

APPLICAZIONE STRUTTURALE DEL VETRO MULTISTRATO

Michel Palumbo¹, Giovanni A. Plizzari² ed Ezio Tempesti¹

¹*Dipartimento di Chimica e Fisica per l'Ingegneria e per i Materiali,
Università di Brescia, Via Valotti, 9, 25123 Brescia;*

²*Dipartimento di Ingegneria Civile,
Università di Brescia, Via Branze, 38, 25123 Brescia.*

SOMMARIO: Il vetro ha sempre suscitato grande interesse nell'ambito delle costruzioni civili ed il principale ostacolo al suo impiego strutturale è rappresentato dalla sua fragilità. L'introduzione sul mercato dei vetri multistrato, giustificata dalla necessità di tenacizzare il materiale, ha rilanciato l'uso del vetro per impieghi strutturali, come dimostrano alcune recenti realizzazioni architettoniche. Nel presente lavoro il comportamento a frattura di vetri multistrato viene studiato con prove tipo *Wedge Splitting* sia a temperatura ambiente, sia a temperature superiori, per simulare il comportamento in opera dei manufatti. Le prove sono state effettuate su un vetro stratificato di tipo classico, in cui l'intercalare è costituito da polivinilbutirrale, e su un multistrato di nuova concezione, analogo al precedente, con interposta al centro una lastra di policarbonato. In quest'ultimo caso, alle prerogative del multistrato classico viene a sommarsi la tenacità del policarbonato che, dopo la frattura delle lastre di vetro, è in grado di impedire la rottura fragile del manufatto.

PAROLE CHIAVE: Vetro Multistrato, Strutture, Polivinilbutirrale, Policarbonato, Wedge Splitting Test, Infrarosso, Temperatura.

INTRODUZIONE

Per vetro multistrato si intende un materiale composito ottenuto dalla sovrapposizione ordinata ed alternata di lastre di vetro e di materiale polimerico con indice di rifrazione prossimo a quello del vetro. L'intercalare polimerico per antonomasia è il polivinilbutirrale (PVB). Vetri così strutturati sono detti anche "vetri di sicurezza", dato che la presenza di materiale polimerico ostacola fortemente il distacco di frammenti di vetro dal manufatto non più integro. Il vantaggio offerto dai multistrato deriva dalla possibilità di sfruttare le proprietà peculiari di ciascun componente: alla ben nota rigidità del vetro ed alla sua eccellente resistenza agli agenti atmosferici, che protegge lo strato plastico dal deterioramento, si aggiunge la capacità del materiale polimerico di assorbire una notevole quantità di energia. La resistenza del multistrato dipende, ovviamente, dalla resistenza del vetro, cioè dal numero di lastre e dal loro spessore, nonché dalle caratteristiche dell'intercalare polimerico; non vanno trascurate, comunque, l'influenza delle modalità di assemblaggio e le condizioni di impiego del manufatto, rappresentate essenzialmente dalla temperatura e dall'umidità.

Il settore di maggior diffusione del vetro multistrato è a tutt'oggi quello automobilistico, ed è proprio grazie all'industria automobilistica che il materiale in esame ha avuto modo di evolvere fino a conquistare un proprio mercato. In architettura il vetro stratificato 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. La richiesta di "trasparenza totale" delle strutture sta spingendo in questi ultimi anni le frontiere della ricerca verso l'impiego strutturale del vetro e la presenza dell'intercalare plastico ha certamente favorito questo tipo di applicazioni. L'impiego strutturale dei vetri stratificati è assolutamente nuovo e poche sono le realizzazioni finora eseguite. Tra i rari esempi citiamo la passerella tra i locali dello studio di architettura Kraaijranger Urbis di Rotterdam, la copertura dell'edificio ristrutturato in Rue Georges V a Parigi citata da Vetro Spazio e, per la novità che ciò rappresenta, la copertura dei laboratori interrati del Louvre sempre a Parigi (Lussignoli e Vicari, 1996; Fig. 1). Quest'ultimo intervento, realizzato nel 1989, vede l'impiego di dieci travi in vetro stratificato per sorreggere la copertura vitrea di un pozzo di luce di 75 m², posizionate alla distanza di 1,40 m l'una dall'altra. Ciascuna trave è costituita da quattro lastre di vetro da 15 mm di spessore, solidarizzate mediante l'impiego di fogli di polivinilbutirrale da 0,37 mm.

