

L' IMPIEGO STRUTTURALE DEL VETRO

Sergio Tattoni⁽¹⁾

Gian Piero Cossu⁽²⁾

Luigi Fenu⁽²⁾

⁽¹⁾Università degli Studi di Cagliari
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Piazza d'Armi – 09123 CAGLIARI – I

⁽²⁾Università degli Studi di Cagliari
Dipartimento di Architettura
Piazza d'Armi – 09123 CAGLIARI – I

Sommario. *Nelle più recenti e significative opere dell'architettura si è iniziato ad ipotizzare per il vetro un possibile ruolo attivo all'interno del sistema strutturale: partendo dall'intensa attività di ricerca e dai progressi tecnologici raggiunti dalle industrie produttrici si sono potuti realizzare effettivamente numerosi esempi architettonici, una volta considerati utopistici o impossibili. Nel presente lavoro, dopo un'ampia presentazione del vetro inteso come materiale strutturale, si descrivono alcune tipologie di elementi (pareti, piastre, travi, pilastri), le loro problematiche e si presenta il metodi di progetto e verifica secondo la normativa europea. Viene infine fornita una vasta bibliografia per i necessari approfondimenti.*

1 INTRODUZIONE

Nel progetto di un edificio e dei suoi differenti elementi di fabbrica, l'evoluzione architettonica ha visto il vetro ricoprire – per effetti di trasparenza e riflessione sempre più perfezionati – ruoli progressivamente differenti. Pur svolgendo solitamente il ruolo di riparo e protezione tipico dell'involucro dell'edificio, esso garantisce l'apporto luminoso verso l'interno degli ambienti, ma, grazie ad un'evoluzione tecnologica ancora relativamente recente, si è raggiunta anche la possibilità di sfruttare, fra le sue caratteristiche fisiche, non solo la trasparenza, ma anche le caratteristiche meccaniche. Discernendo fra specifiche prestazioni, l'ambito strutturale è quello quindi su cui ora soffermarsi, sebbene non siano trascurabili le performance attinenti al comfort visivo, a quello acustico e termico, senza trascurare la potenzialità oggi sempre più attuale di un suo utilizzo sostenibile, dalla produzione alle applicazioni architettoniche nell'architettura bioclimatica, fino alle possibilità di riciclo.

1.1 Produzione

Non tutti i vetri sono adatti all'edilizia. Fra i differenti tipi disponibili, si fa riferimento principalmente, a seconda delle modalità di produzione, al vetro in lastre tipo float e a quello colato, impiegati in edilizia principalmente in due tipi di composizione chimica.

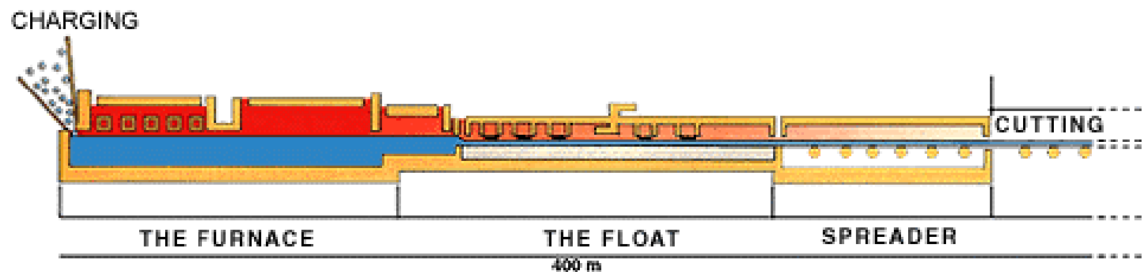


Figura 1. Percorso produttivo vetro Float.

Nel caso specifico, ci si riferisce al vetro sodico-calcico, facilmente lavorabile sia all'atto della sua produzione in lastre tipo float, sia nelle successive lavorazioni d'officina. Le norme UNI lo classificano come prodotto di vetro silicato sodico-calcico piano, trasparente, chiaro o colorato, a facce parallele e lustre, ottenuto per colata continua e flottazione su un bagno metallico di stagno, in atmosfera controllata (Figura 1). Il vetro a composizione sodico-calcica è utilizzato anche colato per vetri stampati ed ornamentali, strutturali e per profilati ad U, oltre che nel caso di lastre che abbiano spessori ragguardevoli. L'evoluzione tecnologica riguarda, oggigiorno, specialmente il vetro borosilicato. Sebbene meno economico del float, esso trova applicazione in edilizia soprattutto per elementi strutturali in tubi, accoppiando ad una maggior resistenza una modesta dilatazione termica.

Per l'importanza dell'uso strutturale delle lastre di vetro, specie nelle facciate continue, è importante rivolgere l'attenzione al vetro tipo float. La sua produzione, all'interno di forni continui a bacino, ricorre a specifici procedimenti di finitura, conseguenti alla fusione ed alla dissoluzione in forno della miscela vetrificabile omogenea delle materie prime. Fra i

procedimenti di finitura, fondamentale è quello della ricottura che riguarda sistemi di produzione industriale in cui il vetro è sottoposto ad un raffreddamento che, nel minor tempo possibile, permette di ridurre le tensioni al di sotto del limite massimo ammissibile. La cosiddetta ricottura del vetro consiste cioè in un processo di raffreddamento controllato per evitare l'insorgere di autotensioni, altrimenti responsabili della rottura. E' importante però precisare che la ricottura non porta ad un rafforzamento della resistenza meccanica come invece avviene con i procedimenti di tempra ed indurimento di cui si dirà nel seguito.

1.2 Lavorazioni

Lasciando appunto la tempera ad uno specifico paragrafo, l'uso del vetro in edilizia, specie se strutturale, impone specifiche lavorazioni successive alla produzione. Oltre ai trattamenti superficiali a freddo quali smaltatura, sabbiatura e satinatura, le seconde lavorazioni prevedono soprattutto trattamenti della superficie e dei bordi della lastra. Alla tecnica del taglio – a cui si ricorre quando il vetro è protetto dal telaio – seguono opportune lavorazioni dei bordi, quali smerigliatura e molatura, essenziali, oltre a prevenire gli infortuni degli operatori, per minimizzare la presenza di microfratture ai bordi della lastra di vetro con taglio grezzo le cui conseguenze sono una minor resistenza, statisticamente dimostrata, della lastra la cui rottura è causata proprio dalla propagazione di microfratture dai bordi non rifiniti.

Per dar forma al bordo si ricorre ad appropriate tecniche di molatura, mentre, per la foratura delle lastre, occorre procedere preservando la lastra da microfessurazioni da cui si propagherebbe la frattura. Il ricorso a trapani dotati di punta a corona diamantata, ovvero a tubi di ottone o ferro in luogo della punta a corona consente di asportare il materiale dal foro senza minare la stabilità dell'intera lastra.

2 PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE

Fra le proprietà fisiche del vetro, la trasparenza è senz'altro peculiare: essa ne indirizza in modo primario l'utilizzo in edilizia e conferisce agli elementi in vetro specifiche qualità architettoniche.

Si trascurano qui altre proprietà quali il calore specifico o le proprietà elettriche, mentre si focalizzano quelle che influenzano il comportamento meccanico, in considerazione di una sua prestazione strutturale. La densità del vetro varia a seconda della sua composizione: mediamente è di circa 2.5 g/cm^3 , ma può scendere a 2.15 g/cm^3 per vetri borosilicati e, invece, anche raddoppiare per quelli all'ossido di piombo. La densità può essere un valido mezzo per controllare l'omogeneità del vetro.

Il vetro ha poi durezza piuttosto elevata, dell'ordine di circa 6 nella scala di Mohs (resistenza alla scalfittura) e compresa tra 400 e 500 in quella di Knoop. Ciononostante può essere scalfito da diversi minerali, per esempio di quarzo, di ortoclasio e dallo stesso acciaio, sì che la polvere, a seconda dei minerali contenuti, può graffiarlo danneggiandolo.

2.1 Comportamento in presenza di difetti e meccanica della frattura

I materiali che non presentano fenomeni di plasticizzazione - come il vetro, nella cui pratica costruttiva sono di fatto da considerare assenti - vedono la loro resistenza determinata dalla meccanica della frattura, perché è la sua instabile propagazione a causarne il collasso.

Nel suo uso strutturale il vetro è da considerare come materiale con comportamento elastico lineare, che quindi non manifesta deformazioni residue e non è in grado di ridistribuire plasticamente le tensioni. Raggiunge quindi lo stato limite ultimo con una tensione di rottura che coincide con il limite elastico. Soggetto a sforzo monoassiale fino a collasso, la sua deformazione ultima coincide con il rapporto fra la tensione di rottura e il modulo di Young, che è di circa $73 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2$.

Il vetro è, quindi, estremamente sensibile alla presenza di difetti, quali microfratture ed inclusioni.

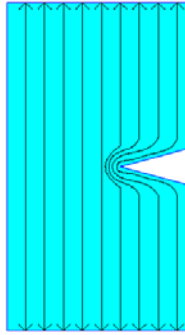


Figura 2. Andamento qualitativo delle traiettorie della tensione in una barra uniformemente sollecitata a trazione e contenete una frattura.

Infatti, allorché nell'intorno di una frattura, seppur microscopica, si hanno tensioni di trazione, l'intensificazione degli sforzi al suo apice (Figura 2) convoglia su di essa l'elevata energia potenziale elastica accumulata dalla struttura, trasformandola in energia che va a rompere i legami fra gli atomi, senza che ciò porti ad una redistribuzione delle tensioni, attraverso modifiche della struttura stessa del materiale, come avviene con la modifica del reticolo nei materiali cristallini, o attraverso la formazione di microfessure nei conglomerati. Dal punto di vista molecolare, il vetro è amorfo, cioè con struttura non ordinata - per esempio, in un reticolo cristallino - e non ha quindi praticamente alcuna risorsa propria in grado di ostacolare il propagarsi catastrofico di una frattura resa instabile dalla combinazione critica dei due principali fattori instabilizzanti, la lunghezza della fessura e l'entità degli sforzi di trazione al suo intorno; nei metalli, invece, la resistenza all'avanzamento della frattura opposta dal reticolo cristallino, li rende duttili.

Vale la pena richiamare brevemente l'esperienza di Griffith, da cui originò la moderna meccanica della frattura. Egli considerò a ragione il vetro come un liquido sovraraffreddato, di cui misurò nell'intorno di $1'000 \text{ }^\circ\text{C}$ l'esatta tensione superficiale di 0.56 Nm/m^2 , pari ad un'energia superficiale $\gamma = 0.56 \text{ J/m}^2$, ed assunse, in accordo con l'esperienza, che fino al collasso avesse comportamento elastico lineare. Fino a rottura, allora, in una barra di vetro soggetta a trazione σ , l'energia di deformazione per unità di volume è pari a:

$$0.5 \sigma \delta/E = 0.5 \sigma^2/E \quad (1)$$

si che, provocando la deformazione l'allontanamento di due strati di atomi adiacenti lungo una sezione retta della barra e distanti fra loro δ , l'energia di deformazione per unità di superficie della sezione retta è

$$\eta = 0.5 \sigma^2 \delta/E \quad (2)$$

D'altra parte η deve anche eguagliare l'integrale dell'energia superficiale sulle due superfici di separazione create dalla rottura della barra in due pezzi, cioè

$$\eta = 2\gamma \quad (3)$$

Dovendo essere allora

$$2\gamma = 0.5 \sigma^2 \delta/E \quad (4)$$

e considerando una distanza interatomica $\delta = 10^{-10}$ m, per $E = 70 \cdot 000$ MPa si trova una resistenza teorica a trazione del vetro $\sigma = 14 \cdot 000$ MPa, circa pari a quella valutata da Griffith di $13 \cdot 000$ MPa in un vetro in cui misurò $E = 62 \cdot 000$ MPa.

