

Il comportamento meccanico del vetro stratificato è determinato dalla capacità di materiale di interfaccia (PVB o SGP) di trasferire azioni di taglio tra le lastre che unisce.

Il grado di interconnessione è quindi strettamente correlato al modulo di elasticità tangenziale in opera del materiale sintetico, sensibilmente dipendente dalla temperatura e dal tempo di applicazione dei carichi, nonché dalla dimensione in pianta dell'elemento e dal sistema dei vincoli esterni.

Nella memoria si illustrano i risultati di una campagna di prove sperimentali, condotte presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa, fino a rottura su lastre rettangolari di 3200x2000 mm (le più grandi finora provate in Italia) appoggiate su quattro punti e irrigidite all'intradosso mediante cavi di acciaio inox presollecitati e puntoni. Il comportamento meccanico delle lastre è stato descritto anche mediante modellazione agli elementi finiti convenientemente tarata sulla base dei risultati sperimentali.

Attraverso i modelli calibrati è stato quindi possibile ottenere una mappatura dell'effettivo grado di connessione in opera offerto dal PVB su tutto il dominio delle singole lastre.

The mechanical behaviour of layered glass is determined by the capacity of the interface material (PVB or SGP) to transfer cutting actions between the plates it joins together.

The level of interconnection is therefore closely correlated with the tangential elasticity module of the synthetic material on site, which depends significantly on the temperature and load appli-

1. INTRODUZIONE

Il vetro è stato impiegato fino ad oggi nelle applicazioni strutturali prevalentemente sotto forma di elementi lastriiformi rinforzati o meno da cavi in acciaio e soggetti in misura dominante a flessione fuori piano (vettore momento-risultante appartenente al piano medio della lastra).

Con frequenza minore ma progressivamente crescente le lastre sono state impiegate anche come nervature, in-

cation time, as well as on the plane dimension of the element and the system of outer restraints.

The article describes the results of a series of experimental tests carried out at the Department of Structural Engineering of the University of Pisa, up to the breakage of 3200x2000 mm plates (the largest so far subjected to testing in Italy), supported at four points and stiffened at the intrados by means of pre-stressed stainless steel cables and

Analisi strutturale di grandi lastre in vetro stratificato rinforzate con cavi in acciaio

Structural analysis of large layered glass plates stiffened by steel cables

Maurizio Froli, Leonardo Lani

struts. The mechanical behaviour of plates is also described by finite element modelling calibrated on the basis of the experimental results.

By means of the calibrated models, it was therefore possible to obtain a mapping overview of the effective level of connection on site offered by PVB over the entire range of single plates.

tegralmente vitree o in sistema misto vetro-acciaio, soggette a flessione nel piano (vettore momento risultante ortogonale al piano medio dell'elemento).

Attorno al comportamento strutturale di piastre inflesse della prima categoria sono state condotte numerose campagne di studio sia teorico che sperimentale, riguardanti tuttavia in modo prevalente elementi di piccole dimensioni destinati a tamponare aperture o al massimo, nei casi più impegnativi, intere pareti. Viceversa il



