

EN 16612 ed EN 16613

Il corpo normativo europeo del vetro per edilizia si arricchisce di due nuovi punti fermi. Il 5 dicembre 2019 è stata pubblicata sul sito ufficiale di UNI la coppia di norme UNI EN 16612 'Vetro per edilizia - Determinazione della resistenza delle lastre di vetro ai carichi laterali tramite metodi di calcolo' e la direttamente correlata UNI EN 16613 'Vetro per edilizia - Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza - Determinazione delle proprietà meccaniche dell'intercalare'.

di **Michel Palumbo**, progettista di strutture in vetro
michel.palumbo@vetrostrutturale.it



Dal 2013 i relativi progetti di norma circolavano sui tavoli dei progettisti e degli addetti del settore rappresentando un momento alto della progettazione del vetro stratificato, perché chiarivano in maniera limpida ed inequivocabile il fatto che il polimero di stratifica gioca un ruolo fondamentale nel comportamento del vetro multistrato e che le proprietà di quest'ultimo sono tutt'altro che costanti ed invariabili. Questo aspetto è già stato peraltro anticipato in due recenti articoli pubblicati da *Rivista del Vetro*: 'Progettare un parapetto in vetro' (*Rivista del Vetro* 6/18) e 'Una vetrina sul mondo' (*Rivista del Vetro* 2/19). A onor del vero bisogna ricordare che anche il CNR DT210:2013 permette di tenere conto della rigidità dell'intercalare nella progettazione di elementi in vetro multistrato per applicazioni strutturali.

Il punto di partenza di ogni considerazione relativa agli intercalari di stratifica parte dalla constatazione che tutti i polimeri organici presentano un comportamento meccanico (rigidità, duttilità, resistenza, durezza...) direttamente dipendente sia dal *tempo* che dalla *temperatura*. In prima istanza la differenza tra due polimeri dipende essenzialmente dalle temperature e dai tempi in corrispondenza dei quali il polimero subisce le sue transizioni. La Norma UNI EN 16613: 2019 definisce le modalità di caratterizzazione dei polimeri da stratifica in modo che il confronto tra i comportamenti di diversi intercalari avvenga 'a parità di condizioni'.

La Norma UNI EN 16612:2019, invece, oltre a riprendere le classificazioni degli intercalari di stratifica e le loro categorizzazioni riportate nella UNI EN 16613:2019 fornisce i criteri di progettazione di elementi non strutturali quali i tamponamenti, consentendo di definire un più favorevole calcolo della resistenza del vetro rispetto ai codici destinati alla progettazione di elementi in vetro con impiego strutturale. L'ambito di utilizzo è quello degli elementi in

vetro che abbiano una Classe di Conseguenza inferiore a CC1 (possiamo dire che fanno riferimento agli elementi in vetro in classe di conseguenza CC0). Ricordiamo sinteticamente che il concetto di Classe di Conseguenza è stato introdotto dall'Eurocodice EN 1990 'Basis of structural design', ripreso e reinterpretato dal CNR DT210. La scelta della Classe di Conseguenza è correlata al rischio del danno che la rottura del vetro può causare.

Infine, la UNI EN 16612 è ricca di informazioni per quanto riguarda stratificati e vetrocamere vincolati su tutti e quattro i lati in maniera continua, mentre risulta praticamente muta per tutte le altre condizioni di vincolo e rimanda quindi a soluzioni tecniche ad appannaggio dei progettisti specializzati.