Riscontrò poi sperimentalmente come a partire da una resistenza a trazione di circa 170 MPa per asticelle di vetro spesse 1 mm, al diminuire del diametro la resistenza aumentasse dapprima lentamente, e poi sempre più marcatamente fino a raggiungere, per il minor diametro da lui ottenuto di 2.5 μ m, il valore di 3'400 MPa; estrapolando i dati, valutò che per un diametro tendente a zero, si raggiungeva la resistenza teorica del vetro da lui stimata. Intuì allora come le fibre più fini fossero praticamente prive di difetti mentre quelle di spessore via via crescente avessero difetti di dimensione e quantità inevitabilmente maggiore che provocavano un anticipato collasso rispetto alle prime. Pose così le basi della meccanica della frattura lineare elastica (LEFM), per lo studio della quale il vetro è il materiale migliore perché l'assenza di reticolo cristallino consente di evitare le complicazioni create dalle plasticizzazioni e dalla duttilità consentendo semplici considerazioni teoriche.

Seguendo Griffith, conviene allora considerare una lastra di vetro molto più larga del suo spessore sollecitata lungo due bordi opposti fra loro da sforzi di trazione uniformi σ , e avente una fessura lunga $2a$ orientata ortogonalmente alla direzione della trazione. La fessura devia quindi la trazione e, avendo le sue pareti scariche, queste si aprono spostandosi in ogni loro punto di

$$v(x) = 2\sigma(a^2 - x^2)^{0.5}/E \quad \text{per } -a \leq x \leq a \quad (5)$$

mentre ai suoi apici si ingenera un'elevata intensificazione degli sforzi. La LEFM consente di utilizzare la sovrapposizione degli effetti: lo stesso effetto si ha quindi sommando quello in una lastra non fessurata soggetta a trazione uniforme σ con quello in una lastra fessurata non sollecitata ai bordi ma sollecitata invece gradualmente da uno sforzo di segno opposto $-\sigma$ sulle due pareti della fessura con l'effetto di richiuderle, sì che per la sovrapposizione degli effetti le pareti della fessura sono alla fine ancora scariche. Il lavoro dovuto al graduale spostamento degli sforzi $-\sigma$ sulle due pareti della fessura è allora:

$$W = 2 \left(-\frac{\sigma}{2} \int_{-a}^a v(x) dx \right) = -\frac{\pi a^2 \sigma^2}{E} \quad (6)$$

Se la lastra ha spessore unitario, l'integrale dell'energia superficiale γ sulle due pareti della fessura è $\Gamma = 4a\gamma$, e, un incremento da della lunghezza della fessura richiede quindi

che da una parte le σ svolgano un incremento di lavoro dW convogliando l'energia potenziale elastica verso la frattura, e che dall'altra quest'energia sia consumata con un aumento della superficie di frattura sulle due pareti pari a $2 da$ per parte che causa una dissipazione di energia $d\Gamma = 4da\gamma$. La frattura è quindi stabile fintanto che, in condizioni critiche, $dW = -d\Gamma$, e si raggiunge quindi la condizione d'equilibrio $d/da (W+\Gamma) = 0$, ovvero $-2a\pi\sigma^2/E + 4\gamma = 0$, situazione oltre la quale si ha la propagazione della fessura; si ottiene cioè la ben nota espressione:

$$\sigma^2 = \frac{2E\gamma}{\pi a} \quad \text{o anche} \quad \sigma^2 = \frac{K_{Ic}^2}{\pi a} \quad (7)$$

ove $K_{Ic} = \sqrt{2E\gamma}$ è il fattore di intensificazione degli sforzi, e in cui $G_c = 2\gamma$ è la resistenza del materiale all'avanzamento della frattura, o tenacità, che nei materiali intrinsecamente fragili è evidentemente una costante e nel vetro vale circa 1 J/m^2 ; K_{Ic} è quindi anch'esso una costante, ed è pari a circa $0.25 \text{ MN/m}^{3/2}$. La (7) mostra che la condizione critica si raggiunge per $\sigma^2 a = G_c E / \pi = \text{cost}$, cioè l'elemento in vetro sollecitato da σ all'intorno di una frattura, si romperà per sforzi di trazione σ_R tanto minori quanto più grande è la lunghezza della frattura, in accordo con quanto evidenziato sperimentalmente da Griffith.

Quindi per un certo elemento in vetro con una fessura di lunghezza $2a$ che collassa per una tensione di trazione all'intorno pari a σ_R , si ha che la frattura rimane stabile fintanto che σ non raggiunge σ_R , cioè fintanto che la variazione dell'energia potenziale elastica rilasciata dW rilasciata dall'intero elemento è minore della variazione $d\Gamma$ dell'energia dissipata dal materiale opponendosi all'avanzamento della frattura. Quando σ raggiunge σ_R il tasso di energia potenziale elastica rilasciata per convergere agli apici della frattura e farla avanzare è maggiore della resistenza del materiale all'avanzamento della frattura stessa e questa si propaga catastroficamente.

Il vetro è poi soggetto ad una sorta di fatica statica, perché per sforzi di trazione subcritici le fratture avanzano nel tempo fintanto che raggiungono una lunghezza critica che porta ad un'intensità di sforzo al loro apice tale che il vetro si rompe spontaneamente. Si può allora considerare un'espressione del tipo

$$\sigma^n T = \text{cost} \quad (8)$$

che mostra come nel vetro il prodotto della tensione elevata n per la durata della sua applicazione T è costante a rottura. Pur variando con le condizioni ambientali, nella pratica si può porre $n = 16$. Per un difetto che porti ad una tensione di rottura di 1 MPa per una durata di applicazione del carico di 1 s , da questa relazione si ha che se la durata è di 0.01 s la tensione può raggiungere 1.6 MPa , mentre se la durata è di un anno la tensione non può superare 0.5 MPa .

Infine si può notare che i difetti possono trovarsi comunque nell'intero volume di vetro, ma nella superficie le microfratture, dette fratture di Griffith, si formano inevitabilmente col raffreddamento. Le fratture superficiali sono poi favorite da aggressivi chimici. Anche l'acqua è uno di questi, e, specie a seconda della composizione chimica del vetro, lo deteriora accrescendone i difetti. Si deve quindi evitare che su una lastra di vetro l'acqua ristagni, per esempio se questa è in posizione perfettamente orizzontale.

2.2 Resistenza meccanica

La resistenza a compressione semplice del vetro è molto elevata, ma nelle applicazioni pratiche raramente può essere integralmente sfruttata. Essa è pari a circa $\sigma_{RC}=1\ 000\text{ N/mm}^2$.

La resistenza a trazione del vetro non trattato diminuisce con l'aumentare dello spessore della lastra a causa della maggior presenza di difetti che statisticamente si rileva in spessori maggiori. In vetri float, per carichi di breve durata (p.e. vento) non amplificati da coefficienti parziali, al variare dello spessore t si può assumere una tensione ammissibile pari a:

$t=6\text{ mm}$	$t=8\text{ mm}$	$t=10\text{ mm}$
41 MPa	34.5 MPa	28 MPa

Tabella 1. Tensione ammissibile in funzione dello spessore delle lastre.

Sommariamente, per carichi di media durata, la tensione ammissibile può assumersi minore di circa il 40%, per lunga durata la tensione ammissibile è all'incirca da poco meno di 3 volte (neve per esempio) a 4 volte (carichi permanenti) inferiore a quella a breve termine.

La pulitura a fuoco che elimina molti difetti superficiali, porta ad un rimarchevole aumento della resistenza. Tra l'altro, è importante che la superficie del vetro venga protetta dal danneggiamento superficiale, anche durante il trasporto. È statisticamente acclarato che la mancata protezione delle lastre causi una loro diminuzione di resistenza.

La resistenza a flessione di una lastra di vetro aumenta notevolmente se essa è sottoposta a trattamenti termici che creino delle autotensioni permanenti sì che la lastra è in trazione nel suo strato più interno ed in compressione negli altri due strati prossimi alle sue due superfici. Gli strati superficiali che nell'inflessione sono quelli maggiormente sollecitati a trazione, si ritrovano così soggetti a compressione e questo impedisce che dai difetti superficiali si propaghi la frattura. Per vetro parzialmente temprato o indurito (Heath Strengthened Glass) e per vetro temprato (Toughened Glass) si possono assumere rispettivamente, per carichi di breve durata, le seguenti tensioni ammissibili

Indurito	Temprato
35 MPa	60 MPa

Tabella 2. Tensioni ammissibili per vetro trattato (carichi di breve durata).

Per carichi di durata maggiore questi valori vengono diminuiti fortemente. Per esempio per la neve sono divisi per un coefficiente pari a 2.6. I carichi permanenti sono fortemente penalizzati: per il vetro indurito si può assumere una tensione ammissibile pari a circa 20 MPa, per quello temprato a 35 MPa.

2.3 Viscosità

A temperatura ambiente il comportamento del vetro è praticamente elastico fino al collasso.

All'aumentare della temperatura diventa invece possibile deformare il vetro avendo deformazioni permanenti. Oltre una certa temperatura, cioè, il vetro manifesta un comporta-

mento viscoso di cui non si può non tenere conto nella sua produzione e nelle differenti lavorazioni che, tra l'altro, ne determinano poi il comportamento e l'uso.

Alle temperature in cui manifesta il suo comportamento viscoso, il vetro si comporta come un fluido newtoniano. Esso è comunque sempre molto viscoso, ed alla massima temperatura di fornace in cui il comportamento è meno evidente, la viscosità della massa fusa è comunque elevata, circa 10 Pa s (10^2 Poise), tale da dover aspettare molte ore prima che le bolle d'aria, formatesi durante il processo, vengano evacuate e la massa vetrosa raggiunga un elevato grado di omogeneità. La viscosità di un vetro, raffreddato dallo stato fuso, aumenta poi esponenzialmente al diminuire della temperatura secondo una curva continua, su cui si possono individuare alcune importanti temperature di riferimento e i relativi valori della viscosità η :

- -il punto di lavorazione, alla cui temperatura corrispondente la viscosità è di 10^4 Poise (10^3 Pa s), sufficiente per iniziare le operazioni di formatura del vetro;
- il punto di rammollimento, la cui temperatura è tale che il vetro scorre ancora in modo apprezzabile sotto il proprio peso ($\eta=107.6\text{P}$), ma in assenza di carichi mantiene la forma;
- il punto di ricottura ($\eta=1013\text{P}$) caratterizzato da una temperatura alla quale eventuali tensioni presenti si riducono entro limiti accettabili;
- il punto di tensione ($\eta=1014.5\text{P}$), dalla cui temperatura il vetro può essere raffreddato rapidamente senza indurre tensioni permanenti di entità significativa.

