

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea

---

**Vetro strutturale: Caratterizzazione tecnologica e valutazione delle  
proprietà meccaniche**

*Structural Glass: Technological characterization and mechanical properties  
assessment*

Laureando:

*Cristian Imbriani*

Relatore:

*Prof. Michele Serpilli*

Anno Accademico 2021 – 2022

A chi è fiero che io sia  
ciò che sono diventato  
e a chi vedrà ogni mio  
cambiamento.

# INDICE

---

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
1.1	<i>Sviluppo dell'utilizzo del vetro nelle costruzioni</i> .....	4
1.2	<i>Vantaggi applicativi del vetro</i> .....	5
1.3	<i>Sostenibilità del vetro</i> .....	13
1.4	<i>Produzione del vetro float</i> .....	14
1.5	<i>Processi di post-produzione</i> .....	17
<b>2</b>	<b>IL VETRO STRUTTURALE</b> .....	<b>24</b>
2.1	<i>Caratteri generali</i> .....	24
2.2	<i>Tipologie di vetro strutturale</i> .....	26
2.3	<i>Proprietà meccaniche</i> .....	32
2.4	<i>Progettazione in vetro strutturale</i> .....	39
<b>3</b>	<b>PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE</b> .....	<b>46</b>
3.1	<i>Determinazione della resistenza a flessione</i> .....	46
3.1.1	<i>Prova di flessione con doppi anelli concentrici</i> .....	47
3.1.2	<i>Prova di flessione per quattro punti</i> .....	53
3.1.3	<i>Calcolo della resistenza a flessione secondo la normativa americana</i> .....	55
3.2	<i>Prova del pendolo</i> .....	58
3.3	<i>Prove di resistenza all'attacco manuale</i> .....	62
3.3.1	<i>Prova di caduta di un corpo</i> .....	62
3.3.2	<i>Prova dell'ascia</i> .....	64
3.4	<i>Prove di resistenza alle esplosioni</i> .....	65
3.5	<i>Prove di resistenza ai proiettili</i> .....	67
<b>4</b>	<b>PROVE DI FLESSIONE SU TRAVI IN VETRO: STUDIO SPERIMENTALE</b> .....	<b>69</b>
4.1	<i>Provini e Materiali di prova</i> .....	69
4.2	<i>Set-up di prova</i> .....	77
4.3	<i>Risultati e discussione</i> .....	79
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>85</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</b> .....	<b>86</b>
	<b>RINGRAZIAMENTI</b> .....	<b>89</b>

# 1 INTRODUZIONE

---

## *1.1 Sviluppo dell'utilizzo del vetro nelle costruzioni*

L'origine della produzione del vetro, così come si intende oggi, si ha nel 1952, attraverso l'invenzione, da parte di Sir Alastair Pilkington, del processo "float", che rivoluzionò il modo di produrre il vetro a livello industriale. Così l'utilizzo del vetro ha subito in architettura e in applicazioni ingegneristiche una fortissima accelerazione, grazie alle sue caratteristiche intrinseche, prima fra tutte la sua trasparenza, ma anche alle riflessioni, le distorsioni e i cambiamenti di colore che gli involucri in vetro offrono; caratteristiche facilmente riscontrabili e apprezzabili anche da occhi inesperti. Tale accelerazione è stata in gran parte spinta dall'aspirazione di molti architetti contemporanei di ridefinire l'idea dell'involucro di un manufatto architettonico come limite tra spazi interni ed esterni, volendo "smaterializzare" il confine visivo – sensoriale che si otterrebbe utilizzando materiali da costruzione tradizionali.

Oltre ai consueti utilizzi, come in tamponature esterne o pareti divisorie interne, gli elementi in vetro possono essere progettati anche per avere comportamento strutturale, talvolta con funzione portante principale. Esso è adatto, quindi, a sopportare carichi elevati, al pari di altri materiali strutturali, come legno e metallo. La scoperta innovativa dell'utilizzo strutturale del vetro ebbe come anno significativo il 1903, anno in cui il chimico francese Edouard Benedictus fece accidentalmente cadere una fiala di vetro rivestita per errore con del materiale plastico di nitrocellulosa e notò che questa si era frantumata senza verificare una dislocazione delle parti. In ragione di ciò, Benedictus fabbricò un composto di vetro e plastica con lo scopo di ridurre infortuni dovuti alla rottura del materiale. Lo sviluppo di tale tecnologia portò all'ideazione di un materiale composito, prodotto unendo più strati di vetro float a materiali plastici usati come interstrato; tale soluzione ebbe successo in molti campi applicativi, uno fra i quali quello edilizio.

L'intrinseca fragilità del vetro, ovvero la scarsissima resistenza alla propagazione delle cricche, anche microscopiche, ha ostacolato a lungo la progettazione di strutture interamente in vetro con funzione strutturale. Infatti, vi è una fortissima aleatorietà nelle caratteristiche di resistenza del materiale vetro, generata da una concentrazione di sforzi in corrispondenza di microfratture superficiali, la quale consente loro di propagarsi all'interno di tutto il mezzo in modo disordinato, in conseguenza della natura amorfa della struttura microscopica del vetro. Questo può accadere anche per gli elementi in vetro più cautelativamente dimensionati. L'estrema fragilità è la proprietà che strutturalmente differenzia il vetro rispetto agli altri materiali da costruzione.

A partire dall'ultimo quarto del XX secolo, anche già dagli anni '60, grazie agli sviluppi dell'ingegneria delle costruzioni, l'utilizzo del vetro come materiale dichiaratamente strutturale introduce una novità nella progettazione edilizia e costituisce una soluzione vantaggiosa alle diverse richieste per l'ambito edilizio.

L'offerta tecnologica in termini di prodotti consente, inoltre, di combinare diversi trattamenti e processi di produzione in modo da ottenere determinate caratteristiche degli elementi volute dal progettista o dalla committenza di un'opera, come le proprietà di trasmissione del calore, del suono e delle radiazioni luminose.

A livello italiano, purtroppo, non esistono studi di ingegneria del vetro comparabili qualitativamente a quelli dei partner europei (S. De Gaetano, 2005). Questo è dovuto principalmente alla mancanza di un approfondimento della ricerca italiana nel campo del vetro strutturale e la scarsità dei fondi utili alla sperimentazione, oltre che al contrasto tra l'ottica italiana del "desiderio di risparmio", delle imprese di costruzione ed il costo che la progettazione di manufatti in vetro strutturale necessariamente ed inevitabilmente richiede.

## ***1.2 Vantaggi applicativi del vetro***

Se, tradizionalmente, il passaggio della radiazione solare luminosa era affidata ad una piccola percentuale dell'involucro, con l'avanzare delle tecnologie dell'ingegneria e dell'architettura, ora esso può essere veicolato dall'intera superficie esterna, pur svolgendo un ruolo di riparo e protezione, quale funzione essenziale di un involucro edilizio. Infatti, altre proprietà molto vantaggiose per il vetro utilizzato in edilizia sono la totale inerzia chimica e biologica, che appunto rende gli involucri inattaccabili da agenti chimici e biologici esterni e l'impermeabilità ai liquidi, gas, vapori e microrganismi, requisiti che altri materiali da costruzione, come calcestruzzo, acciaio o legno, spesso non soddisfano. Oltre ai grandi ed innovativi involucri realizzati per la totalità o quasi in vetro strutturale, esiste una vasta gamma di applicazioni che questo materiale possiede. In questa parte dell'elaborato vengono forniti alcuni esempi applicativi.

- Uno fra i più importanti riguarda assolutamente le facciate vetrate. Esse possono coprire anche grandi superfici e vengono realizzate attraverso il montaggio di lastre in vetro secondo una modularità prevista nel progetto. Tali lastre forniscono una resistenza alle sollecitazioni di carico, che per lo più sono dovute al vento, considerabile con buona approssimazione come carico distribuito su tutta l'area di ciascuna lastra e agente perpendicolarmente al loro piano di giacitura. Il peso proprio delle lastre è trasmesso,

attraverso una struttura di supporto - che può essere di diverse tipologie - agli elementi dello scheletro portante dell'edificio; una possibile tipologia di ancoraggio, molto utilizzata nelle nuove costruzioni è, ad esempio, la sospensione delle vetrate per appoggi puntuali sui quattro angoli della lastra, attraverso elementi di ancoraggio detti *Rotules* (Fig. 1.1).



**Fig. 1.1** Ancoraggio puntuale di una facciata in vetro strutturale agli angoli di ciascuna lastra.  
Fonte: [k].

L'edificio Cube Berlin, situato a Washingtonplatz, inaugurato nel 2020 nel centro di Berlino, rappresenta un eccellente riferimento applicativo di facciate continue realizzate in vetro strutturale. L'edificio di forma cubica, progettato da *3XN Architects*, ha un involucro realizzato interamente, in tutte le sue quattro facciate, da vetro strutturale, disposto in modo da generare delle geometrie triangolari, le quali possono specchiare ogni angolo della piazza, distorcendone la visione, che diventa quasi caleidoscopica (Fig. 1.2). La peculiarità strutturale del Cube Berlin è data dalla realizzazione delle facciate secondo una tecnologia a doppia pelle, i cui elementi costituenti in vetro sono stati realizzati a partire da un nuovo materiale di interstrato, che fosse compatibile con il PVB - materiale anch'esso previsto dal progetto - in modo da ridurre il fenomeno della delaminazione, ovvero lo sfaldamento degli strati costituenti l'elemento in vetro utilizzato per le lastre. Grazie a diverse tecnologie di controllo del consumo energetico, l'edificio in oggetto risulta, inoltre, altamente efficiente energeticamente.



**Fig. 1.2** Cube Berlin, Berlino: esempio applicativo di facciate continue in vetro strutturale.  
Fonte: [1].

- Ad avere funzione di tamponamento, oltre alle grandi facciate vetrate, è possibile anche sfruttare pannelli unicamente in vetro portante che vengono chiamati a comporre piastre totalmente trasparenti. Anche in questo caso le principali sollecitazioni che tali elementi devono fronteggiare riguardano il vento, che imprime ad ogni pannello un carico uniformemente distribuito, anche se in alcuni casi le piastre vengono progettate anche per sorreggere carichi verticali, agenti parallelamente al loro piano medio, i quali possono costituire, per esse, anche una causa di instabilizzazione.

Un esempio applicativo è l'edificio progettato dagli architetti *Marquardt & Hieber* e dagli ingegneri *Ludwig & Weiler* a Rheinbach, in Germania. La struttura è costituita da 8 elementi scatolari in vetro, progettati per sorreggere una copertura di 500 m<sup>2</sup> di superficie, dal peso di 28 tonnellate (Fig. 1.3). I carichi agenti sui componenti vetrati vengono trasmessi agli elementi di fondazione, realizzati in calcestruzzo, attraverso profili in acciaio posti in corrispondenza dell'attacco con le strutture portanti orizzontali. Per il progetto è stato previsto l'impiego di 36 piastre di vetro stratificato, spesse 42 mm, composte da una lastra in vetro temprato posta entro altre 2 di vetro termicamente indurito (successivamente saranno approfonditi i processi di tempra e indurimento), le cui connessioni sono realizzate per mezzo di strati di 1,52 mm di PVB come materiale di interstrato. Sebbene il vetro sia un materiale molto resistente alle azioni di compressione, la snellezza delle piastre ha reso necessario lo studio della stabilità al carico di punta, oltre alla considerazione di diversi scenari che possono presentarsi in seguito alla rottura accidentale di ciascun elemento, in modo che non venga innescato il collasso globale della struttura (L Blandini et. al., 2006).



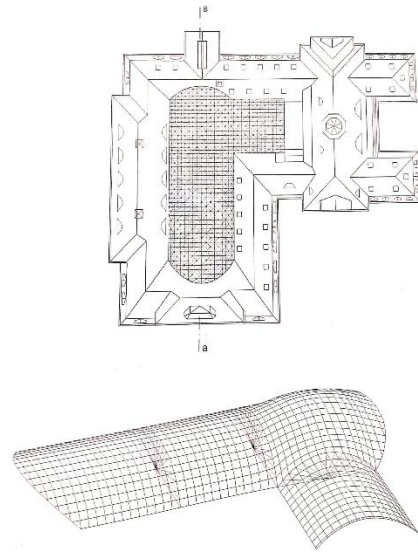
**Fig. 1.3** Pannelli in vetro strutturale: edificio a Rheinbach, Germania.  
Fonte: [4].

- Le coperture sono un'altra eccezionale applicazione del vetro strutturale. Esse devono essere progettate in modo che il vetro resista a determinate condizioni di carico, quali, principalmente, il carico da neve e la forza di estrazione del vento. Si prenda come esempio l'edificio ospitante il Museo di Storia situato sempre in Germania, nella città di Amburgo. Tale edificio, eretto agli inizi del '900 ha al suo interno una corte dalla forma "a L". La corte interna prevedeva dal progetto iniziale una copertura, che venne progettata e realizzata solo nel 1989 da parte degli architetti *Gerkan, Marg und Partner* in occasione dell'ottocentesimo anniversario del porto di Amburgo. Si tratta di un sistema in vetro e acciaio costituito geometricamente da due volte a botte che si intersecano attraverso una superficie di transizione, sfruttando a pieno la modularità delle lastre di vetro (Fig. 1.4, 1.5). Per la realizzazione della copertura, le lastre assumono una geometria variabile tra il rettangolo - a costituire il corpo delle volte a botte - ed il rombo, per quanto riguarda la superficie di transizione; mentre i profili in acciaio mantengono lunghezza e sezione costanti. La struttura in acciaio, costituita da due sistemi di cavi, risulta avere una funzione di irrigidimento delle volte, in modo da fornire globalmente una deformabilità minore. I moduli in vetro sono alloggiati su appoggi in neoprene, avente funzione impermeabilizzante, in modo da costituire una difesa contro le infiltrazioni dell'acqua e sono bloccati in corrispondenza dei nodi tramite piastre circolari. Il progetto ha previsto anche delle aperture comandabili per l'evacuazione di fumi e per il ricambio dell'aria interna.





**Fig. 1.4** Vista delle volte a botte e della zona di transizione.  
Fonte: [n].



**Fig. 1.5** Rappresentazione della superficie della copertura in pianta e in vista 3D.  
Fonte: [o], [12].

- Ulteriore tipologia di applicazione del vetro strutturale riguarda sicuramente scale, balaustre e passerelle. Una peculiarità della progettazione di tali elementi consiste nella sollecitazione di carico da considerare, che in questo caso è relativa principalmente al carico dinamico dell'uomo, determinato dal peso proprio e dalla forza di “spinta della folla”, diversamente al caso delle applicazioni precedenti. In aggiunta a ciò, la superficie di tali elementi deve essere trattata in modo da ridurre quanto più possibile il rischio di scivolamento, che altrimenti potrebbe, in alcuni casi, generare conseguenze disastrose.
- Lo Skywalk è una passerella sospesa orizzontale dalla forma “a ferro di cavallo” avente pavimento unicamente in vetro, realizzata a partire dal 2003 e terminata nel 2007. Situata nel Grand Canyon dello stato dell'Arizona (USA), la struttura ha una sporgenza di 21 metri e lo spessore del vetro utilizzato per il pavimento è di 8 cm (Fig. 1.6). Oltre ad essere antisismica, la passerella è stata progettata per sopportare un carico in movimento di 490 kg/m<sup>2</sup> e resistere a venti di 160 km/h. Per avere tali prestazioni meccaniche, il ponte dello Skywalk è realizzato con quattro strati di vetro a basso contenuto di ferro, prodotti dall'azienda *Saint-Gobain* di Pisa, inframezzati tra loro con strati di SentryGlas, materiale plastico di interstrato realizzato da *DuPont*<sup>®</sup>.



**Fig. 1.6** Passerella dello Skywalk sul Grand Canyon.

Fonte: [q].

- Il vetro con funzione strutturale trova applicazione anche nella realizzazione di pilastri. Per quanto riguarda questi ultimi, essi sono generalmente sollecitati a compressione, a meno dello sviluppo di momenti flettenti indesiderati che possano sottoporli a pressoflessione. A patto che i vincoli di estremità siano realizzati in modo da non sviluppare tali momenti flettenti, sotto queste condizioni di carico, il vetro si presta perfettamente ad essere materiale costituente. Per permettere ciò, lo schema statico di questa tipologia di pilastri deve essere quanto più approssimato ad una “trave semplicemente appoggiata”, incernierata in estremità e appoggiata in basso, in modo da evitare qualsiasi carico di punta. Una difficoltà di questa tipologia di applicazione consiste nelle limitate dimensioni delle lastre di vetro; questo obbliga ad adottare l'accostamento di più lastre al fine di ottenere un determinato valore di snellezza strutturale (rapporto lato/altezza), che garantisca la resistenza adeguata alla sollecitazione di compressione. Una particolare cura progettuale deve essere usata, inoltre, nei dettagli geometrici, controllabili solo con millimetriche e delicate lavorazioni delle lastre di vetro, in modo da consentire una perfetta collimazione dei bordi, ove è più probabile la presenza di cricche (S. Tattoni et. al., 2007).

Uno dei primi esempi di utilizzo del vetro strutturale per la realizzazione di pilastri coincide con il Municipio di Saint-Germain-en-Laye (Francia), realizzato nel 1995, dagli architetti *Brueinet & Saunier* e dagli ingegneri *O.T.H./Alto - M. Malinowski*. All'interno di tale edificio, 12 pilastri di sezione “a croce” sorreggono un tetto di 500 m<sup>2</sup> (Fig. 1.7). Ogni elemento di vetro è formato da tre lastre, in modo da porre quella più resistente nel mezzo e quelle meno resistenti verso l'esterno. La qualità della progettazione sta, appunto, nella collaborazione tra le lastre: nel caso in cui se ne dovesse rompere una, le altre potranno comunque sopportare i carichi agenti ed evitare il crollo dell'intera struttura.

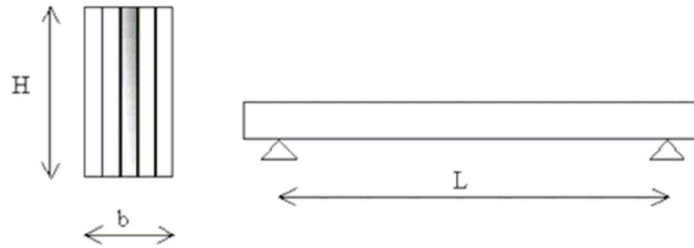


**Fig. 1.7** Pilastri strutturali in vetro, Municipio di Saint-Germain-en-Laye, Francia.  
Fonte: [4].

- Quando una lastra in vetro viene posta orizzontalmente sul suo lato stretto, ovvero disposta in modo che il suo piano medio sia un piano verticale, essa può svolgere il ruolo di una trave a tutti gli effetti. La problematica maggiore nella progettazione e realizzazione delle travi in vetro strutturale riguarda lo sviluppo dell'inflessione (anche semplice) del loro asse. Tale inflessione implica una sollecitazione di trazione lungo il bordo inferiore, che può provocare la rottura del vetro a causa della sua scarsa resistenza a trazione. La resistenza a trazione può essere, però, incrementata in base alle diverse lavorazioni che si possono effettuare sul bordo inferiore delle lastre ma, genericamente, le prestazioni della trave possono essere globalmente migliorate ricorrendo all'assemblaggio di più lastre di vetro che, oltre a fornire una quantità maggiore di area resistente nella zona della sollecitazione di trazione, può anche migliorare la rigidità alla flessione trasversale e alla torsione (Fig. 1.8).

Un esempio di rinforzo strutturale del bordo della lastra è l'integrazione di elementi di altro materiale dotato di una maggiore resistenza a trazione e duttilità, come la fibra di carbonio, che possano assorbire le forze di trazione indotte dalla flessione (S. Tattoni et. al., 2007). È importante valutare le caratteristiche meccaniche dei materiali accostati - come il coefficiente di dilatazione termica - in modo da assicurare la corretta collaborazione strutturale. In altro modo, è possibile anche disporre un'altra lastra, sul suo lato largo, ortogonalmente a quelle costituenti la trave, con funzione irrigidente. Le due estremità della trave vengono solitamente inserite in appositi alloggiamenti metallici, prevedendo una giunzione fra i due diversi materiali - vetro e metallo - realizzata in materiale plastico. Tale giunzione permette di evitare la localizzazione delle tensioni dovute ai momenti di

incastro alle estremità stesse, stabilizzando meglio la trave. Tale tecnologia di giunzione può essere schematizzata come un semplice appoggio.



**Fig. 1.8** Schema statico di una trave multistrato: accostamento di lastre poste sul loro lato stretto.  
Fonte: [13].

Volendo riportare un esempio applicativo, la copertura dei laboratori interrati del Louvre, a Parigi, vede l'impiego di 10 travi in vetro strutturale, posizionate alla distanza di 1,40 m l'una dall'altra. Realizzata nel 1989, la struttura sorregge una copertura in vetro di ampiezza pari a 75 m<sup>2</sup>. Ciascuna trave è costituita da quattro lastre di vetro da 15 mm di spessore, rese coese attraverso l'impiego di PVB, spesso 0.37 mm (M. Palumbo et. al., 2008; Fig. 1.9).



**Fig. 1.9** Copertura dei laboratori del Louvre, Parigi.  
Fonte: [10].

### ***1.3 Sostenibilità del vetro***

In un contesto della sempre più ricercata edilizia green, è necessario non trascurare la potenzialità di un utilizzo sostenibile dei componenti edilizi in vetro, dalla loro produzione alle applicazioni nell'ingegneria bioclimatica, fino alle possibilità di un riciclo del materiale. Esso offre soluzioni progettuali dinamiche che hanno il potenziale di rendere gli edifici efficienti dal punto di vista energetico.

È utile affermare che il vetro, come composizione delle sue materie prime, è un materiale altamente disponibile in natura. Infatti, il suo composto principale è il diossido di silice ( $\text{SiO}_2$ ), che è il costituente primario della sabbia, unita tramite la lavorazione industriale all'ossido di sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e alla calce ( $\text{CaO}$ ), a formare il vetro sodio-calcico, come noi lo conosciamo. Per comprendere la disponibilità di tale materiale, va detto che il vetro naturale, che esiste da milioni di anni, si può formare da alcuni tipi di rocce silicee che si fondono in relazione a fenomeni in cui si sviluppa un'elevatissima temperatura, come eruzioni vulcaniche o scariche elettriche provenienti dai fulmini: un esempio è l'ossidiana, minerale considerato come vetro naturale.

Essendo trasparente, il vetro permette di risparmiare moltissima energia per il normale riscaldamento e per l'illuminazione degli ambienti, e senza eccessiva dispersione del calore interno, soprattutto grazie all'utilizzo di soluzioni tecnologiche che incrementano l'azione isolante dei vetri. Infatti, usufruendo della luce del sole più a lungo durante la giornata non sarà necessario il consueto utilizzo dell'illuminazione artificiale interna agli ambienti e la loro temperatura risulterà aumentata grazie all'incidenza prolungata della radiazione. In questo modo, la domanda di energia artificiale da parte degli edifici sarà notevolmente ridotta, portando anche ad un risparmio sulla bolletta energetica totale.

Tuttavia, sebbene la luce diurna possa essere facilmente fornita attraverso finestre o vetrate continue di facciata, è necessario controllarne l'intensità, la distribuzione, l'abbagliamento e la resa cromatica per generare ambienti interni stimolanti e di alta qualità per gli occupanti. Per attuare un buon progetto illuminotecnico è necessario tenere conto di molti fattori: le caratteristiche delle vetrate e il loro orientamento, gli elementi di controllo solare come tende e lamelle, la geometria e l'organizzazione spaziale dell'edificio, la distanza e l'orientamento degli ambienti interni rispetto alle finestre o vetrate. Una progettazione inefficiente potrebbe portare non solo ad una scarsa illuminazione diurna, ma può anche influire negativamente sul comfort e sulla produttività degli occupanti. Per ridurre al minimo il consumo di energia da parte dell'edificio, non solo giornaliero, ma anche annuo, il progetto illuminotecnico dovrebbe prevedere un sistema di controllo dei raggi solari incidenti sulle superfici vetrate per il periodo estivo, soprattutto se l'edificio è composto da

grandi facciate vetrate di involucro. Tale sistema di controllo della radiazione può essere attuato da schermature esterne o interne, oppure da materiali usati come rivestimenti o intercalari per i vetri (di cui si parlerà in seguito) in modo da non rendere gli ambienti fastidiosamente caldi, con il conseguente consumo di energia che si verificherebbe per l'utilizzo di una climatizzazione estiva.

Per valutare l'impatto che il vetro ha, in termini di impronta ecologica sull'ambiente, è necessario attuare un bilancio energetico legato a tutte le fasi del suo ciclo di vita: sebbene il consumo di energia per la produzione sia molto elevato, a causa delle alte temperature richieste dai processi per l'ottenimento del vetro float, esso può essere controbilanciato dal risparmio energetico che si ha nel suo utilizzo in opera e dalla possibilità di riutilizzo dei componenti nel loro fine vita - ad esempio come aggregato del calcestruzzo - e quindi la possibilità di risparmiare sulla produzione di alcuni ulteriori componenti edilizi.

#### ***1.4 Produzione del vetro float***

Il processo di produzione industriale riguarda il vetro sodio – calcico, facilmente lavorabile, per l'ottenimento delle lastre float e per successive lavorazioni in officina.

Le materie prime utilizzate per la produzione del vetro si possono categorizzare come:

- **Formatori:** sono sostanze che, se fuse e successivamente raffreddate, possono formare naturalmente un materiale di struttura vetrosa (essi sono detti anche “vetrificanti”). Si fa riferimento, come detto precedentemente, al diossido di silice ( $\text{SiO}_2$ ) proveniente dalla sabbia e responsabile della caratteristica struttura amorfa del reticolo del vetro, presente al 69 – 74 % nella composizione del vetro float;
- **Modificatori:** vengono addizionati ai formatori per anticipare la loro fusione. Quest'ultima non avviene ad un valore preciso della temperatura, ma in un range di temperature alle quali il vetro subisce il passaggio da solido a massa fusa attraverso un graduale rammollimento, in cui esso si trova ad uno stato plastico-viscoso. Questo graduale cambiamento di stato del vetro è definito *Transizione vetrosa*. In genere i materiali modificatori utilizzati, detti anche “fondenti” sono gli ossidi di metalli alcalini ( $\text{Na}_2\text{O}$  oppure  $\text{K}_2\text{O}$ ). L'ossido di sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), normalmente impiegato, occupa il 12 – 16 % della composizione totale;

- Additivi: hanno diverse funzionalità e possono essere aggiunti per diversi scopi, in base alle caratteristiche richieste al vetro finito. Un esempio è l'ossido di calcio, o calce (CaO), avente funzione stabilizzante, ovvero di rendere la struttura del vetro meno alterabile, quindi più stabile sia chimicamente che meccanicamente (presente per il 5 – 12 %). Altri materiali additivi possono essere quelli con funzione affinante, che permettono l'espulsione di bolle gassose generate nella miscela, o con funzione colorante;
- Eventuale rottame di vetro che può essere riciclato, quindi reimmesso nel ciclo di produzione di nuovo vetro, a patto che venga depurato da ogni materiale estraneo.

