

EFFETTO DELLA PRESENZA DI MICRO-DIFETTI E DELLA TEMPERATURA SUL COMPORTAMENTO STRUTTURALE DEL VETRO MULTISTRATO

Michel Palumbo*, Giovanni A. Plizzari⁺, Vincenzo Sglavo[°] ed Ezio Tempesti*

(*) *Dip. di Chimica e Fisica per l'Ing. e per i Materiali, Univ. di Brescia, Via Valotti 9, Brescia*

(+) *Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Brescia, Via Branze 32, 25123 Brescia*

(°) *Dip. di Ingegneria dei Materiali, Università di Trento, Via Mesiano 77, 38050 Trento*

Sommario

E' stato studiato il comportamento a frattura (flessione su tre punti) di elementi trave, variamente indentati, costituiti da vetro multistrato di tipo classico (lastre di vetro con polivinilbutirrale interposto) e di tipo tenacizzato (lastre di vetro con policarbonato interposto tra le lastre centrali). E' stato calcolato il valore del fattore di intensita' degli sforzi in entrambi i casi, sia a temperatura ambiente che a 60°C.

Abstract

The fracture behaviour of multilayer glass has been studied by means of three point bending tests on small beams. Classical multilayer specimens with poly(vinyl butyral) interfaces as well as new specimens with an additional layer of polycarbonate have been examined and their results compared. Tests have been performed both at 20°C and at 60°C to study the temperature effects.

1. Introduzione

Il vetro stratificato trova impiego nei più svariati settori tra i quali val la pena mettere in evidenza tanto quello automobilistico quanto quello edilizio.

In architettura il vetro viene prevalentemente impiegato come tamponamento verticale trasparente al quale sono anche richieste garanzie di resistenza contro atti vandalici e contro la caduta di corpi animati od inanimati nel vuoto. Recentemente il vetro multistrato è stato anche impiegato come vero e proprio elemento strutturale; tra gli esempi più significativi si può citare la passerella tra i locali dello studio di architettura Kraaijranger Urbis di Rotterdam, la copertura dell'edificio ristrutturato in Rue Georges V a Parigi e la copertura dei laboratori interrati del Louvre, sempre a Parigi [1,2].

Nel restauro degli edifici antichi il vetro viene frequentemente impiegato anche come pavimentazione che

consente di lasciare in vista resti archeologici la presenza dei quali è molto frequente sotto i monumenti. Recentemente, nei lavori di restauro della basilica di Aquileia è stata prevista la realizzazione di una passerella in vetro su un pavimento musivo, considerato il più grande e meglio conservato della cristianità [3]. L'uso turistico a cui è sottoposto rischiava di comprometterlo irreparabilmente. La passerella vetrata, ponte trasparente con una luce di circa 12 metri (Fig. 1), realizza un percorso interno alla basilica che permette la protezione del manufatto e, al tempo stesso, la sua totale fruizione. In questa realizzazione, oltre al piano di calpestio, sono in vetro tutti gli elementi strutturali.

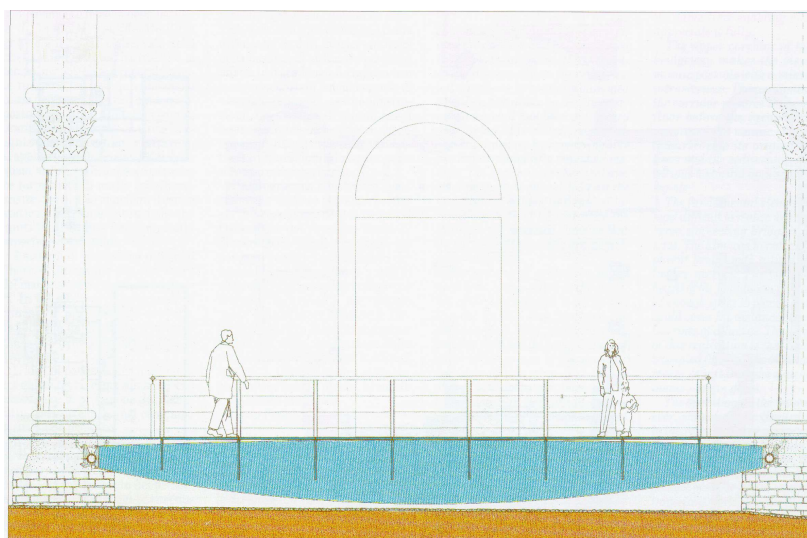


Figura 1: Passerella in vetro realizzata nella basilica di Aquileia [3]