Quando si passa alla fase di raffreddamento, la temperatura viene ridotta ad un valore vicino ai $1'100 \text{ }^\circ\text{C}$, corrispondente ad una viscosità di $1'000 \text{ Pa s}$, ideale per l'inizio della lavorazione meccanica. Non appena si conclude questa fase, la temperatura viene ulteriormente diminuita e la viscosità ridotta al valore di 10^{11} Pa s , per il quale il vetro non si deforma sotto il peso proprio. Una volta superata la temperatura di transizione vetrosa (540°C), la consistenza meccanica consente il trasferimento delle lastre con sistemi a rulli. Il vetro float permane un certo tempo in prossimità della temperatura di transizione vetrosa, al fine di ridurre gli stati tensionali interni. Nella fase successiva, le lastre sono portate lentamente da $540 \text{ }^\circ\text{C}$ a temperatura ambiente, pronte per essere sottoposte alle lavorazioni successive e al confezionamento.

L'aggiunta di piccole percentuali di ossidi metallici alcalini, come SiO_2 o GeO_2 , riduce fortemente la viscosità.

In base al comportamento viscoso del vetro nell'intervallo di trasformazione si definiscono come "punto inferiore di ricottura" (strain point) e "punto superiore di ricottura" (annealing point) le temperature che limitano la zona di raffreddamento o di ricottura dei vetri. Alla temperatura corrispondente al punto inferiore di ricottura è necessario un tempo di 16 ore per annullare le tensioni, mentre alla temperatura del punto superiore di ricottura questo tempo si riduce a 15 minuti. La viscosità corrispondente al punto inferiore e superiore di ricottura è rispettivamente di $10^{14.5}$ e 10^{13}P .

2.4 Autotensioni

Mentre il vetro si trova ancora in uno stato plastico-viscoso, è possibile raffreddarlo a qualsiasi velocità, ma a partire dalla sua temperatura di rammollimento - e in particolare all'interno dell'intervallo di rilassamento - è necessario procedere molto lentamente se si vuole evitare di generare tensioni interne. La formazione di queste tensioni si spiega col fatto che durante un raffreddamento accelerato, a causa della bassa conduttività termica del vetro, la dissipazione termica non ha luogo con velocità uguale in tutto il solido, bensì si genera un gradiente termico tra il centro della lastra e la superficie.

In una lastra di vetro, raffreddata a velocità costante, il gradiente termico tra le due superfici esterne ed il piano medio, ha andamento parabolico. Conseguentemente il raffreddamento rapido genera all'interno dello spessore della lastra tensioni di trazione, il cui massimo valore è nel piano medio, che vanno poi a diminuire parabolicamente e simmetricamente in direzione delle superfici esterne fino ad annullarsi (Figura 3), proseguendo con tensioni di compressione crescenti fino alla loro intensità massima sulle due superfici della lastra.

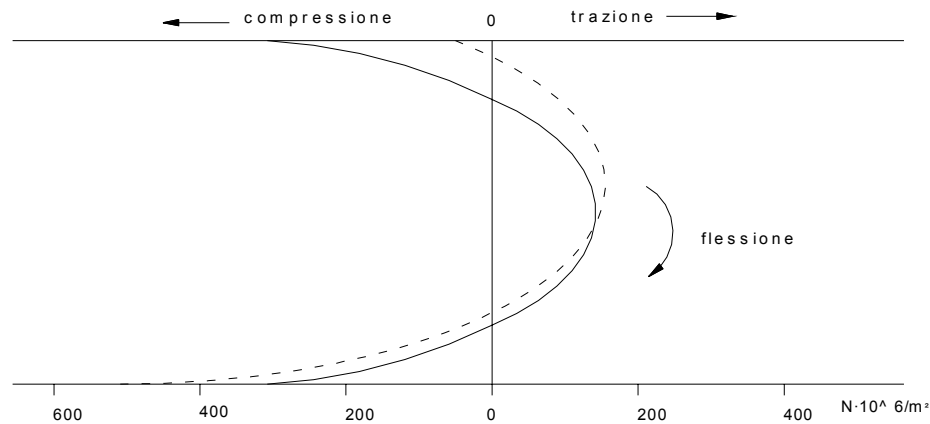


Figura 3. Diagramma dello stato di tensione nel vetro temprato (Curva continua: lastra scarica; curva tratteggiata: dopo inflessione con momento negativo).

Affinché le tensioni generate siano permanenti, il raffreddamento all'interno dell'intervallo termico compreso tra il punto superiore ed il punto inferiore di ricottura del vetro, deve avvenire ad una velocità sufficientemente elevata per impedire il rilassamento viscoso. Tali tensioni si possono poi eliminare solo attraverso un ulteriore riscaldamento al di sopra del punto superiore di ricottura, seguito da un lento raffreddamento.

Se invece il vetro è fatto raffreddare rapidamente ad una temperatura situata al di sotto del punto inferiore di ricottura, le tensioni prodotte sono solo temporanee.

In definitiva le tensioni permanenti si producono come conseguenza dell'eliminazione repentina del gradiente termico del vetro, purché l'intervallo di temperatura sia quello che consente di impedire, per la rigidità raggiunta, il fenomeno del rilassamento viscoso.

3 TRATTAMENTI TERMICI PER AUMENTARE LA RESISTENZA

Attraverso la tempra si fornisce al vetro uno stato di precompressione superficiale che conferisce maggiore resistenza giacché non consente la propagazione della frattura degli inevitabili difetti superficiali. Queste microfratture, inclusioni e graffiature hanno così, al contorno, uno stato di sforzo di compressione sfavorevole all'apertura della frattura ed alla sua propagazione. Nel nucleo della lastra si generano invece trazioni e queste forze di compressione e trazione indotte si devono ripartire in modo da essere in reciproco equilibrio.

In alcune applicazioni, per esempio in alcuni ritti, la stessa funzione è raggiunta con la precompressione uniforme di tubi di vetro mediante l'inserzione di un tirante baricentrico in acciaio teso fra le estremità del tubo. La tempra è fondamentalmente di due tipi, termica e chimica. La prima è di gran lunga più importante nelle applicazioni strutturali.

3.1 Tempra termica

Il vetro temprato nella letteratura specializzata è noto come *partially tempered* o *toughened glass*. Nella produzione di vetro piano, la miscela vetrosa fusa è raffreddata lentamente. Questa procedura di *ricottura* "lehr", rimuove le tensioni indesiderabili dal vetro. Successivamente per diventare "vetro temprato", si procede con un ulteriore riscaldamento uniforme ad una temperatura vicina al punto di rammollimento. Il processo di tempra per vetri piani si svolge all'interno di una fornace su rulli costituiti da materiale refrattario, che riducono la tendenza del vetro ad aderire una volta rammollito.

Quando il vetro raggiunge una temperatura leggermente inferiore a quella di rammollimento, compresa fra 650 °C e 750 °C, la viscosità è di circa 10^9 P. In queste condizioni le tensioni interne che si erano generate precedentemente vengono eliminate.

Quando poi la lastra di vetro ritorna alla temperatura ambiente, compaiono i reali effetti della tempra che la rendono fino a due o tre volte più resistente di una in vetro ricotto.

Nella tempra la fase di raffreddamento, fino alla temperatura ambiente, avviene con correnti uniformi d'aria fredda su entrambe i lati della lastra; altrimenti si può operare con immersione in un bagno di sali fusi. Le zone esterne, quindi, si raffreddano e si contraggono più rapidamente del nucleo, che a causa della bassa conduttività termica tipica del vetro, conserva inizialmente una temperatura maggiore ed uno stato plastico. Nel corso del raffreddamento le superfici esterne del vetro si induriscono subito, mentre l'interno della lastra resta più caldo e grazie alla relativa fluidità è in grado di adattarsi per scorrimento viscoso alla contrazione dell'esterno. Nel corso del rapido raffreddamento il nucleo tende quindi a restringersi, ma incontra l'impedimento delle superfici già irrigidite, generando delle tensioni di trazione.

Il vetro così trattato presenta quindi uno stato di trazione all'interno della lastra e una forte compressione sulle superfici, da cui deriva la maggior resistenza, perchè prima di arrivare a rottura devono essere annullate le tensioni permanenti di compressione introdotte con il trattamento termico che contrastano l'apertura delle inevitabili microfessure superficiali che si formano durante la produzione. L'intensità delle tensioni generate sarà tanto maggiore quanto più elevato è il gradiente termico comparso durante la fase di raffreddamento (ovvero maggiore è la temperatura di riscaldamento e minore quella di raffreddamento).

mento, maggiore lo spessore del vetro e minore la conduttività termica) e quanto più alto è il coefficiente di dilatazione termica.

Qualsiasi tipo di lavorazione che va a penetrare la zona centrale della lastra provocherà la frammentazione dell'intero pezzo, originando piccoli frammenti. Questo fenomeno può essere spiegato in termini di ramificazioni multiple all'estremità delle microfratture che si diffondono molto rapidamente, oppure in termini di conversione dell'energia tensionale interna accumulata in energia di superficie.

L'andamento delle autotensioni dovute alla tempra è descrivibile attraverso l'espressione

$$\sigma(z) = \sigma_0[1 - 12(z/t)^2] \quad (9)$$

ove σ_0 è la tensione di trazione nel piano medio, t lo spessore del vetro, mentre l'ascissa z varia fra una superficie e l'altra sì che $-t/2 \leq z \leq t/2$ con $z = 0$ al centro della lastra.

La compressione in superficie è allora pari a

$$\sigma_{cS} = \sigma(t/2) = -2 \sigma_0 \quad (10)$$

cioè è in valore assoluto doppia rispetto alla tensione di trazione sul piano medio. L'annullamento delle tensioni generate dal processo di tempra si ha per $\sigma(z) = 0$ a profondità $t_c = 0.21 t$, che definisce la profondità superficiale di compressione. Si capisce, quindi, che lo strato di compressione introdotto dalla tempra termica si estende dalla superficie per circa un 20% dello spessore e che la regione di trazione interna alla lastra riguarda circa il 60% dello spessore totale. Una tempra ottimale coinvolge quindi uno strato superficiale più profondo della maggior parte dei difetti normalmente presenti sul vetro.

Il valore della compressione superficiale può essere correlato in questo caso con il valore della resistenza σ_R del vetro temprato. La profondità dello strato di compressione è molto superiore rispetto alla massima profondità delle cricche che si possono generare in superficie, e quindi con buona approssimazione si può ritenere corretta la relazione: $\sigma_R = \sigma_{cS} + \sigma_V$, ove σ_V è la resistenza meccanica del vetro prima della tempra.

La resistenza a trazione in questo tipo di vetro risulta quindi dell'ordine di 200÷250 MPa, cioè due o tre volte superiore a quella di un vetro semplicemente ricotto. Indicativamente, in una lastra soggetta a pressione uniforme, per esempio quella del vento, il vetro temprato risulta circa quattro volte più rigido del vetro ordinario; inoltre, ha una resistenza all'urto circa raddoppiata.