La fabbricazione del vetro float (detto anche ricotto) si articola in diverse fasi: esse vengono qui elencate e analizzate.

#### FUSIONE DELLE MATERIE PRIME:

Le materie prime vengono anzitutto pesate per configurare la corretta composizione del vetro che si vuole ottenere alla fine dell'intero processo, quindi miscelate ed umidificate, a formare una miscela detta "vetrificabile". Successivamente tale miscela viene trasportata in un forno di fusione, in cui essa raggiunge la temperatura di 1550 °C, con lo scopo di renderla il più omogenea possibile. In questo processo la fusione porta all'evaporazione di tutta l'acqua della miscela e allo sviluppo di anidride carbonica o solforosa, con la conseguente generazione di bolle gassose che, attraverso la presenza delle sostanze affinanti, vengono facilmente trascinate sulla superficie della massa vetrosa e così espulse. Una volta uscita dal forno, la miscela si trova ad una temperatura di 1100 °C, alla quale inizia la transizione vetrosa.

#### FORMATURA DEL VETRO:

In seguito alla fusione, la miscela vetrosa viene fatta passare all'interno di un tunnel ad atmosfera controllata, contenente 7 cm di stagno allo stato fuso, su cui viene fatta galleggiare (da qui il termine "Float"). In questo modo il vetro assume una geometria perfettamente piana. I due materiali posti a contatto non si mescolano a causa del diverso stato che assumono a quella determinata temperatura: in particolare, lo stagno è molto fluido, mentre il vetro si trova in condizioni di elevata viscosità.

All'interno del tunnel, lo stagno ha il compito di levigare la superficie inferiore del vetro per diretto contatto, mentre la superficie superiore viene appiattita uniformemente per effetto della gravità e del galleggiamento della massa vetrosa.

All'uscita del tunnel, il vetro viene trasportato su dei rulli rotanti, detti "tops", la cui velocità di rotazione determina lo spessore che dovrà avere la lastra float, che può variare tra 1,3 e 24 mm: una rotazione più lenta determinerà una maggiore consistenza del vetro, quindi uno spessore maggiore; al contrario se la velocità di rotazione dei rulli è elevata. Una volta raggiunto lo spessore voluto, il vetro subisce un raffreddamento fino alla temperatura ambiente, solidificando a partire dai 500 °C.

La formatura del vetro avviene in un intervallo di temperatura definito "Intervallo di lavorazione", all'interno del quale il vetro è modellabile, per effetto della sua viscosità durante la transizione vetrosa, che aumenta progressivamente con il diminuire della temperatura.

Sulla base di ciò, è utile precisare che, a seconda della quantità di modificatori aggiunti per la composizione del vetro, esso sarà caratterizzato da un intervallo di lavorazione differente: in particolare, maggiore è la quantità di modificatori aggiunti e più ampio sarà tale intervallo, compreso tra due temperature più distanti. Solitamente, la lavorazione avviene in un range di temperatura che va dai 1100 °C (all'uscita dal forno) ai 600 °C (alla fine del processo di formatura).

Si deduce che un vetro a maggior contenuto di  $\text{Na}_2\text{O}$  risulterà più adatto ad una lenta lavorazione, mentre un minor contenuto di ossidi determina la necessità di una lavorazione più veloce (come quella industriale).

#### RICOTTURA:

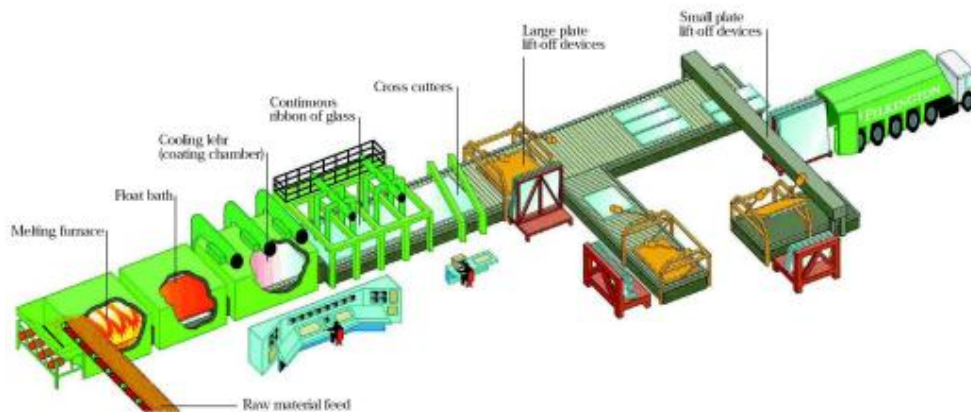
Tale fase del processo di produzione serve ad eliminare le tensioni che si generano all'interno della lastra di vetro nel processo di formatura a causa del riscaldamento e raffreddamento, che renderebbero altrimenti difficili le lavorazioni post-produzione.

In questa fase il vetro viene riscaldato nuovamente fino ad una temperatura di 600 °C la quale, una volta raggiunta, viene mantenuta per un tempo tale da permettere l'uniformità termica in tutti i punti del materiale. Dopo di che, il vetro viene fatto un'altra volta raffreddare fino alla temperatura di 450 °C e poi alla temperatura ambiente.

#### SQUADRATURA:

Alla fine della fase di ricottura, il vetro viene tagliato in modo da formare lastre, in base alle dimensioni richieste, e i bordi longitudinali di ciascuna lastra vengono rifiniti.





**Fig. 1.10** Processo di produzione del vetro float: dalle materie prime alle lastre finite.  
Fonte: [14].

## 1.5 Processi di post-produzione

Una volta prodotta, la lastra di vetro è pronta per subire degli interventi atti a conferirle specifiche caratteristiche, riguardanti proprietà termiche, meccaniche, ottiche e altre.

### PROCESSI MECCANICI:

I processi meccanici post-produzione riguardano il trattamento delle superfici, o di porzioni del materiale, in modo da realizzare elementi prefabbricati, sulla base della richiesta.

- **Sagomatura:** è un particolare processo che prevede il taglio delle lastre di vetro, strettamente necessario quando si vogliono ottenere lastre aventi geometrie irregolari, non solo se sono previsti angoli fuori squadra, ma anche per quanto riguarda contorni curvilinei, come accade, ad esempio per lastre circolari. Esso può essere eseguito sia a mano che per mezzo di macchinari a precisione millimetrica.  
Attraverso la sagomatura, le lastre possono avere le caratteristiche adeguate ad un normale e semplice montaggio.
- **Molatura:** essa consiste nella rifinitura dei bordi della lastra, uscente dalla produzione “float”, attraverso l’eliminazione delle parti taglienti e/o irregolari, ottenuta con mole di pietra o di diamante a grana grossa (Fig. 1.11). Tale processo è necessario, oltre a prevenire gli infortuni dei lavoratori, per minimizzare i difetti del vetro presenti sui bordi, a causa delle microfratture, le quali concorrono a diminuire la resistenza della lastra per effetto della loro propagazione.



**Fig. 1.11** Rifinitura del bordo della lastra attraverso mole diamantata.

Fonte: [t].

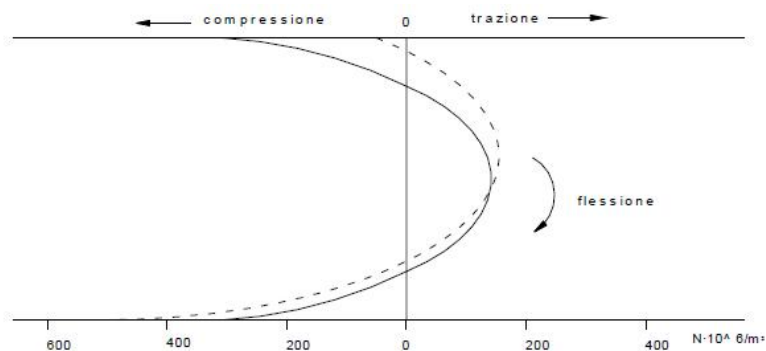
- **Foratura:** permette di praticare fori sulla lastra, che possano garantire il montaggio in opera attraverso la bullonatura. Essa si effettua tramite appositi trapani dotati di punte a corona diamantata.

#### PROCESSI TERMICI E CHIMICI:

Tali processi sono necessari ad evitare la propagazione delle fratture presenti all'interno del vetro, maggiormente in superficie, fornendo al materiale una resistenza meccanica maggiore. Infatti, come detto precedentemente, la rottura del vetro prende atto proprio da tali difetti, che, sotto sollecitazioni di trazione, tendono a innescare una trasmissione della rottura in tutto il mezzo. In particolare, i processi termici di post-produzione forniscono alla lastra di vetro uno stato tensionale preimpostato che incrementa la tensione massima ammissibile a cui può essere soggetta la lastra senza sviluppare una microfrattura.

- **Tempra Termica:** Il processo di tempra termica consiste nel riscaldamento uniforme del normale vetro ricotto (float), che quindi viene doppiamente ricotto, ad una temperatura prossima a quella del suo punto di rammollimento, la quale è compresa fra i 650 e i 750 °C. Tale fase di riscaldamento ad elevata temperatura permette di eliminare tutti i possibili stati tensionali interni che si sono potuti generare nel processo di ricottura semplice. Successivamente al riscaldamento, il vetro subisce un raffreddamento ad elevata velocità, fino alla temperatura ambiente, messo in atto attraverso getti di aria fredda agenti su entrambe le superfici della lastra. Diminuendo velocemente la temperatura del materiale, le superfici esterne tendono a raffreddarsi molto prima del nucleo, a causa della sua scarsa conduttività termica. Considerando che il raffreddamento induce sul vetro una riduzione del volume, quindi una compressione, le zone esterne, a diretto contatto con l'aria fredda, si contraggono più rapidamente del nucleo. A questo punto, come effetto della fluidità relativa del vetro, la zona interna della lastra è in grado di adattarsi agli scorrimenti delle superfici, generati dalla loro contrazione. Raggiunta, però, una temperatura tale da indurre

anche l'indurimento, quindi la contrazione, del nucleo, esso si trova a dover vincere la contrazione già avvenuta nelle superfici esterne, già indurite, per cui viene posta in trazione. Lo stato tensionale indotto sarà tanto maggiore, quanto maggiore è il gradiente termico applicato durante la fase di raffreddamento della tempra, ma in ogni caso gli sforzi indotti di compressione e di trazione si equilibrano lungo lo spessore di tutta la lastra. Affinché tali tensioni generate siano permanenti, il raffreddamento del trattamento di tempra deve avvenire ad una velocità tale da impedire il rilassamento viscoso del vetro. Grazie a questo trattamento, quindi, viene indotto sul vetro uno stato di trazione nella zona centrale della lastra e una forte compressione sulle superfici esterne, la quale aumenta la resistenza del materiale, appunto debole a trazione. Infatti, in presenza di una sollecitazione di trazione a livello delle superfici esterne, ad esempio messa in atto da un'inflexione in corrispondenza delle fibre tese, essa deve prima vincere la compressione pre-esistente per poter porre definitivamente il materiale in trazione (Fig. 1.12). Questo individua, appunto, un grandissimo vantaggio per quanto riguarda l'apertura delle inevitabili microfratture superficiali: per innescarle occorrerà una sollecitazione a trazione maggiore.



**Fig. 1.12** Diagramma delle tensioni nel vetro temprato  
(curva continua: lastra scarica; curva tratteggiata: in seguito a flessione con momento negativo).  
Fonte: [13].

L'andamento parabolico delle tensioni generate dalla tempra in funzione dello spessore della lastra viene descritto dall'espressione:

$$\sigma(z) = \sigma_0 \left[ 1 - 12 \left( \frac{z}{t} \right)^2 \right] \quad [1]$$

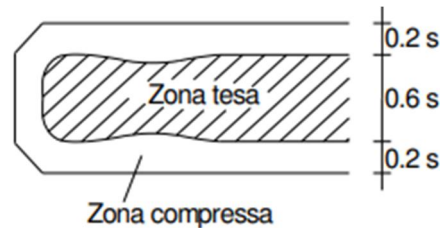
dove:

- $\sigma_0$  è la tensione di trazione agente sul piano medio;
- $t$  è lo spessore della lastra di vetro;
- l'ascissa  $z$  è tale che  $-\frac{t}{2} \leq z \leq \frac{t}{2}$ , con  $z = 0$  in corrispondenza del piano medio della lastra.

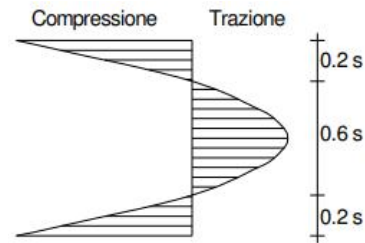
La tensione di compressione sulle due superfici esterne sarà pari a:

$$\sigma_c = \sigma \left( \frac{t}{2} \right) = -2\sigma_0 \quad [2]$$

L'annullamento delle tensioni generate dal processo di tempra, dette anche *Autotensioni*, si ha per  $\sigma(z) = 0$  ad una posizione pari a  $t_c = 0.21 t$  dalla superficie. Tale profondità indica il limite della zona compressa del vetro temprato: si comprende che la compressione indotta sulla lastra è applicata fino a circa il 20% del suo spessore e questa è sufficiente a inglobare i difetti superficiali del vetro, che difficilmente raggiungono tale livello di profondità. Di conseguenza la trazione coinvolgerà il restante 60% (Fig. 1.13, 1.14). Da questo presupposto si comprende che la tempra termica è difficilmente applicabile a vetri molto sottili, dove non è facile ottenere un raffreddamento differenziato delle superfici rispetto all'interno (E. Cagnacci et. al., 2016).



**Fig. 1.13** Spessore delle zone di compressione e trazione all'interno della lastra.



**Fig. 1.14** Andamento delle tensioni riferite allo spessore delle zone di compressione e trazione.

Fonte: [14].

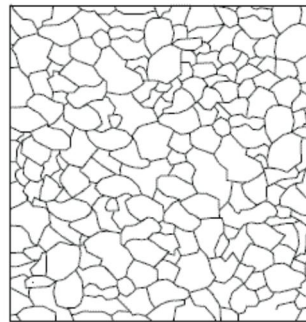
- **Tempra Chimica:** questo tipo di trattamento viene necessariamente eseguito su vetri ad alto contenuto di sodio e consiste nell'immersione della lastra in un bagno di cloruro di potassio (KCl), che viene scaldato fino ad una temperatura di 350 °C, in modo da sviluppare una reazione chimica di scambio ionico tra gli ioni di sodio della superficie del vetro, caratterizzati da piccolo diametro, e gli ioni K<sup>+</sup>, che sono caratterizzati invece da dimensioni maggiori.

Per l'ingombro sterico generato dalla presenza degli ioni di potassio, che dopo lo scambio si trovano sulla superficie della lastra, quest'ultima tende ad occupare più spazio; tale ingombro è però impedito dalle molecole della parte interna. In ragione di ciò, sulle superfici esterne si genera una compressione.

Rispetto al processo di tempra termica, lo sforzo di compressione che viene indotto risulta più elevato, ma è applicato per uno spessore minore della lastra, tale da considerare i difetti superficiali ancora potenzialmente pericolosi.

Indifferentemente dalla tipologia del processo di tempra (termica o chimica), il modello di rottura della lastra trattata prevede, a causa dell'elevatissima energia che si accumula al suo interno, frammenti di dimensioni millimetriche che presentano, per altro, angoli smussati (Fig. 1.15). Per questa ragione, i vetri temprati rientrano nella categoria dei vetri di sicurezza, la cui rottura cioè non comporta danni spropositati a persone o cose.

In ragione di ciò, come svantaggio di questo trattamento termico vi è la possibilità che la lastra si frantumi in piccolissimi pezzi, in tutta la sua interezza, per effetto di un urto, anche accidentale, avvenuto ad un suo estremo. Per questo motivo le lavorazioni meccaniche come il taglio e la foratura non sono applicabili ai vetri già temprati, ma devono avvenire prima del trattamento.



**Fig. 1.15** Rottura tipica del vetro temprato.  
Fonte: [5].

Un particolare fenomeno di rottura del vetro temprato riguarda la cosiddetta *Rottura spontanea*, derivante dalla presenza, all'interno della lastra, di inclusioni di Solfuro di Nichel (NiS), molecole già presenti naturalmente nelle materie prime del vetro, o che comunque possono formarsi nel processo di fusione. Esse sono caratterizzate da una transizione di fase volumica alla temperatura di 396 °C, fra la fase cristallina  $\beta$ -NiS, tipica delle basse temperature, e quella  $\alpha$ -NiS, tipica delle alte temperature (S. Tattoni et. al., 2007). Durante la fase di riscaldamento della tempra il solfuro di Nichel assume completamente la sua forma  $\alpha$  ma, durante il rapidissimo raffreddamento, il passaggio dalla forma  $\alpha$  a quella  $\beta$  non ha il tempo di avvenire. Tale passaggio di stato si verifica in seguito alla tempra - anche dopo molto tempo (nell'ordine degli anni) - con un aumento del

volume (del 4% circa), il quale genera nella matrice del vetro tensioni tali da provocarne una frattura, che può anche fare collassare l'intera struttura (E. Tonella, 2010).

Ciò avviene perché le particelle di Solfuro di Nichel hanno un coefficiente di dilatazione termica molto superiore a quella del vetro, per cui subiscono una dilatazione a temperature molto meno elevate rispetto al vetro. La rottura spontanea viene detta anche “*a farfalla*” (Fig. 1.16).



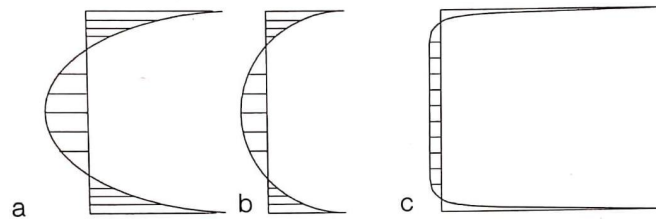
**Fig. 1.16** Tipica rottura “a farfalla” derivante da inclusioni di Solfuro Di Nichel.  
Fonte: [u].

Al fine di evitare che vengano impiegate lastre di vetro che possano contenere inclusioni di solfuro di Nichel e prevenire quindi la potenziale rottura spontanea, esse vengono sottoposte all' Heat Soak Test (HST). Attraverso tale processo, è possibile individuare con elevata probabilità le lastre contenenti le particelle di solfuro di Nichel, le quali non vengono impiegate nell'opera. Ci si limita, di fatto, a scartare gli elementi difettosi in quanto non è possibile, ad oggi, ovviare alla presenza delle inclusioni che inevitabilmente si formano nel processo di produzione del vetro.

La prova consiste nel riscaldamento delle lastre testate ad una temperatura maggiore di quella che caratterizza le reali condizioni di esercizio a cui esse si troveranno, raggiungendo una temperatura media di 290 °C, che viene mantenuta costante per alcune ore, favorendo la transizione di fase, quindi la variazione di volume, delle eventuali particelle di solfuro di Nichel. Il test risulta superato se ciascuna lastra rimane integra in seguito allo stress termico; in caso contrario, come già precisato, le lastre fratturate andranno distrutte.

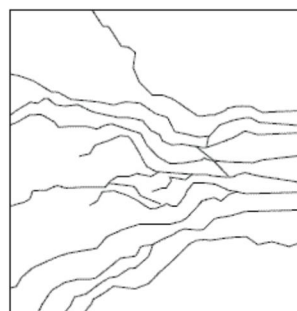
Va tenuto in conto che l'Heat Soak Test non è in grado di garantire con assoluta precisione l'assenza delle particelle di solfuro di Nichel: esiste sempre, infatti, un minimo rischio residuo che alcune particelle incluse nella matrice vetrosa non vengano individuate. Di conseguenza non si può mai escludere qualsiasi rottura spontanea potenziale anche per le lastre che superano il test.

- **Indurimento:** esso consiste in un trattamento termico analogo a quello della tempra termica, che però differisce da questa per la minore temperatura applicata alle lastre di vetro per il loro riscaldamento (di circa 10 – 20 °C in meno) e per una fase di raffreddamento più lenta, eseguita sempre attraverso getti di aria fredda. Per mezzo dell'indurimento, quindi, viene indotto uno stato tensionale sempre parabolico, ma caratterizzato da valori minori di tensione, sia a compressione che a trazione (Fig. 1.17).

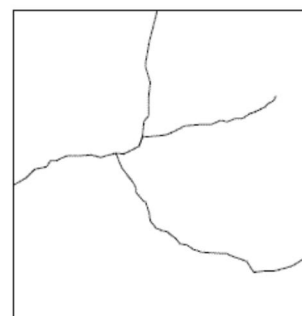


**Fig. 1.17** Distribuzione, lungo lo spessore della lastra delle tensioni nel vetro temprato termicamente (a), indurito (b) e temprato termicamente (c).  
Fonte: [12].

Il modello di rottura dei vetri induriti presenta una dimensione dei frammenti maggiore rispetto a quella ottenuta per il processo della tempra e l'innesco di tale rottura avviene in un centro, a partire dal quale si diramano le fessure, in modo analogo a quanto accade per i vetri ricotti (Fig. 1.18, 1.19). Per questo motivo le lastre di vetro indurito non sono considerate di sicurezza; infatti, il rischio di provocare danni a persone e/o cose derivante dalla loro rottura risulta elevato. I minori valori di trazione che però caratterizzano la lastra riducono la possibilità di sviluppare rotture spontanee. Come però accade per i vetri temprati, anche quelli trattati per indurimento non possono subire ulteriormente trattamenti meccanici come il taglio e la foratura.



**Fig. 1.18** Rottura tipica del vetro indurito. Fonte: [5].



**Fig. 1.19** Rottura del vetro float. Fonte: [5].

## 2 IL VETRO STRUTTURALE

---

### 2.1 Caratteri generali

Il vetro con funzione strutturale, come detto introduttivamente, è una soluzione tecnologica, per quanto riguarda i materiali da costruzione, che garantisce elevati livelli prestazionali di resistenza e sicurezza anti-infortunio, anche dopo rottura, pur garantendo le condizioni di trasparenza che si avrebbero tramite il semplice vetro industriale. Sfruttando i vantaggi introdotti da questo materiale per la progettazione di edifici, è possibile ovviare alla sua tipica fragilità, che da sempre l'ha ostacolata.

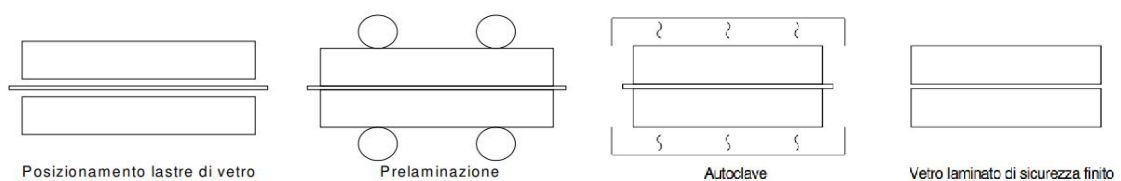
Tale materiale composito è sostanzialmente una piastra ottenuta dalla sovrapposizione ordinata ed alternata di lastre di vetro (spesse solitamente da 3 a 15 mm) e di materiale polimerico, che sia aderente a tutta la superficie del vetro (Fig. 2.1). Generalmente, come materiale plastico di interstrato (“*interlayer*” o “*intercalare*”) viene impiegato il polivinilbutarrile (PVB), che riesce a garantire un’ottima trasparenza, paragonabile a quella del vetro, ed è utilizzabile sia come monostrato, sia attraverso più strati, di diverso spessore. Grazie a tali strati di materiale plastico, la piastra stratificata è in grado di assorbire un’energia d’urto di gran lunga superiore a quella che verrebbe assorbita da una singola lastra di vetro, anche temprato, impedendo la penetrazione del corpo urtante (S. Tattoni et. al., 2007). In questo modo il vetro stratificato permette di sfruttare le proprietà di ogni suo componente, adattando al meglio la rigidità e resistenza agli agenti atmosferici di ogni lastra all’estrema elasticità e adesione del polimero di interstrato. L’adesione delle lastre all’interstrato impedisce inoltre, a seguito di una rottura, la dispersione fuori sede delle schegge, limitando i danni che ne conseguirebbero e quindi fornendo una migliore garanzia di sicurezza. Un altro importantissimo vantaggio introdotto dalla composizione dei vari strati funzionali della piastra stratificata riguarda il mantenimento, da parte di quest’ultima, di una certa capacità resistente post-rottura (quanto meno per un periodo di tempo che deve essere determinato in fase di progettazione o fino ad uno specifico valore del carico, anche esso previsto) in modo che possa ancora, almeno fino alla sostituzione dell’elemento, portare i carichi agenti su di essa.



**Fig. 2.1** Tipica stratificazione funzionale di una piastra in vetro strutturale.  
Fonte: [14].



Il processo di produzione del vetro stratificato è detto *laminazione*: in seguito alla produzione del vetro float, le lastre vengono anzitutto lavate e asciugate in modo da permettere un'elevata adesione dei materiali da assemblare ed evitare un eventuale distacco dei componenti, per poi procedere con l'interposizione dei fogli di materiale plastico. Successivamente l'elemento stratificato che ne risulta viene scaldato e pressato, in una fase di *Prelaminazione*. Una volta avvenuta tale fase, gli strati vengono resi perfettamente aderenti grazie all'applicazione di elevate pressioni e di una temperatura di 250 °C (E. Tonella, 2010, Fig. 2.2). Quest'ultimo processo avviene all'interno di un'autoclave, ovvero una sorta di contenitore chiuso ermeticamente ed isolato dalle condizioni di pressione e di temperatura esterne ad esso.



**Fig. 2.2** Processo di produzione del vetro stratificato.  
Fonte: [14].

Riassumendo, dunque, i molteplici vantaggi che l'utilizzo del vetro stratificato introduce nelle costruzioni riguardano, in punti:

- Sicurezza e protezione: grazie alla permanenza in sede delle schegge nel post-rottura;
- Solidità strutturale: per la resistenza delle molteplici lastre, rese collaboranti dal materiale di interstrato;
- Alte prestazioni termiche, acustiche e di insonorizzazione;
- Versatilità di utilizzo;
- Leggerezza strutturale;
- Basso effetto di riflessione luminosa: qualità che rende il vetro strutturale ottimo nel caso in cui gli edifici debbano essere costruiti in aree molto soleggiate, in cui è necessario un controllo solare ai fini del risparmio energetico;
- Design ed estetica;
- Abbattimento dei costi: dovuto alla semplicità con cui gli elementi vengono montati in opera.