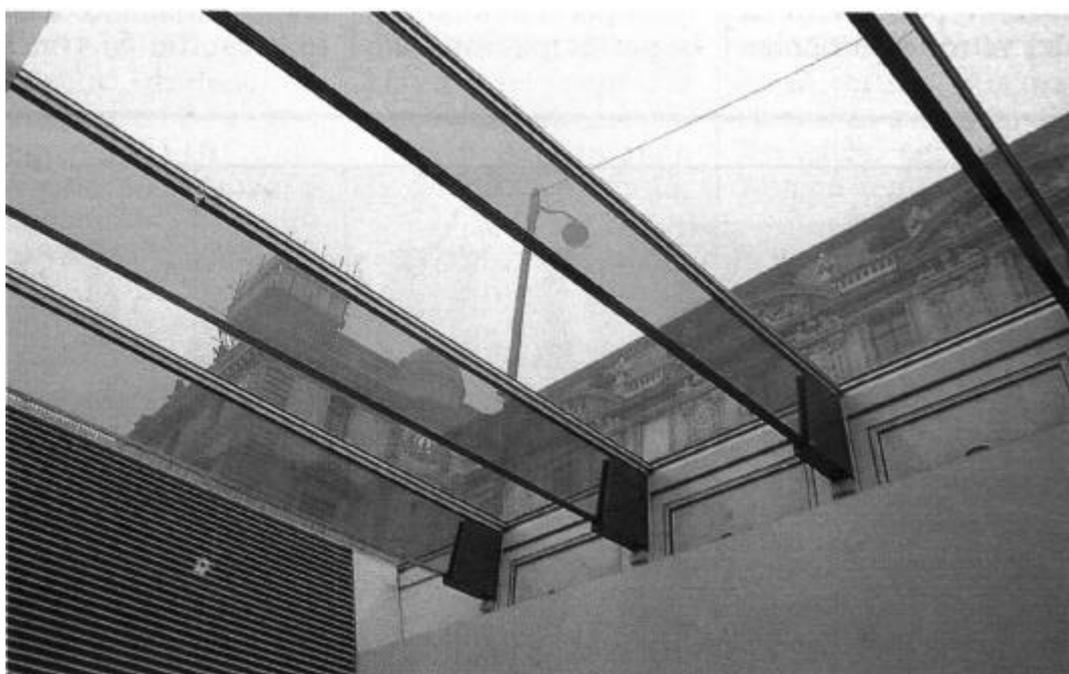


Figura 1: Particolare della copertura dei laboratori del Louvre a Parigi.

L'impiego sistematico del vetro stratificato come materiale strutturale richiede innanzitutto la conoscenza delle sue proprietà a frattura. I risultati sperimentali disponibili in letteratura riguardano quasi esclusivamente il comportamento del vetro multistrato sottoposto a carichi trasversali al piano medio delle lastre. Agli autori non risulta che siano disponibili risultati relativi al comportamento del materiale sottoposto a carichi agenti in piani paralleli a quelli delle lastre di vetro.

La nota presenza di un effetto scala nel comportamento a frattura dei materiali consiglierebbe lo studio di provini con dimensioni simili a quelle della struttura in opera. La sperimentazione sui tradizionali provini di trave con dimensioni simili a quelle reali risulterebbe però problematica a causa delle notevoli difficoltà di movimentazione dei provini, ed onerosa a causa dell'elevato costo del materiale. I maggiori oneri sono ancora meno giustificabili in uno studio preliminare che ha lo scopo di fornire le prime indicazioni necessarie ad orientare e raffinare il prosieguo della ricerca. Per questo motivo sono state effettuate prove di Wedge Splitting, che permettono di simulare il comportamento di una trave inflessa, pur richiedendo campioni di dimensioni sensibilmente contenute. Le prove sperimentali sono state svolte sia a temperatura ambiente che alle temperature tipiche delle condizioni di esercizio di una struttura sottoposta ad irraggiamento solare. Le prove in temperatura si sono rese necessarie per verificare il comportamento di un elemento strutturale in una copertura, rappresentando questo impiego una delle applicazioni più interessanti per le strutture in vetro, grazie alla luminosità che il materiale è in grado di offrire all'ambiente sottostante. Due sono i tipi di multistrato analizzati: il primo è costituito da un vetro stratificato di tipo classico, in cui l'intercalare tra le lastre di vetro è costituito da polivinilbutirrale (PVB); il secondo è costituito da un vetro stratificato di nuova concezione, analogo al precedente, ma con interposta al centro una lastra di policarbonato (PC). Le prove a frattura sono state precedute da uno studio conoscitivo sui due tipi di intercalare impiegati analizzando, mediante spettrometria IR, la struttura macromolecolare di campioni precedentemente sottoposti a ricottura termica.