Va però evidenziato che i vetri trattati con tempra termica non possono essere sottoposti a seconde lavorazioni, quali ad esempio quelle di taglio o perforazione. La penetrazione completa dello strato di compressione provoca infatti la frammentazione totale ed istantanea dell'elemento.

In generale nel vetro possono esservi inclusioni non visibili a occhio nudo, né con microscopio ottico, ma solo con un microscopio elettronico ad alta risoluzione, costituite solitamente da particelle d'alluminio, ferro e silice, dovute al contatto con i materiali refrattari della fornace, oppure derivanti da impurità presenti nel bacino di colatura o nel materiale di scarto aggiunto alle materie prime. Queste inclusioni sono difetti equivalenti a microfratture, come per esempio le bolle d'aria; nel vetro temperato il trattamento termico riduce queste ultime, e l'accuratezza nel processo produttivo riduce le inclusioni. Particolarmente pericolose sono però le microscopiche inclusioni di solfuro di nichel (Ni S) che, se si trovano nella parte centrale in trazione dello spessore della lastra, da sole possono provocarne la co-

siddetta rottura posticipata, o rottura spontanea. Esse sono caratterizzate da una transizione di fase volumica alla temperatura di 396 °C, fra la fase cristallina α -NiS di forma esagonale tipica della alte temperature e quella β -Ni S di forma romboedrica tipica delle basse temperature, e nota come millerite.

Con la tempra, l'inclusione di Ni S si trasforma completamente nella fase di riscaldamento in α -Ni S, mentre nella fase di rapido raffreddamento l'inclusione non ha il tempo per ritrasformarsi da fase α -Ni S a fase β -Ni S. Ciò avverrà dopo la tempra con aumento di volume in un tempo che può variare da pochi minuti a qualche anno. Se la particella si trova nella parte centrale in trazione della lastra, il suo aumento di volume ne provoca la rottura in frantumi.

Attualmente l'unico modo per trovare inclusioni di solfuro di nichel in una lastra di vetro temprato è l'esecuzione dell'Heat Soak Test che attivando termicamente l'espansione dell'inclusione, accelera il processo di rottura spontanea, consentendo così di scartare le lastre di vetro potenzialmente pericolose. Questo controllo di qualità è ovviamente costoso e deve essere fatto su tutte le lastre utilizzate. Se si utilizza vetro float nel cui processo produttivo le inclusioni sono minimizzate, la probabilità di rottura spontanea in opera delle lastre si riduce da circa il 5% a circa l'1%. Purtroppo l'attivazione termica delle inclusioni di Ni S modifica la tempra e riduce la resistenza delle lastre formando anche, in caso di rottura, frammenti di dimensione maggiore, a svantaggio della sicurezza.

3.2 Vetro indurito

Il vetro indurito, che nella letteratura specializzata è noto come *partially tempered* o *heat-strengthened glass*, si ottiene con un trattamento termico analogo a quello dei vetri temprati; le principali differenze consistono in una minore temperatura di riscaldamento del vetro (10-20°C in meno) e in un raffreddamento decisamente più lento, eseguito sempre mediante getti d'aria, ma con correnti d'aria molto meno potenti che per ottenere il vetro temprato *fully tempered*.

L'andamento delle tensioni nello spessore della lastra è sempre parabolico, ma con minori valori di compressione e di trazione rispetto al vetro temprato. Anche i vetri induriti non sono immuni dalla presenza di inclusioni cristalline di solfuro di nichel; tuttavia i minori valori di trazione interna riducono notevolmente la probabilità di rottura spontanea e, quindi, non viene solitamente richiesto di eseguire l'Heat Soak Test.

La tensione di compressione che si genera sulla superficie è minore rispetto a quella di un vetro temprato, quindi si hanno inferiori resistenze a trazione, circa 80 N/mm², ma ancora quasi doppia rispetto a quella di un normale vetro float ricotto. Il modello di frammentazione è considerato non di sicurezza, a causa della maggior dimensione dei frammenti rispetto al vetro temprato. Analogamente al vetro temprato, anche i vetri induriti non possono essere tagliati o perforati.

4 VETRO STRATIFICATO

Nell'intento d'ovviare alla tipica fragilità del vetro, oltre ai processi di rafforzamento meccanico di cui si è detto, va posto in evidenza il ricorso al multistrato, capaci di garantire una resistenza meccanica significativa per le possibilità architettoniche del vetro, proprio nel caso delle facciate strutturali e degli elementi portanti di molte strutture contemporanee interamente vetrate. La loro affermazione commerciale deriva – non a caso – dalle condizioni di trasparenza conseguibili, paragonabili a quelle del vetro usuale, garantendo, però, ben più apprezzabili livelli prestazionale e di sicurezza anti-infortunio, anche dopo rottura. Lo stratificato consiste in un pannello composto da almeno due lastre di vetro con uno strato intermedio di un polimero di sintesi, aderente su tutta la superficie delle lastre. Generalmente si ricorre al polivinilbutirrale (PVB), elastico e di una trasparenza paragonabile a quella vitrea, con spessori contenuti fino a circa 1,5 mm ed anche superiori per lastre temprate termicamente, ricorrendo eventualmente anche a più strati di PVB per vetri stratificati di sicurezza. Talvolta alcuni vetri stratificati sfruttano la ragguardevole resistenza e trasparenza del policarbonato (PC), in luogo del PVB. In lastre monostrato o pluristrato, con relativi spessori variabili – anche in relazione al grado d'infrangibilità richiesto – si garantisce l'adesione del policarbonato al vetro ad alta pressione, interponendo uno spessore molto ridotto di poliuretano per contribuire all'adesione plastica, oltre alla protezione anti-UV. Senza soffermarsi sul loro processo produttivo – comunque complesso e costoso – l'attenzione deve qui rivolgersi verso l'essenziale caratteristica di sicurezza che gli è propria. Rispetto al temprato, lo stratificato assorbe un'energia d'urto ben superiore, rimanendo nella propria sede, impedendo la penetrazione. La stessa localizzazione della rottura e l'adesione delle schegge allo strato plastico, limitano danni e pericoli conseguenti. Ciò dà ragione del vasto campo applicativo, prima solo accennato, giacché la miglior garanzia di sicurezza consente applicazioni strutturali, oltre che di chiusura orizzontale e verticale, elementi di parapetto, interi corpi scala, gabbie di ascensori, ...

Le stesse proprietà del vetro stratificato, specialmente il profilo di frattura, si basano su una serie di fattori fra loro concatenati: tipo di vetro, spessore delle singole lastre, condizioni superficiali del vetro e dei bordi, geometria del pannello e natura del carico, spessore complessivo, condizioni di vincolo e tipo di struttura d'appoggio. Tuttavia, la resistenza all'urto è direttamente correlata all'adesione del PVB al vetro, giacché il deterioramento dell'adesione nel tempo compromette seriamente le prestazioni di sicurezza all'impatto previste.

Con crescente frequenza si ricorre all'interstrato in PVB, non solo per le sue proprietà di comprovata sicurezza, protezione, isolamento acustico e solare, ma anche per la durata e le garanzie che offre in termini di sicurezza in caso di rottura. Si tratta di una tecnologia consolidata da oltre 60 anni, conforme alle normative vigenti a livello mondiale, sebbene emergano ancora delle perplessità, soprattutto per la durabilità dello stratificato in campo edilizio. Qui la qualità ed il comportamento dei vetri stratificati risentono del contenuto d'umidità del materiale plastico interposto, il cui controllo deve compiersi in laboratorio.

5 STRUTTURE IN VETRO

5.1 Facciate in vetro

Tra le principali applicazioni del vetro in architettura annoverare innanzitutto le facciate vetrate, con geometrie e superfici più o meno estese. In molte metropoli del mondo si va realizzando quanto immaginato nelle visioni della *Glasarchitektur* di Paul Scheebart; idee che vennero riprese negli USA nella celebre visione della città come “rozen Fountain (fontana ghiacciata), in cui i grattacieli con le loro superfici vetrate simboleggiano i getti bloccati in una rarefatta atmosfera glaciale.

Nei sistemi di facciata è possibile distinguere quattro elementi funzionali essenziali:

- l'elemento base, ovvero la semplice lastra di vetro o il vetrocamera;
- la struttura portante, ovvero la struttura sulla quale vengono fissate le lastre di vetro e gli altri elementi della vetrata, e alla quale vengono trasmessi tutti i carichi;
- il fissaggio, ovvero il sistema che consente la trasmissione dei carichi dalla lastra all'ossatura principale;
- il giunto, ovvero l'insieme di quegli elementi di correlazione e tenuta.

La prima generazione di facciate, comparse negli edifici moderni durante gli anni '50, era generalmente strutturata sul sistema cosiddetto “montanti e traversi” e sui primi concetti della prefabbricazione in moduli costruttivi, per rendere più facile e veloce il montaggio.

Oggi la varietà delle soluzioni è enorme e si differenzia in base alle esigenze costruttive ed estetiche. Sebbene la tendenza sia di ridurre al minimo gli elementi in acciaio (fissaggi, controventi ...), la loro presenza viene comunque notata dall'osservatore, ed anzi, se di particolare qualità formale, possono diventare essi stessi i veri protagonisti dell'opera architettonica, mettendo in secondo piano la pur preminente superficie vetrata. L'ultima generazione di facciate vetrate sono quelle integrate nel circuito di condizionamento e quelle fotovoltaiche.

Le diverse tipologie di facciate strutturali in vetro-acciaio realizzate negli ultimi anni si possono suddividere fondamentalmente in due grossi gruppi in base alle condizioni di posa delle lastre di vetro: facciate a “lastre indipendenti” o facciate a lastre “dipendenti”.

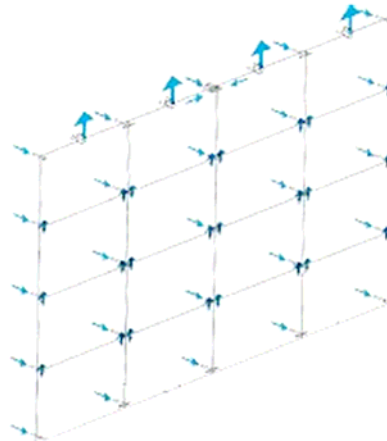


Figura 4. Schema di una facciata appesa con fissaggi puntuali.

La prima famiglia consente di realizzare ampie superfici vetrate in cui ogni lastra viene agganciata alla struttura portante in quattro o più punti mediante appositi sistemi di fissaggio, a cui vengono trasferiti i carichi dovuti al peso proprio e alle sollecitazioni esterne, che fluiscono anche attraverso il vetro, parte integrante del sistema strutturale..

La rottura provocata da alte pressioni di vento non è un evento comune, sebbene questa eventualità debba essere considerata in fase di progettazione. In caso di rottura accidentale di una delle lastre, non si avrebbe alcuna conseguenza rilevante sulla stabilità del sistema globale.