## ***2.2 Tipologie di vetro strutturale***

Combinando assieme le diverse tipologie di vetri e di intercalari polimerici, è possibile ottenere vetri stratificati caratterizzati da differenti livelli prestazionali. A cominciare dalle tipologie di lastre di vetro, si deve tenere a mente che, le proprietà strutturali derivanti dalla composizione di vetri differenti dipenderanno dalla lastra, o dalle lastre, meno resistenti, perché la rottura si innescherà proprio in corrispondenza degli elementi più deboli del multistrato.

L'utilizzo del normale vetro ricotto in applicazioni strutturali non è quasi mai adottato, a causa innanzitutto della sua scarsa resistenza alla trazione, ma anche del fatto che la rottura del vetro float si manifesta con schegge di grandi dimensioni, solitamente aguzze e taglienti, quindi estremamente pericolose. A meno di applicazioni non strutturali o di finitura, il vetro float viene quindi utilizzato in edilizia solamente con lo scopo di ottenere vetri termicamente trattati (temprati o induriti) in modo da ridurre la pericolosità ed aumentarne la resistenza, così da essere impiegabili in ambito strutturale.

Dall'utilizzo, invece, di vetri temprati a costituire lo stratificato, ne risulta che quest'ultimo sarà caratterizzato innanzitutto da una maggior resistenza alla trazione rispetto al caso in cui viene impiegato il vetro ricotto, dovuta al processo della tempra; ma la sua frantumazione per rottura, caratterizzata da moltissimi frammenti minuti, conduce ad una perdita completa della resistenza in post-rottura da parte delle componenti di vetro, mentre l'unico elemento in grado di fornire una resistenza, seppur minima, risulta essere l'intercalare (Fig. 2.3).

Le caratteristiche che, invece, fornisce il vetro indurito alla piastra stratificata riguardano pur sempre una resistenza maggiore rispetto al caso di impiego del vetro float, ma minore rispetto all'utilizzo del vetro temprato, a causa del differente gradiente termico applicato durante il trattamento. Un vantaggio che però fornisce l'utilizzo del vetro indurito, anziché temprato, riguarda la capacità di mantenere una determinata resistenza residua e rigidità post-rottura, come effetto della maggior dimensione dei frammenti (Fig. 2.3).

Infatti, una tecnica per aumentare la resistenza post-rottura, soprattutto per elementi strutturali con funzione di impalcato calpestabile è proprio quella di avere, all'interno dell'elemento stratificato, delle lastre in vetro temprato, ma almeno una componente in vetro non temprato o comunque temprato parzialmente, in modo che si abbia un'elevata resistenza in fase di esercizio ma si conservi comunque una certa capacità portante anche a seguito alla rottura di tutte le lastre di vetro (L. Blandini, 2006, Tab. 2.1).



**Fig. 2.3** Deformazione post-rottura (in termini di freccia) del vetro stratificato con lastre temperate (a sinistra) e con lastre di vetro indurito (a destra).

Fonte: [5].

Tipo di vetro	Natura dei componenti	Elemento orizzontale
Stratificato (almeno tre strati - si deve prevedere la rottura di almeno un elemento)	Temperato/Temperato/Temperato	SI (se è il sistema di fissaggio è perimetrale)
	Temperato/Indurito/Temperato Indurito/Temperato/Indurito <sup>(1)</sup>	SI
	Indurito/Indurito/Indurito Ricotto/Ricotto/Ricotto <sup>(2)</sup>	NO
<sup>(1)</sup> Questa combinazione è possibile, ma appare meno conveniente della precedente Temperato/Indurito/Temperato. Infatti, conviene in genere mantenere in superficie il materiale più resistente all'abrasione, nonché più resistente alle tensioni di flessione (temperato), mentre è opportuno mantenere prossimo all'asse neutro quello meno resistente (Indurito), ma che in caso di rottura rimane più compatto, in quanto si frammenta in pezzi più grandi. <sup>(2)</sup> Questa combinazione non è consigliata anche per la scarsa resistenza all'abrasione superficiale del vetro ricotto.		

**Tab. 2.1** Esempio applicativo: tipologia di vetro strutturale per impalcati calpestabili.

Fonte: CNR-DT 210:2013.

Dopo aver analizzato le caratteristiche del vetro stratificato conferite dalla tipologia di vetro si passa ad analizzare quelle dipendenti dalla tipologia di materiale plastico di interstrato. I differenti tipi di intercalare sono caratterizzati dal diverso materiale impiegato: vengono in questa parte elencati i più comunemente utilizzati e vengono descritte le proprietà che essi sono in grado di fornire.

### POLIVINILBUTARRILE (PVB)

Esso è costituito da una membrana plastica di spessore normalmente pari a 0,83 mm, la quale viene incollata a caldo sulla superficie del vetro attraverso la produzione del vetro stratificato (descritta precedentemente). Preso separatamente, il PVB è caratterizzato da una resistenza alla trazione dell'ordine di 20 MPa ed una dilatazione ultima del 40% circa, per cui è in grado di sopportare grandi allungamenti prima di giungere a rottura (E. Tonella, 2010). Ovviamente, la resistenza del vetro stratificato risulterà più o meno elevata in base al numero di strati di PVB utilizzati nella laminazione. Oltre a conferire alla piastra multistrato un'eccellente resistenza agli urti,

l'inserimento di PVB, come anche di altri materiali di interstrato, comporta notevoli vantaggi, tra cui il controllo solare e l'isolamento termico e acustico.

Vengono riportate le principali caratteristiche meccaniche del PVB:

<b>Proprietà PVB</b>	
Modulo elastico	2.1 MPa
Resistenza a trazione	21 MPa
Coefficiente di Poisson	0.49
Densità	1060 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente di espansione termica	8·10 <sup>-5</sup>

**Tab. 2.2** Caratteristiche meccaniche del PVB.

Fonte: [14].

Tuttavia, il vetro stratificato con PVB presenta, più di vetri in cui vengono impiegati altri intercalari, una certa debolezza all'umidità relativa dell'ambiente. Infatti, le caratteristiche meccaniche che ne risultano dipendono sostanzialmente dal grado di adesione tra questo materiale plastico e il vetro, il quale è più o meno elevato in base al contenuto di umidità del polimero stesso, influenzato a sua volta dall'umidità relativa dell'ambiente con cui si trova a contatto. Infatti, all'aumentare di quest'ultima l'adesione del PVB al vetro diminuisce e questo concorre a incrementare il rischio di delaminazione della piastra stratificata, ovvero uno sfaldamento degli strati. Avere una perdita di adesione tra gli strati si traduce nella possibilità che i frammenti del vetro, in seguito alla rottura, vengano meno trattenuti, compromettendo la sicurezza e la resistenza agli urti.

Va precisato, inoltre, che i vetri stratificati risentono notevolmente degli effetti del tempo in quanto il PVB, essendo un materiale termoplastico, tende a perdere le sue proprietà a causa dei danni prodotti dai raggi ultravioletti e da cicli di riscaldamento e raffreddamento a cui è sottoposto durante la sua fase di esercizio.

### SENTRY GLAS PLUS (SGP)

Altro materiale ormai spesso utilizzato come intercalare è il Sentry Glas Plus, sviluppato dall'azienda *DuPont*<sup>®</sup>. Tale materiale plastico è compatibile con molti materiali da costruzione differenti dal punto di vista dell'adesione, oltre ad avere delle caratteristiche tali da permettergli una grande resistenza agli impatti di forte entità e anche alle esplosioni. Tale proprietà deriva soprattutto dalla sua elevata resistenza a trazione, maggiore di quella del PVB, e al collasso in fase di post-rottura, la quale fa del SGP un ottimo materiale per le applicazioni in solai, scale e facciate sospese, nelle quali si registrano grandi carichi di esercizio. Come effetto del suo elevato modulo elastico, inoltre, tale materiale ha un comportamento estremamente rigido: questo permette al vetro stratificato di comportarsi molto più monoliticamente. Oltre alle differenti capacità meccaniche dei

due materiali, il SGP si distingue dal PVB anche per le modalità di fornitura. Mentre quest'ultimo viene fornito in fogli precedentemente tagliati, l'intercalare prodotto da *DuPont*<sup>®</sup> è fornito in rotoli e presenta uno spessore che può essere di 1,52 mm oppure di 2,28 mm.

Anche in questo caso vengono riportate le caratteristiche meccaniche del prodotto:

<b>Proprietà SGP</b>	
Modulo elastico	300 MPa
Resistenza a trazione	34.5 MPa
Coefficiente di Poisson	0.49
Densità	950 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente di espansione termica	10-15·10 <sup>-5</sup>

**Tab. 2.3** Caratteristiche meccaniche del SGP.

Fonte: [14].

### PELLICOLE DI ETILENE VINIL - ACETATO (EVA)

Si tratta di film realizzati con un materiale termoindurente, la cui composizione chimica è costituita da molecole legate da fortissime connessioni tridimensionali. Grazie a questa loro microstruttura, le pellicole EVA riescono a garantire un buon livello di protezione dalle condizioni di esposizione nei confronti della piastra stratificata che sono chiamate a comporre, assicurando pur sempre un'elevata trasparenza. Infatti, alcune loro grandi qualità sono l'elevata resistenza all'umidità, l'ottimo isolamento acustico (maggiori rispetto al PVB), l'eccellente resistenza al calore, ai raggi UV e l'idrofobia. L'impiego di tali pellicole in applicazioni strutturali risulta molto vantaggioso a causa dell'alto grado di adesione che esse hanno nei confronti di tutte le tipologie delle lastre di vetro, nonché di molti altri materiali da inserto nella laminazione (come tessuti, legno e altro), le cui compatibilità rendono il materiale stratificato molto resistente e stabile, anche in modo duraturo e sotto severe condizioni esterne.

### RESINE GETTATE IN OPERA (CIP)

Esse vengono impiegate quando le piastre stratificate sono realizzate a partire da lastre di vetro con superfici non uniformi (ad esempio le lastre di vetro stampate, che presentano in superficie geometrie irregolari date dal motivo stampato), sulle quali non è facile attuare laminazioni con fogli plastici come PVB o SGP. Il processo di laminazione prevede che la resina venga versata in opera ("*cast in place*" - CIP) tra due lastre di vetro, che devono essere preposte ad una determinata distanza (prevista ovviamente dal progetto), in modo da riempire completamente lo spazio tra le due. Successivamente a tale operazione, la resina viene fatta polimerizzare in modo che assuma una struttura solida elasto-plastica, in grado di assorbire l'energia legata all'applicazione dei carichi in fase di esercizio, anche se in maniera qualitativamente peggiore rispetto al PVB.

L'adesione al vetro di questa tipologia di intercalare risulta abbastanza buona, ma uno svantaggio che esso introduce nel vetro laminato è quello di non avere uno spessore uniforme dell'intera piastra, con conseguente difficoltà in applicazione architettonica.

Indifferentemente dalla tipologia di intercalare impiegata, la loro azione nella stabilità del vetro stratificato è strettamente correlata alla durata dei carichi agenti e alla temperatura. Soffermandosi sulla risposta alle sollecitazioni d'urto, questa può essere di due tipologie: da corpo duro e da corpo molle; l'elemento multistrato risponderà in maniera differente per effetto della differente reazione che avrà l'intercalare. Nel caso di impatto da corpo duro, il tempo di applicazione del carico risulta molto breve – nell'ordine di  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  secondi – per cui il foglio plastico di interstrato non ha il tempo di adattare le sue deformazioni (per rilassamento) dovute al carico. Di conseguenza, in queste condizioni l'intercalare assume un comportamento rigido e perciò avrà meno capacità di assorbire l'energia di impatto, provocando, talvolta la rottura della piastra multistrato.

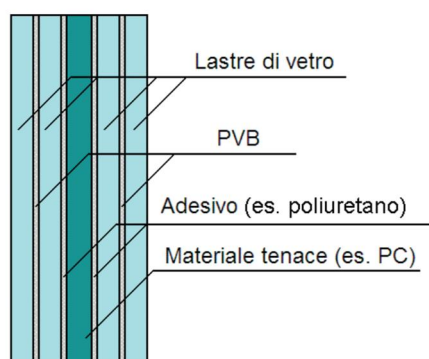
Al contrario, se l'impatto avviene da corpo molle, il tempo di applicazione del carico risulterà più prolungato – nell'ordine di  $10^{-2}$  secondi – con l'effetto di un rilassamento del foglio plastico, che in questo caso è in grado di adattare le proprie deformazioni per effetto dell'assorbimento dell'energia di impatto. Il suo comportamento sarà quindi elasto-plastico con notevoli deformazioni prima della rottura, che solitamente non si verifica (E. Tonella, 2010).

Analizzando invece la dipendenza dalla temperatura, il materiale plastico risulta meno rigido alle temperature dell'ordine di 10 – 20 °C, mentre avrà comportamento molto più rigido per temperature più basse (prossime allo zero).

Per contrastare gli effetti negativi della bassa resistenza a trazione del vetro, che lo rende estremamente fragile, oltre all'applicazione dei trattamenti termici è possibile anche integrare all'elemento stratificato altri materiali ad elevata resistenza a trazione, principalmente metalli o materiali fibrocompositi. Grazie all'impiego di tali materiali, si riescono ad ottenere elementi compositi in vetro in grado di resistere a tutte le sollecitazioni che determinano sforzi di trazione (come la flessione), purché sia garantita la piena adesione tra il vetro e i materiali di rinforzo. L'applicazione in cui maggiormente viene impiegato un rinforzo strutturale del vetro stratificato risulta essere quella delle travi, che grazie ad esso riescono a comportarsi in modo simile a quanto accade per le travi in calcestruzzo armato. Nel caso di rinforzo con materiali metallici, è previsto l'impiego di barre a sezione generalmente rettangolare, che vengono incollate alle lastre di vetro mediante collanti acrilici (E. Cagnacci et. al., 2016). Per quanto riguarda il rinforzo attuato da materiali fibrocompositi, questi possono essere molteplici: utilizzate maggiormente risultano essere sicuramente le fibre di carbonio (C – FRP), impiegate in lamine che vengono incollate alla

superficie del vetro con adesivi epossidici o in barre solitamente circolari, le quali possono anche essere pretese in modo che, una volta composto l'elemento stratificato, questo risulti precompresso; altra tipologia applicativa può essere quella di travi in vetro armate con polimeri rinforzati con fibre di vetro o policarbonato (PC). È buona norma posizionare gli elementi di rinforzo lungo i bordi dei lati lunghi della piastra in vetro, in modo che la trasparenza non venga compromessa completamente.

La soluzione con rinforzi di materiali fibrocompositi può essere adottata, inoltre, mediante lastre che vengono interposte fra gli strati di vetro e di intercalare, in modo che tutta la superficie della piastra stratificata abbia una certa capacità resistente: tale tecnologia è principalmente impiegata nel caso di pannelli sottoposti a grandi sollecitazioni di flessione, come scale o passerelle (Fig. 2.4).



**Fig. 2.4** Esempio di stratigrafia di vetri laminati con lastre di materiali fibrocompositi.

Fonte: [5].

Il materiale di rinforzo, dunque, permette all'elemento in vetro stratificato di acquisire globalmente una duttilità, che individualmente non avrebbe, in modo da fornirgli una capacità portante anche dopo frattura. Va però precisato che tale tecnologia possiede dei limiti, quali la sensibilità alle alte temperature, all'attacco da agenti atmosferici e irraggiamento solare, che rappresentano un rischio per la delaminazione dei vari strati funzionali; per non parlare dell'incompatibilità adesiva che talvolta alcuni materiali presentano. Una soluzione a questo problema, ad esempio, potrebbe essere l'impiego del SGP o di pellicole EVA come materiali da intercalare che, come detto precedentemente, sono dotati di ottime capacità di adesione con molte tipologie di materiali differenti.

### 2.3 Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche del vetro stratificato con utilizzo strutturale sono chiaramente correlate strettamente a quelle dei singoli vetri che lo compongono. Includendo tutte le possibili tipologie dei vetri costituenti, ne vengono brevemente elencate e discusse le principali:

- DENSITA' ( $\rho$ ): il vetro ha una densità media di  $2,5 \frac{g}{cm^3}$ , comparabile a quella del calcestruzzo (di  $2,4 \frac{g}{cm^3}$ ) ed essa è leggermente variabile a seconda della composizione e del trattamento termico a cui è stato sottoposto;
- RESISTENZA ALLA TRAZIONE: essa può variare indicativamente da 20 a 200 MPa, a seconda dell'influenza di molti fattori, come lo stato di usura della superficie, la durata dei carichi applicati (di cui si parlerà in seguito) e i trattamenti termici e chimici subiti (E. Cagnacci et. al., 2016). In particolare, ai sensi del CNR-DT 210:2013, per la progettazione del normale vetro float la resistenza a trazione caratteristica che va considerata è pari a 45 MPa; attraverso un trattamento di indurimento tale valore può essere incrementato del doppio circa, fino a 70 MPa come valore di progetto; applicando un trattamento di tempra si raggiungono invece valori ben superiori, ma ai fini progettuali va considerata una resistenza di 120 MPa per i vetri temprati termicamente e di 150 MPa per quelli temprati chimicamente;
- RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE: il vetro presenta un'elevatissima resistenza a compressione, che varia dai 900 ai 1000 Mpa, anche se questi valori si raggiungono raramente nelle condizioni di esercizio, a cui il vetro è normalmente sottoposto;
- MODULO DI YOUNG (E): esso esprime la relazione lineare tra la tensione interna del materiale dovuta all'applicazione del carico e la sua deformazione conseguente. Per il vetro assume un valore che si aggira intorno ai 70 GPa;
- COEFFICIENTE DI POISSON ( $\nu$ ): esso è sostanzialmente il rapporto tra la contrazione trasversale di un materiale dovuta ad una dilatazione longitudinale impressa e la dilatazione longitudinale stessa, e per il vetro utilizzato in edilizia il valore di tale coefficiente è pari a 0,22;



- COEFFICIENTE DI DILATAZIONE TERMICA LINEARE ( $\alpha$ ): esso esprime la dilatazione di natura termica dell'unità di lunghezza di un materiale per una variazione di temperatura di 1 °C. Per il vetro tale coefficiente varia da 7,7 a  $8,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , ad esempio minore di quello dell'acciaio, che di conseguenza sarà più deformabile sotto l'effetto di un gradiente termico.

Per fornire un termine di paragone vengono riportate le proprietà meccaniche dell'acciaio da costruzione a confronto con quelle del vetro (alcune delle quali appena esposte).

Caratteristica	Vetro	Acciaio
Densità (kg/m <sup>3</sup> )	2.500	7.850
Resistenza a trazione (N/mm <sup>2</sup> )	20 ÷ 200	360 ÷ 1.900
Resistenza a compressione (N/mm <sup>2</sup> )	900 ÷ 1.000	360 ÷ 1.900
Modulo di Young (N/mm <sup>2</sup> )	68.000 ÷ 74.000	210.000
Coeff. di Poisson	0,22	0,30
Durezza (scala Mohs)	6	5,5 ÷ 7,5
Tenacità alla frattura <sup>1</sup> (N·m <sup>1/2</sup> /mm <sup>2</sup> )	0,75	40 ÷ 140
Coeff. di dilatazione termica lineare (°C <sup>-1</sup> )	7,7 ÷ 8,8×10 <sup>-6</sup>	1,2×10 <sup>-5</sup>

<sup>1</sup> La tenacità alla frattura rappresenta la capacità dei materiali di opporsi alla propagazione delle fratture. Questa grandezza è misurabile mediante prove di laboratorio standardizzate.

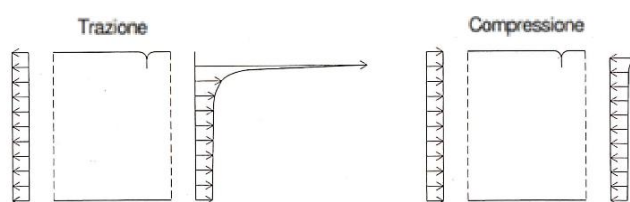
**Tab. 2.4** Principali caratteristiche del vetro comune.  
Fonte: GÜSGEN, 1998.

Da come si riesce ad apprendere grazie alla Tabella 2.4 il vetro presenta una scarsissima tenacità alla frattura, quindi di fatto un'elevatissima fragilità, che è facilmente riscontrabile leggendo anche il legame costitutivo sforzo - deformazione (Fig. 2.5): da questo si deduce che il vetro è un materiale perfettamente elastico lineare, che non è in grado di ridistribuire plasticamente le tensioni e arriva a rottura improvvisamente una volta raggiunto il carico limite del suo campo elastico. Il vetro da solo, dunque, non è in grado di subire grandi deformazioni prima di arrivare a rottura, caratteristica che invece gli viene fornita dalla laminazione per la produzione del vetro stratificato, sempre che si consideri globalmente l'elemento stratificato stesso.

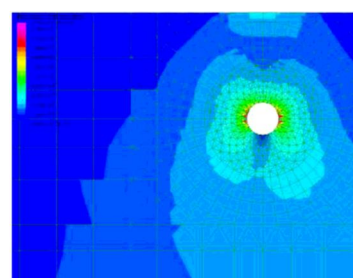
**Fig. 2.5** Confronto qualitativo dei legami costitutivi di vetro e acciaio (fuori scala).  
Fonte: [5], [12].



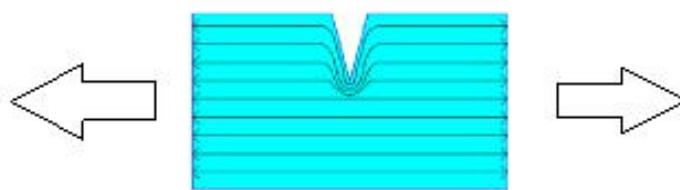
L'elevata fragilità che si osserva rende il vetro estremamente sensibile nei confronti delle imperfezioni, nelle quali si verificano delle concentrazioni di tensione responsabili della rottura, che appunto si innesca proprio in corrispondenza di tali imperfezioni quando viene raggiunto il valore di sforzo critico (Fig. 2.6, 2.7). Tali concentrazioni di tensione si generano come effetto della distribuzione delle direzioni di azione delle tensioni in presenza di un'imperfezione. Per esporre in dettaglio questa situazione è utile dire che in presenza di un difetto superficiale, le direzioni di azione delle tensioni, che normalmente sarebbero tutte parallele e in direzione della forza di trazione impressa, vengono deviate in modo che circondino il bordo della frattura, avvicinandosi le une alle altre, quindi generando una localizzazione delle tensioni (Fig. 2.8), che non vengono ridistribuite attraverso una riorganizzazione della struttura reticolare, come avviene per altri materiali, come l'acciaio. In assenza di tali imperfezioni, il vetro avrebbe una resistenza a trazione (teorica) molto elevata, che può raggiungere anche i 32 GPa (E. Tonella, 2010). Nei processi di produzione del vetro industriale, tuttavia, risulta inevitabile la formazione di difetti superficiali, i quali, in caso di sollecitazione a trazione, sono i punti più deboli per la resistenza del materiale. Questo meccanismo non si verifica nel caso di sollecitazione a compressione, per la quale le imperfezioni non giocano un ruolo di debolezza, garantendo al vetro una resistenza alla compressione molto maggiore rispetto a quella a trazione. Anche se quest'ultima può essere incrementata da processi di post-produzione, analizzati in precedenza, comunque essi non sono in grado di ovviare alla presenza di difetti, quanto più di "chiuderli" attraverso uno stato di compressione che li possa proteggere dall'applicazione di trazioni. La loro dimensione, quindi la debolezza a trazione, varia in dipendenza di molti fattori: in particolare, essa aumenta col tempo, al crescere dei carichi a cui è soggetto il vetro e in funzione delle condizioni climatiche esterne (E. Tonella, 2010).



**Fig. 2.6** Distribuzione delle tensioni in presenza di fratture (difetti) nel caso a trazione e compressione. Si noti la concentrazione delle tensioni di trazione nel picco in corrispondenza della frattura superficiale, che non si verifica per la compressione. Fonte: [14].



**Fig. 2.7** Esempio di elaborazione FEM per la caratterizzazione dello stato tensionale nell'intorno di un foro (l'intensità maggiore si ha con il colore verde nell'immagine). Fonte: [13].



**Fig. 2.8** Andamento qualitativo delle direzioni di azione della tensione in una lastra uniformemente sollecitata a trazione e contenete una microfrattura.  
Fonte: [13].

In ragione di quanto affermato, gli elementi strutturali in vetro si dovrebbero progettare e sono effettivamente progettati per sollecitazioni di carico a compressione, a meno di alcuni elementi in cui la sollecitazione principale è quella flettente (come passerelle, scale, balaustre).

Analizzando quindi, la resistenza a flessione del vetro, essa è sostanzialmente conseguente alla sua resistenza alla trazione. Infatti, sollecitando un qualsiasi corpo a momento flettente, se tale momento è convenzionalmente positivo, il corpo verificherà una dilatazione delle fibre sul bordo inferiore (all'intradosso), mentre in corrispondenza del bordo superiore (all'estradosso) si instaurerà una compressione delle fibre. Nel caso in cui il momento flettente sia convenzionalmente negativo, al contrario, le fibre dilatate saranno quelle superiori, mentre quelle inferiori saranno compresse. In ogni caso, sotto sollecitazione unicamente a flessione una parte della sezione sarà sottoposta a trazione. Tenendo a mente la scarsa resistenza a trazione del vetro, in contrasto con quella a compressione, essa pregiudicherà la resistenza globale dell'elemento posto in flessione; di fatto si comprende, quindi, che la resistenza a flessione del vetro coincide con quella a trazione.

In conseguenza di ciò, si vuole descrivere quali siano i fattori che influenzano tale resistenza.

- Condizione della superficie: Le difettosità che si instaurano sulla superficie della lastra di vetro, a causa di lavorazioni di finitura della superficie stessa o della presenza di sollecitazioni residue, pregiudicano in modo significativo, come già detto, la sua resistenza a trazione, quindi quella a flessione. Al contrario, la protezione delle lastre da eventuali danneggiamenti permette di impedire questa riduzione della resistenza del vetro;
- Durata e frequenza dei carichi: La frequenza e durata dei carichi può contribuire all'innescò e alla propagazione, anche istantanea, delle cricche superficiali, anche se tali carichi non raggiungono il livello critico di resistenza a trazione del materiale. Per carichi di media durata, la resistenza viene diminuita del 40% circa, mentre per carichi di lunga durata, essa viene ridotta di circa 3 o 4 volte, sempre al crescere della durata dei carichi fino a considerare carichi permanenti, i quali sono quindi fortemente penalizzanti (S. Tattoni et. al., 2007);

- Porzione di superficie caricata e spessore delle lastre: Maggiore è la superficie caricata o lo spessore della lastra, ragionevolmente e statisticamente essa avrà maggiori probabilità di contenere difetti, verificando una resistenza minore, per quanto detto al primo punto. A titolo esemplificativo, vengono riportati valori sperimentali relativi alla resistenza a trazione di lastre float al variare dello spessore  $t$  della lastra, per carichi di breve durata (come il vento).

