre del Parco delle Villette (arch. A. Fainsilber, RFR).

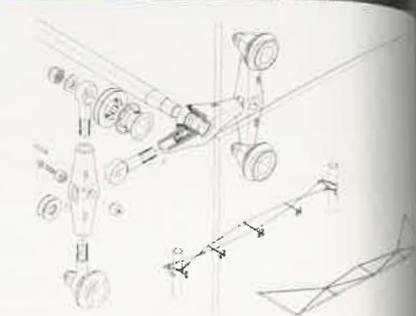
Il successo commerciale delle vetrate strutturali ha reso poi possibile la ricerca teorico-sperimentale e l'ingegneria del vetro è stata approfondita agli inizi degli anni '90 soprattutto dallo studio francese Rice, Francis, Ritchie (RFR) e dalla scuola di Stoccarda di Schlaich. Il desiderio architettonico di massima trasparenza ha quindi portato architetti e ingegneri a sperimentare nuovi orizzonti e senza dubbio l'enorme progresso della tecnologia moderna è stato possibile solo grazie al contributo dei maggiori produttori di vetro come Pilkington e Saint Gobain.

Oggi esistono diverse realtà europee specializzate nel campo dell'ingegneria del vetro strutturale (ad esempio Arup, Whitbybird, RFR o Dewhurst&Macfarlane): data la complessità del materiale vetro come elemento strutturale, acustico, termico e tecnologico, l'apporto di società di consulenza è indispensabile se si vuole raggiungere un certo livello qualitativo del prodotto finale e l'esperienza dei tecnici del settore è richiesta durante l'iniziale analisi e design, così come durante i test, la produzione e l'installazione. A livello italiano purtroppo non esistono studi di ingegneria del vetro con un livello qualitativo comparabile a quello dei partner europei. Questo è dovuto principalmente al mancato approfondimento della ricerca universitaria italiana nel campo del vetro strutturale ed alla mancanza di fondi per la sperimentazione. A ciò si aggiunge poi la incompatibilità tra il "desiderio al risparmio" delle imprese di costruzione italiane ed il costo che la progettazione del vetro strutturale inevitabilmente comporta.

ecc...). Oggi è possibile utilizzare una struttura in vetro anche come protezione al fuoco^{14,15}, elemento anti-vandalismo¹⁶, anti-proiettile¹⁷ ed infine è possibile progettare la struttura perché abbia delle caratteristiche di resistenza nei confronti delle esplosioni e degli atti terroristici.

Sergio De Gaetano, ingegnere, CEng, M.I.C.E. Whitbybird Engineering UK.

L'autore ringrazia Niccolò Baldassini-RFR (Fra), Franz Safford-Asidesign (USA), Wilfried Laufs e Lucio Baldini-Werner Sobek (Ger) e Will Stevens-Ben Beer - Whitbybird Engineers (UK), per il prezioso contributo fotografico.



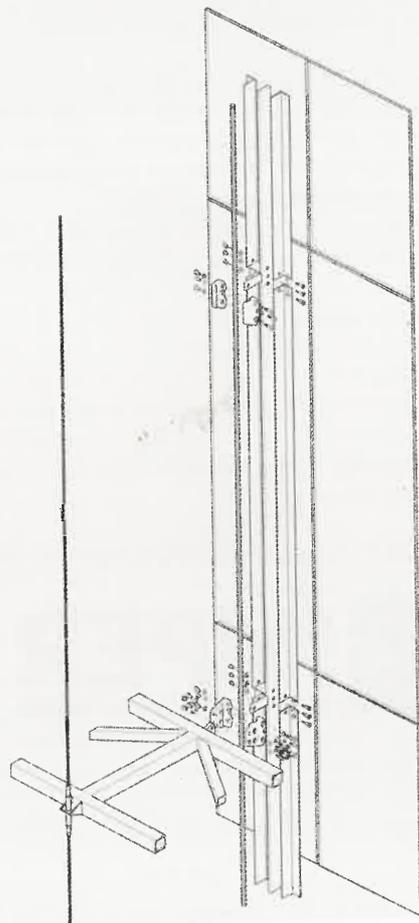
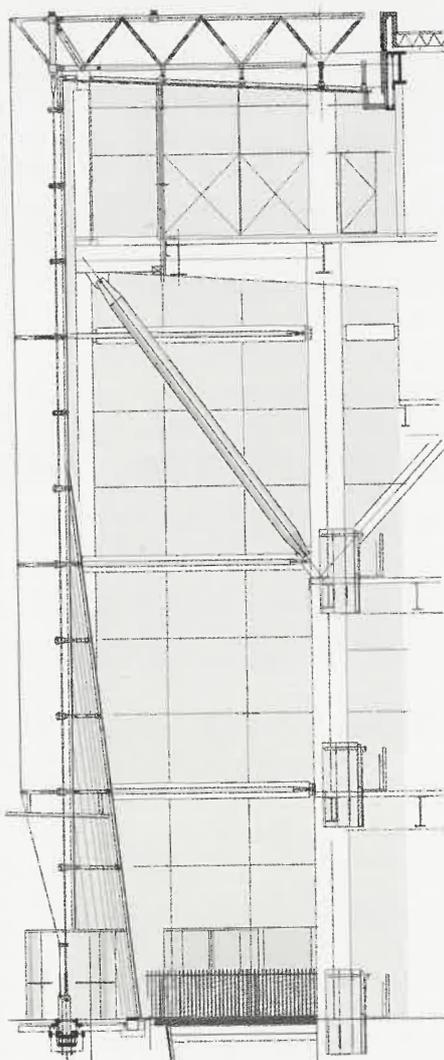
Progetto: Serre La Villette, Paris (Fra), 1986.