L'utilizzo del vetro come elemento strutturale è fortemente limitato sia dall'intrinseca fragilità dei ceramici sia dal problema della "fatica statica". Questo fenomeno, proprio dei ceramici, ma fortemente evidente nel caso del vetro, mette in evidenza come quest'ultimo, a differenza dei materiali da costruzione classici, non dia garanzia di poter sostenere uno stato di sollecitazione imposto per un tempo indeterminato. Ciò è da imputarsi alla cosiddetta crescita sub-critica dei difetti, dovuta ad un'interazione sinergica tra sollecitazioni meccaniche e fenomeni corrosivi che si instaurano tra il materiale e l'ambiente di impiego. La presenza dell'intercalare plastico può certamente favorire questo tipo di applicazioni, soprattutto quando il vetro è a contatto con un ambiente molto umido, in quanto garantisce la coesione tra le singole lastre costituenti il multistrato.

La presenza di difetti superficiali sui manufatti di vetro è una situazione imprescindibile contro la quale non ha senso scontrarsi ed in tal senso, il presente lavoro, volto alla valutazione dell'impiego del vetro multistrato per la realizzazione di elementi strutturali, ha come scopo la determinazione dei limiti di impiego di una struttura, per ipotesi difettata, posta in opera. A tal fine è stato avviato uno studio finalizzato alla comprensione del comportamento del multistrato in presenza di micro-difetti, opportunamente indotti sulla superficie di una o più lastre costituenti il manufatto. In fase preliminare sono stati studiati campioni di vetro multistrato di tipo classico (vetro intercalato da polivinilbutirrale) e di tipo tenacizzato (vetro intercalato da polivinilbutirrale con l'aggiunta di una lastra di policarbonato). Su tali materiali sono state effettuate prove di flessione su tre punti su provini con difetti creati mediante indentazione Vickers. Per tener conto sia del fenomeno di usura chimica sia dei carichi termici cui il vetro strutturale può essere soggetto, tutte le prove sono state effettuate bagnando le superfici indentate dei provini mentre altre sono state svolte a differenti temperature.

2. Materiali impiegati

I vetri multistrato impiegati, definiti anche vetri blindati, si dividono in due classi:

Vetri di tipo "Stratoval" (detti di seguito multistrato PVB), classificati come vetri antiproiettile secondo la norma UNI 9187, costituiti da quattro lastre di vetro (spessori 8-10-8-10 mm) intercalate da fogli di polivinilbutirrale (PVB) per uno spessore totale di circa 39 mm. Questo tipo di multistrato è quello che finora ha trovato impiego in ambito architettonico-strutturale.

Vetri di tipo "Oversafe" (detti di seguito multistrato PC), classificati come vetri antiproiettile e antischeggia secondo la norma UNI 9187, costituiti da quattro lastre di vetro (spessori 8-10-10-8 mm) con interposte, in posizione centrale, una lastra di policarbonato (PC) di 6 mm di spessore, con le due lastre esterne ancora intercalate da PVB. L'adesione tra vetro e PC è garantita da un film di poliuretano. Lo spessore di tali provini è di 45 mm. Questo tipo di vetro multistrato rappresenta un'alternativa ai vetri attualmente impiegati; alla sicurezza intrinseca nel concetto di multistrato viene ad aggiungersi la tenacizzazione dello stesso a mezzo dell'interposizione di un polimero tenace e trasparente quale il policarbonato, particolarmente importante per l'impiego strutturale di questo materiale che, per sua natura, è molto fragile.

3. Modalità di prova

Nell'ottica di fornire le prime indicazioni necessarie ad orientare e raffinare il prosieguo della ricerca, sono state effettuate prove di flessione in tre punti su campioni di vetro multistrato dalle dimensioni di 30 x 39/45 x 210 mm.