Figura 5. Principali modelli di rottura di un vetro e relative cause.

A partire dal 1960 circa, l'introduzione di guarnizioni sintetiche ha consentito di incollare direttamente la lastra di vetro al telaio con collanti al silicone. La definizione “facciata continua strutturale” mette in evidenza il compito portante delle lastre di vetro, in cui il silicone non serve più solamente come sigillante contro gli agenti atmosferici, ma sostiene anche parte del carico della lastra e trasmette la spinta e il risucchio del vento dal vetro al telaio metallico che viene appeso alla facciata o fissato in un altro modo meccanico.

Dal punto di vista statico le lastre, oltre al peso proprio che però agisce nel piano della lastra stessa, devono sostenere la pressione del vento che può ragionevolmente essere considerata come un carico ripartito uniformemente su tutta la superficie della vetrata. Il pannello di vetro si comporta così come una piastra, ma, a causa dei fori praticati per alloggiare gli elementi di ancoraggio, il carico ultimo di collasso risulta fortemente influenzato dalla distanza del foro dall'estremità della lastra. Questo è un fattore da considerare attentamente in sede di progettazione, avvalendosi dell'aiuto di simulazioni agli elementi finiti, in grado di evidenziare le zone di maggiore concentrazione degli sforzi.

Per ridurre le punte di sollecitazione, è opportuno disporre giunzioni particolari, denominate “rotulle”, che grazie ad un raccordo sferico posizionato sul piano della vetrata o a rondelle in materiale elastico consentono la libera deformazione della lastra che viene inflessa dalla pressione del vento.

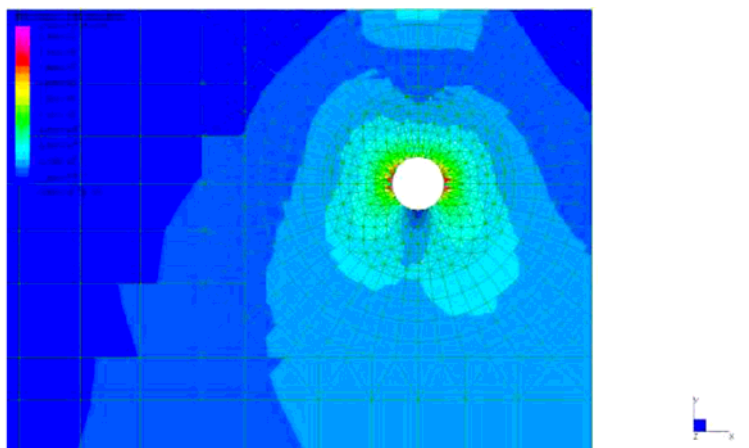


Figura 6. Esempio di elaborazione FEM: stato tensionale nell'intorno di un foro.

5.2 Coperture di vetro

La copertura vetrata viene spesso prevista all'interno di un progetto con lo scopo di conferire particolare enfasi ad opere architettoniche di grande rilevanza. Dalle coperture piane a falde inclinate (sono sconsigliate inclinazioni inferiori ai 10° per le quali non è in genere possibile garantire una sufficiente autopulizia) il problema strutturale si amplifica dal problema della resistenza della singola lastra (soggetta ai carichi di vento, neve e di calpestio) a quello della stabilità e deformabilità dell'insieme. Quest'ultimo, oltre che con l'impiego di una struttura metallica convenzionale di sostegno, può essere risolto anche con un sistema di cavi posti in coazione.

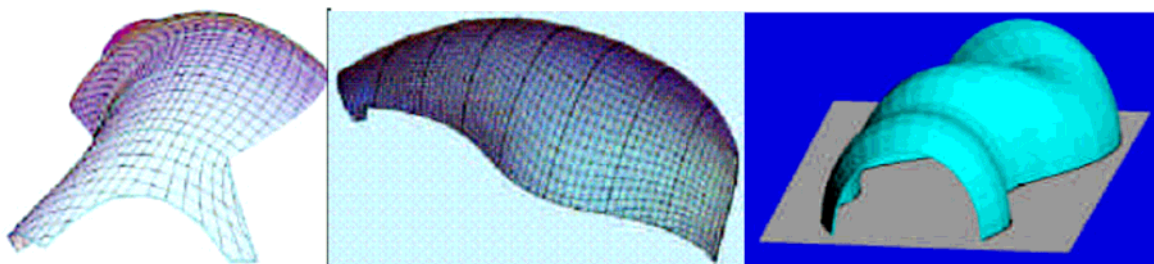


Figura 7. Esempi di superfici a maglia quadrangolare originate da espansione in scala e traslazione



Figura 8. Il cantiere del nuovo auditorium di Newcastle (GB).

Particolarmente significativa è la realizzazione di coperture a guscio, che possono essere realizzati anche con bassi spessori. In questo campo il contributo di Jorg Schlaich e del suo studio ha permesso a questa tecnologia di fare un grande passo evolutivo. L'ingegnere tedesco ha sviluppato e realizzato cupole reticolari e gusci reticolari, con nodi snodati e a doppia diagonale con cavi sottili, in maniera così precisa che con l'interposizione di un semplice profilo in EPDM, è stato possibile porre la lastra di vetro direttamente sulla struttura di acciaio. L'elevato grado di standardizzazione (tutte le aste identiche) e la facilità di montaggio hanno portato a soluzioni economiche per strutture geometricamente complesse, mentre le sezioni snelle delle aste e dei cavi le hanno rese estremamente trasparenti.

In questi strutture estremamente sottili, con curvatura semplice o con luce molto ampia, non è più possibile risolvere i problemi di stabilità senza l'inserimento nel sistema strutturale di componenti aggiuntivi quali cavi o controventature. Nei gusci reticolari di luce minore è formalmente possibile l'impiego di soluzioni senza diagonali, sempre che i nodi della struttura siano sufficientemente resistenti alla flessione.

5.3 Pilastrì

L'impiego di soluzioni progettuali come pavimentazioni, scale o pareti in vetro, si è diffuse soprattutto all'interno di edifici pubblici o ambienti nei quali si voleva enfatizzare la trasparenza degli spazi. Questo desiderio di trasparenza assoluta ha spinto i progettisti a cercare di sostituire l'impiego di materiali strutturali tradizionali (acciaio, cemento armato e legno) con il vetro.

L'impiego del vetro per la realizzazione strutture portanti di una certa consistenza è ancora limitato a poche ardite realizzazioni; le principali difficoltà, oltre ai notevoli costi, sono legate alle dimensioni limitate dei semilavorati e alle conseguenze di un improvviso cedimento del vetro sulla stabilità del sistema strutturale.

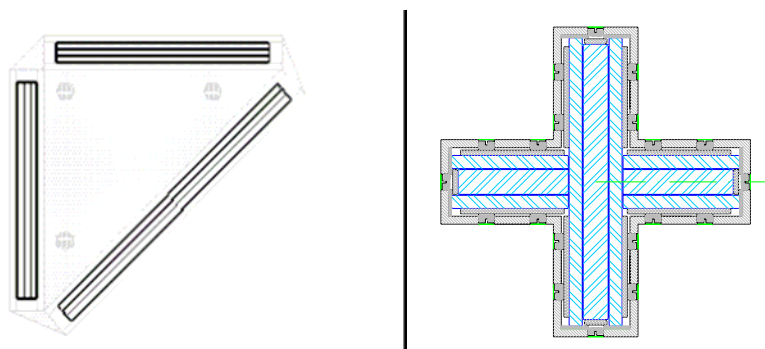


Figura 9. Sezioni di pilastrì: a sezione aperta e a croce con basamento

Per quanto concerne i pilastrì, generalmente compressi, il materiale vetro sembrerebbe poter manifestare la sua massima possibilità applicativa, a patto di realizzare vincoli d'estremità che assicurino la completa assenza di momenti flettenti parassiti. La prima difficoltà consiste nelle limitate dimensioni delle lastre che verranno a costituire il pilastrì; le lastre di vetro prodotte con il procedimento float hanno uno spessore massimo di 19 mm, solo in casi speciali si può arrivare fino a 25 mm. Pertanto, volendo limitare la snellezza a

1/50 (rapporto lato/altezza), sarà necessario comporre fra loro le varie lastre per ottenere sezioni di inerzia accettabile (Figura 9).

L'unione delle singole lastre per formare una sezione composta avviene tramite: incollaggio di vetro a vetro, incollaggio degli strati di vetro a profili metallici di correlazione, o correlazione localizzata degli strati con fissaggi per punti. Ad esempio, si può realizzare una colonna unendo due lastre curve semicircolari.

Sebbene il vetro abbia una buona resistenza a compressione, la rottura fragile innescata da possibili sollecitazioni a flessione rende problematica l'affidabilità strutturale dei pilastri in vetro. Per ovviare all'inconveniente si può ricorrere ad un sistema strutturale ridondante: fin dalla fase progettuale si deve prevedere che, in caso di completo cedimento di un pilastro, globalmente la struttura sia in grado di resistere ai normali carichi di esercizio, anche in assenza dell'elemento collassato, che comunque dovrà essere ripristinato in tempi brevi. Occorre quindi eseguire una raffinata modellazione strutturale, configurando possibili scenari di rottura per evitare il crollo totale.

Altro sistema "fail safe" consiste nell'uso di elementi a più strati, in cui esistono strati in grado di sostituire lo strato portante in caso di rottura. I pilastri in vetro multistrato sono strutture particolarmente snelle, per le quali due dimensioni prevalgono sulla terza (spessore della lastra). Alla luce di questa considerazione è possibile concepire sistemi pilastro costituiti da più elementi, che possono essere resi solidali o rimanere separati. Si può scegliere tra una sezione resistente con profilo chiuso o aperto. Una particolare cura progettuale deve essere usata nei dettagli geometrici, controllabili solo con millimetriche lavorazioni di molatura e smussatura delle lastre di vetro, per consentire una perfetta collimazione dei bordi nelle delicate fasi di assemblaggio e incollaggio.

5.4 Piastre

Secondo la teoria dell'elasticità si considera "piastra" un solido con sviluppo di due dimensioni prevalente rispetto alla terza (piastra di piccolo spessore) caricato perpendicolarmente al suo piano medio. Questa è la condizione prevalente di impiego delle lastre di vetro con funzione di separazione (vetrate) o di copertura (pannelli). L'entità della pressione che tali lastre devono sostenere (vento o neve) è dell'ordine di $0.8 - 1.6 \text{ KN/m}^2$ uniformemente distribuito. Se si considerano le facciate vetrate di tecnologia tradizionale, sotto la spinta del vento ogni pannello si comporta appunto come una piastra e il vetro viene sollecitato principalmente a flessione, trasmettendo i carichi al telaio a cui è fissato.

Se lungo i bordi la piastra non è vincolata con continuità, ma per punti, a parità di dimensioni, aumentano sia le sollecitazioni a flessione che per taglio e le conseguenti deformazioni; per questa ragione a parità di condizioni di esercizio, si usano spessori maggiori. Particolare attenzione va data alle concentrazioni di sforzi, individuabili nelle zone di fissaggio, in base alle quali si determinano le dimensioni dei fermavetri, per meglio distribuire le tensioni lungo le pareti dei fori.