STUDIO DEGLI EFFETTI DELLA TEMPERATURA SUL PC E SUL PVB

Mentre in letteratura diversi sono i dati presenti sul comportamento in temperatura del polivinilbutirrale, è risultato necessario valutare l'eventuale modifica, a livello di struttura chimica, del policarbonato a seguito di riscaldamento prolungato nel tempo, stante l'assenza in letteratura di informazioni specifiche. Questa analisi è prodromo di ogni successivo studio comportamentale del vetro stratificato dal momento che la degradazione chimica dell'intercalare inficerebbe, a priori, l'applicabilità strutturale del manufatto. Per favorire il confronto, le prove sono state effettuate anche su provini di polivinilbutirrale. La sperimentazione ha riguardato cinque provini di PVB e cinque provini di PC che sono stati posti, per 6 ore, alla temperatura rispettivamente di 20, 50, 100, 150, 200°C e successivamente raffreddati per determinarne lo spettro IR mediante uno spettrofotometro ad interferenza JASCO FT-IR 5300 (Palumbo et al., 1997).

Per quanto concerne il PVB sono state osservate variazioni sensibili degli spettri IR nel passare dai campioni non ricotti a quelli ricotti, il che conferma sostanzialmente le conclusioni di El-Din e Sabaa (1995), e cioè il progressivo degrado della struttura polimerica all'aumentare della temperatura. Decisamente degna di nota è, per contro, la notevole stabilità termica del PC: non si riscontrano modifiche seppur lievi di frequenze vibrazionali tipiche della catena polimerica e dei gruppi funzionali in essa presenti. Lo spettro registrato a 20°C risulta inoltre essere identico a quello riportato in letteratura, osservazione che permette di affermare che il processo di assemblaggio non influenza la struttura del policarbonato.

STUDIO DEL COMPORTAMENTO A FRATTURA DEL MULTISTRATO

DESCRIZIONE DEI PROVINI E MODALITÀ DI PROVA

La tecnica sperimentale scelta per lo studio del comportamento a frattura del multistrato è il "*Wedge Splitting Test*". Questa prova fornisce risultati simili a quelli ottenuti da una trave inflessa con tre punti di carico col vantaggio di utilizzare provini con forma compatta e maneggevole (Fig. 2). Il multistrato di tipo classico è costituito da 4 lastre di vetro con spessore di 8-10-8-10 mm rispettivamente, intercalate da tre strati di polivinilbutirrale (0,38 mm), per uno spessore complessivo di circa 37,5 mm. Il multistrato con policarbonato è assemblato come il precedente, con lo stesso spessore degli strati di vetro e di polivinilbutirrale, con l'aggiunta di uno strato di PC (spessore 6 mm) nel centro, per uno spessore finale complessivo di circa 44 mm (Fig. 2a). Questa fase preliminare di sperimentazione ha lo scopo di studiare il comportamento a frattura del materiale sottoposto a diverse temperature ed in particolare l'influenza della temperatura sulle modalità di rottura e l'interazione tra vetro e polimero. Essendo la tenacità a frattura del solo vetro un dato facilmente reperibile in letteratura, non si è ritenuto necessario procedere alla complessa operazione di formazione di difetti nelle quattro lastre di vetro; le prove sono state effettuate su provini con un intaglio di circa 110 mm di lunghezza, realizzato a macchina e regolarizzato manualmente con una sega rettilinea a lama filiforme al carburo di tungsteno con diametro di 2 mm.