Le prove sono state condotte imponendo uno spostamento del pistone, per l'applicazione del carico verticale, con una velocità di 0.5 mm/min.

I campioni da sottoporre a flessione in tre punti sono stati in precedenza sottoposti ad indentazione Vickers (carico di 39.2 N per 15 sec), allo scopo di creare sulla superficie difetti di dimensione e forma controllata, ma nello stesso tempo simili a quelli che si possono formare in seguito alla lavorazione o messa in opera. Una casistica assai ampia di tipologie di indentazioni è stata affrontata per quanto

concerne sia il numero di lastre che l'ordine delle lastre indentate.

Le prove sperimentali sono state svolte sia a temperatura ambiente (20°C), che alla temperatura di 60°C, tipica delle condizioni di esercizio di una struttura sottoposta ad irraggiamento solare. Le prove in temperatura sono state effettuate allo scopo di verificare il comportamento di un elemento strutturale in una copertura, rappresentando questo impiego una possibile applicazione per le strutture in vetro, grazie alla luminosità che il materiale è in grado di offrire all'ambiente sottostante.

Le prove sono state svolte anche in presenza di un tenore di umidità relativa del 100%, per tenere conto dell'effetto corrosivo dovuto all'umidità ambientale. E' infatti noto che un ambiente acquoso è fortemente aggressivo e, a lungo termine, riduce la resistenza del vetro in quanto l'acqua provoca un aumento della velocità di propagazione della cricca sotto carico costante.

4. Risultati sperimentali

I risultati sperimentali evidenziano una sostanziale differenza di comportamento tra i campioni tipo PVB ed i campioni tipo PC. Mentre nel primo caso, una volta fratturate le lastre di vetro, il provino non è più in grado di resistere ad alcun carico, nel secondo caso il provino è in grado di resistere a carichi superiori a quello di rottura del vetro, in funzione dello spessore della lastra di policarbonato.

Campioni tipo PVB: si riportano in Tabella 1 gli sforzi massimi registrati (σ) ed i corrispondenti fattori di intensità degli sforzi (K_I^*) in funzione delle temperature di prova e del numero di lastre indentate. I valori di K_I^* sono stati ottenuti prendendo in considerazione il fenomeno di crescita stabile dei difetti, come suggerito da Sglavo e Green [4,5]. Va messo in evidenza che questo modo di procedere ipotizza l'assenza di qualsiasi fenomeno di fatica.

Tabella 1: Valori dello sforzo a rottura e del fattore di intensità degli sforzi dei provini tipo PVB sottoposti a flessione su tre punti, al variare del numero di lastre indentate.

Campione Lastre Indentate Temperatura Sforzo a Rottura K_I^*

	8	10	8	10	[°C]	[MPa]	[Mpa m ^{1/2}]
PVB	+	+	+	+	20°C	28.5	0.60
PVB	+	+	+	+	60°C	31.9	0.65

PVB	+		+	20°C	24.0	0.53
PVB		+	+	20°C	31.8	0.65
PVB	+	+		20°C	31.3	0.64
PVB	+	+		60°C	32.4	0.65
PVB			+	20°C	32.4	0.65
PVB			+	60°C	26.0	0.56
PVB			+	20°C	31.0	0.63
PVB			+	60°C	30.5	0.63
PVB	+			20°C	32.8	0.66
PVB	+			60°C	32.7	0.66
PVB			+	20°C	29.9	0.62
PVB			+	60°C	38.1	0.74
PVB		+		20°C	33.6	0.67
PVB		+		60°C	33.2	0.67

Come si evince dai risultati esposti in Tabella 1, il fattore di intensità degli sforzi K_{I}^* non sembra risentire in maniera sostanziale né del numero né del tipo di lastre indentate. I valori medi dello sforzo e del fattore di intensità degli sforzi ottenuti da tutti i campioni testati a 20 °C sono risultati rispettivamente pari a 30.6 MPa e $0.64 \text{ Mpa m}^{1/2}$, mentre i valori medi ottenuti dai provini testati a 60°C sono risultati 32.1 MPa e $0.65 \text{ Mpa m}^{1/2}$ rispettivamente.