Qualora la lastra di vetro venga utilizzata come elemento di calpestio (impalcati, gradini, pavimentazioni pedonabili) la percezione della freccia dovuta all'applicazione del proprio

peso può amplificare ulteriormente la possibile insicurezza data da un piano di calpestio trasparente.

Premesso che le lastre pedonabili sono sempre multistrato, nel caso in cui queste fossero semplicemente sovrapposte ed indipendenti, ad ognuna di esse sarebbe destinata la propria parte di carico, in base alla propria rigidezza flessionale. Quindi un carico distribuito q verrebbe suddiviso tra due piastre disposte lungo lo stesso asse e posate l'una sull'altra, di rispettivi spessori t_1 e t_2 , secondo il rapporto $(t_1/t_2)^3$. La tensione massima, ipotizzando una struttura simmetrica $t_1=t_2=t/2$, sarebbe allora:

$$\sigma = 1.5q \left(\frac{l}{t} \right)^2 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (11)$$

Se invece lo scorrimento fosse impedito, la tensione massima sarebbe allora pari a:

$$\sigma = 0.75q \left(\frac{l}{t} \right)^2 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (12)$$

con evidente incremento dell'efficacia in termini strutturali.

La scelta delle proprietà dello strato intermedio di aderenza è quindi molto importante, dato che una rigidità molto elevata è favorevole per il comportamento sotto flessione, mentre in caso di rottura è di grande vantaggio avere una elevata viscosità, che consenta alle lastre danneggiate di rimanere solidali, offrendo una portata residua ed evitando il distacco di frammenti.

Per quanto riguarda il fissaggio delle lastre alla struttura sottostante, quello più efficace e semplice avviene per contatto lungo l'intero bordo della lastra, con strisce di appoggio più o meno elastiche, a seconda del materiale scelto (legno duro, EPDM, neoprene, alluminio, silicone o altro). Lo spostamento laterale viene impedito da distanziatori elastici posti lungo i bordi laterali. È necessario infine curare la planarità degli appoggi e controllare le deformazioni della struttura di sostegno, affinché non insorgano picchi di tensioni.

È anche possibile un fissaggio per punti, ma le tensioni locali indotte dalle reazioni concentrate di vincolo portano ad assegnare alla lastra spessori elevati.

5.5 Travi

Una lastra di vetro disposta in verticale con carichi applicati parallelamente al piano medio può svolgere la funzione di trave. Nelle travi di vetro la sollecitazione può essere calcolata con la teoria delle lastre o, in caso di elevato rapporto L/H , con la teoria delle travi: comunque la flessione intorno all'asse forte implica una sollecitazione di trazione lungo il bordo inferiore. Pertanto il fattore che condiziona in modo determinante l'effettiva resistenza a flessione della trave è rappresentato dal tipo di lavorazione effettuata sul bordo inferiore delle lastre, che influenza la distribuzione dei microdifetti.

In generale la resistenza lungo i bordi, a causa della maggiore incidenza delle cricche, è solitamente inferiore rispetto a quella riscontrabile sulla superficie: è pertanto importante una accurata lavorazione dei bordi. Per migliorare la resistenza a trazione, comunque, i progettisti preferiscono solitamente il vetro temprato, i cui bordi sono comunque accuratamente rifiniti prima della tempra.

Si possono migliorare le prestazioni della trave ricorrendo all'assemblaggio di più lastre di vetro, che non solo dispongono di una maggiore quantità di materiale resistente nella zona sollecitata a trazione, ma possiedono anche una maggiore rigidità alla flessione trasversale e la torsione, rispetto a quelle monolitiche (Figura 10).

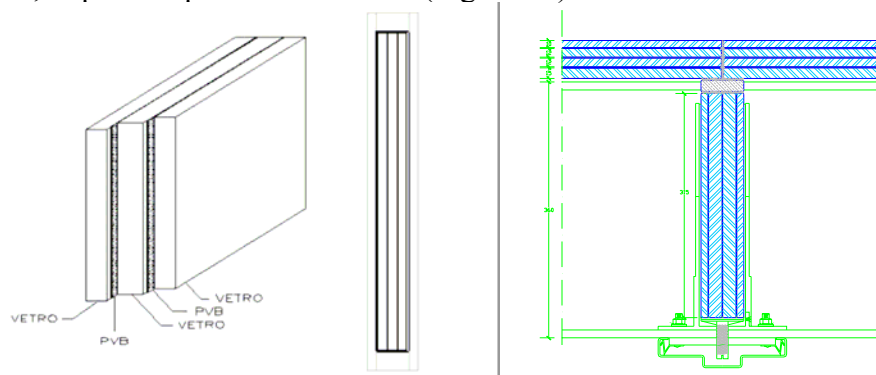


Figura 10. Vetro stratificato con PVB, vista frontale di una scarpa metallica di appoggio e sezione di trave composta con più lastre stratificate.

Le due estremità delle travi di vetro vengono solitamente inserite in apposite scarpe metalliche, con accoppiamento per attrito ed opportuna interposizione di uno strato elastico, che consente di evitare elevate tensioni localizzate dovute a momenti d'incastro, ma permette di stabilizzare meglio la trave. Tale materiale plastico si deforma, riempiendo lo spazio tra i due materiali uniti e assicurando un ripartizione più uniforme della sollecitazione e delle tensioni sulle relative superfici di contatto. L'unione si può schematizzare come un semplice appoggio.

È possibile migliorare il comportamento fragile del vetro dotando il bordo della lastra di elementi di materiale dotato di una maggiore resistenza a trazione e duttilità, in grado di assorbire con sicurezza le forze di trazione indotte dalla flessione. In questi sistemi ibridi è importante valutare attentamente le caratteristiche meccaniche dei materiali, come il coefficiente di dilatazione termica, per assicurarne un'effettiva collaborazione strutturale.

Si pone quindi il problema della connessione delle lastre di vetro con l'elemento aggiuntivo, se questo debba essere aderente o, in caso affermativo, come realizzare l'incollaggio. Tra le soluzioni sino ad oggi proposte vi sono:

- trave in vetro stratificato di sicurezza con un cavo teso con un apposito sistema a dado inserito sul bordo inferiore;
- trave con un fascia in fibra di carbonio, o in altri materiali di matrice metallica, posta in aderenza sul profilo inferiore (Figura 11);
- travi multistrato con interposta, parallelamente a quelle di vetro, una lastra di materiale polimerico con funzione tenacizzante, ad esempio policarbonato o PVC. Questi materiali offrono la stessa caratteristica di trasparenza del vetro e sono in grado di garantire una portata residua in caso di cedimento del vetro;
- un sistema di lastre stratificate, ispirato ai principi costitutivi del legno lamellare, incollate fianco a fianco (Figura 11); è possibile che alcune delle lastre impiegate non arrivino fino agli appoggi, ma rimangano presenti solo nelle parti maggiormente sollecitate. Per impedire che un eventuale rammollimento dell'interstrato polimerico

provochi la delaminazione, si pone una fascia di fibra di carbonio sul margine inferiore della trave, oppure si usano fissaggi puntuali tra le lastre (Figura 12). Questa soluzione tecnologica consente di superare ulteriormente i limiti dimensionali imposti dalla lunghezza dei formati e di coprire luci maggiori.

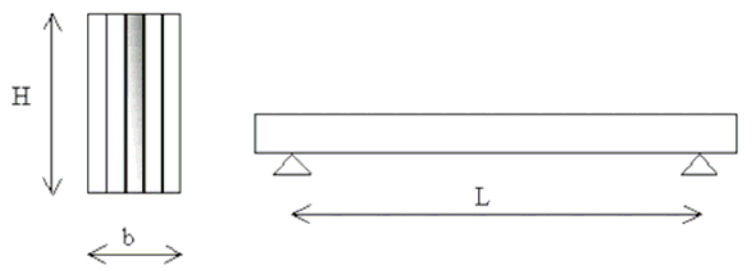


Figura 11. Schema statico della trave multistrato



Figura 12. Schema di una trave "lamellare" in vetro.

Per rendere ancora più trasparente le grandi vetrate è possibile disporre lastre di vetro con funzione irrigidente ortogonalmente alle lastre di chiusura; questa tecnologia presenta il vantaggio, non indifferente, di non introdurre dilatazioni differenziali sotto l'effetto del calore, diversamente dalle strutture metalliche il cui coefficiente di dilatazione è sempre superiore a quello del vetro.

6 CRITERI E METODI DI VERIFICA

Come è stato illustrato nei paragrafi precedenti, la limitazione dell'uso del vetro come materiale strutturale veniva dal considerarlo "troppo fragile" per poter svolgere con sicurezza funzioni portanti.

Un'altra limitazione (p.e. per realizzare travi e pilastri) era rappresentata fino a pochi anni fa dalle dimensioni ridotte delle lastre. Oggi si arriva ad avere lastre piane o curve di 3.21 x 7.00 m e teoricamente, se non vi fossero anche problemi di trasporto, i 7.00 m sarebbero superabili. Resta comunque il problema delle connessioni sia correnti che di forza che introducono sollecitazioni concentrate localizzate, foriere di fratture fragili.

6.1 Progettare strutture di vetro

Il criterio progettuale in presenza di possibili rotture fragili è quello del "fail safe", cioè di prevedere già in fase di progettazione che alcuni elementi possano collassare, a condi-

zione però di non inficiare la stabilità globale del sistema strutturale. Due concetti chiave di tale approccio sono:

- la gerarchia
- la ridondanza.

Il primo consiste nello stabilire una funzione per ciascuno degli elementi che compongono la struttura, fissandone un ordine gerarchico di importanza, in modo tale da individuare quegli elementi secondari “sacrificabili”. Gli elementi primari invece, devono essere sempre ben protetti e funzionanti, ed anzi in numero maggiore rispetto a quello strettamente necessario (ridondanza). È il caso di elementi realizzati con vetri stratificati costituiti da 3 o più lastre di vetro, dove alcuni strati hanno il compito di intervenire solo in caso di rottura dello strato incaricato di sopportare i carichi.

Soprattutto per il vetro è assolutamente necessario conoscere a fondo tutte le caratteristiche fisiche e tenere ben presente che esso possiede una struttura molto resistente ma fortemente penalizzata dalla presenza di microdifetti, che generano differenze sostanziali di resistenza tra i diversi punti di un dato elemento. Per poter assicurare con una adeguata sicurezza la capacità portante di una struttura in vetro, occorre conoscere come questi microdifetti ne influenzino la reale resistenza in funzione della forma, delle dimensioni e delle variabili legate alle condizioni al contorno.

Non è neppure trascurabile l'effetto dei carichi permanenti quando l'alternanza delle condizioni igrotermiche ambientali, specie in presenza di alte percentuali di umidità relativa, possono accelerare la propagazione della cricca.

È ormai riconosciuto che i metodi convenzionali di progettazione basati sull'ipotesi di distribuzione uniforme degli sforzi, sono inadeguati per garantire un alto livello di affidabilità rispetto al rischio di una rottura strutturale. La resistenza del vetro dipende da molti fattori, tra i quali i principali sono:

- condizioni della superficie dell'elemento di vetro;
- durata del carico applicato;
- geometria dell'elemento di vetro;
- umidità relativa e temperatura dell'ambiente circostante.