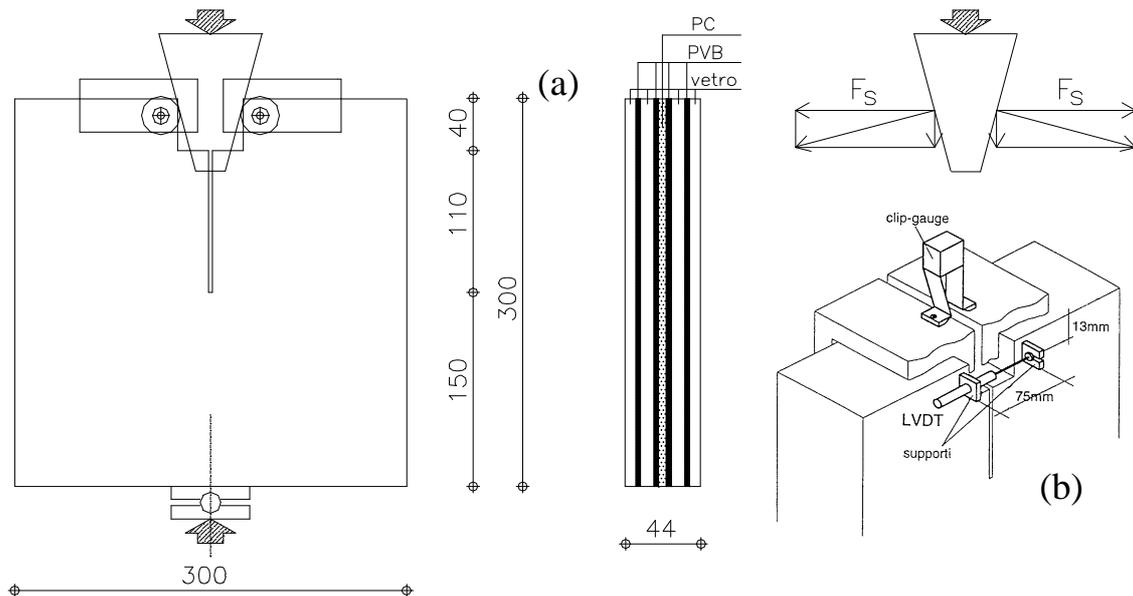


Figura 2: Provino tipo *Wedge Splitting* e sistema di carico (a); strumentazione usata per la misura dell'apertura di fessura (b).

Le prove sono state eseguite in controllo di deformazione impiegando una macchina di prova servocontrollata Instron 1274/8500. La deformazione è stata impressa ai provini per mezzo di un sistema di piastre di acciaio applicate sul lato superiore del provino e di cunei in acciaio temprato agenti tra cuscinetti a sfera applicati alle piastre (Fig. 2a). Per garantire una distribuzione uniforme del carico sulle quattro lastre di vetro, queste sono

state preventivamente levigate sulle superfici verticali a contatto con la piastra di acciaio. Un trasduttore di spostamento resistivo (*clip-gauge*) con una sensibilità di $0.4 \mu\text{m/mV}$, applicato tra le due piastre metalliche superiori, ha fornito il segnale di retroazione per il controllo della prova. La velocità di apertura della fessura imposta, pari a $0,001 \text{ mm/min}$, ha consentito di rilevare dettagliatamente le fasi di rottura delle lastre di vetro. L'apertura della fessura in corrispondenza del punto di applicazione del carico, denominata COD (*Crack Opening Displacement*), è stata misurata per mezzo di due trasduttori di spostamento induttivi LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) con una sensibilità di $0.5 \mu\text{m/mV}$ (Fig. 2b). Il carico applicato al provino è stato misurato per mezzo della cella di carico da 250 kN con una sensibilità di 1 N/mV . Tutti i segnali analogici provenienti dalla strumentazione sono stati inviati alla scheda di conversione analogico/digitale presente in un PC e memorizzati sul disco fisso. Le prove alle diverse temperature sono state effettuate applicando un modesto precarico iniziale a temperatura ambiente e riscaldando successivamente il provino, fino al raggiungimento della temperatura di prova, mediante due lampade OSRAM SICCATHERM posizionate sui due lati opposti del campione. La temperatura è stata mantenuta costante durante la fase successiva di applicazione del carico di splitting al provino. La temperatura è stata misurata per mezzo di quattro termocoppie, due sulla faccia anteriore e due sulla faccia posteriore del provino.

RISULTATI SPERIMENTALI

La Fig. 3 mostra i diagrammi della forza di splitting (F_s , Fig. 2a) in funzione dell'apertura di fessura COD, ottenuti dai provini con PVB e con PC nella fase iniziale della prova, durante la quale si sono formate e propagate le fessure nelle quattro lastre di vetro. Si può notare che in questa prima fase i due tipi di multistrato hanno circa lo stesso comportamento, anche se i risultati sperimentali mostrano una certa dispersione, probabilmente dovuta alla presenza di difetti presenti all'apice dell'intaglio e formati durante la lavorazione del provino. Si può notare che dopo la frattura delle lastre di vetro, i provini con solo PVB non sono più in grado di portare carico; i provini con PC, dopo la fessurazione del vetro, mostrano invece un incremento quasi lineare del carico. Il carico massimo medio raggiunto è di 9.27 kN , pari a circa sei volte il carico di frattura del vetro. Questo comportamento è ben evidenziato nella Fig. 4 che mostra i diagrammi del carico in funzione della apertura della fessura (limitatamente ad un valore di COD pari a 2 mm). In tale figura si possono notare le due fasi caratterizzanti il comportamento a frattura del multistrato: la prima, comune ad entrambi i tipi di provino, è relativa alla frattura delle lastre di vetro e dipende dallo spessore delle lastre e dalla tenacità a frattura del vetro; la seconda, propria dei campioni in cui è presente il polycarbonato, è relativa all'incremento di resistenza offerto da quest'ultimo e dipende quindi dal numero e dallo spessore delle lastre di PC impiegate nel multistrato. La presenza del polycarbonato diventa particolarmente importante se si pensa al cedimento, ritardato nel tempo, del vetro, dovuto all'aumento delle dimensioni dei difetti, inevitabilmente presenti sulla superficie del vetro. Questa eventualità si può presentare anche quando il fattore di intensificazione degli sforzi è inferiore alla tenacità a frattura; la crescita sub-critica dei difetti è dovuta all'interazione tra il materiale e l'ambiente che, in normali condizioni di impiego, risulta essere di tipo corrosivo (Lawn, 1993).