In Figura 2 viene riportato l'andamento tipico della curva del carico in funzione dello spostamento in mezzzeria di un campione di tipo PVB; si può notare l'andamento lineare elastico della curva fino alla rottura che avviene in modo fragile. A tal riguardo va messo in evidenza che le lastre di vetro si sono rotte in sequenza estremamente rapida durante le prove.

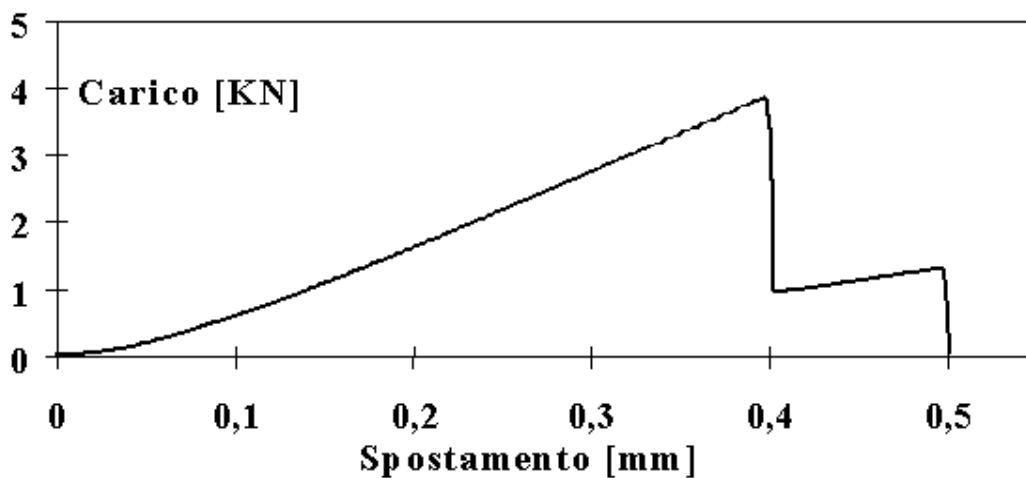


Figura 2: Tipico andamento della curva carico-spostamento di un

campione di tipo PVB.

I risultati presentati in Tabella 1 e nella Figura 2 mostrano che il comportamento del multistrato classico (PVB) è dettato unicamente dalle proprietà del vetro e che l'unico ruolo dell'intercalare polimerico è quello di tenere solidali le lastre di vetro e di consentire che le lastre non fessurate esercitino una azione di contenimento sulla lastra fessurata.

Campioni tipo PC: contrariamente alle prove svolte sui campioni tipo PVB, caratterizzate da spostamenti a rottura dell'ordine dei 0.4-0.7 mm, le prove sui campioni di multistrato tipo PC sono continuate fino a spostamenti dell'ordine dei 15-20 mm. Infatti, dopo la frattura delle lastre di vetro, si è verificata una caduta di carico (come nei provini tipo PVB); successivamente, ha iniziato a lavorare la lastra di polycarbonato e le prove sono proseguite fino al raggiungimento del suo carico di rottura. Tale carico, che dipende dallo spessore della lastra di polycarbonato impiegata, nel caso in esame è risultato superiore al carico di rottura del vetro. Il comportamento dei provini tipo PC è messo bene in evidenza nella Fig. 3, nella quale si possono chiaramente distinguere le due regioni caratterizzanti il comportamento del multistrato con polycarbonato: la prima, a comportamento fragile, relativa alla capacità portante delle lastre di vetro; la seconda, più duttile, relativa alla capacità portante del polycarbonato. Questo risultato riveste una particolare importanza se si pensa agli impieghi strutturali del multistrato in quanto lo spessore della lastra di polycarbonato da utilizzare può essere determinato in modo da garantire il necessario grado di sicurezza, anche dopo l'eventuale frattura delle lastre di vetro, che costituiscono comunque l'elemento portante principale della struttura.

In Tabella 2 sono riassunti i valori dello sforzo a rottura (σ) e del fattore di intensità degli sforzi (K_I^*), determinati per il carico di picco nella prima fase della prova sui provini tipo PC (rottura delle lastre di vetro). I valori medi di σ e di K_I^* ottenuti da tutti i campioni testati a 20 °C, sono risultati rispettivamente pari a 27.4 MPa e 0.61 Mpa m^{1/2}, mentre i valori medi ottenuti dalle prove a 60°C sono risultati 31.6 MPa e 0.67 Mpa m^{1/2} rispettivamente.