Di conseguenza nella progettazione del vetro strutturale è necessario considerare tutti questi fattori, per poter svolgere un'analisi corretta della sicurezza. Ad una fase progettuale ben eseguita deve essere accompagnata la scelta altrettanto accurata dei prodotti da utilizzare nella realizzazione del progetto.

6.2 Verifica della sicurezza

Partendo dai principi sopra enunciati, la norma prEN 13474 (CEN/TC129/WG8) segue l'impostazione di base degli Eurocodici e cioè quella della verifica semiprobabilistica degli Stati Limite, Ultimo e di Servizio. I principi ed i metodi di calcolo sono in accordo con l'Eurocodice EN 1990 “Basis of Structural Design”, le azioni sono in accordo con l'Eurocodice EN 1991 “Action on Structures”. La normativa si focalizza sulle applicazioni dipendenti dalla resistenza meccanica del vetro.

6.2.1 Azioni

La combinazione dei carichi da utilizzare nei calcoli è data dalla ben nota espressione:

$$F_d = \sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (13)$$

dove

$G_{k,j}$ = valore caratteristico delle azioni permanenti;

$Q_{k,1}$ = valore caratteristico di una delle azioni variabili;

$Q_{k,i}$ = valore caratteristico delle altre azioni permanenti.

I coefficienti parziali e coefficienti di combinazione da applicare ai carichi sono determinati nel rispetto della norma ENV 1991, tenendo conto del comportamento del vetro rispetto alle azioni prolungate nel tempo (Tabella 3 e Tabella 4).

carichi		S.L.U.		S.L.E	
		Carichi permanenti	Carichi variabili	Carichi permanente	Carichi variabili
		γ_{Gj}	γ_{Qj}	γ_{Gj}	γ_{Qj}
sfavorevoli	Peso proprio, vento, neve	1.35	1.5	1.13	1.0
	Climatici	1.35	1.2	1.13	0.92
favorevoli	tutti	1.0	0	1.0	0

Tabella 3. Coefficienti parziali dei carichi.

Tipo di carico	S.L.U	S.L.E
Breve (vento)	0.15	0.15
Neve	0.82	0.96
Interno	0.60	0.60

Tabella 4. Coefficienti di combinazione dei carichi.

6.2.2 Materiale

Oltre a quanto è possibile reperire nelle normative specifiche (es. EN 572 per il vetro float) i valori di progetto per la verifica si possono desumere come di seguito indicato:

$$R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_m} \quad (14)$$

dove

R_k = valore caratteristico della resistenza del vetro, ottenuto da test (EN 1228-1);

k_{mod} = coefficiente che tiene conto della durata del carico e di altri effetti;

γ_m = coefficiente parziale.

Trattamento	$f_{b,k}$ (N/mm ²)
Indurito	70
Temprato termicamente	120

Tabella 5 Valori della resistenza caratteristica per vetri con compressione superficiale

I valori caratteristici di resistenza determinati direttamente da prove sperimentali devono seguire le indicazioni contenute nella norma EN 1288. ($f_{g,k} = 45 \text{ N/mm}^2$ per il vetro float e borosilicatico).

Tipo di vetro	γ_m		γ_v			
			Temprato termicamente o indurito		Temprato chimicamente	
	S.L.U	S.L.E	S.L.E	S.L.E	S.L.E	S.L.E
Float glass	1.8	1.0	2.3	1.5	2.3	1.5
Borosilicatico	1.8	1.0	2.3	1.5	-	-

Tabella 6. Coefficienti parziali per la resistenza del materiale.

I valori nella tabella sono stati determinati da dati sperimentali interpretati con la distribuzione di Weibull per una probabilità di rovina pari a 0.005.

Nella norma sono forniti anche i valori per altri tipi di vetro (rivestiti, armati..) sottoposti ai diversi trattamenti termici.

Il seguente fattore K_{mod} viene inserito per considerare il fenomeno della corrosione del vetro sotto sforzo in presenza di acqua o umidità elevate, che a seconda della durata dei carichi, influisce sul comportamento a fatica.

Durata del carico	K_{mod}
Breve (vento)	0.72
Medio (neve, climatici*)	0.36
Permanenti (peso proprio, altitudine*)	0.27

Tabella 7 Fattore modificatore K_{mod} .

Pertanto le sollecitazioni di progetto si calcolano mediante le :

$$f_{g;d} = k_{mod} \frac{f_{g,k}}{\gamma_m k_A} \gamma_n \quad \text{per vetro ricotto}$$

$$f_{g;d} = \left(\frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_v} + k_{mod} \frac{f_{g,k}}{\gamma_m k_A} \right) \gamma_n \quad \text{per vetro temprato o indurito} \quad (15)$$

dove

γ_n = coefficiente parziale imposto dalle singole nazioni (in realtà sempre uguale a 1);
 $k_A = A^{0.04}$ fattore dipendente dall'area superficiale della lastra (A in m^2) che tiene conto della maggiore probabilità di trovare un difetto in lastre di grande superficie.

6.2.3 Geometria

Per il calcolo strutturale e le verifiche conseguenti è necessario conoscere la geometria dell'elemento considerato ed in particolare lo spessore della lastra h. Se tale conoscenza è scontata per lastre singole, nel caso di vetro multistrato la sovrapposizione e la collaborazione fra le varie lastre porta a definire degli spessori efficaci:

$$h_{ef,w} = (h_1^3 + h_2^3 + 12\Gamma I_3)^{\frac{1}{3}} \quad \text{per il calcolo dell'inflessione}$$

$$h_{1,ef,\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_1 + 2\Gamma h_{z;2}}} \quad h_{2,ef,\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_2 + 2\Gamma h_{z;1}}} \quad \text{per il calcolo delle tensioni} \quad (16)$$

dove

$$h_z = (h_1 + h_2) + h_v \quad h_{z;1} = \frac{h_z h_1}{h_1 + h_2} \quad h_{z;2} = \frac{h_z h_2}{h_1 + h_2} \quad I_z = h_1 h_{z;2}^2 + h_2 h_{z;1}^2 \quad (17)$$

dove

h_1, h_2 = spessore delle singole lastre;

h_v = spessore dell'interstrato plastico;

Γ = coefficiente di trasferimento dell'azione di taglio dell'interstrato plastico del vetro stratificato. Se $\Gamma = 0$ non vi è trasmissione di scorrimento, ovvero le lastre lavorano indipendentemente; se $\Gamma = 1$ l'interstrato è in grado di trasmettere l'intera sollecitazione di scorrimento, ovvero il multistrato si comporta come un elemento monolitico. Il comportamento dell'interstrato dipende anche dalla temperatura e dalla durata del carico (Tabella 8).

Tipo di vetro	Carichi di breve durata		Carichi di media durata		Carichi permanenti	
	S.L.U	S.L.E	S.L.U	S.L.E	S.L.U	S.L.E
Ricotto	17.0	30.7	8.5	15.3	6.4	11.5
Indurito	27.9	47.3	19.4	32.0	17.3	28.2
Temprato termicamente	49.6	80.7	41.1	65.3	39.0	61.5
Temprato chimicamente	62.7	100.7	54.2	85.3	52.0	81.5

Tabella 8. Resistenze di calcolo in funzione della durata del carico

6.2.4 Stati limite

La rottura di un pannello di vetro non dipende necessariamente dal massimo sforzo di trazione in superficie; la frattura si innesca nel punto della superficie nel quale ad un livello relativamente alto di trazione corrisponde anche una significativa difettosità superficiale. La rottura non si origina né nel punto di maggior difettosità né nel punto di maggior sollecitazione.

Ne consegue che la probabilità di rottura dipende da una media pesata della distribuzione degli sforzi di trazione; tale media pesata viene chiamata sforzo efficace e può essere calcolato mediante la relazione:

$$\sigma_{ef} = \left[\frac{1}{A} \int \{\sigma_1(x, y)\}^\beta dx dy \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (18)$$

Qualora non sia nota la tensione σ_{ef} , cautelativamente si può confrontare la sollecitazione ammissibile con quella massima σ_{max} , ottenuta dall'analisi strutturale.

Va però precisato che le strutture in vetro hanno spesso un comportamento geometricamente non lineare (essendo le lastre molto flessibili gli spostamenti maggiori superano la metà dello spessore delle lastre), con l'attivazione di un comportamento membranale. Si ri-

chiederebbe quindi un'analisi strutturale complessa: per casi semplici (lastra appoggiata sui quattro lati) la norma fornisce un'espressione non lineare per il calcolo delle tensioni e degli spostamenti per un pannello appoggiato lungo i quattro lati.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} &= k_1 \frac{a^2}{h^2} F_d & \sigma_{\text{eff}} &= k_2 \frac{a^2}{h^2} F_d \\ w_{\max} &= k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E} & V &= k_5 \frac{a^4}{h^4} \frac{F_d}{E} ab \end{aligned} \right| \quad (19)$$

Dove V è il cambio di volume nell'intercapedine di un vetrocamera e i coefficienti k_1 , k_2 , k_4 e k_5 , ricavabili da tabelle contenute nella norma, dipendono dal rapporto tra i due lati della lastra e dal carico normalizzato p^* , nullo nell'ipotesi di piccole deformazioni.

$$p^* = \frac{a^4 F_d}{h^4 E} \text{ carico normalizzato} \quad (20)$$

Analoghe formule vengono proposte per lastre appoggiate su tre o due lati, triangolari, trapezoidali e circolari.

In via semplificativa è possibile calcolare la distribuzione delle tensioni e l'inflessione massima w_{\max} , seguendo la teoria dell'elasticità lineare. Quando l'inflessione indotta dai carichi più onerosi supera lo spessore del vetro, la teoria lineare delle piastre porta ad una sovrastima delle tensioni e dell'inflessione massima.

Per assicurare una sufficiente rigidità dell'elemento di supporto si limita la sua inflessione ad un valore massimo di $L/200$ sotto un carico di 2.0 KN/m^2 ; nel caso di applicazioni particolari come le pavimentazioni, la rigidità dell'elemento di supporto, indipendente dalla lastra di vetro, va incrementata, rispettando sempre la seguente condizione:

$$E_B I_B \geq \Omega K \quad \text{dove} \quad K = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)} \text{ rigidità della lastra di vetro} \quad (21)$$

E_B = Modulo di Young del materiale che costituisce il supporto;

I_B = Momento d'inerzia dell'elemento di supporto;

Ω = coefficiente dipendente dal numero di pannelli supportati (= 5 se supporta un pannello solo, = 10, se ne supporta due);

L = lunghezza del bordo della lastra supportata;

7 CONCLUSIONI

Dalla sintetica presentazione delle linee guida da seguire nella progettazione di elementi in vetro strutturale, emerge come la normativa italiana ed internazionale siano entrambe praticamente prive di indicazioni riguardanti l'applicazione del vetro soggetto a carichi che vadano oltre alla spinta del vento o al carico della neve (funzionamento a piastra). Mancano soprattutto indicazioni su dettagli costruttivi, sulle caratteristiche di fori e giunzioni, sulla lavorazione dei bordi delle lastre e sui metodi per localizzare precisamente le zone del ma-

teriale dove insorgono solitamente i problemi che possono portare ad una improvvisa rottura.