È evidente che l'obiettivo di questa coppia di norme è quello di consentire una progettazione in linea con l'evoluzione tecnica e tecnologica che permetta, finalmente in via definitiva, di tenere conto delle caratteristiche meccaniche degli intercalari nella definizione del prodotto finale. Sarà interessante vedere come questa euronorma impatterà su Paesi quali Francia e Germania. Ricordiamo infatti che l'attuale normativa nazionale di questi Paesi è fortemente cautelativa e in molte situazioni non consente al progettista di prendere in considerazione il contributo dei polimeri di stratifica. Questa posizione risulta eccessivamente cautelativa, quasi come a imporre di 'andare piano in autostrada per non fare incidenti'. Nessuno pretende di trasformare l'autostrada in un autodromo, ma è inevitabile che esista un'ampia categoria di polimeri che sono in grado di elevare le performances dei vetri stratificati da cui non è giusto prescindere.

Una progettazione consapevole e l'utilizzo di materiali performanti può essere all'avanguardia anche nelle logiche ambientali così importanti per il periodo storico che stiamo vivendo: l'utilizzo di polimeri in famiglia 2 (secondo la UNI EN 16613) consente spesso

In apertura

Effetto della temperatura su un chewing-gum. Il polimero di stratifica può essere associato al chewing-gum: portato alla temperatura di circa 37°C diventa viscoso ed estremamente deformabile in maniera irreversibile

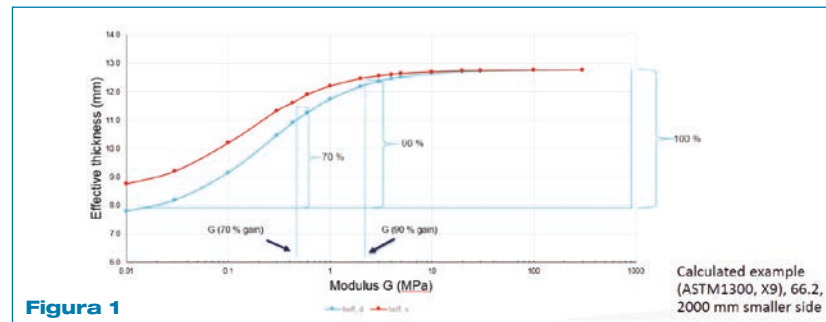


Figura 1 Effetto del modulo di taglio (G) di uno stratificato sul suo spessore equivalente. Sull'asse delle ordinate (Y) è riportato lo spessore equivalente di un 66.2 PVB al variare del modulo di taglio G del polimero utilizzato, riportato sull'asse delle ascisse (X). GPD 2017 - Effect of different sources of interlayer modulus data for glass design: the structural PVB case - Wim Stevels - Eastman Chemical Company

Figura 2a-2b Andamento degli sforzi stimati nella lastra più sollecitata al variare della temperatura in due simulazioni identiche per composizione stratigrafica, carico e sistema di vincolo. L'andamento degli sforzi nel vetro è molto simile, ma lo sforzo massimo raggiunto a $T = 40^{\circ}\text{C}$ è $s_{\text{max}} = 57,8 \text{ MPa}$ (Figura a), mentre lo sforzo massimo raggiunto a $T = 20^{\circ}\text{C}$ è $s_{\text{max}} = 33,4 \text{ MPa}$ (Figura b)

di ridurre gli spessori del vetro e quindi di avere un prodotto più leggero e contemporaneamente dotato di un'impronta ambientale minore rispetto allo stesso manufatto dimensionato senza tenere conto del contributo dell'intercalare polimerico. Ogni millimetro di spessore di vetro risparmiato si tramuta in chilogrammi di CO_2 in meno emessa in atmosfera non solo in fase di produzione, ma anche nelle operazioni di tempra o indurimento oltre che di trasporto.

La pubblicazione di queste norme in via definitiva non consente più alibi, non è quindi più possibile non sapere che il comportamento dello stesso oggetto cambia sensibilmente se ci si trova in un interno anziché un esterno esposto al sole oppure in inverno anziché in estate.

Il rischio da scongiurare è quanto avvenuto in passato quando ignorando la dipendenza degli intercalari dalla temperatura e dal tempo sono state accettate prove di laboratorio ottenute in condizioni controllate, e sono stati estesi arbitrariamente i risultati in ambiti di utilizzo assolutamente fuori portata.