Tabella 2: Valori dello sforzo a rottura e del fattore di intensità degli sforzi in provini tipo PC sottoposti a flessione su tre punti, al variare del numero di lastre indentate.

Campione	Lastre	Indentate	Temperatura	Sforzo a Rottura	K_I^*		
	8	10	10	8	[°C]	[MPa]	[Mpa m ^{1/2}]
PC	+	+	+	+	20°C	21.1	0.49
PC	+	+	+	+	60°C	27.7	0.59
PC	+	+			20°C	22.9	0.52

PC	+	+	60°C	28.0	0.59
PC		+	20°C	31.2	0.64
PC		+	60°C	39.5	0.76
PC	+		20°C	34.5	0.68
PC	+		60°C	31.2	0.64

Figura 3: Curve modello Carico-Spostamento di campioni di tipo PC a 20°C (1) ed a 60°C (2).

Effetti della Temperatura

Dai risultati presentati nelle tabelle 1 e 2 si può osservare che i valori del fattore di intensità degli sforzi, relativo ai campioni con due o più indentazioni, sono leggermente maggiori nel caso dei campioni tipo PVB rispetto a quelli di tipo PC ed aumentano leggermente con la temperatura. Si può infine notare che i valori del fattore di intensità degli sforzi ottenuti nel presente lavoro, dove le prove sono state condotte in ambiente con umidità relativa del 100%, sono paragonabili alla tenacità a frattura ottenuta in ambiente

inerte per campioni di vetro sodico-calcico, che in letteratura è normalmente riportata come $0.7 \text{ Mpa m}^{1/2}$. Il fatto che detti valori si posizionino leggermente al di sotto di tale soglia è dovuto alla presenza di fenomeni di fatica non presi in considerazione, per semplicità, nei calcoli. Il ruolo della temperatura di prova sul carico di frattura del vetro, risultato critico nelle prime esperienze svolte su vetri multistrato a causa della notevole differenza dei coefficienti di dilatazione termica dei due materiali [6], sembra ridimensionato dai risultati presentati nelle tabelle 1 e 2. Si deve comunque sottolineare che gli effetti della temperatura, trattandosi di un fenomeno strutturale, dipendono fortemente dalle dimensioni del provino.

Per valutare gli effetti della temperatura sul multistrato, si deve considerare anche l'influenza che temperatura ha sul materiale polimerico interposto tra le lastre di vetro, responsabile della trasmissione degli sforzi tangenziali tra le singole lastre. Come dimostrato da preliminari prove di taglio effettuate, l'influenza della temperatura negli accoppiamenti vetro-polivinilbutirale-vetro e vetro-poliuretano-policarbonato non è trascurabile [7]. In Figura 4 viene riportato il massimo sforzo tangenziale misurato con prove di taglio sui due diversi tipi di accoppiamento al variare della temperatura di prova. Come si può notare, passando da 20°C a 40°C si ha un abbattimento di un ordine di grandezza della resistenza a taglio per entrambe le tipologie di accoppiamento; passando successivamente a 60°C ed a 80°C la resistenza a taglio continua a decrescere, anche se in maniera più graduale, fino a diventare quasi nulla [7]. Questi risultati preliminari portano quindi a pensare che le lastre componenti il multistrato, all'aumentare della temperatura, tendano a diventare indipendenti e siano sempre meno in grado di trasferire sforzi tangenziali che nascono per lo stesso aumento di temperatura.