Per elementi strutturali più complessi, solamente l'analisi strutturale approfondita, volta all'individuazione dei punti critici dove è probabile la comparsa di intense concentrazioni di sforzo, l'elaborazione statistica dei risultati sperimentali e lo studio dei dettagli tecnologici in relazione anche alla compatibilità strutturale dei materiali nelle connessioni, possono condurre ad una progettazione corretta e sicura.

Da non dimenticare l'importanza dell'interazione con l'ambiente, della distribuzione dei difetti, la durata e la velocità di applicazione dei carichi.

La progettazione con questo materiale in particolare non può essere limitata al semplice dimensionamento dei singoli elementi strutturali (affermazione che vale anche per altri materiali strutturali!). È fondamentale sottolineare che la progettazione debba iniziare dal sistema strutturale complessivo, per poi ridurre sempre più l'oggetto di indagine, fino ad arrivare a focalizzarsi sui dettagli costruttivi; ciò può significare gestire tolleranze inferiori al millimetro, come nel caso della finitura dei bordi di una lastra. Il progettista deve valutare la risposta globale della struttura ipotizzando la rottura totale o parziale dell'elemento strutturale, prediligendo una filosofia di tipo fail-safe piuttosto che safe-life.

8 BIBLIOGRAFIA

In considerazione della particolarità dell'argomento trattato, gli Autori hanno ritenuto opportuno fornire un'ampia bibliografia di riferimento ed approfondimento. In particolare si segnala la tesi di laurea dell'ing. F. Ferrari ([62] relatore prof. S. Tattoni) che ha costituito una preziosa e solida base per la redazione della presente memoria.

- [1] Inglis C.E., *Stresses in a plate due to pressure of cracks and sharp corners*, Trans.Inst.Naval.Arch. (1913)
- [2] Griffith A.A., *The phenomena of rupture and flows in solids*, Phil.Trans Roy Soc. London A (1920)
- [3] Littleton.J.T,Roberts E.H, *A Method for determining the annealing temperature of Glass*, J.Opt.Soc.Amer.(1920)
- [4] Adams L.H, Williamson E.D., *Annealing of glass*, J.Franklin Inst. (1920)
- [5] Lillie H.R., *Viscosity of Glass between the strain point and melting temperature*, J.Amer.Ceram.Sol. (1931)
- [6] Lillie H.R., *Viscosity time temperature relations in glass at annealing temperature*, J.Amer.Ceram.Soc. (1933)
- [7] Littleton J.T., *The Physical processes occurring in the melting and cooling of glass*, J.Amer.Ceram.Soc. (1934)

- [8] Holland A.J. Turner W.E.S., *The effect of sustained loading on breaking strength of sheet glass*, J.Soc.Glass.Technol. (1940)
- [9] Baker T.C. Preston F.W., *The effect of water on the strength of glass*, J.Appl.Phys. (1946)
- [10] Jebesen-Marwedel H., *Abhängigkeit der oberflachen spannung des glases von oxydierender und reduzierender atmosphäre-eine folge <ambulanten> SO₃*, Gehaltes Glastechn.Ber. (1955)
- [11] Charles R.J. *Static fatigue of glass*, J.Appl. Phys. (1958)
- [12] Charles R.J. Hillig W.B., *The Kinetics of glass failure by stress corrosion*, Symp. sur la resistance mecanique du verre et les moyens de l'ameliorer Florence pg. 511-527 (1961)
- [13] Charles.RJ and Hillig, W.B, *On Mechanical Strength of Glass and Ways of Improving it*, pp 25-29, Union Scientifique, Union Continentale du Verre, Charleroi, Belgium (1962)
- [14] Barsom J.M., *Fracture of tempered glass*, J.Amer.Ceram.Soc. (1968)
- [15] Wiederhorn, S.M and Bolz, L.H. J.Am.Ceram.Soc. (1970)
- [16] Milchalske, T.A. in *Fracture Mechanics of Ceramics, Vol.5, Surface Flaws, Statistics, and Microcracking*, pp.277-289, Plenum Press, New York (1977)
- [17] George Kohlmaier, Barna Von Sartory, *Houses of Glass a Nineteenth-Century Building*, Type The Hit Press Cambridge, Massachusetts GB (1981)
- [18] Scheerbart P. *Architettura di Vetro*, Adelphi, Milano (1982)
- [19] M. Cipollini, L.A. Fabiani, G. Giorni, *Vetro, Alluminio, Acciaio nella tecnologia dei componenti costruttivi*, ESA Editrice, Roma (1986)
- [20] Vincenzo M. Sglavo, David. J. Green, *Threshold stress intensity factor in Soda-lime silicate by interrupted static fatigue test*. J.Europ. Ceram.Soc 16 (1996)
- [21] Conio C., *La Tecnologia della Trasparenza*, Tecnomedia, Milano (1995)
- [22] Hix J., *The Glass House*, The Hit Press Cambridge Massachusetts GB (1974)
- [23] Offestein F., *Compatibilità dei materiali. Come associare i materiali da costruzione*, UTET Torino (1995)
- [24] Hugh Dutton H., Rice P., *Il Vetro Strutturale*, Tecniche Nuove, Milano (1996)
- [25] Guglielmi M., Scarinci G. (a cura di), *AIMAT Manuale dei materiali per l'ingegneria – capitolo 9 Il vetro*, McGraw-Hill, Milano (1996)
- [26] Sglavo V.M., Green D.J., *The sub-critical indentation fracture process in soda-lime-silica glass*, Engineering Fracture Mechanics Vol.55, n.1 pp. 35-46 (1996)

- [27] Maritz Vandenberg, *Glass Canopies, Detail in Building*, Academy Editions, GB (1997)
- [28] -, *Manuale del vetro*, Saint Gobain Glass (1997)
- [29] Lü B.T., *Effect of a proof test on the fatigue strength and lifetime of soda-lime glass*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 27 pp.79-84 (1997)
- [30] Lü B.T., *Fatigue strength prediction of soda-lime glass*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 27 pp.107-114 (1997)
- [31] Re E., *Il vetro e le sue molteplici soluzioni d'impiego nell'edilizia moderna*, Alinea, Firenze (1997)
- [32] Amstock, Joseph S. - *Handbook of Glass in Costruction* – McGraw – UK (1997)
- [33] Donald R. Askeland – *The Science and Engineering of Materials* - Stanley Thoners Publishers Ltd, UK (1998)
- [34] Heinz W. Krewinkel - *Glass Buildings : Material, Structure and Detail* – Birkhäuser, Basilea (Dic. 1998)
- [35] Holgate, Alan - *Art Of Structural Engineering: The Work Of Jorg Schlaich and his team* - Edition Axel Menges GmbH (Dic. 1998)
- [36] Schittich Christian, Gerald Staib, Dieter Balkow, Matthias Schuler, Werner Sobek, *Atlante del Vetro* - –UTET, Torino (1999)
- [37] L. Bertolini, F. Bolzoni, M. Cabrini, P. Pedefferri - *Tecnologia dei materiali. Ceramici, polimeri e compositi* - CittàStudi Edizioni, Milano (2000)
- [38] Stefan Behling , Sophia Behling - *Glass : Structure and Technology in Architecture* – Prestel, USA (Mar. 2000)
- [39] Stephan Knapp - *The art of Glass: Integrating Architecture and glass* - (Apr. 2000)
- [40] Rice Peter, H. Rice, P. Dutton, Hugh Dutton, *Structural Glass*, E & FN Spon Febbraio (2001)
- [41] M. Suszynska, M. Szmida, P. Grau - *Mechanical characteristics of mixed soda-lime silicate glasses* - Materials Science & Engineering A319-321 pp.702-705 (2001)
- [42] -, *Structural Use of Glass in Buildings* - Publication of The Institution of Structural Engineers - London UK (2002)
- [43] Wiederhorn, Dretzke e Ròdel, *Near the static fatigue limit in glass* - International Journal of Fracture, 1-7 (2003)
- [44] Robert Nijse, Winy Maas - *Glass in Structures: Elements, Concepts, Designs* - Birkhauser (2003)
- [45] Patrick Loughran – *Falling Glass. Problems and Solutions in Contemporary Architecture* - Birkhäuser, Basilea (2003)

- [46] AA VV, *Le giornate del vetro*. Atti del convegno Venezia 10-11 Ottobre 2003
- [47] S.M. Wiederhorn, A. Dretzke, J. Rödel - *Near the static fatigue limit in glass* - International Journal of Fracture 121 pp.1-7, (2003)
- [48] Mehmet Zülfü A°ik – *Laminated glass plates: revealing of non-linear behaviour* - Computers & Structures 81 pp. 2659-2671(2003)
- [49] A. Seal, S.K. Dalui, A.K. Mukhopadhyay, K.K. Phani, H.S. Maiti - *Mechanical behaviour of glass polymer multiplayer composites* — Journal of Materials science 38 pp. 1063-1071 (2003)
- [50] Sedlacek - *Glass for Structural Design* – John Wiley & Sons - USA (2003)
- [51] Gerhard Sedlacek, Haegh Gulvanessian, Kurt Blank, Wilfried Laufs - *Glass for Structural Design* - John Wiley & Sons (Apr. 2003)
- [52] C.H. Schuler, - *Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur-und Belastung*. - Dissertation, Lehrstuhl für stahlbau, TU München, 2003.
- [53] Wigginton M., - *Glass in architecture*, - Phaidon Press Ltd, London, 2003.
- [54] Funk C., Okalux. - *We take architectural glass a step ahead*, - Okalux GmbH, Marktheidenfeld-Altfield, 2004.
- [55] AA. VV., - *Costruire con strutture in vetro*, - Atti del workshop sulle strutture in vetro di Pisa (editor: M. Froli), 19-20 marzo 2004.
- [56] AA.VV. - *Glass design*, - Daab GmbH, Colonia, 2005.
- [57] F.Veer, J. Zuidema, F.P. Bos, - *The strength and failure of glass in bending*, - Glass processing days, 2005.
- [58] M.Froli, L.Lani, *Determinazione probabilistica della resistenza a flessione di campioni di vetro temperati termicamente e chimicamente*, - Rivista del Vetro, n°8, pp. 15-18, 2005.
- [59] M. Moratti C. Perrini, *Studio delle proprietà di nuovi materiali per vetri multistrato*, Tesi di Laurea, Università degli studi di Brescia (a.a 1996/1997)
- [60] L. Pensieri P.Rosati, *Il comportamento del vetro multistrato nell'interazione con l'ambiente*, Tesi di laurea, Università degli studi di Brescia (a.a 1996/1997)
- [61] N. Orsini M. Zanella, *Studio sul comportamento a frattura del vetro multistrato*, Tesi di Laurea, Università degli studi di Brescia (a.a 1997/1998)
- [62] F. Ferrari, *Progettare il vetro strutturale*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano (aa 2003/2004)