$t=6$ mm	$t=8$ mm	$t=10$ mm
41 MPa	34.5 MPa	28 MPa

**Tab. 2.5** Tensioni ammissibili a trazione del vetro in funzione dello spessore delle lastre, non amplificate da coefficienti parziali.

Fonte: [13].

- Umidità relativa nell'ambiente circostante: Anch'essa, come la durata e la frequenza dei carichi, contribuisce allo sviluppo delle microfessure, quindi alla diminuzione di resistenza a trazione; per non rappresentare una causa rilevante, l'umidità dell'aria si dovrebbe mantenere quanto più possibile entro il 30 e il 70%.
- Azione dell'acqua: l'acqua rappresenta un fattore di perdita di resistenza del vetro, la quale, avendo su di esso un'azione corrosiva ciclica, lo porta con il passare del tempo a sopportare meno i carichi che normalmente agiscono su esso; talvolta tale meccanismo porta a rottura, anche se i carichi agenti, per cui è stato progettato il vetro, non raggiungevano inizialmente il valore critico di rottura. Tale fenomeno è detto "fatica statica" (E. Cagnacci et. al., 2016);
- Effetto della temperatura: allo stesso modo dell'umidità relativa, anche la temperatura rappresenta un parametro ambientale che pregiudica la resistenza a flessione del vetro, anche se la sua influenza non è significativa nelle normali condizioni a cui esso è sottoposto.

Attraverso l'integrazione di materiali plastici usati come intercalari a costituire una lastra multistrato, il vetro acquisisce globalmente un comportamento meccanico migliore, in funzione delle caratteristiche dell'intercalare stesso. Infatti, la resistenza a flessione dell'elemento stratificato è fortemente influenzata dal grado di rigidità del materiale plastico.

Si consideri, ad esempio, una piastra composta da due lastre di vetro di uguale spessore, nella quale viene internamente posto uno strato di materiale plastico di interstrato. Quest'ultimo giacerà esattamente lungo l'asse di simmetria delle due lastre. In caso di sollecitazione a flessione le tensioni normali che si sviluppano nella sezione risulteranno nulle in corrispondenza dell'asse neutro e la loro distribuzione interna avrà andamento tipico "a farfalla", ma risulterà differente in base alle caratteristiche di rigidità dello strato di intercalare, che in risposta alla flessione

collabora trasmettendo gli sforzi di taglio da una lastra all'altra. La rigidità dello strato di intercalare dipende, oltre che dalla sua microstruttura, anche dalla temperatura alla quale è sottoposto (in maniera inversamente proporzionale) e dalla durata di applicazione del carico (come detto precedentemente) ed è rappresentata dal modulo elastico tangenziale (G).

Nel caso in cui l'intercalare sia infinitamente rigido (G molto elevato), esso è in grado di trasmettere gli sforzi di taglio integralmente, conferendo all'elemento stratificato un comportamento praticamente monolitico, in cui vetro e intercalare si deformano come se fossero un corpo solo. In questo caso la distribuzione delle tensioni normali dovute alla flessione risulta essere quella classica "a farfalla" e la freccia sarà ridotta (Fig. 2.9). Da indagini sperimentali condotte da S. Tattoni et. al. nel 2007, si è osservato che la tensione massima agente su un elemento stratificato di luce pari a l e costituito da due lastre di vetro, con spessori rispettivi pari a  $t_1$  e  $t_2$ , sollecitato da un carico distribuito q è data da:

$$\sigma = 0,75 \cdot q \cdot \left(\frac{l}{t}\right)^2 \quad [N/mm^2] \quad [3]$$

dove  $t = 2 t_1 = 2 t_2$ ;

nel caso in cui, invece, l'intercalare abbia una rigidità quasi nulla (G molto ridotto), esso avrà incapacità di trasmettere gli sforzi di taglio da uno strato di vetro all'altro e servirà solamente a mantenere aderenti gli strati. Di conseguenza, l'elemento stratificato si comporterà come se le lastre di vetro componenti siano due strati indipendenti, che si deformano separatamente e la distribuzione delle tensioni risulterà avere un andamento composto da due "farfalle", ciascuna relativa ad una lastra (Fig. 2.10). Inoltre, la freccia risulterà più ampia rispetto a quella che si verifica nel caso precedente. Infatti, la tensione massima agente sull'elemento stratificato risulterà maggiore rispetto a quella che si verifica in caso di piena rigidità dell'intercalare, e pari a:

$$\sigma = 1,5 \cdot q \cdot \left(\frac{l}{t}\right)^2 \quad [N/mm^2] \quad [4]$$

Tale differenza è dovuta ad una più scarsa capacità di collaborazione degli strati costituenti lo stratificato, che non permette in questo caso di distribuire in maniera omogenea gli sforzi, ma al contrario, convogliarli in maniera concentrata e identica su entrambe le lastre.

La situazione reale, che si ha con qualsiasi tipo di intercalare, risulta essere intermedia fra le due precedenti, con una distribuzione delle tensioni rappresentata dalla media fra quelle di questi due casi (Fig. 2.11). Per rappresentare il caso reale, ai fini del progetto si determina uno spessore equivalente della piastra, il cui calcolo è esplicitato nel documento CNR-DT 210 [2012]; esso è

definito come lo spessore di una lastra monolitica che presenta la stessa distribuzione delle tensioni e la stessa deformazione della piastra stratificata reale (E. Cagnacci et. al. 2016).



**Fig. 2.9** Distribuzione delle tensioni nel caso “monolitico”;



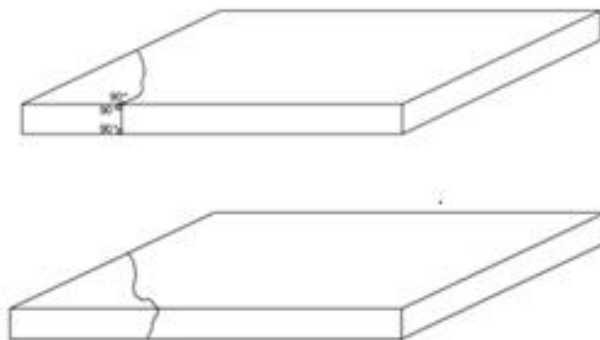
**Fig. 2.10** Distribuzione delle tensioni nel caso “a strati indipendenti”;



**Fig. 2.11** Distribuzione delle tensioni nella situazione reale.

Oltre a pregiudicare la resistenza a flessione, la trazione del vetro ha affetti anche riguardanti lo shock termico. La resistenza allo shock termico è la capacità del materiale di sopportare lo stato di sollecitazione generato da una differenza di temperatura instaurata tra due facce opposte. Nel caso del vetro, essa è appunto governata dalla resistenza alla sollecitazione di trazione che si produce nelle facce in cui il materiale subisce un raffreddamento o un riscaldamento minore. In presenza di un gradiente termico, infatti, la faccia del vetro a maggior temperatura tende ad espandersi mentre quella a temperatura minore tende a comprimersi (se raffreddata) o a espandersi meno dell'altra (se comunque riscaldata ma ad una temperatura minore). La differenza di deformazione legata al gradiente termico fa sì che una porzione di materiale “tiri” maggiormente l'altra per effetto della sua maggior dilatazione, generando una sollecitazione di trazione nella zona più fredda, che se raggiunge il valore critico, conduce a rottura del vetro. La tipica rottura da shock termico del vetro si riconosce dalla linea di fessurazione, la quale è ortogonale ai bordi della lastra e si propaga a partire proprio da essi (Fig. 2.12). La resistenza allo shock termico risulta diversa in base all'impiego delle differenti tipologie di vetri. In particolare, i trattamenti termici di indurimento e tempra conducono il materiale a sopportare range di temperatura più ampi rispetto al vetro

normalmente ricotto. Da evidenze sperimentali risulta, infatti, che per il vetro temprato tale intervallo ha ampiezza è dell'ordine di 150 – 200 °C, per il vetro indurito risulta di circa 100 °C, mentre quello semplicemente ricotto riesce a sopportare uno sbalzo di 40 °C circa (E. Tonella, 2010; Schittich et. al., 1999).



**Fig. 2.12** Tipica rottura da shock termico del vetro (in alto) e rottura non dovuta allo shock termico (in basso).  
Fonte: [14].

## 2.4 *Progettazione in vetro strutturale*

Questa parte dell'elaborato è volta a chiarire quali sono le linee guida di base per la progettazione di strutture in vetro stratificato, rimandando ai principali riferimenti normativi e ai principi cardine della progettazione.

Il quadro normativo è rappresentato principalmente da 4 fonti:

- Norme Tecniche per le Costruzioni, Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008 (NTC 2008): definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali. Esse trattano quindi gli aspetti attinenti alla sicurezza strutturale delle opere di costruzione, nei confronti degli Stati Limite Ultimi (SLU), Stati Limite di Esercizio (SLE) e robustezza nei confronti di azioni eccezionali;
- CNR-DT 210:2013: “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro*”, riconosciuto come documento di riferimento per la progettazione strutturale del vetro. In esso viene riportata la caratterizzazione delle proprietà meccaniche del vetro strutturale correlate alla tipologia delle lastre di vetro impiegate e al materiale di intercalare, le azioni da considerare per il

progetto delle costruzioni specificatamente in vetro e i calcoli da effettuare per la resistenza dei materiali, applicando una calibrazione dei coefficienti riduttivi delle resistenze di progetto. Vengono inoltre fornite le linee guida per la progettazione comprendenti i principi di base ed esempi pratici includendo calcoli eseguiti nei confronti degli impieghi più ricorrenti;

- UNI 7697:2015: “*Criteri di sicurezza nelle applicazioni vetrarie*” fornisce i criteri di scelta dei vetri impiegati nelle costruzioni, in modo che, nella destinazione di impiego prevista dal progetto, sia assicurato l’adempimento alle richieste prestazionali e il soddisfacimento dei requisiti minimi necessari per la sicurezza.;
- UNI EN 14449:2005: la norma è un riferimento per la valutazione della conformità del vetro stratificato e del vetro stratificato di sicurezza;

Oltre a questa importante base per la progettazione in vetro strutturale, vengono citati altri riferimenti:

- UNI EN ISO 12543:2022: definisce i termini e descrive le parti componenti del vetro stratificato di sicurezza per utilizzo in edilizia;
- prEN 16613:2019: “*Vetro per edilizia – Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza – Determinazione delle proprietà meccaniche dell’intercalare*”
- UNI EN 14019:2004: definisce i requisiti prestazionali delle facciate vetrate continue sottoposte a condizioni di carico dovute all’urto di un corpo molle e pesante. Essa viene revisionata e sostituita dalla versione del 2016;
- UNI TR 11463:2012: in essa viene esplicitata la determinazione della capacità portante di lastre di vetro piano applicate come elementi di tamponamento e le relative procedure di calcolo;
- prEN 12488: Definisce le raccomandazioni per la messa in opera e i principi di posa di vetrate verticali e inclinate;



La progettazione di elementi in vetro strutturale richiede particolare attenzione per il soddisfacimento dei requisiti di resistenza, di esercizio e di durabilità, a causa delle problematiche legate alla sua fragilità intrinseca, che obbliga i progettisti a seguire scrupolosamente determinati principi di progettazione:

- concetto di Gerarchia strutturale: nella progettazione vengono assegnati indici di importanza ai diversi elementi strutturali in vetro dell'opera in funzione delle conseguenze in termini di perdite sia materiali che umane derivanti dal loro collasso.

In quest'ottica gli elementi strutturali vengono inquadrati in classi di conseguenze (ai sensi della EN 1990), quali:

<b>Classi di Conseguenze</b>	<b>Descrizione</b>
<b>CC0</b>	Elementi specificatamente non strutturali. A seguito della loro crisi, si prevedono conseguenze molto limitate in termini economici, sociali, ambientali e perdita di vite umane.
<b>CC1</b>	A seguito di crisi si hanno basse conseguenze per perdita di vite umane e conseguenze modeste o trascurabili in termini economici, sociali o ambientali. Fanno parte di questa categoria edifici dove le persone sono presenti solo occasionalmente e, per estensione, quegli elementi di vetro la cui crisi strutturale comporta scarse conseguenze.
<b>CC2</b>	A seguito della crisi, conseguenze medie per perdita di vite umane e conseguenze considerevoli in termini economici, sociali o ambientali. Esempi di strutture ricadenti in questa classe sono edifici residenziali e ad uso uffici. Per estensione, tutti quegli elementi strutturali la cui crisi comporta conseguenze di livello medio.
<b>CC3</b>	Conseguenze alte per la perdita di vite umane, conseguenze importanti in termini economici, sociali o ambientali. Ricadono in questa categoria, ad esempio, le strutture di edifici pubblici, palchi e tribune coperte, dove le conseguenze della crisi possono essere elevate (sale da concerto, centri commerciali con grande affollamento etc.). Per estensione, tutti quegli elementi strutturali di vetro la cui crisi comporta conseguenze di livello elevato.

**Tab. 2.6** Classi di conseguenze degli elementi costruttivi. Fonte: EN 1990.

Attraverso il concetto di gerarchia strutturale, viene stabilita una funzione per ciascuno degli elementi che compongono la struttura, fissandone un ordine gerarchico di importanza, in modo tale da individuare quegli elementi che si possono ritenere secondari per la funzione strutturale, quindi “sacrificabili” nell’eventualità di una rottura inevitabile. Gli elementi considerati come primari, ovvero composti dalla somma di quelle parti che vengono coinvolte nella trasmissione di tutte le forze che agiscono su un edificio incluso il peso proprio (Schittich et. al., 1999), devono invece essere sempre ben protetti e

funzionanti, ed anzi in numero maggiore rispetto a quello strettamente necessario, in quanto il cedimento della struttura portante primaria è correlabile appunto a gravi conseguenze, come il collasso dell'intero edificio (il che conduce al secondo principio di progettazione).

L'inquadramento gerarchico di ogni elemento della struttura deve essere necessariamente individuato sia per il progetto e la verifica nella fase pre-rottura, sia nel post-rottura. Infatti, un elemento che incorre nel collasso, qualunque sia la classe di conseguenze a cui appartiene nella fase pre-rottura, può subire un declassamento dovuto alla sua reale capacità resistente residua. La classificazione degli elementi nella verifica a pre/post-rottura viene esplicitata nel CNR-DT 210:2013:

Tipo	Classe per verifica pre-rottura*	Classe per verifica post-rottura
Elementi verticali** vincolati in modo continuo sui bordi	1	1/NV***
Elementi verticali** con vincoli puntuali	2/1	1/NV***
Coperture orizzontali**	2	2/1
Parapetti con pericolo di caduta	2	2/1
Pinne (o coste) di rinforzo	2	2/1
Solai, travi portanti	2	2
Pilastri	3 (studi specifici con metodi di livello II o livello III)	2 (con le azioni della pre-rottura)
<p>Note:</p> <p>(*) All'interno della stessa categoria, la scelta della classe di verifica più o meno restrittiva dipende dall'importanza dell'opera, dalla pericolosità in caso di collasso del vetro, e del fatto che siano previste/prevedibili contromisure immediate di salvaguardia che riducano le conseguenze del collasso (puntellature, protezioni, recinzioni).</p> <p>(**) Un elemento è considerato verticale se l'angolo che il suo piano forma con la verticale è minore di 15°. Un elemento che non ricade in questa definizione è considerato orizzontale.</p> <p>(***) La sigla NV indica "Nessuna Verifica". Quando la rottura del vetro presenta rischi trascurabili per danni e perdite di vite umane, la verifica post-rottura può essere omessa.</p>		

**Tab. 2.7** Classificazione degli elementi strutturali in vetro a seconda delle condizioni di impiego. Prodotti da costruzione non strutturali ricadono per definizione in classe 0 (CC0).

Fonte: CNR-DT 210:2013.

Nella progettazione di strutture in vetro risulta quindi di fondamentale importanza il contributo della statistica, che permette di individuare con quale probabilità si possano rompere gli elementi ed effettuare la verifica escludendo quelli con maggior probabilità di rottura nelle zone più sollecitate. Un errore di valutazione o l'ambiguità nella definizione dei ruoli degli elementi, potrebbe portare con facilità a comportamenti imprevisti ed inficiare così sulla capacità portante della struttura (L. Blandini et al., 2006).

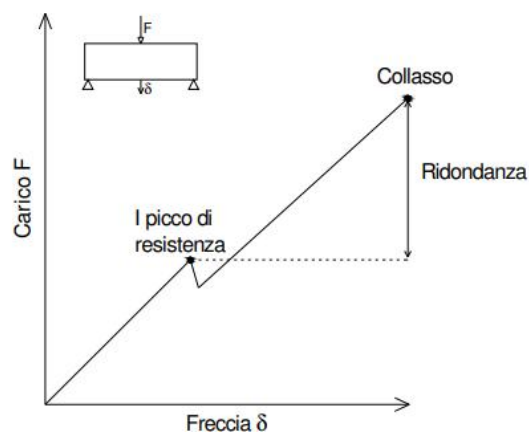
- concetto di Ridondanza strutturale: capacità della struttura di ridistribuire al suo interno i percorsi dei carichi agenti, in presenza del collasso di una sua parte, di modo che quest'ultimo non provochi il collasso dell'intera struttura.

La ridondanza strutturale può essere definita facendo riferimento a vari livelli:

- a) **Ridondanza di sezione**: capacità della sezione di un elemento strutturale di mantenere un'azione resistente residua in seguito alla rottura di una sua parte.

Si pensi ad un elemento in vetro stratificato, composto da almeno due lastre di vetro e da uno strato di intercalare, sottoposto ad un carico crescente. Il carico raggiungerà ad un certo punto il valore critico di resistenza del materiale (che sia a trazione o compressione), provocando la rottura di una lastra. Se le connessioni fra gli elementi sono state progettate in modo efficace, tale rottura non pregiudicherà il collasso dell'intero elemento, che quindi sarà ancora in grado di fornire una resistenza per un carico ancora maggiore, in quanto si mette in atto una redistribuzione degli sforzi agenti per la nuova configurazione resistente dell'elemento con una lastra collassata (Fig. 2.13). In quest'ottica, le singole lastre devono essere dimensionate in modo che ognuna di esse sia in grado di reggere il peso dell'altra lastra rotta e contemporaneamente i carichi esterni.

La ridondanza di sezione di un elemento in vetro stratificato può essere quindi definita come l'intervallo di resistenza che esso è in grado di fornire dopo il collasso del primo strato di vetro, e può essere incrementata ad esempio prevedendo un numero di lastre maggiore rispetto a quello necessario a sopportare le azioni di progetto, al posto dell'impiego di lastre di maggior spessore rispetto a quello di progetto, che per quanto detto risulterebbero anche meno resistenti.

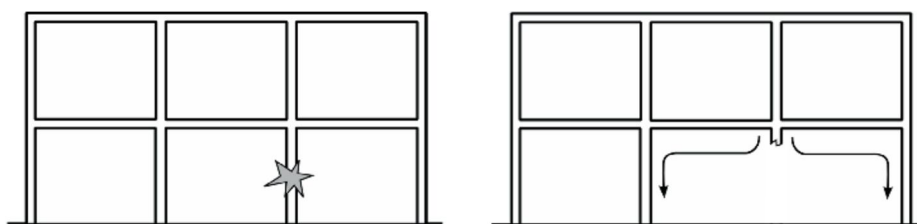


**Fig. 2.13** Diagramma sforzo-deformazione di un elemento sottoposto a flessione nelle fasi pre-rottura e post-rottura.

Fonte: [14].

b) **Ridondanza di sistema:** capacità della struttura di trasferire i carichi, in seguito alla rottura di un elemento o di una sua parte, secondo meccanismi alternativi rispetto a quello di progetto, resi possibili soprattutto grazie ad una presenza ridondante di elementi resistenti, cioè ripetuta per una stessa funzione strutturale.

Per quanto concerne la ridondanza di sistema, l'attenzione si focalizza sul comportamento globale della struttura. L'azione tecnica deve in questo caso prevedere accuratamente i possibili scenari di rotture locali e progettare la struttura in modo che essa sia in grado di ridistribuire i carichi negli elementi ancora non collassati e garantire così la stabilità anche dopo rottura, fino al momento della sostituzione del componente collassato. Ovviamente, per la corretta individuazione di tali scenari di rottura è fondamentale determinare quali elementi sono primari e quali secondari nella gerarchia strutturale, e fare in modo che la rottura avvenga prima negli elementi di importanza gerarchica minore, cosicché la ridistribuzione dei carichi nel post-rottura avvenga negli elementi gerarchicamente più importanti.



**Fig. 2.14** Esempio di ridondanza di sistema. In caso di rottura di un pilastro del piano terra, i pilastri superstiti devono sopportare i carichi che prima erano sopportati dal pilastro collassato e la trave deve sopportare i carichi (compreso quello concentrato aggiuntivo) su una luce maggiore.

Pertanto, tali elementi dovranno essere progettati in maniera ridondante.

Fonte: [5].

- concetto di Robustezza strutturale: essa rappresenta la capacità della struttura di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti (NTC 2008). Essa può essere ottenuta mediante opportune scelte progettuali, atte a garantire che il sistema strutturale possa sopportare in sicurezza la rottura localizzata o generale di un elemento strutturale.

I criteri di ridondanza e robustezza strutturale garantiscono alla struttura alti livelli di sicurezza a fronte della rottura accidentale (o dolosa) di una sua parte. In particolare, la crisi di uno o più elementi della struttura non provoca il collasso generalizzato dell'intera struttura, non compromettendo l'incolumità degli occupanti e non provocando danni. Questo tipo di

prestazione si definisce con il termine di “*Fail Safe*” (o rottura protetta). Solo con queste condizioni è possibile accettare il collasso di una parte della struttura; altrimenti il raggiungimento dello stato limite ultimo di collasso di una parte della struttura deve essere necessariamente considerato come stato limite ultimo dell’intera opera, anche se la crisi globale della struttura non viene innescata effettivamente. Questa strategia progettuale è invece definita dal termine “*Safe Life*” (E. Cagnacci et. al., 2016).

La verifica della sicurezza delle strutture in vetro strutturale va effettuata ai sensi di EN 1990 adottando il metodo semiprobabilistico agli stati limite. Tale metodo considera coefficienti amplificativi delle azioni di progetto e coefficienti riduttivi per le resistenze di progetto, in modo da confrontare direttamente le azioni e le resistenze; in particolare, le azioni di progetto non dovranno mai oltrepassare il valore delle resistenze di progetto della struttura. I coefficienti parziali devono essere calibrati in modo tale che, in una visione probabilistica della sicurezza, tale confronto sia indicativo dei livelli prestazionali richiesti alla costruzione in termini di probabilità di collasso, associati a ciascuna classe di conseguenze (CNR-DT 210:2013).

## 3 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE

---

### *3.1 Determinazione della resistenza a flessione*

La caratterizzazione della resistenza a flessione del vetro è regolata sul territorio europeo dalla normativa EN 1288:2001, recepita a livello italiano dalla UNI EN 1288:2001. Ai fini della determinazione della resistenza a flessione, i metodi di prova specificati hanno lo scopo di fornire un elevato numero di valori di resistenza a flessione, utilizzabili come base per la valutazione della resistenza del vetro, considerando l'influenza che la velocità di applicazione del carico sottoposto, la sua durata e la temperatura hanno su di essa, non tenendo conto di tutti gli altri fattori di influenza (citati al capitolo 2.3). Tali prove sono valide solo per provini di vetro piano e non si applicano per vetrate isolanti o vetri stratificati a causa del verificarsi di una deformazione di taglio aggiuntiva, originata negli strati intermedi elasto-plastici, che si verifica con lo slittamento delle lastre. Con l'origine di tale deformazione, è probabile che la misurazione della resistenza a flessione del vetro stratificato porti ad un valore inferiore rispetto a quello della reale resistenza a flessione di un vetro monolitico avente lo stesso spessore. Il vetro stratificato è, tuttavia, ricavato da prodotti in vetro monolitico che possono essere sottoposti a prova individualmente, quindi è improbabile che il processo di fabbricazione causi dei cambiamenti significativi nella resistenza a flessione dei vetri componenti; per questa ragione non è necessario eseguire la prova sui vetri stratificati: la loro resistenza alla flessione potrà essere determinata indirettamente dai risultati delle prove applicate ai vetri monolitici suoi componenti, in base alle interazioni tra le parti della sua struttura composita.

A causa delle aleatorietà delle caratteristiche di resistenza del vetro, le prove descritte dalla norma vengono ripetute per un numero di provini indeterminato (a discrezione), in quanto sottoponendo solo pochi provini alle prove, i risultati ottenuti potrebbero essere o non essere rappresentativi (ciò introduce un'indeterminazione). La scelta del numero di provini da sottoporre è comunque guidata dalla probabilità di trovare uno specifico valore di resistenza. Ad esempio, se si vogliono testare dei provini al fine di ottenere un valore di resistenza a flessione coincidente con il valor medio della distribuzione dei valori di resistenza a flessione, la prova potrebbe essere rappresentativa anche per mezzo di pochi provini. Vale l'opposto per valori di resistenza lontani dal valor medio (meno probabili).

La UNI EN 1288 fornisce due metodologie di prova per la determinazione della resistenza a flessione, descritti in seguito.

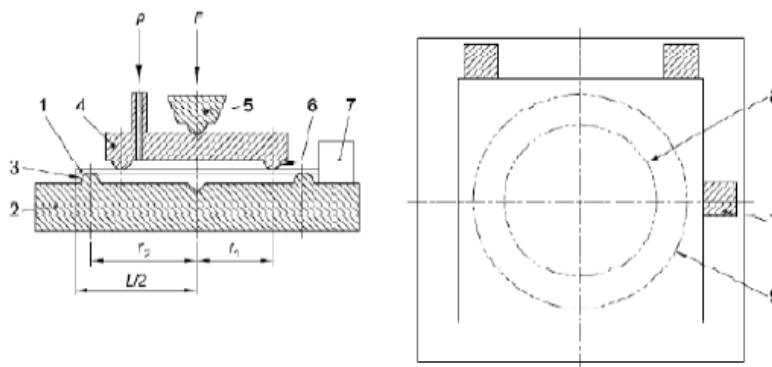
### 3.1.1 Prova di flessione con doppi anelli concentrici

Tale prova viene analizzata in due condizioni differenti, in base alla dimensione della superficie caricata dagli anelli.

- La UNI EN 1228-2 descrive la determinazione della resistenza a flessione attuata per grandi superfici caricate.