Fig. 1 - Castello di Schloß Juval in Südtirol

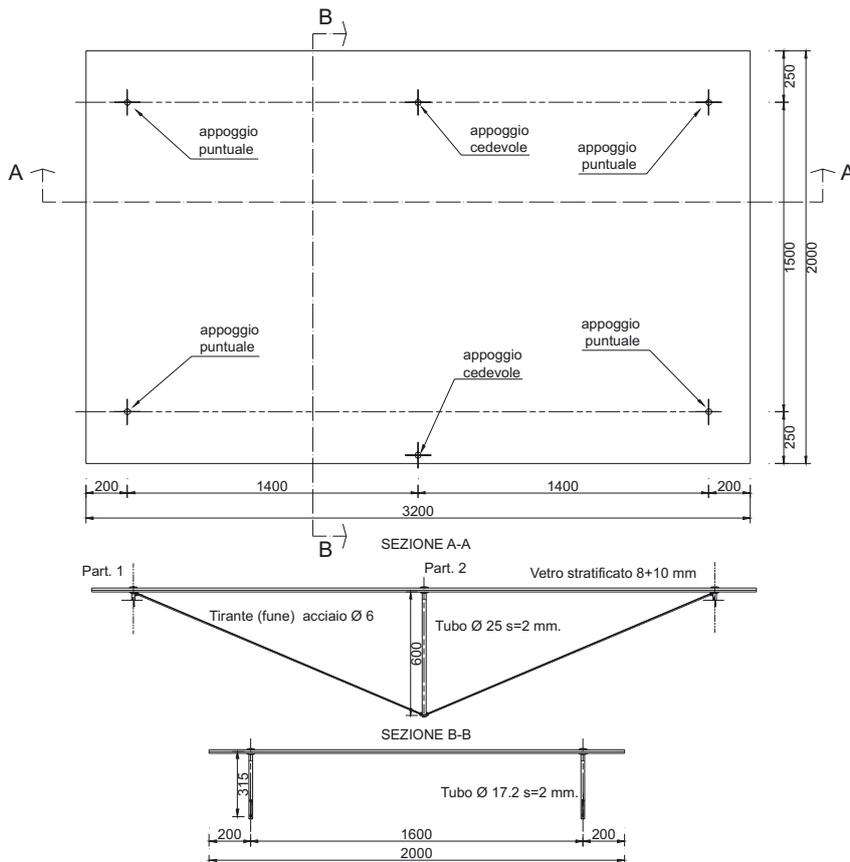


Fig. 2 - Schema e dimensioni geometriche della lastra

comportamento termo-meccanico di lastre di grandi dimensioni impiegate per realizzare orizzontamenti anche calpestabili costituisce ancora oggi un argomento non del tutto chiarito soprattutto a causa della forte dipendenza dalla temperatura delle caratteristiche meccaniche del materiale termoplastico di interfaccia (usualmente polivinilbutirrale: PVB) al punto che il grado di interconnessione di una lastra stratificata, realizzata cioè accoppiando due lastre di vetro mediante un sottile film di PVB varia in funzione della temperatura da monolitico sotto basse temperature ad accoppiato per semplice sovrapposizione sotto temperature maggiori o uguali a circa 40°C [Schuler C.,2003]. Inoltre, a causa del comportamento viscoso del PVB, una struttura in vetro stratificata con questo materiale esibirà differenti comportamenti deformativi e svilupperà diverse risorse statiche a seconda della durata di applicazione dei carichi [Schuler C. et Al., 2004]

In questa nota si presentano i risultati di una ricerca sul comportamento

meccanico di grandi lastre appartenenti alla categoria delle piastre inflesse fuori piano.

Nel corso della ricerca è stato studiato il comportamento meccanico di un tipico elemento strutturale di copertura realizzato con una lastra in vetro stratificato e temperato vincolata con dispositivi puntuali e rinforzata all'intradosso con un sistema di puntoncini e cavi pre-tesi in acciaio inox.

In particolare è stata analizzata la capacità del materiale di interstrato (PVB), di trasferire le azioni di taglio tra gli elementi che compongono lo stratificato. Le indagini sono state condotte per via sperimentale e teorica su due campioni differenti tra loro solo per i trattamenti di tempera.

La simulazione numerica, condotta mediante modellazione con Elementi Finiti, è stata opportunamente tarata sulla base dei risultati sperimentali consentendo di definire quali proprietà meccaniche dovessero essere attribuite agli elementi in modo da ottenere una descrizione della risposta statica sufficientemente aderente alla realtà fisica.

I campioni provati hanno rappresentato una prima assoluta in campo nazionale soprattutto in relazione alle loro dimensioni, ma anche per la tipologia dei vincoli, per la presenza delle funi metalliche e per la diversità dei trattamenti di tempera. Proprio a causa delle rilevanti dimensioni delle lastre è risultato particolarmente impegnativo per il produttore garantire un grado uniforme di scambio ionico superficiale nel campione temperato chimicamente.

2. DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO

Elementi simili a quelli oggetto dell'indagine sono già stati impiegati in Italia per la ricostruzione della copertura di circa 200 m² dei resti del castello appartenente all'esploratore Reinhold Messner (v. fig. 1).

I moduli sono in questo caso costituiti da pannelli rettangolari stratificati aventi dimensioni di 3400x2000 mm circa realizzati con due lastre di 8 mm di spessore entrambe temperate termicamente.

Ciascun elemento è vincolato puntualmente ai quattro vertici con attaches a "borchia" ed è rinforzato all'intradosso con due cavi longitudinali pre-tesi allo scopo di limitare la freccia massima e conferire alla struttura un ulteriore appoggio intermedio elasticamente cedevole.