In molti ambiti abbiamo detto (e continueremo a farlo!) che il PVB e i suoi derivati subiscono forti riduzioni di rigidità (anche di cento volte!) passando da 25°C a 35°C e questo è innegabile. Basta semplicemente osservare le curve del modulo elastico $E=E(T;t)$. La dipendenza della rigidità dal tempo e dalla temperatura è valida per tutti i tipi di intercalare anche se in modo diverso. Per gli intercalari cosiddetti ionomerici, la diminuzione di rigidità con l'aumento della temperatura è presente, ma con valori assoluti di rigidità comunque elevati. Per gli intercalari a base EVA ad alta densità e alto grado di reticolazione, l'andamento della curva del modulo elastico in funzione di tempo e temperatura risulta meno accentuata. Per questo

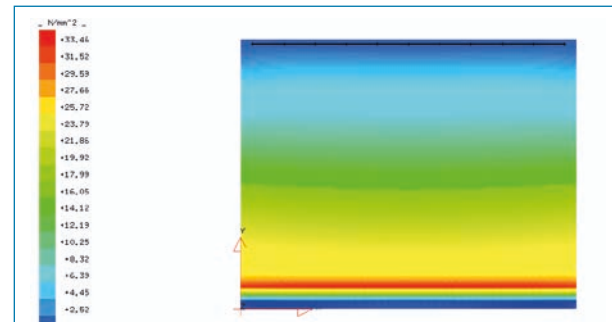


Figura 2a

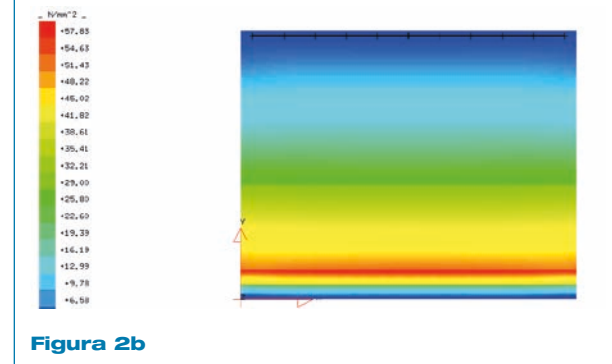


Figura 2b

motivo progettisti e operatori del settore possono avvalersi di configuratori di facile impiego come programvetro.it, che consentono di trovare la soluzione ottimale per la realizzazione di un vetro stratificato non solo in funzione dei carichi, ma anche della modalità d'uso, del plastico utilizzato e della temperatura di impiego.

Riportiamo per chiarezza il semplice esempio di un parapetto in vetro incastrato al piede, realizzato con un intercalare a base PVB: se testato a 20°C in laboratorio ha un comportamento meccanico enormemente differente rispetto a quello che avrebbe in estate (come l'ultima trascorsa, estate 2019) quando la temperatura ambiente può tranquillamente superare i 36°C . Il motivo è presto detto: il modulo di taglio tra 20°C e 35°C decade e quindi si riduce apprezzabilmente la capacità di trasferire i carichi esterni da una lastra all'altra (Figura 2).

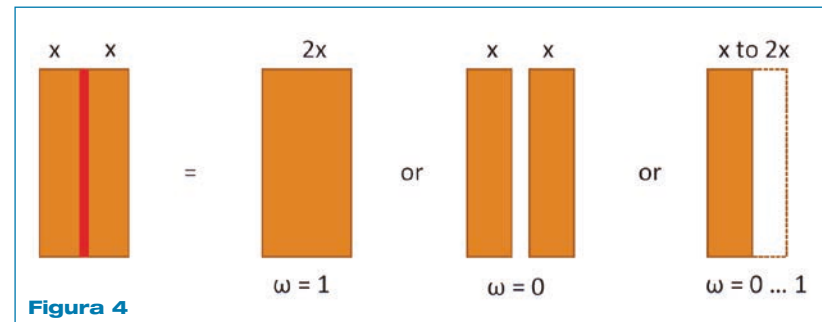
Per chiarire il concetto in maniera inequivocabile possiamo ricordare che il polimero ha lo stesso comportamento di un chewing-gum: se lo lasciamo in frigorifero (al freddo) è rigido e fragile, se invece lo abbiamo in tasca (al caldo) è evidente a tutti che sarà flessibile e duttile.