Un provino quadrato, con lunghezza di lato  $L$ , o circolare, di raggio  $r_3$  e avente superfici piane parallele viene posizionato libero su un anello circolare di supporto (di raggio  $r_2$ ). Il provino viene sottoposto ad un carico  $F_{ring}$  per mezzo di un anello di carico (di raggio  $r_1$ ), sistemato in modo coassiale rispetto all'anello di supporto. Inoltre, l'area  $A$ , delimitata dall'anello di carico, per  $0 < r < r_1$  viene messa sotto pressione di gas (del valore  $p$ ).

Viene riportata una raffigurazione del dispositivo di carico e successivamente le dimensioni richieste agli anelli coassiali e ai provini:



**Fig. 3.1** Allestimento della prova di flessione ad anelli coassiali secondo la UNI EN 1288-2.

Fonte: UNI EN 1288-2.

Legenda:

1. Provino
2. Piastra base rigida in acciaio, con anello di supporto
3. Profilo in gomma adattato all'anello di supporto, 3 mm di spessore (in conformità con la ISO 48)
4. Anello di carico rigido, preferibilmente in acciaio
5. Componente di trasmissione della forza, con un meccanismo a sfera per garantire che la forza venga centrata nell'anello di carico
6. Profilo di gomma adattato all'anello di carico, 3 mm di spessore (in conformità con la ISO 48)
7. Morsetti di registrazione per centrare il provino
8. Cerchio di contatto dell'anello di carico
9. Cerchio di contatto dell'anello di supporto

Anello di carico $r_1$ [mm]	Anello di supporto $r_2$ [mm]	Effettiva area superficiale A [mm <sup>2</sup> ]
300 ± 1	400 ± 1	240 000

**Tab. 3.1** Dimensioni del dispositivo di carico della prova.

Fonte: UNI EN 1288-2

Lunghezza del lato del provino L [mm]	Minimo spessore nominale del provino [mm]	Raggio medio del provino (per valutazione) $r_{3m}$ [mm]
1000 ± 4	3	600

**Tab. 3.2** Dimensioni dei provini sottoposti alla prova.

Fonte: UNI EN 1288-2

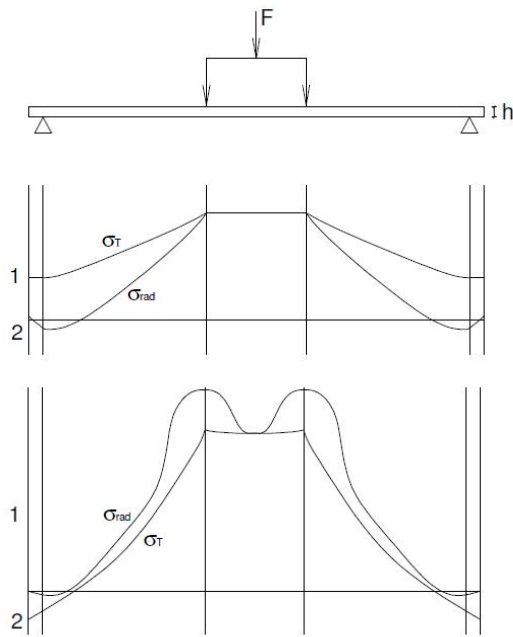
La forza  $F_{ring}$  trasmessa al provino è la risultante di una forza F applicata esternamente da un pistone sull'anello di carico e la pressione del gas p, che agisce contro il pistone ed è dipendente dal valore della forza F impressa dal pistone. In particolare, risulterà:

$$F_{ring} = F - pA$$

Mediante la presente prova, solo una limitata area di forma circolare, in posizione centrale nella superficie del provino, è sottoposta alla massima sollecitazione; ciò non si ha sui bordi.

Quando il provino viene sottoposto al carico dell'anello e alla pressione del gas associata, sulla superficie si sviluppa un campo di tensione variabile con il raggio r del provino (detta tensione radiale) e un campo di tensione tangenziale. In particolare, le tensioni saranno maggiori nella zona del provino interna all'anello di carico, e diminuiranno con l'aumentare del raggio, fino ai bordi. Se le deflessioni sono relativamente ridotte, l'area superficiale centrale sarà sottoposta ad una sollecitazione di trazione uniforme, sia per la distribuzione radiale che per quella tangenziale. Se le deflessioni diventano relativamente grandi, ciò provoca degli aumenti localizzati di sollecitazione al di sotto del bordo dell'anello di carico, la cui entità aumenta con l'aumentare della sollecitazione stessa. In questo caso, il calcolo delle sollecitazioni diventa più complesso, non più basato sulla teoria della flessione lineare.





**Fig. 3.2** Dipendenza schematica degli sforzi di tensione radiale e tangenziale del provino: nell'intervallo delle piccole deflessioni (in alto) e delle grandi deflessioni (in basso).

Fonte: UNI EN 1288-1.

La forza  $F$  e la pressione del gas  $p$  vengono aumentate nel tempo ad una velocità costante, fino a portare il provino a rottura. Si può ritenere che l'origine della rottura derivi dal superamento della resistenza agli sforzi radiali e non tangenziali e si trovi nell'area superficiale sottoposta alla massima sollecitazione a trazione, all'interno dell'anello di carico.

La resistenza a flessione ( $\sigma_{bB}$ ) viene calcolata dal valore massimo di  $F_{max}$  della forza del pistone, misurata al momento della rottura. Le variazioni di omogeneità o spessore del provino influenzano la distribuzione dello sforzo, pertanto, la resistenza a flessione  $\sigma_{bB}$  non rappresenta mai un valore preciso e, in alcuni casi, è meglio definirla resistenza a flessione equivalente ( $\sigma_{beqB}$ ). Per il vetro float, però, la resistenza a flessione che si misura con la prova è sufficientemente prossima all'esatta resistenza a flessione.

$$\sigma_{bB} = \sigma^*_{bB} \frac{Eh^2}{r_{3m}^2 \cdot (1-\mu^2)} \quad [5]$$

Dove:

$r_{3m}$  : raggio medio del provino (per valutazione)

$\mu$  : Numero di Poisson del provino

$h$ : Spessore o spessore medio del provino

$E$ : Modulo di Young del provino

$\sigma^*_{bB}$  : Quantità non dimensionale corrispondente a  $\sigma_{bB}$

Con riferimento alla presente norma, il resoconto della prova deve contenere le seguenti informazioni:

- a) Tipo e nome del vetro;
- b) Pretrattamento e condizione della superficie del provino sottoposto a prova, compresa la sequenza dei vari stadi di trattamento;
- c) Sforzi interni del provino, vetro sottoposto a ricottura o precompressione, compresa la natura e se possibile il grado di precompressione;
- d) Numero di provini;
- e) Per ogni provino, le seguenti informazioni:
  - 1) Spessore  $h$  in mm, approssimato ai 0,05 mm più prossimi, nel caso di provini con superfici piane; massimo spessore, minimo spessore e spessore medio  $h$  in mm, approssimato ai 0,05 mm più prossimi, nel caso di provini con una o due superfici decorate;
  - 2) Resistenza a flessione  $\sigma_{bB}$  o  $\sigma_{beqB}$  in  $N/mm^2$ , arrotondato a 0,1  $N/mm^2$ , di ogni provino rotto in conformità;
  - 3) Tempo di rottura in secondi, approssimato al secondo più prossimo.

- La UNI EN 1228-5 descrive, invece, la determinazione della resistenza a flessione attuata per piccole superfici caricate.

Un provino circolare o quadrato a facce piane parallele con raggio  $r_3$  o di lunghezza di lato  $L$  che poggia su un anello di appoggio (di raggio  $r_2$ ) deve essere caricato per mezzo di un anello di carico (raggio  $r_1$ ), sistemato in modo concentrico rispetto all'anello di appoggio. In questo caso non viene applicata nessuna pressione di gas  $p$  per mezzo del pistone. Anche per questa prova, vengono riportate le dimensioni degli anelli coassiali e dei provini testati:

Dispositivo di carico	Raggio dell'anello di carico $r_1$ [mm]	Raggio dell'anello di supporto $r_2$ [mm]	Raggio $r_3$ o $L/2$ del provino [mm]
R45	9	45	50
R30	6	30	33

**Tab. 3.3** Dimensioni del dispositivo di carico della prova.  
Fonte: UNI EN 1288-5

Dispositivo di carico	Diametro ( $=2 r_3$ ) o lunghezza di lato $L$ [mm]	Spessore $h$ massimo [mm]
R45	$100 \pm 2$	9
R30	$66 \pm 2$	6

**Tab. 3.4** Dimensioni del provino sottoposto alla prova.  
Fonte: UNI EN 1288-5.

Resistenza a flessione $\sigma_{bB}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spessore minimo dei provini per il dispositivo di carico	
	R45 [mm]	R30 [mm]
$\sigma_{bB} \leq 100$	2,0	1,0
$100 < \sigma_{bB} \leq 200$	2,5	1,5
$200 < \sigma_{bB} \leq 300$	3,0	2,0
$300 < \sigma_{bB} \leq 400$	3,5	2,5
$400 < \sigma_{bB} \leq 500$	3,5	2,5
$500 < \sigma_{bB} \leq 600$	4,0	3,0

**Tab. 3.5** Spessore minimo dei provini in funzione della resistenza a flessione che si vuole ottenere.  
Fonte: UNI EN 1288-5.

La resistenza a flessione ( $\sigma_{bB}$ ), associata al carico massimo, ( $F_{max}$ ) deve essere calcolata usando l'equazione [6] per i provini circolari e l'equazione [7] per i provini quadrati.

$$\sigma_{bB} = K_1 \frac{F_{max}}{h^2} \quad [6]$$

$$\sigma_{bB} = K_2 \frac{F_{max}}{h^2} \quad [7]$$

Dove:

$K_1$ : costante che dipende dal numero di Poisson del provino. Per il vetro sodo-calcico è pari a 1,09

$K_2$ : costante che dipende dal numero di Poisson del provino. Per il vetro sodo-calcico è pari a 1,04

h: Spessore o spessore medio del provino

Le costanti  $K_1$  e  $K_2$  valgono sia per il dispositivo di carico R45 sia per R30

La prova deve essere accompagnata da resoconto, nel quale vanno riportate le stesse informazioni di quanto specificato in UNI EN 1288-2.

### 3.1.2 Prova di flessione per quattro punti

Il presente metodo di prova rappresenta quello più comunemente utilizzato per la caratterizzazione di elementi inflessi in vetro stratificato. La sua definizione è affidata alla UNI EN 1288-3. Grazie alla prova specificata, è possibile attuare una determinazione della resistenza a flessione del vetro piano, comprendendo quella dipendente dagli effetti sui bordi, che non vengono considerati invece in UNI EN 1288-2/5.

La prova viene allestita secondo quanto riportato in seguito.

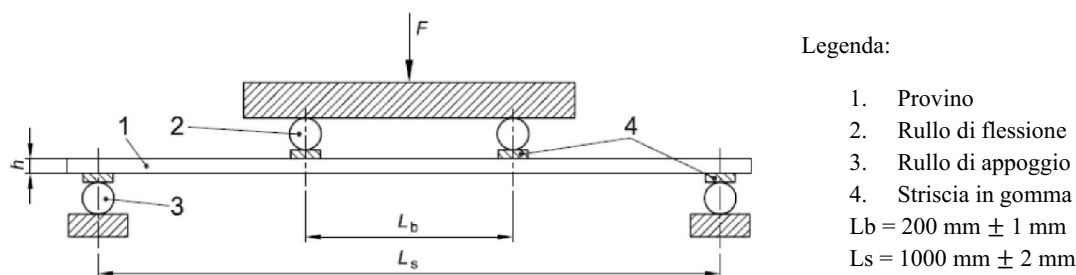


Fig. 3.3 Schema rappresentativo della prova descritta in UNI EN 1288-3.

Fonte: UNI EN 1288-3.

I provini devono avere le seguenti dimensioni:

- Lunghezza L:  $1100 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$
- Larghezza B:  $360 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$
- Spessore h: deve essere determinato come media aritmetica di almeno quattro misure singole, prese da entrambe le estremità del provino, arrotondando agli 0,05 mm più vicini

Il provino deve essere montato come illustrato in figura. Le strisce di gomma, spesse 3 mm devono essere posizionate tra il provino ed i rulli di flessione e d'appoggio. Il provino deve essere flesso con una sollecitazione di flessione crescente in maniera uniforme, con velocità di incremento di  $2 \pm 0,4 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$  fino a rottura. Viene misurato il carico massimo  $F_{max}$  e il tempo impiegato per raggiungerlo.

Ai fini della valutazione, devono essere considerati solo i provini in cui l'origine della rottura si trova tra i rulli di flessione. Per calcolare la resistenza a flessione dei bordi liberi del vetro, si devono prendere in considerazione solo i provini la cui rottura ha origine nel bordo.

La resistenza a flessione  $\sigma_{bB}$  viene calcolata con la seguente espressione:

$$\sigma_{bB} = k \left[ F_{max} \frac{3(L_s - L_b)}{2Bh^2} + \sigma_{bG} \right] \quad [8]$$

Dove:

$k$  : Fattore adimensionale definito dalla UNI EN 1288-1

$\sigma_{bG}$  : Sforzo di flessione imposto dal peso proprio del provino, calcolato mediante la seguente espressione:

$$\sigma_{bG} = \frac{3\rho g L_s^2}{4h}$$

$\rho$  = Densità del provino

$g$  = Accelerazione di gravità

Con riferimento alla presente norma, il resoconto della prova deve contenere le seguenti informazioni:

- a) Tipo e nome del vetro;
- b) Pretrattamento e condizione della superficie del provino sottoposto a prova, compresa la sequenza dei vari stadi di trattamento;
- c) Descrizione della finitura del bordo e verso il quale è stato sottoposto a prova
- d) Sforzi interni del provino in vetro, sottoposto a ricottura o precompressione, compresa la natura e se possibile il grado di precompressione;
- e) Numero di provini;
- f) Per ogni provino, le seguenti informazioni:
- g) Spessore  $h$  in mm, approssimato ai 0,05 mm più prossimi, nel caso di provini con superfici piane; massimo spessore, minimo spessore e spessore medio  $h$  in mm, approssimato ai 0,05 mm più prossimi, nel caso di provini con una o due superfici decorate;
- h) Larghezza in millimetri approssimata al millimetro più vicino;
- i) Resistenza a flessione  $\sigma_{bB}$  o  $\sigma_{beqB}$  in  $N/mm^2$ , arrotondato allo 0,1  $N/mm^2$  più vicino;
- j) Se richiesto, resistenza a flessione del bordo  $\sigma_{bB}$  o  $\sigma_{beqB}$  in  $N/mm^2$ , arrotondato allo 0,1  $N/mm^2$  più vicino;
- k) Tempo di rottura in secondi, approssimato al secondo più prossimo;
- l) Se la rottura del provino è partita dal bordo o dalla parte centrale

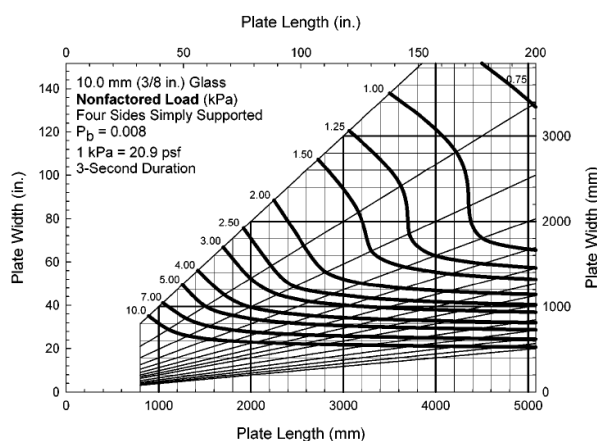
Tutti i metodi di prova specificati nella norma UNI EN 1288, in tutte le sue parti, devono essere eseguiti ad una temperatura di  $23 \pm 5$  °C per evitare lo sviluppo di sollecitazioni termiche e ad un'umidità relativa tra il 40% e il 70%.

### 3.1.3 Calcolo della resistenza a flessione secondo la normativa americana

La norma americana ASTM E 1300 descrive le procedure per la determinazione della resistenza alla flessione (LR) per determinati tipi di vetro sottoposti ad un carico uniforme di breve o lunga durata e in base ad una determinata probabilità di rottura. Nella stessa pratica vengono anche riportati grafici al fine della determinazione della massima inflessione approssimativa del provino sottoposto al carico. Ai fini del calcolo, l'autorità competente dovrà fornire il carico di progetto, le dimensioni del vetro e il tipo di vetro in oggetto.

La norma si applica a vetri monolitici e stratificati, oppure a vetri isolanti, di forma rettangolare con supporto continuo lungo uno, due, tre o quattro lati. Nel caso di supporto continuo su due lati, il provino si comporta come una trave semplicemente appoggiata, mentre in caso di supporto lungo un lato, il comportamento rimanda a quello di una trave a sbalzo. Nel presente elaborato si pone l'attenzione sulla valutazione della resistenza alla flessione per i soli vetri monolitici e stratificati, mentre si rimanda alle specifiche della norma in oggetto per i vetri isolanti.

La procedura di base per la valutazione della resistenza del vetro risulta essere quella relativa a singoli vetri monolitici, per cui si utilizzano differenti riferimenti al fine del calcolo, in funzione del numero di lati del provino supportati in maniera continua. Per ogni casistica relativa al supporto continuo del provino, la procedura di calcolo consiste nella determinazione del cosiddetto carico non fattorizzato (NFL), attraverso grafici di riferimento riportati nella norma (Fig. 3.4) e di un fattore che tiene conto del tipo di vetro (GTF), per mezzo di tabelle di riferimento e in base alla durata del carico (Tab. 3.5).



**Fig. 3.4** Riferimento per la determinazione del carico non fattorizzato (NFL): esempio relativo a vetri monolitici di spessore pari a 10 mm (3/8 pollici) con quattro lati supportati in modo continuo, per un carico di durata pari a 3 secondi.

Il valore è ottenuto in funzione della lunghezza e larghezza del provino (in mm e in pollici). Per le altre casistiche si rimanda alla presente normativa.

Fonte: ASTM E 1300-04.

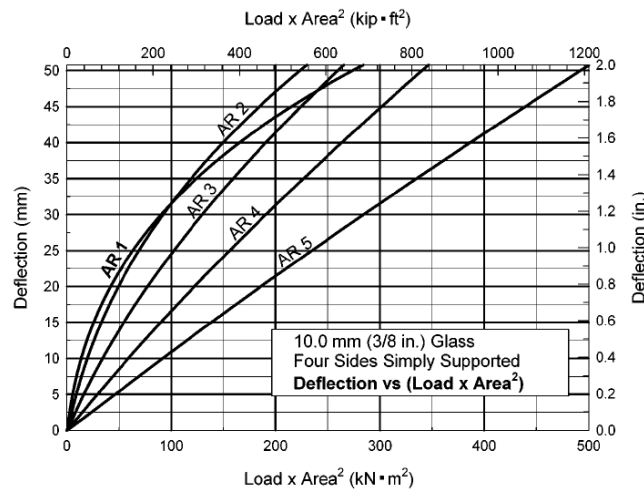
**TABLE 1 Glass Type Factors (GTF) for a Single Lite of Monolithic or Laminated Glass**

Glass Type	GTF	
	Short Duration Load	Long Duration Load
AN	1.0	0.5
HS	2.0	1.3
FT	4.0	3.0

**Tab. 3.6** Riferimento per la determinazione del fattore del tipo di vetro (GTF), in funzione della durata del carico (breve o lunga), applicati a vetri ricotti (AN), vetri induriti termicamente (HS) e vetri temprati (FT).

Fonte: ASTM E 1300-04.

Successivamente i due valori di NFL e GTF vengono moltiplicati per ottenere il valore della resistenza al carico (LR). Occorre determinare, inoltre, la deflessione massima approssimativa (nel centro della lastra), utilizzando i grafici sforzo-deformazione (deformazione di flessione) forniti anch'essi dalla presente norma, a partire dallo spessore del vetro di progetto, le sue dimensioni e il carico di progetto (Fig. 3.5).



**Fig. 3.5** Grafico di calcolo dell'inflexione del provino (in mm o in pollici): esempio relativo a vetri monolitici di spessore pari a 10 mm (3/8 pollici) con quattro lati supportati in modo continuo, in funzione del prodotto tra carico di progetto e impronta di carico (Load x Area) e del rapporto di aspetto (AR), ottenuto come rapporto tra la lunghezza e la larghezza del vetro (può assumere valori pari a 1, 2, 3, 4 o 5). Per le altre casistiche si rimanda alla presente normativa.

Fonte: ASTM E 1300-04.

La norma prevede la stessa procedura di valutazione anche per provini di vetro stratificato (LG), ottenuti con uno strato di intercalare in PVB, anche in questo caso a seconda del numero di lati



supportati in modo continuo, considerando una temperatura di servizio del vetro stratificato, sottoposto al carico di progetto specificato, che non supera i 50 °C.

Viene fornita, in aggiunta, una procedura analitica per la valutazione della resistenza del vetro: secondo tale procedura, vengono determinate le sollecitazioni di trazione superficiali, utilizzando lo spessore minimo corrispondente allo spessore nominale di progetto, riportato nella presente specifica, per il carico di progetto specificato, applicato alla lastra. Dopo di che deve essere determinata la probabilità di rottura del vetro in oggetto (si rimanda alla presente normativa per la sua procedura di determinazione). Se questa risulta minore o uguale a 0,008, allora la resistenza al carico sarà maggiore o uguale al carico di progetto specificato.

Viene inoltre determinata la massima inflessione (al centro del provino) utilizzando lo spessore minimo corrispondente a quello nominale tra quelli riportati, per il carico di progetto specificato. Quanto appena detto vale per vetri singoli monolitici supportati in modo continuo su quattro lati. Per quanto riguarda gli elementi in vetro stratificato supportati in modo continuo su quattro lati, occorre determinare lo spessore effettivo per ogni lastra di vetro che compone lo stratificato e l'inflessione relativa a tale spessore, in funzione dei moduli di taglio riportati per il materiale intercalare dell'elemento e in base alla combinazione tra temperatura e durata del carico di progetto. In particolare:

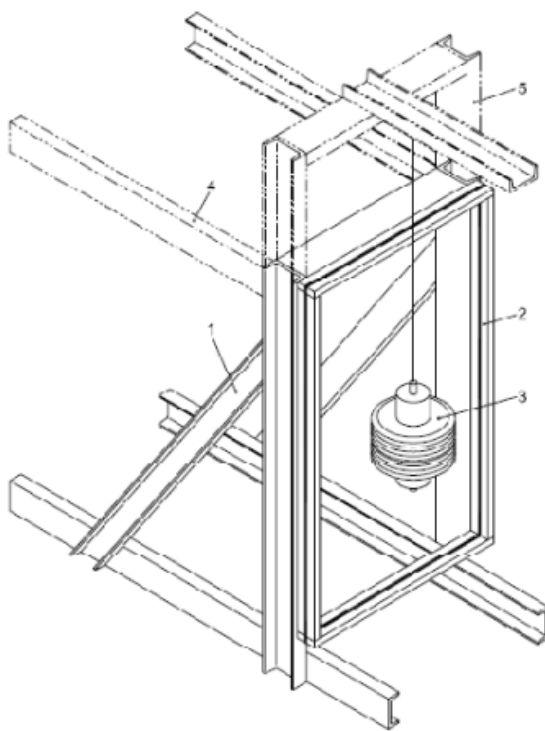
- Carichi di lunga durata, a 20 °C per 30 giorni
- Carichi di breve durata, a 50 °C per 3 s

Successivamente, la procedura di determinazione della resistenza avviene allo stesso modo di quanto previsto per le lastre singole di vetro monolitico.

### 3.2 Prova del pendolo

Oltre a prove per la caratterizzazione della resistenza alla flessione, il vetro stratificato viene sottoposto a test atti a verificare il rispetto di criteri di sicurezza affidatigli.

La norma UNI EN 12600:2004, “Prova del pendolo”, descrive un metodo di prova normalizzato per la classificazione dei prodotti di vetro piano utilizzati in edilizia, in cui è previsto l’impatto sul vetro di un pendolo da una determinata altezza di caduta, rappresentativa dell’energia trasmessa dall’impatto con una persona. La prova ha lo scopo di classificare i vetri piani in base alle prestazioni all’impatto e alla modalità di rottura. La prova deve essere eseguita su quattro provini di struttura identica e con uguale spessore nominale, per ogni altezza di caduta. Vengono analizzate in questo elaborato solo le prove per provini simmetrici.



**Fig. 3.6** Dispositivo della prova del pendolo.

Fonte: UNI EN 12600:2004.

Legenda:

1. Intelaiatura principale
2. Intelaiatura di bloccaggio
3. Impattatore
4. Elemento di supporto opzionale
5. Dispositivo di sospensione opzionale

Le dimensioni dell'intelaiatura principale devono essere:

- Larghezza interna:  $847 \pm 5$  mm;
- Altezza interna:  $1910 \pm 5$  mm.

Le dimensioni dell'intelaiatura di bloccaggio devono essere:

- Larghezza interna:  $847 \pm 5$  mm;
- Altezza interna:  $1910 \pm 5$  mm.

L'impattatore è costituito da due pneumatici conformi alla ISO 4251-1, che trasportano due pesi di acciaio di massa uguale, dimensionati in modo che la sua massa totale sia di  $50 \pm 0,1$  kg. L'impattatore deve essere sospeso mediante cavo di acciaio con diametro 5 mm, sopra la testa dell'intelaiatura principale. All'altezza di caduta, l'angolo tra il cavo di sospensione teso e l'ancoraggio all'intelaiatura non deve essere minore di  $14^\circ$  dall'orizzontale.

La dimensione dei provini deve prevedere:

- Larghezza:  $876 \pm 2$  mm;
- Altezza:  $1938 \pm 2$  mm.

I provini devono essere sottoposti per un minimo di 12 h a  $20 \pm 5$  °C, temperatura alla quale andrà svolta anche la prova vera e propria. Essi vanno collocati nell'intelaiatura di bloccaggio, e così bloccati. I due pneumatici vanno gonfiati ad una pressione di  $0,35 \pm 0,02$  MPa. La pressione deve essere controllata prima di ogni caduta. I provini vanno quindi alzati all'altezza di caduta determinata e stabilizzati, in modo che il cavo di sospensione sia teso.

L'impattatore viene rilasciato in modo che cada con movimento pendolare e con velocità iniziale nulla. La direzione di impatto sul centro del provino deve essere normale alla superficie e l'impatto con il provino deve avvenire una sola volta, altrimenti la prova deve essere considerata non valida.

La prova consiste nel far cadere in oscillazione libera l'impattatore, che viene sollevato ad una determinata altezza di caduta, quindi rilasciato in modo che colpisca il provino, posto verticalmente, e deve essere ripetuta per ogni altezza di caduta, a partire da un'altezza di caduta minima, salendo fino a quella appropriata per la classe a cui si vuole associare il materiale.