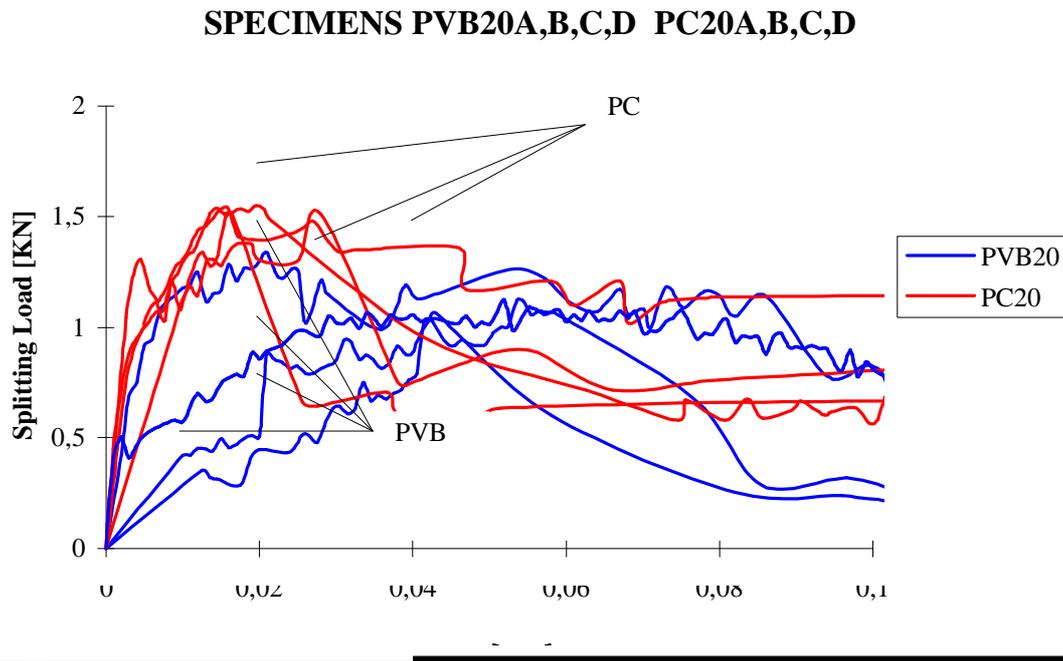


Figura 3: Diagramma del carico di splitting in funzione della COD ottenuto dai provini con solo PVB e con PC nella fase iniziale della prova ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

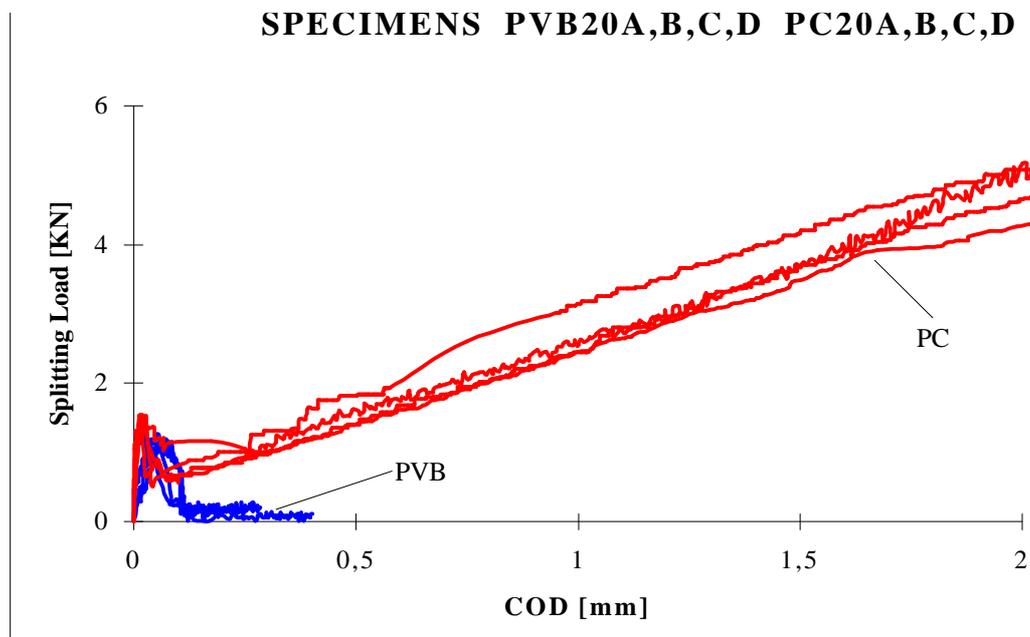


Figura 4: Diagramma del carico di splitting in funzione della COD ottenuto dai provini con solo PVB e con PC ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

Le fotografie di Figura 5 mostrano il quadro fessurativo finale nei provini; si può notare che nel provino con solo PVB le fessure nelle lastre rimangono quasi verticali mentre nel provino con PC, a causa dell'incremento di deformazione che si verifica nel polycarbonato successivamente alla frattura delle lastre, le fessure nel vetro si propagano e tendono ad orientarsi secondo le isostatiche di compressione.