●●● IL RISCHIO DA SCONGIURARE È QUANTO AVVENUTO IN PASSATO QUANDO SI IGNORAVA LA DIPENDENZA DEGLI INTERCALARI DA TEMPERATURA E TEMPO ●●●

La letteratura [Engineering design of laminated safety glass considering the shear coupling: a review - J. Str. & Eng. 2019 - Vol. 4 Iss. 2 pp. 209-228 J. Kuntsche et. Al] dimostra che non è necessario raggiungere valori di modulo di taglio (G [MPa]) particolarmente elevati per avere un trasferimento completo degli sforzi tra una lastra di vetro e l'altra, ma nello stesso tempo al di sotto di certi valori le lastre possono intendersi disaccoppiate (Figura 1).

Se le lastre di vetro sono completamente accoppiate il momento di inerzia dello stratificato può intendersi equivalente a quello di un monolitico avente lo stesso spessore dello stratificato stesso. In questo caso il parametro che rappresenta tale accoppiamento h risulta $h(\eta)=1$. Se invece le lastre di vetro sono completamente disaccoppiate il parametro $h(\eta)=0$ e il momento di inerzia dello stratificato è pari alla semplice somma dei momenti di inerzia delle singole lastre, nulla di più. Per valori intermedi: $0 < h < 1$ le lastre sono parzialmente collaboranti, quindi solo un calcolo tecnico o il contributo di un configuratore meccanico per il vetro possono fornire risultati coerenti con la realtà. La UNI EN 16613:2019 oltre a definire le modalità di prova per caratterizzare i plastici di stratifica definisce tre grandi famiglie all'interno delle quali li categorizza:

- alla Famiglia 0 corrisponde un polimero non caratterizzato; il suo contributo nel trasmettere sforzi di taglio è da considerare nullo;
- alla Famiglia 1 appartengono tutti quei polimeri caratterizzati secondo la UNI EN 16613:2019, ma le cui caratteristiche meccaniche non risultino 'di punta'. In questo caso il contributo nel trasmettere sforzi di taglio tra le lastre di vetro viene preso in considerazione anche se nella maggior parte delle applicazioni risulta modesto;



• alla Famiglia 2 appartengono i polimeri caratterizzati secondo quanto previsto dalla norma stessa e la cui rigidità raggiunga opportune soglie (riportate nelle Tabelle 2 - 13). In questo caso si tiene conto di un contributo non trascurabile del polimero nel trasmettere le sollecitazioni di taglio tra vetri e quindi è possibile quasi sempre utilizzare vetri meno spessi di quanto si sarebbe costretti a fare utilizzando polimeri in Famiglia 0 o in Famiglia 1.

Il parametro da utilizzare nella progettazione semplificata proposta dalla UNI EN 16612:2019 è: w (omega) così come riportato nella Tabella D.3 della norma stessa. Se per i polimeri in Famiglia 0 $w = 0$ sempre, nel caso dei polimeri in Famiglia 1 si può avere un w al più = 0,1. Solo con la Famiglia 2 è possibile raggiungere valori di omega fino a 0,5 (alle nostre latitudini). Di fatto il metodo proposto è un metodo semplificato che, lavorando per famiglie, risulta essere abbastanza cautelativo e non è in grado di sfruttare al massimo le potenzialità dei polimeri di stratifica, quali che siano. Qualora non si intenda progettare adottando il metodo semplificato proposto dalla UNI EN 16612:2019 è possibile riferirsi ad altre modalità di calcolo che consentono di utilizzare a pieno le informazioni sugli intercalari di stratifica desumibili dalle caratterizzazioni prodotte secondo la UNI EN 16613:2019.