Classificazione	Altezza di caduta [mm]
3	190
2	450
1	1200

**Tab. 3.7** Altezza di caduta richiesta per il superamento della prova per la diversa classificazione.

Fonte: UNI EN 12600:2004.

I provini devono essere ispezionati dopo l'impatto e deve essere annotato se rimangono integri o si rompono, secondo due tipologie di rotture accettabili:

1. presenza di numerose spaccature, ma nessun taglio o apertura nel pezzo di prova attraverso il quale possa passare una sfera di diametro 76 mm a cui viene applicata una forza massima di 25 N. Inoltre, se dal pezzo di prova si staccano piccoli frammenti entro 3 minuti dall'impatto, questi devono pesare complessivamente non più di una massa equivalente a 10000 mm<sup>2</sup> del pezzo di prova originario. Il frammento più grande deve avere un peso inferiore a quello di una massa equivalente a 4400 mm<sup>2</sup> dell'originario pezzo di prova;
2. il provino si disintegra e i 10 pezzi privi di spaccature più ampi, raccolti entro 3 minuti dall'impatto e pesati, insieme, entro 5 minuti dall'impatto non devono pesare più di una massa equivalente a 6500 mm<sup>2</sup> dell'originario pezzo di prova. I frammenti devono essere scelti solamente dalla parte del pezzo di prova originario esposta nella cornice di prova. Per determinare la massa equivalente occorre tenere conto solamente della zona esposta nella cornice di prova.

Se tutti e quattro i provini non si rompono o si rompono conformemente a tali criteri, è richiesta la prova del materiale a un livello di impatto maggiore, aumentando l'altezza di caduta al livello superiore, su altri quattro campioni dello stesso materiale. Se invece anche solo uno dei provini si rompe in modo non conforme a tali criteri, la prova ha termine.

La classificazione dei provini conseguente ai risultati delle prove viene attribuita da un codice specifico:

$\alpha$  ( $\beta$ )  $\varphi$

- $\alpha$ : classe più elevata di altezza di caduta per la quale il vetro si rompe in base a uno dei due modelli di frammentazione descritti precedentemente.

La classificazione attuata in base all'altezza di caduta prevede tre possibili classi:

Classe 3 – Il materiale è conforme ai criteri di rottura individuati precedentemente tramite un'altezza di caduta di 190 mm;

Classe 2 - Il materiale è conforme ai criteri di rottura individuati precedentemente tramite un'altezza di caduta di 190 mm e 450 mm;

Classe 1 - Il materiale è conforme ai criteri di rottura individuati precedentemente tramite un'altezza di caduta di 190 mm, 450 mm e 1200 mm;

- $\beta$ : tipo di rottura.

I provini possono presentare modelli di rottura differenti in base alla tipologia di vetro testato:

Tipo A – appaiono numerose fessurazioni che formano frammenti separati con spigoli vivi, alcuni dei quali di grandi dimensioni (tipica del vetro ricotto o indurito);

Tipo B – appaiono numerose fessurazioni, ma i frammenti rimangono uniti e non si separano (tipica del vetro stratificato);

Tipo C – il provino si disintegra, producendo un numero elevato di piccole particelle relativamente innocue (tipica del vetro temprato);

- $\varphi$ : classe più elevata di altezza di caduta per la quale il vetro si rompe senza consentire la penetrazione (conformemente con il primo dei due criteri indicati); se si rompe con una caduta dall'altezza minima e consente la penetrazione, il vetro è indicato con 0.

### 3.3 Prove di resistenza all'attacco manuale

La resistenza dei vetri stratificati di sicurezza all'impatto viene testata mediante le prove descritte nella UNI EN 356:2002. La norma fornisce una classificazione dei vetri in base alla loro prestazione all'impatto; in questo caso i vetri sono testati per essere vetri antieffrazione.

I campioni sottoposti alle prove devono essere tre per ogni categoria richiesta (è consigliato almeno un provino supplementare). Le prove vengono eseguite alla temperatura di  $23 \pm 2$  °C. Ogni provino deve essere caratterizzato da:

- lunghezza:  $1100 \pm 5$  mm;
- larghezza:  $900 \pm 5$  mm.

La prestazione antieffrazione dei campioni può essere certificata mediante due possibili metodologie di prova:

#### 3.3.1 Prova di caduta di un corpo

Viene fatto cadere sul provino, posizionato orizzontalmente su un telaio di bloccaggio, un corpo di impatto, quale una sfera di acciaio con un diametro di  $100 \pm 0,2$  mm ed una massa di  $4,11 \pm 0,06$  kg. L'attrezzatura che sostiene il corpo di impatto deve permettere di regolare l'altezza di caduta e deve essere dotata di un meccanismo di rilascio, che non deve provocare alcun momento o rotazione nel corpo di impatto, in modo che lo stesso subisca come accelerazione solo quella di gravità e possa cadere verticalmente.

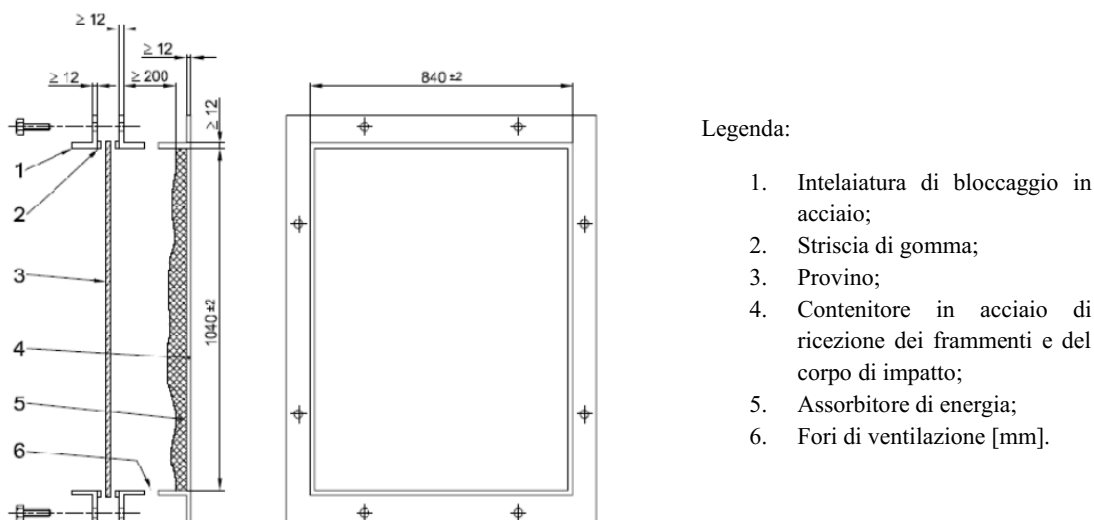


Fig. 3.7 Attrezzatura della prova di caduta di un corpo.

Fonte: UNI EN 356:2002.

Viene riportata l'altezza di caduta dalla quale deve essere rilasciato il provino, per la caratterizzazione di ciascuna categoria di resistenza all'impatto:

Categoria di resistenza	Altezza di caduta [mm]
P1A	1500 ± 50
P2A	3000 ± 50
P3A	6000 ± 50
P4A	9000 ± 50
P5A	9000 ± 50

**Tab 3.8** Requisiti per le altezze di caduta in base alla classe richiesta.  
Fonte: UNI EN 856:2002.

Per le categorie P1A, P2A, P3A, P4A, il corpo di impatto deve essere fatto cadere su ogni provino tre volte dalla stessa altezza, in modo che le posizioni di impatto formino la sagoma di un triangolo equilatero con lunghezza di lato pari a  $130 \pm 20$  mm attorno al centro geometrico del provino. Per la categoria P5A, ciascun provino deve essere colpito in totale nove volte, tre volte su ogni punto del triangolo formato dagli impatti secondo le altre categorie (sostanzialmente, viene ripetuto tre volte lo stesso procedimento per la caratterizzazione delle precedenti categorie).

Dopo ogni impatto, deve essere controllata la penetrazione nel provino da parte del corpo di impatto. Un provino si può considerare penetrato se il corpo di impatto è passato completamente attraverso il provino prima che siano trascorsi cinque secondi dall'istante di impatto. La prova risulta superata, con la conseguente classificazione del materiale, se tutti i provini resistono alla penetrazione da parte del corpo di impatto, alla specifica altezza di caduta, mentre non è valida se, dopo ogni impatto, uno qualsiasi dei bordi del provino si è spostato per più di 5 mm nel telaio di bloccaggio e deve essere ripetuta con un nuovo provino.

### 3.3.2 Prova dell'ascia

Ogni provino viene bloccato verticalmente su un'attrezzatura di supporto e viene colpito con un'ascia e un martello, che vengono fatti cadere in oscillazione libera in modo pendolare, partendo da una posizione avente angolo di impatto pari a  $25^\circ \pm 2^\circ$ , colpendo la superficie del provino.

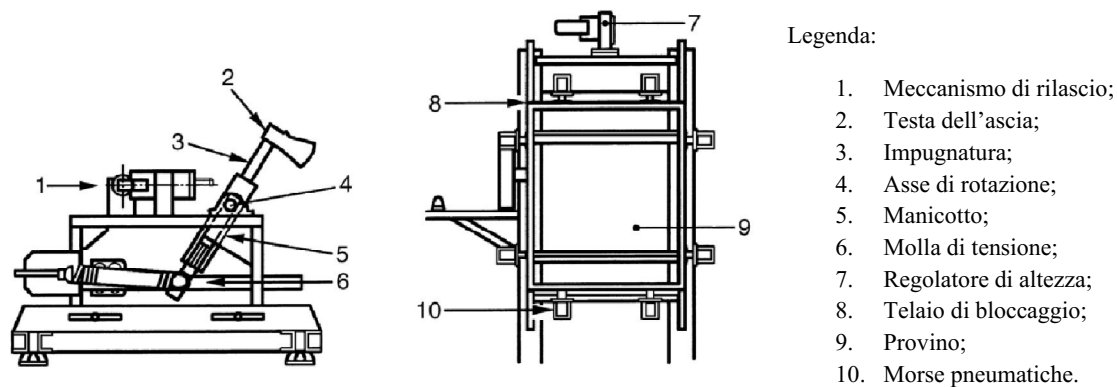


Fig. 3.8 Attrezzatura della prova dell'ascia.

Fonte: UNI EN 356:2002.

Le condizioni alle quali viene eseguita la prova dipendono dalla categoria di prestazione che si vuole associare ai provini:

Categoria di resistenza	Simulazione di un'ascia tenuta in mano				
	Colpi di martello		Colpi di taglio		Numero totale dei colpi
	Velocità di impatto $v_i$ [m/s]	Energia di impatto $E_i$ [Nm]	Velocità di impatto $v_i$ [m/s]	Energia di impatto $E_i$ [Nm]	
P6B	$12,5 \pm 0,3$	$350 \pm 15$	$11,0 \pm 0,3$	$300 \pm 15$	Da 30 a 50
P7B	$12,5 \pm 0,3$	$350 \pm 15$	$11,0 \pm 0,3$	$300 \pm 15$	Da 51 a 70
P8B	$12,5 \pm 0,3$	$350 \pm 15$	$11,0 \pm 0,3$	$300 \pm 15$	Oltre 70

Tab 3.9 Requisiti delle caratteristiche dell'impatto in base alla classe richiesta.

Fonte: UNI EN 356:2002.



Ad ogni colpo deve essere misurata la velocità di impatto ( $v_i$ ). Lo scopo della prova è quello di produrre un'apertura quadrata con una lunghezza di lato  $400 \pm 10$  mm, colpendo con il martello e l'ascia progressivamente in diversi punti, così che il centro di tale apertura coincida con il centro geometrico del campione e in modo tale da usare il minimo numero di colpi di martello e ascia, combinati. Ogni punto di impatto deve prevedere un numero di impatti massimo pari a 10. Se dopo tali impatti non si rompono tutti gli strati del provino, si deve passare al punto di impatto successivo.

Il provino non supera la prova se la parte di esso formante l'apertura quadrata è:

- Distaccata completamente dal resto del pezzo di prova;
- Benché ancora leggermente attaccata, ceda sotto il proprio peso creando l'apertura.

Se un provino ha resistito al numero di colpi necessari per rientrare nella categoria di resistenza per cui è stato testato, la prova può terminare prima della rottura. La prova non è valida se uno qualsiasi dei bordi del provino si è spostato per più di 5 mm nel telaio di prova e va ripetuta con un nuovo provino.

### ***3.4 Prove di resistenza alle esplosioni***

In questa sede viene riportata la metodologia di caratterizzazione della resistenza del vetro alla pressione causata da esplosioni. Tale metodologia viene fornita dalla UNI EN 13541:2012, la quale riporta anche la relativa classificazione alle esplosioni, valida solo per vetri di prova aventi superfici di circa  $1m^2$ . Il materiale deve essere testato per mezzo di tre provini non forati di uguali dimensioni, per ciascuna superficie di attacco e per ciascuna classe per cui è richiesta la prova, i quali devono essere fissati adeguatamente in direzione verticale su una struttura di supporto.

In particolare, i provini devono avere dimensioni:

- Larghezza di  $1100 \pm 5$  mm;
- Lunghezza di  $900 \pm 5$  mm.

La prova viene effettuata mediante un tubo d'onda d'urto (detto *Shock-tube*) o un dispositivo analogo per generare una deflagrazione, il quale deve assicurare la corretta riproduzione di un'onda d'urto piana perpendicolare alla superficie d'attacco del campione. La sovrappressione generata sulla superficie a causa dell'onda d'urto dovrebbe avere una forma che possa essere correlata a quella di una carica sferica avente un peso noto di trinitrotoluene (TNT) detonante posta ad una

certa distanza dalla superficie. Ai fini della prova e classificazione, è inoltre necessario predisporre di un dispositivo di misurazione della sovrappressione dell'onda d'urto riflessa dalla superficie del provino e del tempo di sviluppo della stessa, con accuratezza pari al  $\pm 5\%$ .

Per l'attinenza alla normativa, la temperatura del campione deve essere di  $18 \pm 5$  °C ed esso deve essere conservato per almeno 12 ore prima della prova in tale intervallo, mentre le condizioni di temperatura dell'ambiente di prova possono essere di  $18 \pm 10$  °C.

La prova è considerata superata se i tre provini non mostrano segni di perforazione del lato esposto né alcuna apertura tra il supporto del vetro e i bordi della lastra di prova.

La classificazione proposta dalla UNI EN 13541 si basa sulla massima sovrappressione d'onda riflessa e sulla durata della fase di sovrappressione. Se tutti i tre provini del campione soddisfano i requisiti di prestazione di una determinata classe, allora esso può essere classificato nella classe pertinente (quando un elemento ottiene una determinata classe, automaticamente consegue anche tutte le classi minori).

Codice di classificazione	Caratteristiche dell'onda d'urto piana		
	Massima sovrappressione dell'onda d'urto riflessa $p_r$ (KPa)	Impulso specifico positivo $i_+$ (KPa ms)	Durata della fase di sovrappressione $t_+$ (ms)
ER1	$50 \leq p_r < 100$	$370 \leq i_+ < 900$	$\geq 20$
ER2	$100 \leq p_r < 150$	$900 \leq i_+ < 1500$	$\geq 20$
ER3	$150 \leq p_r < 200$	$1500 \leq i_+ < 2200$	$\geq 20$
ER4	$200 \leq p_r < 250$	$2200 \leq i_+ < 3200$	$\geq 20$

**Tab. 3.10** Requisiti della sovrappressione dell'onda d'urto in base alla classe richiesta.

Fonte: UNI EN 13541:2012.

### ***3.5 Prove di resistenza ai proiettili***

La resistenza del vetro ai proiettili è determinata a partire dalle specifiche della UNI EN 1063:2001. La metodologia di prova fornita dalla presente norma è volta alla classificazione dei vetri in base ai requisiti prestazionali richiesti da ciascuna classe, e viene effettuata per mezzo di attacchi con pistole, fucili e fucili da caccia, i quali sono mirati in più punti della superficie dei provini.

Il campione sottoposto alla prova deve essere formato da tre provini per ciascuna delle classi per cui è richiesta l'effettuazione della prova (deve essere tenuto come riserva almeno un provino in più). Ciascuno dei provini deve essere quadrato con lato di  $500 \pm 5$  mm e conservato per un periodo di almeno 12 ore prima del test alla temperatura di  $18 \pm 5$  °C.

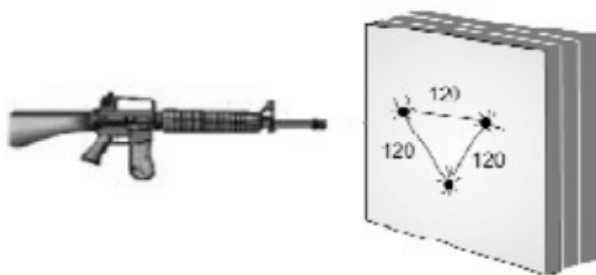
L'attrezzatura della prova deve includere:

- Telaio rigido di supporto dei provini;
- Cassone di recupero delle schegge e dei frammenti di pallottola installato dietro il provino (con apertura frontale di 440 mm x 440 mm);
- Foglio testimone: esso è un foglio di alluminio di spessore pari a 0,02 mm, montato nel cassone di recupero delle schegge dietro il provino (avente superficie di 440 mm x 440 mm);
- Sistema di misura della velocità (con precisione di 1 m/s);
- Dispositivo di prova balistica: le prove possono essere effettuate con apparecchiature balistiche di prova che producono la stessa velocità di impatto (dovranno essere posti a distanze di impatto specifiche).

Ciascuno dei tre provini, quando sottoposto alla prova, deve soddisfare almeno uno dei seguenti requisiti:

1. Nessuna perforazione della vetrata da proiettile o parte di esso e nessuna perforazione da schegge di vetro del foglio testimone sulla faccia opposta. Questo tipo di vetrata resistente ai proiettili deve essere indicata nella classe appropriata con un marchio addizionale "NS" (senza schegge).
2. Nessuna perforazione della vetrata da proiettile o parti di esso, ma perforazione del foglio testimone da schegge di vetro staccatesi dalla faccia posteriore. Questo tipo di vetrata resistente ai proiettili deve essere classificata nella classe appropriata con un marchio addizionale "S" (schegge).

La prova viene messa in atto anzitutto fissando i provini sul supporto in direzione perpendicolare alla linea di fuoco e, dopo il montaggio corretto delle parti dell'attrezzatura e la disposizione delle corrette distanze (differenti per ogni arma utilizzata), è necessario tracciare al centro dei provini un triangolo equilatero di lato pari alla distanza che dovrà esserci tra gli impatti e segnare i vertici in modo che siano ben visibili dal tiratore. Ciascun provino dovrà essere sottoposto a uno o tre tiri e deve essere misurata la velocità della pallottola per ogni tiro, oltre che la distanza dei centri dei tre colpi con uno strumento di precisione pari a 1 mm. La prova è considerata superata per un campione se i tre provini rispettano i requisiti di perforazione riportati in precedenza ed esso viene classificato in una determinata classe di resistenza ai proiettili se la velocità e la distanza degli impatti è in accordo con i requisiti della classe stessa.



**Fig. 3.9** Schema della prova di resistenza ai proiettili.

Fonte: UNI EN 1063:2001

Le vetrate resistenti ai proiettili, secondo il livello di attacco al quale resistono, dovrebbero essere classificate come BR1, BR2, BR3, BR4, BR5, BR6, BR7 per l'attacco da pistole e fucili, oppure come SG1 e SG2 per l'attacco da fucili da caccia. Le classi da BR1 a BR7 vedono un livello di prestazione crescente per i campioni in vetro; quindi, un elemento che soddisfa i requisiti per una determinata classe è garante anche delle prestazioni delle classi inferiori.

Classe	Arma	Calibro	Tipo di munizioni	Massa del proiettile (g)	Condizioni della prova				
					Distanza di tiro (m)	Velocità di impatto (m/s)	Numero di impatti	Distanza tra gli impatti (mm)	
BR1	Fucile	0,22 Long Rifle	L/RN	2,6 ± 0,1	10,00 ± 0,5	360 ± 10	3	120 ± 10	
BR2	Pistola	9 mm Luger	FJ/RN/SC	8,0 ± 0,1	5,00 ± 0,5	400 ± 10	3	120 ± 10	
BR3	Pistola	0,357 Magnum	FJ/CB/SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	3	120 ± 10	
BR4	Pistola	0,44 Rem. Magnum	FJ/FN/SC	15,6 ± 0,1	5,00 ± 0,5	440 ± 10	3	120 ± 10	
BR5	Fucile	5,56 x 45 *	FJ/PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10,00 ± 0,5	950 ± 10	3	120 ± 10	
BR6	Fucile	7,62 x 51	FJ/PB/SC	9,5 ± 0,1	10,00 ± 0,5	830 ± 10	3	120 ± 10	
BR7	Fucile	7,62 x 51 **	FJ/PB/HC1	9,8 ± 0,1	10,00 ± 0,5	820 ± 10	3	120 ± 10	
SG1	Fucile da caccia	Cal 12/70	Piombo <sup>3</sup>	31,0 ± 0,5	10,00 ± 0,5	420 ± 20	1	-	
SG2	Fucile da caccia	Cal 12/70	Piombo <sup>3</sup>	31,0 ± 0,5	10,00 ± 0,5	420 ± 20	3	12,5 ± 10	
* passo rigatura 178 mm ± 10 mm			FJ	Proiettile blindato					
** passo rigatura 254 mm ± 10 mm			FN	Proiettile con ogiva troncoconica					
1 Proiettile con blindatura di acciaio dolce			HC1	Nucleo in acciaio, massa 3,7 g ± 0,1 g, durezza > 63 HRC					
2 Proiettile con blindatura di lega di rame			PB	Proiettile appuntito					
3 Brenneke			RN	Proiettile con ogiva arrotondata					
L Piombo			SC	Nucleo tenero (piombo)					
CB Proiettile con ogiva di forma conica			SCP1	Proiettile blindato (tipo SS 109) con nucleo tenero (piombo) e penetratore di acciaio					

**Tab. 3.11** Classi di resistenza alle armi da fuoco in accordo con la UNI EN 1063:2001.

Fonte: [w].

## 4 PROVE DI FLESSIONE SU TRAVI IN VETRO: STUDIO SPERIMENTALE

---

Come analisi sperimentale sono state effettuate prove di flessione, conformemente alla UNI EN 1288-3, per tre diverse tipologie di vetro stratificato, sollecitate ciascuna attraverso un dispositivo di carico con ripartitore in due punti e con appoggi in due punti, in grado di trasferire il carico ai provini alla velocità costante indicata in normativa. Come obiettivo delle prove è stato registrato l'andamento in tempo reale del carico impresso e della deformazione dei provini, con determinazione del carico massimo sopportato dal materiale e della deformazione al momento della rottura.

### 4.1 *Provini e Materiali di prova*

Le tipologie di provini sottoposte alla prova di flessione sono le seguenti:

- Elemento in vetro stratificato ottenuto per laminazione con due strati di vetro temprato di spessore pari a 10 mm ciascuno, interconnessi per mezzo uno strato di SentryGlas di spessore pari a 1,52 mm. L'elemento ha dimensioni totali di 1500 x 150 x 21,52 mm;

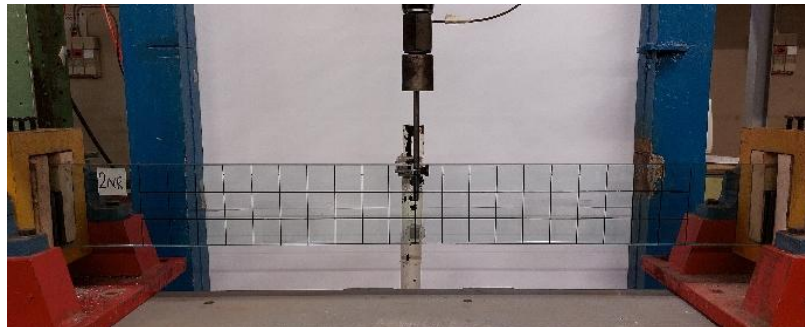


Fig. 4.1 Provino in vetro stratificato non rinforzato, indicato per semplicità con la sigla "NR".

- Elemento in vetro stratificato ottenuto per laminazione con due strati di vetro temprato di spessore pari a 10 mm, interconnessi per mezzo di una stratificazione che prevede due strati di SentryGlas di spessore pari a 1,52 mm ciascuno e rinforzato con una lamina di fibra di carbonio, spessa 1,27 mm, ottenuta con l'incollaggio di 3 tessuti (C-FRP) per tutta la sua larghezza e lunghezza, in posizione intermedia rispetto ai due strati di SentryGlas. L'elemento ha dimensioni totali di 1500 x 150 x 24,31 mm;



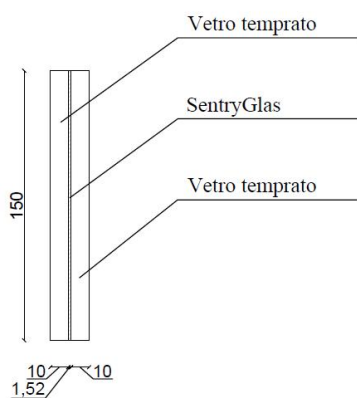
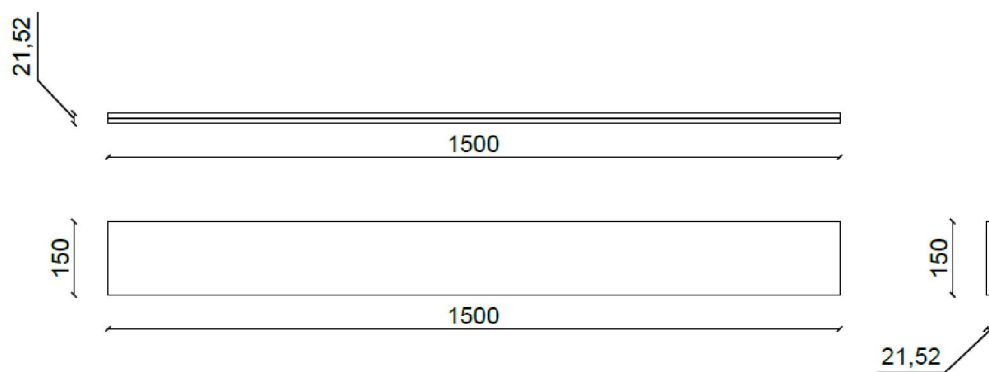
**Fig. 4.2** Provino in vetro stratificato rinforzato con lamina C-FRP, indicato per semplicità con la sigla “RL”.