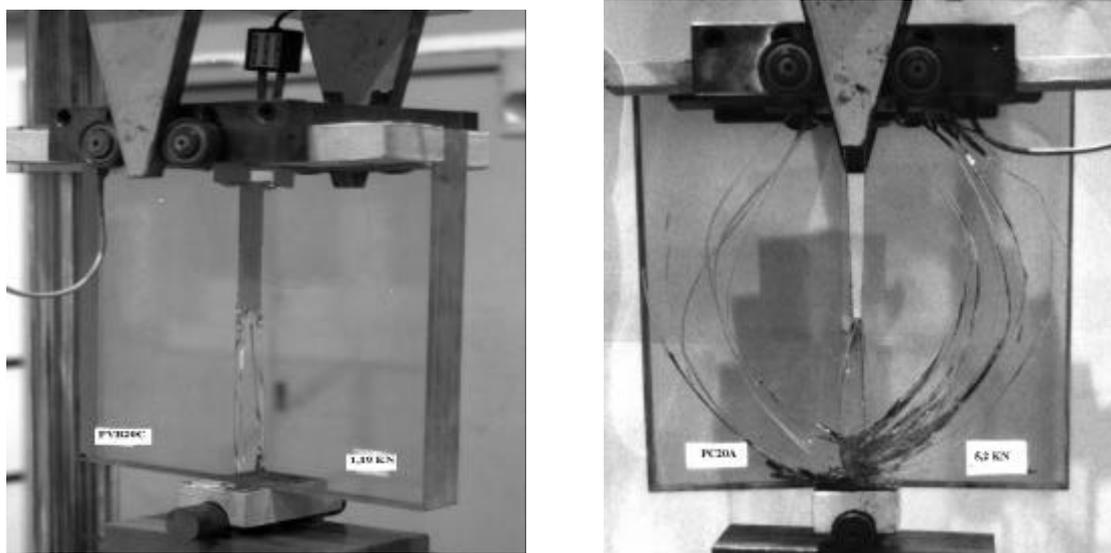


Figura 5: Quadro fessurativo finale nei provini con solo PVB e con PC ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

La Tabella 1 riporta i valori del carico e della COD nel momento di formazione delle fessure e l'ordine di fessurazione delle lastre, avendo numerato le stesse a partire dalla faccia anteriore del provino. Si può notare che in alcuni provini le fessure successive alla prima si sono formate per valori decrescenti del carico, mentre in altri provini si sono formate per valori superiori al carico di formazione della prima fessura. Il diverso comportamento potrebbe essere attribuito alla presenza di difetti in una delle lastre, causa di una sua fessurazione anticipata (Palumbo et al., 1997). Nella Tabella 1 sono anche riportati i valori della tenacità a frattura K_{Ic} dei provini, valutati sulla base del carico massimo misurato nella prima fase di frattura del vetro. La tenacità a frattura è stata determinata sulla base di una analisi agli elementi finiti eseguita nell'ambito della Meccanica della Frattura Elastica Lineare, ipotizzando i provini costituiti da solo vetro. Si può osservare che i valori di K_{Ic} risultano simili ai valori usualmente ottenuti per il vetro in condizioni ambiente (Sglavo et al., 1996); inoltre, essendo il polycarbonato più rigido del polivinilbutirrale, il valore medio della tenacità a frattura dei provini con PC, pari a $0.74 \text{ MPa m}^{1/2}$, risulta superiore a quello dei provini con solo PVB, pari a $0.58 \text{ MPa m}^{1/2}$ (Palumbo et al., 1997). La Figura 6 mostra un confronto tra le curve del carico di splitting in funzione della COD, ottenute dai campioni con polycarbonato, relative alle prove svolte rispettivamente a 20, 30, 40 e 60°C . In realtà, nella prova prevista a 60°C si è verificata la frattura anticipata e simultanea delle quattro lastre già durante la fase preliminare di riscaldamento a provino scarico. L'evento anomalo si è verificato a 48°C .