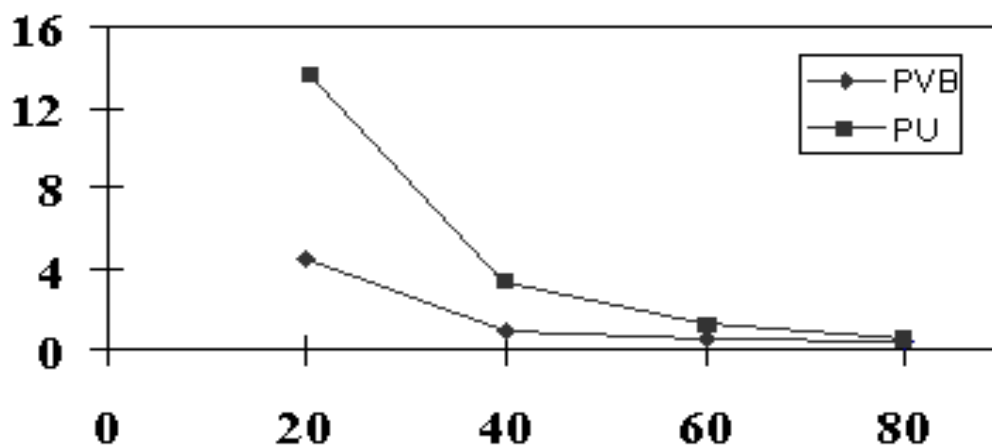


Figura 4: Andamento dello sforzo massimo di taglio al variare della temperatura nel caso di accoppiamenti vetro/PVB/vetro (PVB) e vetro/poliuretano/PC (PU).

Per quanto riguarda invece il comportamento dei provini tipo PC dopo la frattura del vetro, la Figura 3 mostra che, ad una temperatura di 60°C , la capacità portante del policarbonato, sia pur sensibilmente ridotta (di circa il 30%), rimane comunque significativa. Questo conferma i risultati su provini strutturali presentati in [6].

5. Conclusioni

Le principali risultanze sperimentali ottenute dai provini di multistrato sottoposti a prove di flessione su tre punti, possono essere così riassunte:

- la temperatura non influenza in modo significativo il carico di rottura delle lastre di vetro;
- nei provini tipo PVB la sequenza di rottura delle lastre di vetro è stata sempre molto rapida;
- il polycarbonato non modifica il carico di rottura delle lastre di vetro; solo ad avvenuta frattura di tutte le lastre il PC assume un ruolo di primario rilievo nella capacità portante del multistrato che viene raggiunta per grandi deformazioni del provino;
- nei provini tipo PC la fessura iniziale ha un andamento quasi verticale lungo la sezione di massimo sforzo; inoltre, le lastre di vetro non si sono mai rotte simultaneamente ad indicare una maggior redistribuzione del carico nel momento in cui la sezione resistente viene progressivamente riducendosi;
- alla velocità di applicazione del carico pari a 0.5 mm/min si ha una riduzione del fattore di intensità degli sforzi critico noto ($0.7 \text{ Mpa m}^{1/2}$), ma non si scende mai al di sotto di $K_{I^*} = 0.5 \text{ Mpa m}^{1/2}$.

Alcune prove di taglio preliminari hanno evidenziato che il massimo sforzo tangenziale sulle due diverse interfacce utilizzate (PVB tra due lastre di vetro e poliuretano tra vetro e polycarbonato) diminuisce sensibilmente all'aumentare della temperatura di prova. Quando la temperatura raggiunge gli 80°C la resistenza a taglio è quasi nulla.

Bibliografia

[1] D. Aldebert, Le Moniteur, pp 36-37, 1994

[2] E. Braicovich, Nuova Finestra, pp 148-149, 1996

[3] C. Paganelli, l'ARCA, Vol. 116, pp 72-75, 1997.

[4] V. M. Sglavo e D. J. Green, Acta Metall. Mat., Vol. 43, pp 965-972, 1995

[5] V. M. Sglavo e D. J. Green, J. Am. Ceram. Soc., Vol 78, pp 650-656, 1995

[6] M. Palumbo, G. Plizzari e E. Tempesti, IGF XIII, Cassino pp. 212-221, 1997

[7] M. Moratti e C. Perrini, tesi di laurea Università di Brescia, A.A. 1996 - 1997

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Vetreria Valentini S.p.A. di Calcinato (BS) per l'aiuto prestato nella fornitura dei provini sperimentali. Gli autori desiderano ringraziare inoltre gli Ingegneri Monica Moratti e Caterina Perrini per il loro disinteressato contributo profuso durante l'intera campagna sperimentale.

Atti del convegno

[[Precedente](#)] [[Successiva](#)]

Versione HTML realizzata da