- Elemento in vetro stratificato ottenuto per laminazione con due strati di vetro temprato di spessore pari a 10 mm, interconnessi per mezzo di uno strato di SentryGlas spesso 1,52 mm e rinforzato con una striscia di tessuto in fibra di carbonio (C-FRP), di larghezza pari allo spessore del provino, applicata sul bordo inferiore (mediante incollaggio a freddo con resina epossidica), le cui fibre sono tese durante la prova di flessione. L'elemento ha dimensioni totali di 1500 x 150 x 21,5 mm.

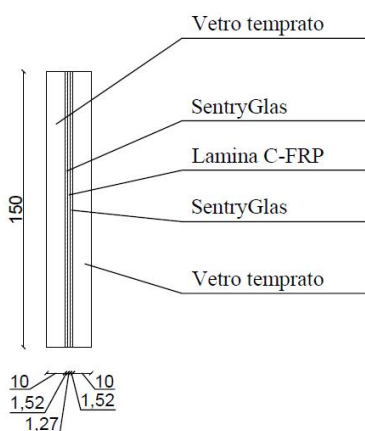
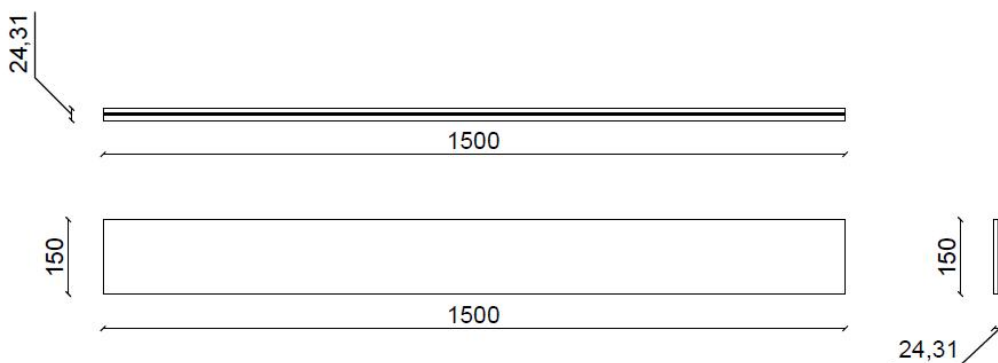


**Fig. 4.3** Provino in vetro stratificato rinforzato con tessuto C-FRP, indicato per semplicità con la sigla “RT”.

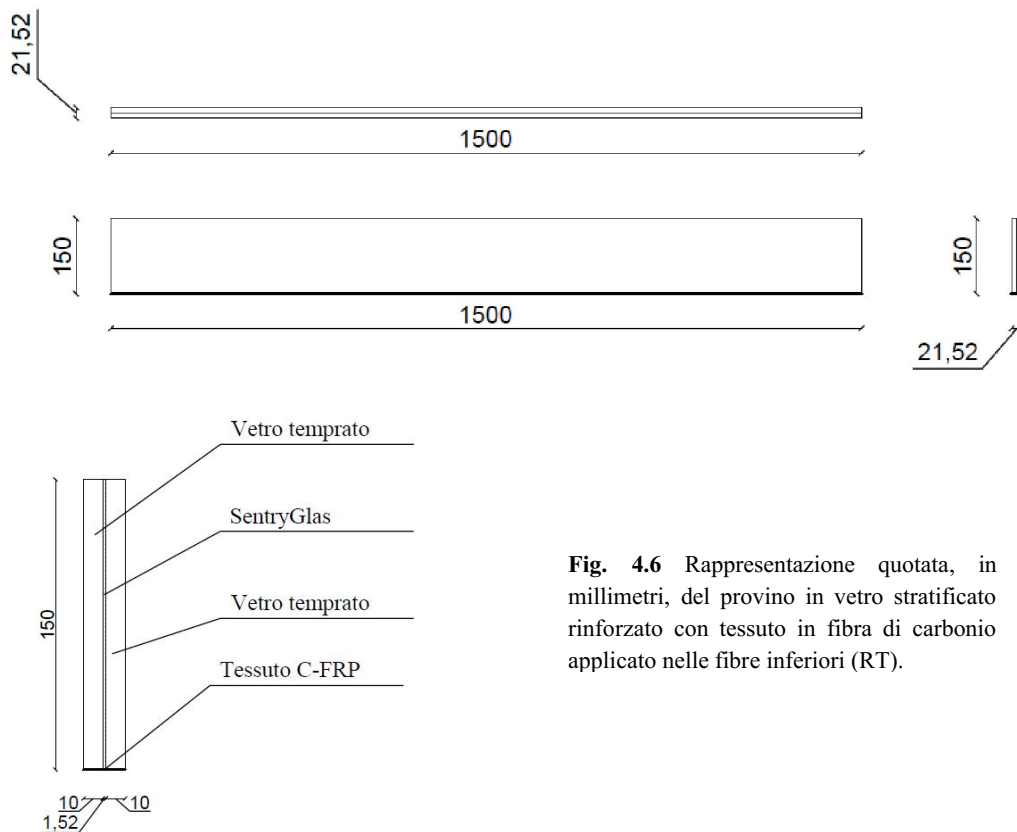
Per ogni tipologia di elemento sottoposto a prova sono stati previsti tre provini di pari dimensioni, ottenuti con lo stesso processo di laminazione ed eventualmente rinforzo, posizionati sul loro lato stretto per l'effettuazione della prova e sottoposti alla stessa velocità di impressione del carico, in modo che giungessero a rottura tutti nelle stesse condizioni. Viene in seguito fornita una rappresentazione CAD di ciascuna tipologia di provino.



**Fig. 4.4** Rappresentazione quotata, in millimetri, del provino in vetro stratificato non rinforzato (NR).



**Fig. 4.5** Rappresentazione quotata, in millimetri, del provino in vetro stratificato rinforzato con lamina in fibra di carbonio intermedia (RL).



**Fig. 4.6** Rappresentazione quotata, in millimetri, del provino in vetro stratificato rinforzato con tessuto in fibra di carbonio applicato nelle fibre inferiori (RT).

Vengono in questa sezione indicati i materiali necessari all'ottenimento dei provini sottoposti a flessione. Il vetro costituente questi ultimi è un vetro temprato, fornito dall'azienda *Novavetro srl*, i cui requisiti e parametri tecnici sono regolamentati a livello europeo tramite le specifiche UNI EN 12150-1:2019 e UNI EN 12150-2:2005, in merito ai vetri di sicurezza temprati termicamente - a cui si rimanda nella sezione bibliografica del presente elaborato - e dal CNR-DT 210:2013. I materiali utilizzati per laminazione del vetro e il successivo ottenimento dei provini vengono elencati in seguito.



○ SENTRYGLAS:

Il materiale di interstrato in oggetto è stato fornito dall'azienda *Kuraray Europe Italia srl*, la quale distribuisce il prodotto in rotoli o in fogli, con la possibilità di fornitura secondo lastre tagliate su misura; in ogni caso, il prodotto può essere richiesto con differenti spessori. Per l'effettuazione della prova è stato impiegato SentryGlas con spessore di 1,52 mm.

Caliper (mm) (mil)	Width (cm) (in) Ordered, -0 +7 mm (-0 +¼ in)	Length (cm) (in)
0.89 (35)	61-216 (24-85)	up to 600 (up to 236)
1,52 (60)	61-216 (24-85)	up to 600 (up to 236)
2,28 (90)	61-216 (24-85)	up to 600 (up to 236)
2,53 (100)	61-183 (24-72)	up to 600 (up to 236)
3,04 (120)	61-183 (24-72)	up to 600 (up to 236)

**Tab. 4.1** Dimensioni dei fogli SentryGlas disponibili dall'azienda produttrice.

Le caratteristiche di rigidità dell'intercalare (Modulo di Young, Modulo di taglio e Coefficiente di Poisson) hanno forte dipendenza dalle condizioni di temperatura e dalla durata del carico a cui è sottoposto. Vengono inoltre riportate le proprietà meccaniche tipiche dei materiali intercalari, tra i quali ricade anche il prodotto SentryGlas impiegato nelle prove.

Young's Modulus E MPa (psi)	Load Duration						
	1 s	3 s	1 min	1 h	1 day	1 mo	10 yrs
10 °C (50 °F)	692. (1.00 E+05)	681. (98745)	651. (94395)	597. (86565)	553. (80185)	499. (72355)	448. (64960)
20 °C (68 °F)	628. (91060)	612. (88740)	567. (82215)	493. (71485)	428. (62060)	330. (47850)	256. (37120)
24 °C (75 °F)	581. (84245)	561. (81345)	505. (73225)	416. (60320)	327. (47415)	217. (31465)	129. (18705)
30 °C (86 °F)	442. (64090)	413. (59885)	324. (46980)	178. (25810)	148. (21460)	34.7 (5032)	15.9 (2306)
40 °C (104 °F)	228. (33060)	187. (27115)	91.6 (13282)	27.8 (4031)	13.6 (1972)	9.86 (1430)	8.84 (1282)
50 °C (122 °F)	108. (15660)	78.8 (11426)	33.8 (84901)	12.6 (1827)	8.45 (1225)	6.54 (948.3)	6.00 (870)
60 °C (140 °F)	35.3 (5119)	24.5 (3553)	10.9 (1581)	5.10 (739.5)	3.87 (561.2)	3.24 (469.8)	2.91 (422)
70 °C (158 °F)	11.3 (1639)	8.78 (1273)	5.64 (817.8)	2.52 (365.4)	1.77 (256.7)	1.44 (208.8)	1.35 (195.8)
80 °C (176 °F)	4.65 (674.3)	3.96 (574.2)	2.49 (361.1)	0.96 (139.2)	0.75 (108.8)	0.63 (91.4)	0.54 (78.3)

**Tab. 4.2** Modulo di Young del prodotto SentryGlas in dipendenza di temperatura e durata del carico.

Shear Modulus G MPa (psi)		Load Duration						
		1 s	3 s	1 min	1 h	1 day	1 mo	10 yrs
Temperature	10 °C (50 °F)	240. (34800)	236. (34220)	225. (32625)	206. (29870)	190. (27550)	171. (24795)	153. (22185)
	20 °C (68 °F)	217. (31465)	211. (30595)	195. (28275)	169. (24505)	146. (21170)	112. (16240)	86.6 (12557)
	24 °C (75 °F)	200. (29000)	193. (27985)	173. (25085)	142. (20590)	111. (16095)	73.2 (10614)	43.3 (6279)
	30 °C (86 °F)	151. (21895)	141. (20445)	110. (15950)	59.9 (8686)	49.7 (7207)	11.6 (1682)	5.31 (770)
	40 °C (104 °F)	77.0 (11165)	63.0 (9135)	30.7 (4452)	9.28 (1346)	4.54 (658.3)	3.29 (477.1)	2.95 (427.8)
	50 °C (122 °F)	36.2 (5249)	26.4 (3828)	11.3 (1639)	4.20 (609)	2.82 (408.9)	2.18 (316.1)	2.00 (290)
	60 °C (140 °F)	11.8 (1711)	8.18 (1186)	3.64 (527.6)	1.70 (246.5)	1.29 (187.1)	1.08 (156.6)	0.97 (140.7)
	70 °C (158 °F)	3.77 (546.7)	2.93 (424.9)	1.88 (272.6)	0.84 (121.8)	0.59 (85.6)	0.48 (69.6)	0.45 (69.6)
	80 °C (176 °F)	1.55 (224.8)	1.32 (191.4)	0.83 (120.4)	0.32 (46.4)	0.25 (36.3)	0.21 (30.5)	0.18 (26.1)

Tab. 4.3 Modulo di taglio del prodotto SentryGlas in dipendenza di temperatura e durata del carico.

Poisson Ratio, $\nu$		Load Duration						
		1 s	3 s	1 min	1 h	1 day	1 mo	10 yrs
Temperature	10 °C (50 °F)	0.442	0.443	0.446	0.450	0.454	0.458	0.463
	20 °C (68 °F)	0.448	0.449	0.446	0.459	0.464	0.473	0.479
	24 °C (75.2 °F)	0.452	0.453	0.458	0.465	0.473	0.482	0.489
	30 °C (86 °F)	0.463	0.466	0.473	0.485	0.488	0.497	0.499
	40 °C (104 °F)	0.481	0.484	0.492	0.498	0.499	0.499	0.499
	50 °C (122 °F)	0.491	0.493	0.497	0.499	0.499	0.500	0.500
	60 °C (140 °F)	0.497	0.498	0.499	0.500	0.500	0.500	0.500
	70 °C (158 °F)	0.499	0.499	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
	80 °C (176 °F)	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500

Tab. 4.4 Coefficiente di Poisson del prodotto SentryGlas in dipendenza di temperatura e durata del carico.

Property	Units Metric (English)	Value	ASTM Test
Young's Modulus	Mpa (kpsi)	300 (43.5)	D5026
Tear Strength	MJ/m <sup>3</sup> (ft lb/in <sup>3</sup> )	50 (604)	D638
Tensile Strength	Mpa (kpsi)	34.5 (5.0)	D638
Elongation	% (%)	400 (400)	D638
Density	g/cm <sup>3</sup> (lb/in <sup>3</sup> )	0.95 (0.0343)	D792
Flex Modulus 23 °C (73 °F)	Mpa (kpsi)	345 (50)	D790
Heat Deflection Temperature (HDT)@0.46 MPa	°C (°F)	43 (110)	D648
Melting Point	°C (°F)	94 (201)	(DSC)
Coeff. of Thermal Expansion (-20 °C to 32 °C)	10-3 cm/cm °C (mils/in °C)	10 - 15 (0.10 - 0.15)	D696
Thermal Conductivity	W/M-K (BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> °F)	0.246 (1.71)	

Tab. 4.5 Proprietà tipiche dei materiali intercalari.

○ C-FRP:

Il materiale in questione è un tessuto in fibra di carbonio unidirezionale, fornito da *Seico Compositi srl* in nastri, identificati come UD/HM 300 all'interno del catalogo dei prodotti dell'azienda produttrice stessa. Il tessuto C-FRP è prodotto per rinforzi strutturali, con una grammatura di 300 g/mq ed è coperto da Certificato di Valutazione Tecnica (CVT) n° 350/1750C. Sono riportati i dettagli della scheda tecnica del prodotto.

Caratteristica	NASTRO UD/HM 300
Denominazione del sistema di rinforzo in accordo a CVT N° 73/2019	CB300UDHM
Classe di appartenenza secondo DPCS LL.PP. n.220 del 09.07.2015	350/1750 C
Modulo elastico del laminato riferito all'area netta fibre (Valore tabellare)	350 GPa
Resistenza del laminato riferita all'area netta fibre (Valore tabellare)	1750 MPa
Tipo di fibra	Carbonio ad alta resistenza HT- HR 40
Tipo di tessuto	Tessuto unidirezionale
Densità della fibra $\rho_{fb}$	1,82 g/m <sup>2</sup>
Peso del tessuto secco	300 g/m <sup>2</sup>
Spessore equivalente	0,165 mm
Area resistente per unità di larghezza	165 mm <sup>2</sup> /m
Resistenza meccanica a trazione	4600 MPa
Carico massimo per unità di larghezza	> 700 kN/m
Modulo elastico	390 GPa
Allungamento a rottura	1,2 %

Tab. 4.6 Specifiche tecniche del nastro UD/HM 300 dichiarate dal produttore.

Caratteristica	Sistema CB300UDHM	Norma riferimento
Modulo elastico del laminato riferito all'area netta fibre $E_L$ (valore medio)	369 GPa (1 strato) 350 GPa (3 strati)	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferito all'area netta fibre $E_L$ (valore medio)	2530 MPa (1 strato) 2501 MPa (3 strati)	UNI EN 2561
Resistenza del laminato riferito all'area netta fibre $E_L$ (valore caratteristico)	1790 MPa (1 strato) 1986 MPa (3 strati)	UNI EN 2561
Deformazione a rottura $\epsilon_{fb}$	0,69 % (1 strato) 0,71 % (3 strati)	UNI EN 2561
Tipo di fibra	Carbonio ad alta resistenza	-
Aspetto	Tessuto unidirezionale	-
Densità delle fibre $\rho_{fb}$	1,82 g/m <sup>2</sup>	ISO 1183-1
Massa del tessuto per unità di area $\rho_s$	300 g/m <sup>2</sup>	ISO 3374
Densità della resina $\rho_m$	1,065 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1675
Area equivalente del tessuto secco $A_{it}$	165 mm <sup>2</sup> /m	UNI EN 2561
Spessore equivalente del tessuto secco $t_{eq}$	0,165 mm	UNI EN 2561
Frazione in peso delle fibre nel composito %	54,4 % (1 strato)	Metodo Interno
Frazione in volume delle fibre nel composito %	28,0 % (1 strato)	Metodo Interno
Temperatura di transizione vetrosa della resina di impregnazione $T_g$ [°C]	+ 53°C	UNI EN 12614
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo [°C]	-15/ +38°C	Da calcolo: CNR-DT-200- R1/2013
Temperature di applicazione del sistema	+5/ +35°C	Metodo Interno
Resistenza a l fuoco	npd	EN 13501
Reazione al fuoco	npd	EN 13501

Tab. 4.7 Specifiche tecniche dei sistemi CB300UDHM.

○ ADESIVO EPOSSIDICO:

L'adesivo epossidico, fornito da *3M Italia srl* è stato utilizzato per l'incollaggio dei tessuti C-FRP ai bordi della trave stratificata di vetro, per l'ottenimento della terza tipologia di provini indicata in precedenza. Il prodotto in oggetto è una resina adesiva bicomponente, indicato dall'azienda produttrice come Scotch-Weld™ DP490, e offre un legame forte e duraturo, un'eccellente resistenza al calore e alle condizioni ambientali, a temperature fino a 120°C. Tale adesivo è inoltre altamente resistente agli impatti ed estremamente stabile in presenza di carichi statici e dinamici, oltre ad avere una buona resistenza e durata nel tempo. Sono riportate in seguito le specifiche tecniche fornite dall'azienda produttrice.

Applicazioni	Incollaggio dei metalli, Incollaggio di materiali compositi, Incollaggio strutturale, Incollaggio di compositi, Incollaggio di alluminio, Resistenti agli urti
Colore prodotto	Nero
Dimensioni contenitore (sistema metrico)	50 Millilitre, 54 litri, 400 Millilitre
Temperatura massima di applicazione (Celsius)	120 °C
Temperatura minima di applicazione (Celsius)	-55 °C
Tempo di polimerizzazione completa	7 Days @ 72 F (22 C)
Tipo di Adesivo	Epossido, Epossidico componente B, Epossidico componente A
Tipo di prodotto	adesivo epossidico
Volume	50 mL, 18 L

**Tab. 4.8** Specifiche tecniche dell'adesivo epossidico 3M™ Scotch-Weld™ DP490.

## 4.2 Set-up di prova

L'allestimento della prova di flessione prevede la disposizione dei provini sui due punti di appoggio, rappresentativi di vincoli a cerniera, posti a distanza determinata pari a 1400 mm ( $L_s$ ) e il posizionamento di un ripartitore di carico al di sopra di essi, in maniera centrata, il quale permette di applicare la forza in due punti, posti a distanza pari a 300 mm ( $L_b$ ).

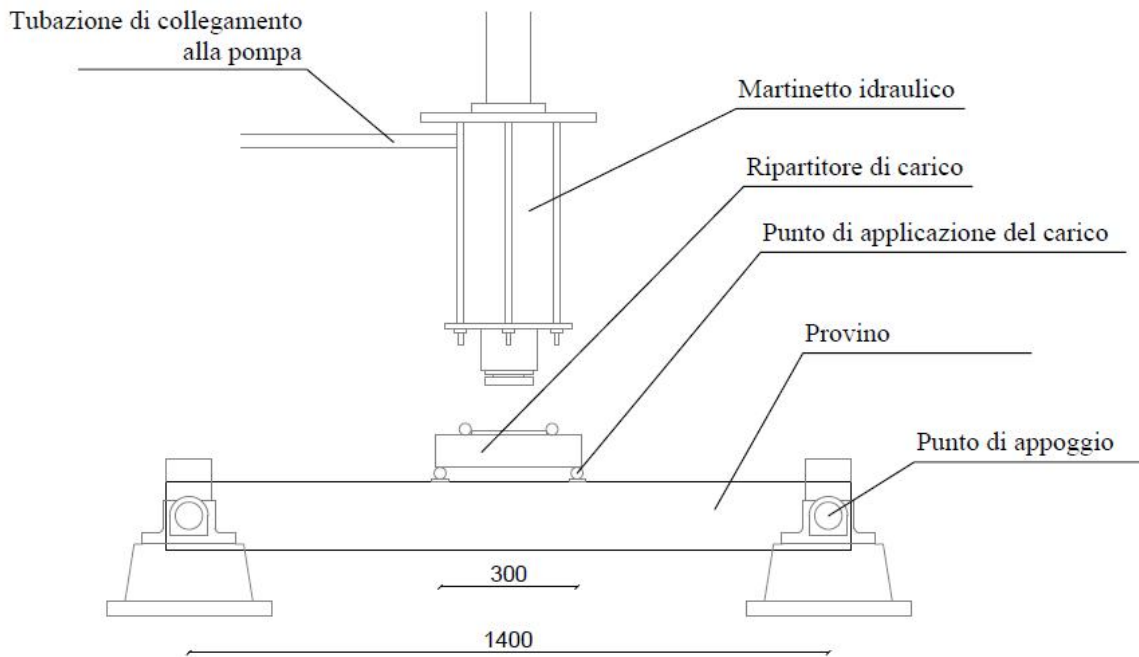


Fig. 4.7 Rappresentazione CAD del set-up di prova per un generico provino.

Il carico è impresso per mezzo di due martinetti idraulici, applicati al ripartitore di carico, prodotti da *ENERPAC*. Ciò che caratterizza il loro funzionamento è la loro capacità di carico. In particolare, durante la prova, è stato utilizzato un martinetto con capacità di 10 tonnellate per la rottura dei provini in vetro non rinforzato, mentre un martinetto con capacità di 50 tonnellate per la rottura delle altre due tipologie di provini (Fig. 3.15).



**Fig. 4.8** Martinetto idraulico *ENERPAC* (capacità di 50 tonnellate) utilizzato nella prova.

Il martinetto è azionato da una pompa idraulica manuale *ENERPAC*, tramite una tubazione di collegamento. La pompa è caratterizzata da una pressione nominale di esercizio di 500 bar, da una pressione massima pari a 700 bar e da una quantità di fluido (olio) utilizzabile pari a 2200 cm<sup>3</sup> (Fig. 3.16).



**Fig. 4.9** Pompa idraulica *ENERPAC* (500 bar) utilizzata nella prova.

Durante la prova vengono registrate le deformazioni di inflessione dei provini, attraverso un trasduttore di spostamento induttivo (detto anche LVDT), ovvero un dispositivo elettromagnetico capace di misurare spostamenti lineari di piccola entità, fino ad un massimo di 50 mm; viene inoltre monitorato l'andamento delle pressioni applicate dalla pompa attraverso un ulteriore trasduttore, prodotto da *Aep Transducers Srl*, caratterizzato da una pressione nominale di 10 tonnellate. I dati registrati sono stati acquisiti con il software DAQ SPIDER 8, mentre sono stati elaborati per mezzo del software DAQ CATMAN, entrambi prodotti di *HBM Italia srl*.

### 4.3 Risultati e discussione

Attraverso l'acquisizione e l'elaborazione dei dati rilevati durante le prove di flessione è stato possibile generare (in Excel) i grafici Forza-Spostamento relativi a tutti i provini portati a rottura. Tali grafici individuano il legame costitutivo del materiale testato, ovvero la relazione tra lo stato di sollecitazione e quello di deformazione per flessione del vetro stratificato, oggetto di studio, in modo da rendere leggibile la prestazione in termini di resistenza a flessione e, soprattutto, da confrontare la prestazione delle tre tipologie di travi sottoposte alla prova sperimentale. A questo scopo, vengono riportati tre grafici relativi a ognuna delle tipologie di provini, ciascuno contenente la curva F- $\delta$  corrispondente ad ogni provino. Ogni grafico contiene, per ogni provino, una linea di tendenza dell'andamento F- $\delta$ , ovvero una retta che approssima l'andamento delle curve ottenute sperimentalmente in un andamento lineare, rappresentativo del comportamento elastico lineare (fino a rottura) del materiale. Per ogni linea di tendenza è riportata la relativa equazione, il cui coefficiente angolare rappresenta la rigidezza a flessione ( $\alpha$ ) del provino a cui si riferisce.

#### GRAFICI RELATIVI AI PROVINI NON RINFORZATI (NR)

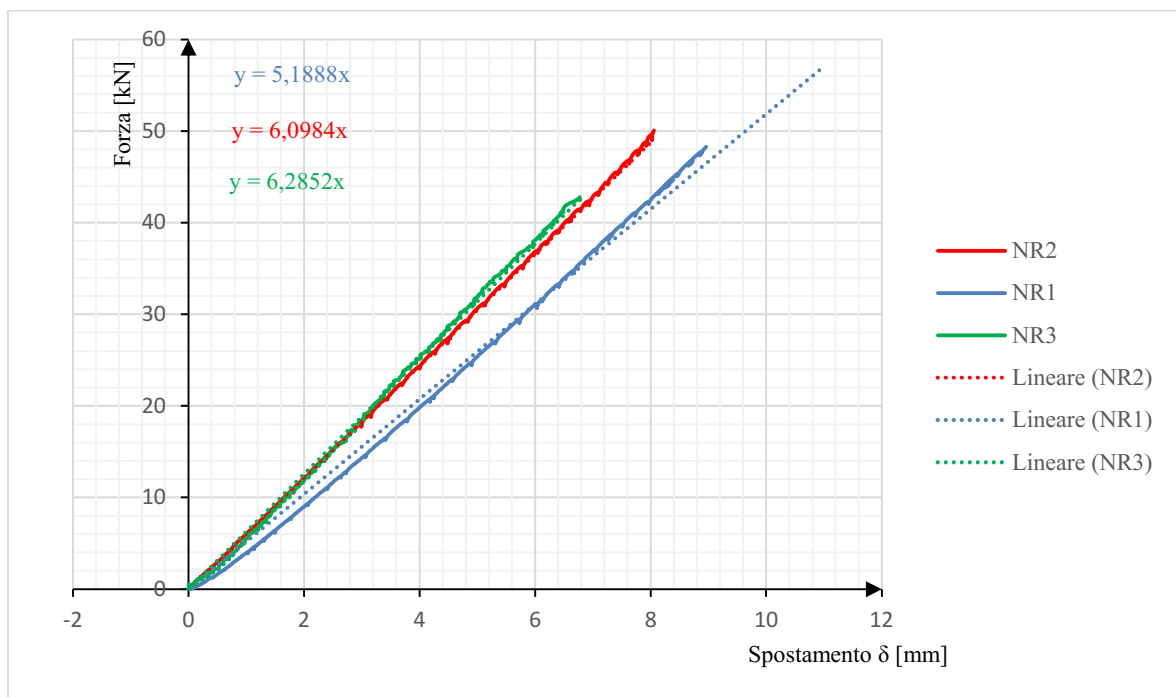


Fig. 4.10 Curve F- $\delta$  per provini di vetro stratificato non rinforzati.