Engineering: RFR (Fra).

Immagini per cortesia di N. Baldassini.

Un esempio eccellente: Canary Wharf, Londra

Diverse soluzioni architettoniche e tecnologiche sono state adottate per il DS-8, rappresentando una vera e propria esibizione sulle potenzialità del vetro strutturale. L'edificio si trova ad est della torre principale di Canary Wharf, ospitando una sede dei famosi magazzini Waitrose e il Reebok Sports Club. Lo studio di architettura canadese Chapman Taylor Architects vinse la competizione internazionale ed in seguito il Cliente ha voluto avere nel team gli architetti SMCZeidler come responsabili delle sole facciate e Whitbybird come studio di ingegneria con esperienza nell'uso del vetro e delle strutture high-tech. Le facciate Est ed Ovest hanno un'estroverta personalità, espressa da una dozzina di patterns sul vetro e un andamento conico che dà il benevenuto ai visitatori provenienti da est e da ovest. Il vetrocamera interno è trattato con dell'inchiostro ceramico che conferisce opacità mentre il vetro esterno è acidato in vario modo per conferire diverse soluzioni di densità visiva. Si tratta di facciate larghe 50 m e alte 24 m, sostenute orizzontalmente da un complesso sistema di cavi e sezioni piene in acciaio il cui peso è trasferito alla singola truss in acciaio che corre sul tetto per tutta la lunghezza dell'edificio. Cavi pretesi in acciaio inox da 29 mm di diametro sono posizionati ogni 2 metri, tenuti assieme da staffe disegnate da Whitbybird per l'occasione. I cavi sono pretesi fino a 25 t in modo tale da minimizzare le deformazioni indotte dal carico vento fino ad un massimo di 50 mm. I cavi sono vincolati lateralmente da trusses orizzontali posizionate ogni 6 metri, tirantate direttamente sui pilastri interni dell'edificio. Le facciate Nord e Sud hanno un sistema di facciata continua alla quale si appendono strutturalmente delle "pinne" in vetro di diversa grandezza che creano un effetto "onda" di grande impatto visivo ed architettonico: le pinne hanno varie altezze (massimo fino a 2 metri) e una larghezza che va da 300 mm fino a 1.8 m. La forma e l'angolazione di ogni pinna è stata calcolata e modellata al computer. Le estremità della lastra di vetro sono incernierate in alto e vincolate anche in basso a cavi di 10 mm di diametro che a loro volta si legano tutti alla trave perimetrale sul tetto che corre lungo tutto l'edificio. Essendo le pinne in vetro solo incernierate, si è reso necessario l'uso di cavi orizzontali per scongiurare il rischio di



Il Progetto

Realizzazione:
Edificio DS-8

Cliente:
Canary Wharf Group

Progetto:
Chapman Taylor Architects

Architettura delle facciate:
Arch: Zeidler,
Roberts&Partners.

Ingegneria delle facciate e del vetro:
Whitbybird Engineers

Importo generale della commessa:
150 Milioni di Euro

Anno di realizzazione:
2004



In alto, facciate Nord/Sud. Dettaglio del sistema di connessione delle pinne di vetro con la facciata interna.

Sopra, facciate Nord/Sud. Test di rottura delle pinne in vetro e verifica in sicurezza del comportamento strutturale delle lastre a rottura. A sinistra in alto, sezione verticale delle facciate est e ovest.

A sinistra in basso, sketch del sistema di supporto strutturale delle facciate est e ovest. Tutte le immagini: per cortesia Whitbybird

instabilità laterale: i cavi sono fissati alla facciata continua interna ogni 8 metri e sono pretesi in modo tale da minimizzare i carichi orizzontali del vento. Si noti che i cavi sono stati tesi in cantiere dopo la loro installazione. La soluzione del vetro strutturale appeso mediante un sistema di cavi, l'ondularità delle lastre e le diverse tipologie di smaltatura del vetro conferiscono un ruolo scultoreo all'architettura. La pelle esterne riflette la luce in una prospettiva continuamente cangiante basata su una curva sinusoidale. L'illusione ottica di un muro in movimento è enfatizzata dalla smaltatura puntuale delle pinne esterne o di quella lineare della facciata continua retrostante.