Determinare i limiti di progetto degli sforzi e delle frecce in presenza di carichi concentrati e carichi distribuiti richiede non solo la conoscenza delle due norme in oggetto, ma anche i valori dei carichi da applicare e le modalità con cui questi carichi vengono trasferiti dal mondo esterno al vetro a seconda della natura del vetro e dei vincoli.

Come anticipato, se l'appendice B della UNI EN 16612:2019 risulta essere esaustiva per quanto con-

Figura 4 Schematizzazione del significato del parametro omega (w) sullo spessore equivalente di uno stratificato - GPD 2017 - Effect of different sources of interlayer modulus data for glass design: the structural PVB case - Wim Stevels - Eastman Chemical Company

Figura 5 Esempio di realizzazione tipica eseguibile con un dimensionamento basato sulla UNI EN 16612:2019 - Vetrocamera a vista a tutta altezza in appoggio continuo sui quattro lati. Progetto Ing. Palumbo - Realizzazione Vetrostrutturale Srl



Figura 6 Esempio di realizzazione tipica eseguibile con un dimensionamento basato sulla UNI EN 16612:2019 - Vetro stratificato e vetro monolitico a tutta altezza con appoggi continui anche vetro-vetro su due o più lati. In questo caso non è stato possibile svolgere un calcolo tabellare secondo le appendici A, B e C e si è ricorsi alle regole della Scienza delle Costruzioni. Progetto Ing. M. Palumbo - Realizzazione Vetrostrutturale Srl



cerne i vetri in appoggio sui quattro lati, nulla è riportato per le altre (ben comuni) situazioni di vincolo. Per questo l'utilizzo di un configuratore, quale ad esempio Programmavetro, che sia in grado di integrare le regole previste da norme, leggi e regole della Scienza delle Costruzioni costituisce una via molto celere per risolvere in pochi minuti quello che con calcoli svolti 'a mano' richiederebbe ore di lavoro con tutte le difficoltà di reperire le chiavi in grado di dirimere le situazioni non codificate dalle norme.

Per concludere

Concludiamo sintetizzando i passi per una corretta progettazione.

Particolare attenzione deve essere posta ad un concetto fondamentale nella progettazione: la realtà prevale sull'aspetto formale.

Il cap. 9 della UNI 7697:2015 esplicitamente richiama il fatto che gli oggetti in vetro stratificato (strutturali o meno) devono essere progettati con i carichi previsti dalla legge e secondo le effettive condizioni di utilizzo. Facciamo un esempio; immaginiamo di dovere progettare dei parapetti per una terrazza di un hotel:

- 1) le NTC2018 ci indicano la categoria C4 per la definizione dei carichi antropici: $q = 3 \text{ kN/m}$;
- 2) la UNI 7697:2015 impone che se si utilizzano vetri temprati il polimero sia di tipo 'rigido' secondo la classificazione della prEN 16613:2013.

Richiamiamo il fatto che *questa condizione è necessaria ma non sufficiente* in virtù del fatto che la UNI 7697:2015 al capitolo 9 riporta esplicitamente la



necessità di progettare l'oggetto;

- 3) la prEN 16613:2013 riporta le soglie di rigidità per definire rigido un intercalare polimerico. Nel caso in oggetto si tratta di $E = 5 \text{ MPa}$ per una durata del carico di 5 minuti a 30°C ;
- 4) la EN16612:2019 riporta la resistenza del vetro da utilizzare come riferimento, se progettualmente si decide di ritenere il parapetto un elemento non strutturale da concepire come presidio di sicurezza ai sensi del CPR 305/2011.