Le curve relative ai provini non rinforzati sono state utilizzate come riferimento per la valutazione dell'efficacia dei rinforzi strutturali su cui si è basato lo studio sperimentale. Gli andamenti riportano relazioni pressoché lineari, approssimati molto bene dalle linee di tendenza indicate. Infatti, i provini si sono rotti in maniera fragile, in corrispondenza di valori di Forza dell'ordine di 50 kN, e di valori di Spostamento dell'ordine di 8-9 mm. Il comportamento del provino NR3 (in verde nel grafico) si discosta da quello degli altri due, in quanto il materiale è giunto a rottura con la frantumazione di uno solo dei due vetri componenti. Questo sta ad indicare che il carico impresso è stato assorbito solo da esso, che era quindi l'unico a fornire un contributo resistente significativo; di conseguenza, il carico massimo sopportato globalmente dall'elemento stratificato è risultato minore. La rottura di uno solo dei due strati di vetro è avvenuta per un'eccentricità del carico, data presumibilmente da una scorretta laminazione, la quale può aver causato irregolarità del bordo dell'elemento o della superficie di adesione tra le lastre e il SentryGlas, oppure da errori di set-up, per i quali il martinetto potrebbe non essere stato centrato adeguatamente. Un'altra spiegazione plausibile potrebbe essere la differenza di resistenza intrinseca tra le due lastre di vetro componenti lo stesso elemento, come effetto della presenza di cricche interne, che di fatto rappresentano un aspetto di natura imprevedibile: ciò dà indice, inoltre, della ridondanza di sezione che caratterizza le strutture in vetro stratificato (Cap. 2.4): una volta raggiunta la rottura di una lastra, quella ancora integra avrebbe concorso ad assorbire un'ulteriore aliquota di carico, fino alla sua rottura.

In ogni caso, la rottura dei provini utilizzati nella sperimentazione è stata coerente con quanto previsto per elementi in vetro stratificato: lo strato di SentryGlas ha mantenuto i frammenti delle lastre nella loro sede, a meno di una piccola quantità di schegge, proiettate verso l'ambiente di prova a gran velocità.



**Fig. 4.11** Rottura del provino NR3.



## GRAFICI RELATIVI AI PROVINI RINFORZATI CON LAMINA IN C-FRP (RL):

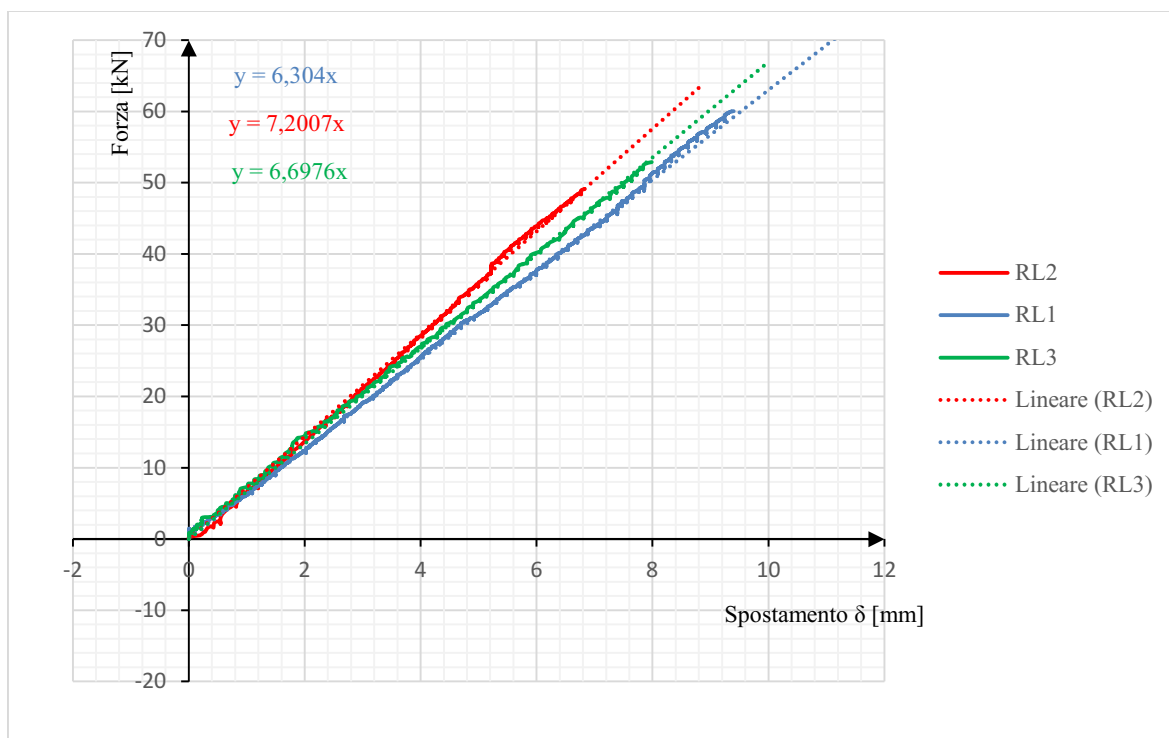
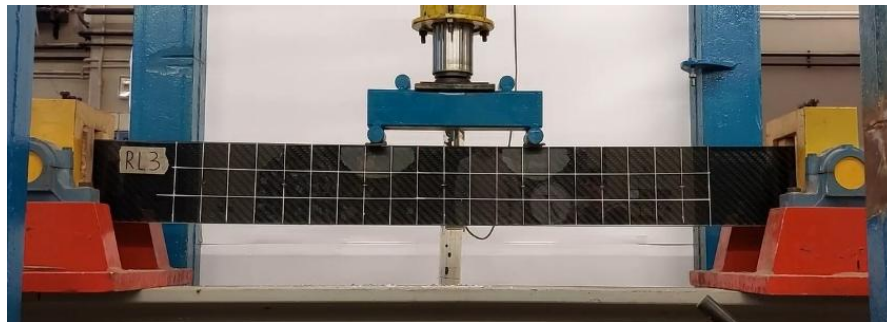


Fig. 4.12 Curve F- $\delta$  per provini di vetro stratificato rinforzati con lamina C-FRP intermedia.

Le curve relative ai provini rinforzati con lamina intermedia mostrano chiaramente un miglioramento della capacità resistente del materiale, rispetto ai provini non rinforzati in alcun modo, in quanto la rottura, sempre avvenuta in maniera fragile una volta superato il limite elastico, si è verificata per valori più elevati del carico (55÷60 kN), mantenendo circa la stessa capacità deformativa (intorno a 8÷10 mm). Sulla base di questi dati si deduce che il materiale è risultato globalmente più rigido rispetto ai provini non rinforzati, come è mostrato anche dalla pendenza delle linee di tendenza riportate nel grafico, le quali sono caratterizzate, appunto, da coefficienti angolari maggiori. Questo risultato è indice del buon comportamento della lamina in fibra di carbonio interna; essa è stata in grado di fornire un consistente contributo resistente a trazione, agendo come rinforzo per le fibre tese della trave, mentre gli strati di SentryGlas hanno concorso a trasferire adeguatamente gli sforzi di taglio tra una lastra di vetro e l'altra, comportando un'efficace collaborazione tra queste. Durante l'effettuazione della prova, tuttavia, si è potuta osservare una perdita di adesione del SentryGlas alle lastre di vetro, all'aumentare del carico, verificatasi in corrispondenza dei punti di applicazione del carico, visibile per mezzo di aloni di colore più chiaro sulla superficie della trave inflessa (Fig. 3.20).

Particolare attenzione va posta alla curva relativa al provino RL2 (in rosso nel grafico), la quale mostra una rottura per valori del carico prossimi a quelli relativi ai provini non rinforzati. Questo deriva dal fatto che la rottura è avvenuta solamente in una lastra di vetro per effetto di una scorretta distribuzione del carico, come nel caso del provino NR3 (precedentemente analizzato). Tuttavia, il carico massimo sopportato dal provino RL2 risulta maggiore di quello del provino NR3, che si è rotto in maniera analoga; per cui si deduce che, a fronte di una scorretta ripartizione del carico, il rinforzo strutturale in fibra di carbonio conduce comunque a effetti benefici sulla resistenza del materiale.

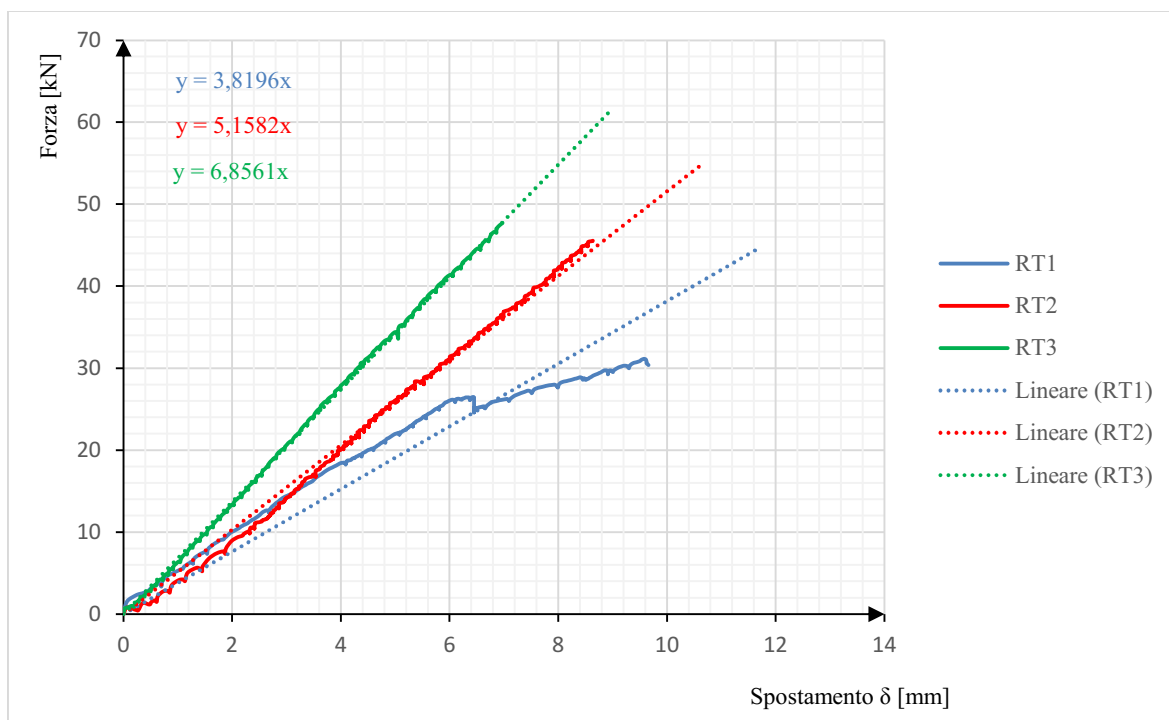


**Fig. 4.13** Condizione deformativa del provino RL3 un attimo prima della rottura: sono ben visibili, al di sotto dei punti di applicazione del carico, gli aloni di colore più chiaro in cui vi è perdita di adesione tra la lastra di vetro e lo strato di SentryGlas.



**Fig. 4.14** Rottura del provino RL3.

## GRAFICI RELATIVI AI PROVINI RINFORZATI CON TESSUTO C-FRP (RT):



**Fig. 4.15** Curve F- $\delta$  per provini di vetro stratificato rinforzati nel bordo inferiore con tessuto C-FRP.

Le curve in questione mostrano rotture fragili del materiale per valori del carico molto prossimi a quelli registrati nel caso delle travi non rinforzate (circa 45 kN), mentre la capacità deformativa è risultata abbastanza variabile (7-9 mm circa). Da tali dati è possibile constatare che il materiale rinforzato secondo questa tecnologia non ha verificato particolari incrementi di rigidezza, né di resistenza alla flessione, rispetto al caso base; al contrario, si è riscontrata quasi un peggioramento di tali proprietà. Questo risultato può essere giustificato con lo scorretto comportamento del tessuto in fibra di carbonio: il materiale composito non è stato in grado di distribuire lo stato di sollecitazione in maniera omogenea tra tutti i componenti. Infatti, il tessuto C-FRP non ha presentato particolari segni di stiramento, che sarebbero conseguiti ad una corretta azione di rinforzo a trazione nei confronti delle fibre maggiormente tese della trave. Si è dedotto, quindi, che il vetro si è comportato indipendentemente dal rinforzo, portando, di fatto, agli stessi risultati ottenuti per le travi in vetro non rinforzato.

Per quanto riguarda il provino RT1, la curva F- $\delta$  registrata mostra un andamento molto più irregolare rispetto agli altri due provini di tipologia RT, verificando una diminuzione istantanea del carico prima della rottura, ad un valore di circa 26 kN, a causa di fenomeni torcenti generati durante la prova per effetto di eccentricità del carico.



**Fig. 4.16** Rottura del provino RT2.

Allo scopo di fornire un termine di paragone tra i risultati ottenuti durante le prove di flessione effettuate, in modo da poter distinguere chiaramente e direttamente le prestazioni meccaniche individuate per ogni tecnologia strutturale analizzata, viene riportata, per tutti i provini testati, una tabella contenete i valori di interesse, quali:

- Spostamento verticale dell'elemento registrato nell'istante di rottura;
- Forza massima sopportata dal provino;
- Rigidezza del provino, ottenuta per mezzo della pendenza delle linee di tendenza riportate nelle curve  $F-\delta$ ;
- Tensione massima del provino, ottenuta per mezzo dell'equazione [8] (Cap. 3.1.2), trascurando l'aliquota di tensione  $\sigma_{bG}$  dovuta al peso proprio del provino e assumendo  $k=1$ , conformemente alla UNI EN 1288-1, in quanto si considera che la rottura del provino avviene in maniera generalizzata e non includendo solo le fratture di bordo;
- Valori medi di tutte le grandezze ottenute, per tutte le tipologie di provini.

	Spostamento a rottura [mm]		Forza massima [kN]		Rigidezza $\alpha$ [kN/mm]		$\sigma_{bB}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
<i>NR1</i>	8,96	7,93 (medio)	48,31	47,07 (medio)	5,19	5,86 (medio)	164,62	160,39 (medio)
<i>NR2</i>	8,07		50,09		6,10		170,69	
<i>NR3</i>	6,77		42,81		6,29		145,87	
<i>RL1</i>	9,40	8,07 (medio)	60,04	54,03 (medio)	6,30	6,73 (medio)	181,11	162,98 (medio)
<i>RL2</i>	6,825		49,13		7,20		148,21	
<i>RL3</i>	7,98		52,91		6,70		159,62	
<i>RT1</i>	9,66	8,42 (medio)	31,14	41,47 (medio)	3,82	5,28 (medio)	106,13	141,34 (medio)
<i>RT2</i>	8,63		45,56		5,16		155,25	
<i>RT3</i>	6,975		47,72		6,86		162,63	

**Tab. 4.9** Confronto dei valori ottenuti sperimentalmente.

## 5 CONCLUSIONI

---

Il presente elaborato ha avuto lo scopo di fornire in primo luogo le conoscenze di base sul vetro, come materiale innovativo in uso edilizio, caratterizzandone gli aspetti principali, le proprietà fondamentali e le possibilità di impiego; in secondo luogo, è stata riportata la valutazione delle proprietà meccaniche associate alle diverse tecnologie possibili con cui i vetri, e in particolare i vetri stratificati, possono essere costituiti. Come risulta da evidenze sperimentali indirette, riportate nella sezione bibliografica in seguito, la laminazione del vetro per mezzo di intercalari e altri materiali di rinforzo risulta vantaggiosa per la stabilità e la sicurezza delle strutture edilizie, anche portanti, e permette un'efficace progettazione delle stesse, anche se questa necessita pur sempre un'attenzione maggiore, rispetto al caso di utilizzo di materiali tradizionali. È stato chiarito come, a partire dalla natura dei vetri componenti gli elementi stratificati, processi di tempra o indurimento conducano a prestazioni di resistenza maggiori rispetto all'utilizzo di vetri normalmente ricotti; per quanto riguarda i materiali di interstrato, invece, è stato evidenziato come le loro proprietà meccaniche e fisiche (di adesione) incidano sul comportamento dell'intero materiale composito: un'elevata capacità adesiva, infatti, permette al materiale stratificato di lavorare in maniera più omogenea, con conseguente incremento della resistenza globale.

Da evidenze sperimentali dirette si è inoltre dedotto come determinate tecnologie di rinforzo strutturale agiscano sulla resistenza di elementi in vetro stratificato. Ciò che ci si aspettava era un miglioramento della prestazione meccanica delle travi rinforzate, sia tramite una lamina intermedia in fibra di carbonio, che attraverso un rinforzo in fibra di carbonio lungo le fibre più tese, in quanto entrambe le tecnologie avrebbero dovuto incidere incrementando la resistenza a trazione. Quanto invece è risultato è che l'unico rinforzo strutturale effettivamente funzionante riguarda la tipologia di provini RL (rinforzati con lamina), mentre, a causa di una scarsa collaborazione tra i materiali componenti, le travi rinforzate mediante tessuto in C-FRP solamente all'intradosso non riscontrano miglioramenti sulla capacità flessionale globale. Una soluzione a tale problema potrebbe essere l'impiego di tessuti di rinforzo che subiscano una pre-tensione, in modo da indurre sull'elemento uno stato di compressione pre-impostato (o pre-compressione), così che esso possa aumentare la sua resistenza a trazione una volta sottoposto al carico. In ogni caso, ci si augura un ulteriore sviluppo nell'individuazione di tecnologie adatte a verificare e certificare l'adeguatezza e la sicurezza strutturale del vetro come nuovo e vantaggioso materiale da costruzione.

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

---

- [1] Achintha Mithila. “*Sustainability of glass in construction*” - Sustainability of construction materials. Woodhead Publishing. (2016).
- [2] ASTM E 1300. “*Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings*”. ASTM International. (2004)
- [3] Bianchi Dario, Rigazzi Leonardo. “*Vetro strutturale*”. Università degli studi dell’Aquila, Facoltà di Ingegneria. (2015).
- [4] Blandini Lucio, Froli Maurizio, and Lani Leonardo. “*Sviluppi recenti delle costruzioni in vetro strutturale e acciaio*”. Costruzioni Metalliche 4 (2006).
- [5] Cagnacci Emanuele, Orlando Maurizio, and Spinelli Paolo. “*Il vetro strutturale – parte I*” (2016).
- [6] Cagnacci Emanuele, Orlando Maurizio, and Spinelli Paolo. “*Il vetro strutturale – parte II*” (2016).
- [7] CNR-DT 210:2013. “*Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro*”. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni. (2013).
- [8] De Gaetano Sergio. “*Costruire trasparente e resistente*”. Modulo 314. (2005).
- [9] O’Regan C. “*Structural use of glass in buildings*”. Seconda edizione. Institution of Structural Engineers. (2015).
- [10] Palumbo Michel, Plizzari Giovanni A., and Tempesti Ezio. “*Applicazione strutturale del vetro multistrato*”. (1997).
- [11] Redazione The Plan. “*3XN Architects, cube berlin, una scultura in vetro a Europacity, Berlino, Germania*”. (2021).
- [12] Schittich Christian, Staib Gerald, Balkow Dieter, Schuler Matthias, Sobek Werner. “*Atlante del vetro*”. UTET Torino. (1999).
- [13] Tattoni Sergio, Cossu Gian Piero, and Fenu Luigi. “*L’impiego strutturale del vetro*”. Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Dipartimento di Architettura. (2007).

- [14] Tonella Elisabetta, *“Il vetro strutturale: Risposta di elementi stratificati inflessi e prove di indentazione”*. Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale. (2010).
- [15] UNI EN 1063:2001. *“Vetrature di sicurezza: Classificazione e prove di resistenza ai proiettili”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2001).
- [16] UNI EN 12150-1:2019. *“Vetro per edilizia – vetro di silicato sodo-calcico di sicurezza temprato termicamente – parte 1: Definizione e descrizione”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2019).
- [17] UNI EN 12150-2:2005. *“Vetro per edilizia – vetro di silicato sodo-calcico di sicurezza temprato termicamente – parte 2: Valutazione di conformità/Norma di prodotto”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2005).
- [18] UNI EN 12600:2004. *“Prova del pendolo: Metodo della prova di impatto e classificazione per il vetro piano”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2004).
- [19] UNI EN 1288-1:2001. *“Determinazione della resistenza a flessione del vetro, Principi fondamentali delle prove sul vetro”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2001).
- [20] UNI EN 1288-2:2001. *“Determinazione della resistenza a flessione del vetro, Prova con doppi anelli concentrici su provini piani, su grandi superfici sollecitate”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2001).
- [21] UNI EN 1288-3:2001. *“Determinazione della resistenza a flessione del vetro, Prova con provino supportato in due punti (flessione in quattro punti)”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2001).
- [22] UNI EN 1288-5:2001. *“Determinazione della resistenza a flessione del vetro, Prova con doppi anelli concentrici su provini piani, su piccole superfici sollecitate”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2001).
- [23] UNI EN 13541:2012. *“Vetrature di sicurezza: Prove e classificazione della resistenza alla pressione causata da esplosioni”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2012).
- [24] UNI EN 356:2002. *“Vetro di sicurezza: Prove e classificazione di resistenza contro l’attacco manuale”*. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milano (2002).

- [a] <https://vitrumlife.it/conosciamo-il-vetro-strutturale/>
- [b] <https://www.pologlass.it/vetro-come-elemento-strutturale/>
- [c] <https://www.pologlass.it/vetro-portante/>
- [d] <https://vitrumsapiens.com/article/vetro-e-proprietà-meccaniche>
- [e] <https://vitrumsapiens.com/article/vetro-stratificato-ed-intercalare>
- [f] <https://vitrumsapiens.com/article/comportamento-post-rottura>
- [g] <https://vitrumsapiens.com/article/classificazione-dei-vetri>
- [h] <https://vitrumsapiens.com/article/principi-general-di-progettazione>
- [i] [http://latex.codecogs.com/gif.latex?\fn\\_jvn&space;\large&space;\sigma\\_{MAX}\leq&space;e;f\\_{g,d}\{g,d\}](http://latex.codecogs.com/gif.latex?\fn_jvn&space;\large&space;\sigma_{MAX}\leq&space;e;f_{g,d}\{g,d\})
- [j] <https://assovetro.it/il-vetro-materiale/#:~:text=Trasparenza%2C%20compattezza%20e%20omogeneità%20strutturale,un%20numero%20in%EF%AC%81nito%20di%20volte.>
- [k] [https://www.nicolli.it/wp-content/uploads/2021/12/Puntuali\\_5.jpg](https://www.nicolli.it/wp-content/uploads/2021/12/Puntuali_5.jpg)
- [l] [https://www.guardianglass.com/content/dam/guardianindustriesholdings/project/europe/project-hd-diamond66-climaguard-premium2-sn6234\\_de\\_berlin\\_cube-berlin%20\(3\).jpg.transform/rendition-1280-keep/img.jpg](https://www.guardianglass.com/content/dam/guardianindustriesholdings/project/europe/project-hd-diamond66-climaguard-premium2-sn6234_de_berlin_cube-berlin%20(3).jpg.transform/rendition-1280-keep/img.jpg)
- [m] [https://de.wikipedia.org/wiki/Cube\\_Berlin](https://de.wikipedia.org/wiki/Cube_Berlin)
- [n] [https://www.gmp.de/images/gmp\\_0449\\_0517\\_03\\_H\\_1777\\_011.jpg?w=828](https://www.gmp.de/images/gmp_0449_0517_03_H_1777_011.jpg?w=828)
- [o] [https://www.gmp.de/images/gmp\\_0449\\_0517\\_03\\_0449\\_L\\_1650\\_21.jpg?w=1280](https://www.gmp.de/images/gmp_0449_0517_03_0449_L_1650_21.jpg?w=1280)
- [p] [https://it.frwiki.wiki/wiki/Grand\\_Canyon\\_Skywalk#R%C3%A9alisation\\_technique](https://it.frwiki.wiki/wiki/Grand_Canyon_Skywalk#R%C3%A9alisation_technique)
- [q] <https://girouxglass.com/wp-content/uploads/Skywalk18.jpg>
- [r] <https://www.vetreriastudiovetro.it/it/Sagomatura#:~:text=La%20SAGOMATURA%20%20%20%20la%20particolare,anche%20di%20forma%20circolare%20o>
- [s] <https://www.vetromarca.com/>
- [t] <https://www.lanzettaaldo.it/wp-content/uploads/2020/02/tris-1200x720.jpg>
- [u] <https://www.sggglassmanufacturer.com/upfile/images/27/20161112085259650.jpg>
- [v] <http://materioteca.iuav.it/SitoRel0/vetro/ElementiStrutturali/schedeProgetto/PadiglioneRheinbachB.html>
- [w] [http://www.glassconsult.it/images/en1063\\_tabella.gif](http://www.glassconsult.it/images/en1063_tabella.gif)
- [x] <https://www.satinal.it/en/glass-interlayers-strato/>



## RINGRAZIAMENTI

---

Questa parte dell'elaborato vuole essere testimone delle figure professionali e non, indispensabili e di supporto per la sua stesura.

Primo fra tutti un riconoscimento va al relatore, il Professor Michele Serpilli, per aver fornito supporto professionale al lavoro di tesi, fornendo le basi di comprensione, analisi e competenza riguardo l'argomento e per aver sollecitato l'interesse in materia. Un ulteriore riconoscimento va agli studenti magistrali tesisti Alessio Donati e Luca Cartechini, per aver condiviso parte del materiale riguardante la loro analisi sperimentale, concernente all'argomento trattato dal presente elaborato.

Si ringraziano infine gli affetti.

Ilaria, che con tutte le nostre differenze continua ad essere la mia proiezione al futuro e io la sua impronta passata.

Aurora, perché la sua sensibilità e dolcezza ha per me rappresentato un rifugio dagli ostacoli e la sua determinazione ha sempre disinnescato la mia paura di affrontarli.

Maurizio, che con la sua esperienza e quiete critica, mi ha insegnato a discernere le scelte a me consone, da quelle inappropriate, al momento in cui io ero pronto a condurle.

Antonia, quinto anello della catena, perché la sua tenace creatività mi ha insegnato cos'è la passione e che l'impegno e i successi derivano esclusivamente da essa ed essa è l'unica ad appagare l'animo.

Grazie alle amicizie care, alcune delle quali indispensabili nella crescita personale e accademica.

In ultimo grazie a me, per la persona che sono diventato; mi affido il dovere di fare tesoro dei cambiamenti che mi coinvolgeranno in futuro.