Tabella1: comportamento a frattura degli stratificati con PVB e con PC

	PVB20A			PVB20B			PVB20C			PVB20D		
	COD	Load	lastra									
	[mm]	[KN]		[mm]	[KN]		[mm]	[KN]		[mm]	[KN]	
Crack 1	0,032	1,34	4	0,053	1,12	1	0,032	0,64	2	0,022	0,49	1
Crack 2	0,061	1,26	1	0,078	1,07	2	0,039	0,75	4	0,025	0,87	2
Crack 3	0,098	1,18	3	0,081	1,03	4	0,046	1,03	1	0,031	0,94	3
Crack 4	0,108	0,82	2	0,097	0,73	3	0,051	1,12	3	0,046	1,06	4
K _{IC}												
[MPa m ^{1/2}]	0,67			0,56			0,56			0,53		

	PC20A			PC20B			PC20C			PC20D		
	COD	Load	lastra									
	[mm]	[KN]		[mm]	[KN]		[mm]	[KN]		[mm]	[KN]	
Crack 1	0,016	1,54	2	0,018	1,53	4	0,006	1,32	1	0,01	1,19	1
Crack 2	0,018	1,51	3	0,027	1,48	2	0,01	1,22	4	0,014	1,31	4
Crack 3	0,018	1,51	4	0,043	1,36	3	0,017	1,36	2	0,019	1,35	2
Crack 4	0,037	0,71	1	0,067	1,13	1	0,022	1,57	3	0,039	1,48	3
K _{IC}												
[MPa m ^{1/2}]	0,77			0,76			0,68			0,74		

Anche i campioni con intercalare costituito da solo PVB hanno presentato un comportamento analogo per la prova svolta a 60°C (in questo caso la rottura si è verificata a 47°C). Questo fenomeno è dovuto alle autotensioni provocate dai valori notevolmente superiori dei coefficienti di dilatazione termica dei polimeri rispetto a quelli dei vetri. Il comportamento osservato durante la sperimentazione, già evidenziato durante le prove sperimentali preliminari effettuate sulle travi del museo del Louvre (Lussignoli e Vicari, 1996), è legato ad un comportamento strutturale del provino e come tale è molto influenzato dalle sue dimensioni, dal difetto (o meglio, nei provini utilizzati, dall'intaglio), dalle condizioni di carico e di vincolo; esso evidenzia comunque chiaramente una limitazione al possibile impiego strutturale del multistrato. Le autotensioni presenti nel provino in presenza di temperatura hanno naturalmente anche provocato una riduzione del carico di frattura delle lastre di vetro (Palumbo et al., 1997). Occorre comunque osservare che nei provini con policarbonato, dopo la frattura delle lastre il carico riprende ad aumentare anche per elevati valori della temperatura. In tali provini, il carico massimo nella seconda fase diminuisce con l'aumento di temperatura raggiungendo comunque valori di 7.97 kN, 7.08 kN e 6.03 kN, per temperature rispettivamente di 30, 40 e 60°C. Questo significa che, anche in presenza di temperature notevolmente superiori alla temperatura ambiente, il carico massimo nei provini con PC risulta più del triplo del carico di frattura delle lastre di vetro, continuando a garantire un adeguato coefficiente di sicurezza nei confronti del collasso dell'elemento strutturale. Il comportamento negativo del multistrato alle elevate temperature riguarda quindi prevalentemente i provini con solo PVB che non hanno altre risorse di resistenza dopo la frattura delle lastre di vetro.