A questo punto diventa fondamentale, nel dimensionare l'elemento composito (vetro + polimero) tenere conto del comportamento del polimero alle effettive temperature di utilizzo. La nota "b" Tabella 1 UNI EN 16613:2019 focalizza l'attenzione sul fatto che, a prescindere dalla famiglia di appartenenza, le temperature per le balaustre possono essere superiori a quanto riportato nella Tabella 1 stessa. Il progettista definisce se il polimero prescelto come intercalare è di tipo rigido secondo la UNI 7697:2015 in funzione delle Tabelle 1, 6 e 7 della prEN 16613:2013 ma poi, nel dimensionamento dello stratificato e nell'utilizzo delle rigidità degli intercalari di stratifica (determinate secondo la UNI EN 16613:2019) deve tenere conto che le temperature di utilizzo del manufatto possono essere apprezzabilmente superiori rispetto alle soglie tabellate per il discriminare della famiglia di appartenenza sia in virtù della temperatura ambiente, sia tenuto conto del fenomeno di irraggiamento cui i vetri possono essere/sono soggetti.

Per quanto riguarda invece le prove sperimentali, le



stesse vanno valutate con oculatezza.

Il nostro scetticismo verso il grande peso attribuito a volte alle prove sperimentali rispetto a un calcolo risiede nel fatto che i risultati delle prime non sono estensibili né per durate di carico superiori né per temperature diverse da quelle misurate in fase di prova. Spesso accade che il numero di prove effettuate per caratterizzare un prodotto commerciale risulti assolutamente esiguo e non significativo dal punto di vista statistico. Non di rado si vedono documenti di prova che fanno riferimento ad un solo campione testato per tipologia di prova (uno per la statica e uno per la dinamica).

Suffragare la qualità di una soluzione complessa (ad esempio un parapetto) portando come supporto alle scelte una sola prova sperimentale risulta poco sostenibile se consideriamo il fatto che un simile manufatto composito è costituito da materiali molto diversi tra loro (elastici e viscosi, fragili e duttili, termostabili



Figura 7-7b Esempio di realizzazione tipica eseguibile con un dimensionamento basato sulla UNI EN 16612:2019 - Vetro stratificato con appoggi continui e discontinui su due o più lati. Anche in questo caso non è stato possibile svolgere un calcolo tabellare secondo le appendici A, B e C e si è ricorsi alle regole della Scienza delle Costruzioni. Progetto Ing. M. Palumbo - Realizzazione Vetrostrutturale Srl

e termovarianti, soggetti a creep e tempoinvarianti) le cui proprietà dipendono non solo dal materiale in quanto tale, ma anche dalle lavorazioni eseguite su di esso in fase di produzione, assemblaggio e posa. In sintesi, un parapetto in vetro ha un comportamento finale che dipende da:

- 1) tipo di vincolo (continuo o a cunei/blocchi di serraggio);
- 2) dalla coppia di serraggio dei sistemi di bloccaggio del vetro;
- 3) dal polimero di stratifica scelto;
- 4) dalla stratifica del vetro;
- 5) dalla tempra del vetro;
- 6) dai tasselli scelti per staffare il tutto al contesto;
- 7) dalla temperatura di prova;
- 8) eccetera.

D'altro canto teniamo conto che la caratterizzazione di materiali elementari omogenei ed isotropi (come l'acciaio o l'alluminio) richiede un campione di numerosità superiore.

Il calcolo, da parte sua, consente di stimare (in maniera assolutamente cautelativa stanti i vari coefficienti di sicurezza da adottare) il comportamento di un manufatto al variare sia dei carichi, che dei tempi di carico e delle temperature di utilizzo. In questo modo la soluzione fornita è in grado di garantire il cliente finale da tutte quelle considerazioni che la prova sperimentale non può prendere in considerazione e descrivere.

La prova sperimentale che affianchi il calcolo o in fase preliminare o in fase di collaudo diventa invece valido strumento di conferma per la progettazione. ■