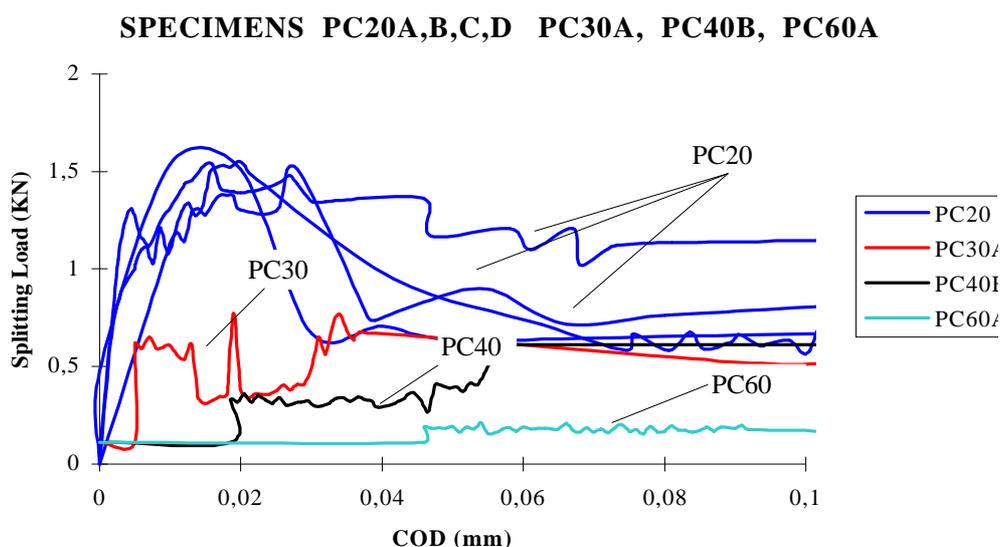


Figura 6: Diagramma del carico di splitting in funzione della COD ottenuto dai provini con PC con temperature di 20, 30, 40 e 60 °C.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state effettuate alcune prove preliminari per verificare un possibile impiego del vetro multistrato per la realizzazione elementi strutturali. Le prove hanno riguardato sia provini di vetro stratificato classici, nei quali l'intercalare plastico è costituito da polivinilbutirrale, sia provini con polivinilbutirrale e policarbonato. I risultati sperimentali hanno mostrato la fragilità dei provini con solo polivinilbutirrale, nei quali l'intercalare polimerico non offre un significativo contributo alla tenacità del multistrato. In questi provini la funzione portante è totalmente assolta dal vetro, molto più tenace rispetto all'adesivo, che ha il solo compito di assicurare la coesione delle lastre di vetro e di rallentare la propagazione della fessura; nel caso di un possibile impiego strutturale, il polivinilbutirrale potrebbe evitare il distacco della lastra eventualmente fessurata a causa di possibili urti o di difetti in essa presenti. Il contributo del policarbonato è poco significativo in fase non fessurata mentre diventa fondamentale dopo la frattura delle lastre, stante la sua elevata tenacità. Pensando ad un uso strutturale di questo tipo di multistrato, la sicurezza è garantita dalla resistenza del policarbonato che, sia pur subendo notevoli deformazioni, può essere dimensionato in modo da garantire il necessario coefficiente di sicurezza. L'impiego strutturale di elementi in vetro multistrato ha dettato l'esigenza di verificare il comportamento del materiale in condizioni di reale esercizio, e quindi anche quando, per effetto dell'irraggiamento solare, subisca un aumento di temperatura. Sono state eseguite a tale scopo prove a diverse temperature che hanno evidenziato gli effetti negativi delle autotensioni causate dalle notevoli differenze nei coefficienti di dilatazione termica del vetro, del policarbonato e del polivinilbutirrale. Questo fenomeno limita ulteriormente l'impiego del multistrato con solo polivinilbutirrale che perde la sua capacità portante dopo la frattura delle lastre di vetro. La lastra di policarbonato inserita nel multistrato, sia pur di modesto spessore (6 mm), ha consentito un incremento del carico massimo dopo la frattura del vetro anche in

presenza di elevate temperature; il carico massimo raggiunto garantisce un buon coefficiente di sicurezza nei confronti del crollo dell'elemento strutturale. In conclusione, i risultati ottenuti consentono di affermare che l'impiego del policarbonato nel multistrato consente di progettare la struttura garantendo il necessario coefficiente di sicurezza, anche quando a causa di urti, di difetti o di imprevisti peggioramenti delle condizioni di esercizio, una o tutte le lastre del multistrato si dovessero fratturare; nel caso in cui questa eventualità si verificasse, si potrà sostituire l'elemento eventualmente fratturato con un nuovo elemento integro. L'impiego sistematico del vetro multistrato per le applicazioni strutturali richiede l'approfondimento delle conoscenze sugli effetti dei polimeri nel tempo, e sull'interazione tra i diversi strati costituenti il composito nel caso reale di presenza di difetto in una sola delle lastre di vetro.

BIBLIOGRAFIA

- A. Carpinteri, 1992, "Meccanica dei materiali e della frattura", Pitagora Editrice, Bologna.
- B.R. Lawn, 1993, "Fracture of brittle solids - 2nd Edition", Cambridge University Press.
- C. Lussignoli e S.Vicari, 1996, "Vetro multistrato: correlazione tra struttura e proprietà", Tesi per il conseguimento della Laurea in Ingegneria Civile, Università di Brescia.
- M. Palumbo, G.A. Plizzari e E. Tempesti, 1997, "Il vetro multistrato: prime indagini per applicazioni di tipo strutturale" Technical Report, Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile.
- Macocco, Duffaure-Gallais, 1993, "Des poutres de verre au musee du Louvre", CSTB Magazine n. 62, pp 27-28.
- S. El-Din, W. Sabaa, 1995, "Thermal degradation of polyvinylbutyral laminated safety glass", Polymer Degradation and Stability n. 47, pp. 283-288.
- Ulmann, "Encyclopedia of Industrial Chemistry", Vol. A21.
- V. Sglavo, R. Dal Maschio, L. Brundi` e A. Conci, 1996, "Crescita subcritica di difetti controllati ottenuti mediante indentazione vickers nel vetro", IGF XII Conegno Nazionale Gruppo Italiano Frattura, Parma 12-13 Giugno