Allo scopo di valutare preventivamente la capacità portante limite ultima dell'elemento tipo, alcuni moduli furono sottoposti a prove di carico uniforme presso l'Università di Innsbruck [Böck, et Al.; 1998] mediante l'applicazione diretta di sacchi riempiti di sabbia su pannelli posti in posizione orizzontale e con vincoli identici a quelli previsti in opera.

Attraverso *strain-gauges* a variazione di resistenza furono misurati gli andamenti delle deformazioni specifiche al variare del tempo di prova.

Tuttavia i risultati disponibili non chiariscono ancora numerosi aspetti importanti: non fu infatti effettuato alcun confronto tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti con modelli numerici o analitici, inoltre la determinazione della capacità del PVB di trasferire azioni di taglio, di primaria importanza per la determinazione degli sforzi nei pannelli in vetro stratificato, appare del tutto trascurata, come pure la valutazione

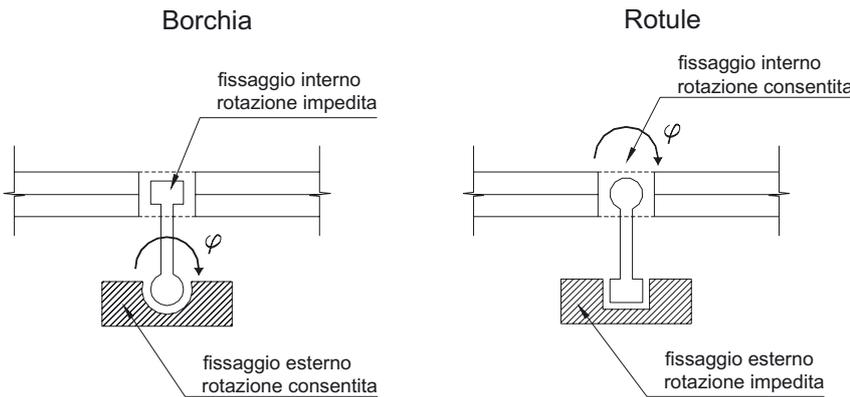


Fig. 3.1 - Schema del funzionamento di diversi dispositivi di supporto puntuali

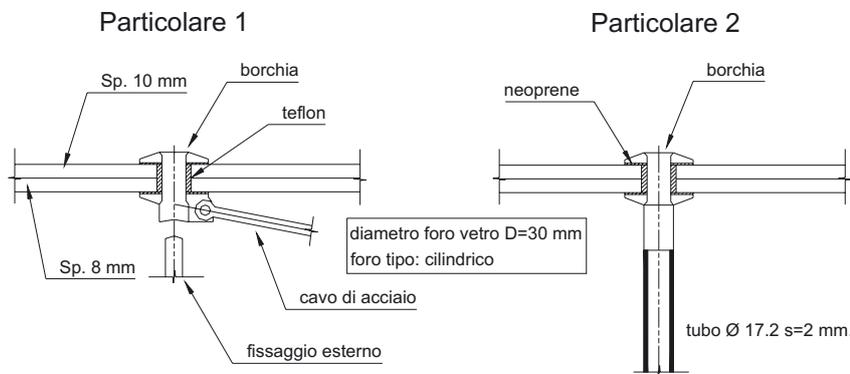


Fig. 3.2 - Schema delle borchie impiegate per il supporto della lastra

di eventuali effetti viscosi per carichi agenti per lunghi periodi [Behr, R.A.; 1986].

3. CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEI CAMPIONI

I due campioni sottoposti a prove sperimentali nel Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa sono tra loro identici per caratteristiche geometriche e di vincolo e differiscono tra loro solo per i trattamenti di tempera ai quali sono state assoggettate le lastre di vetro, come specificato al punto seguente.

Entrambe le lastre hanno forma rettangolare con lati di 3200x2000 mm e sono state vincolate con quattro appoggi puntuali a "borchia".

Il sistema di fissaggio puntuale a "borchia" si distingue da quello a "rotule" perché è in grado, a differenza di quest'ultimo, di sviluppare un certo grado di incastro nel suo intorno come rappresentato in **fig. 2** [Siebert, B.; 2004].

All'intradosso di ciascuna lastra, pa-

rallelamente ai lati più lunghi, sono stati posizionati due cavi longitudinali in un puntone in acciaio vincolato alla lastra tramite un dispositivo

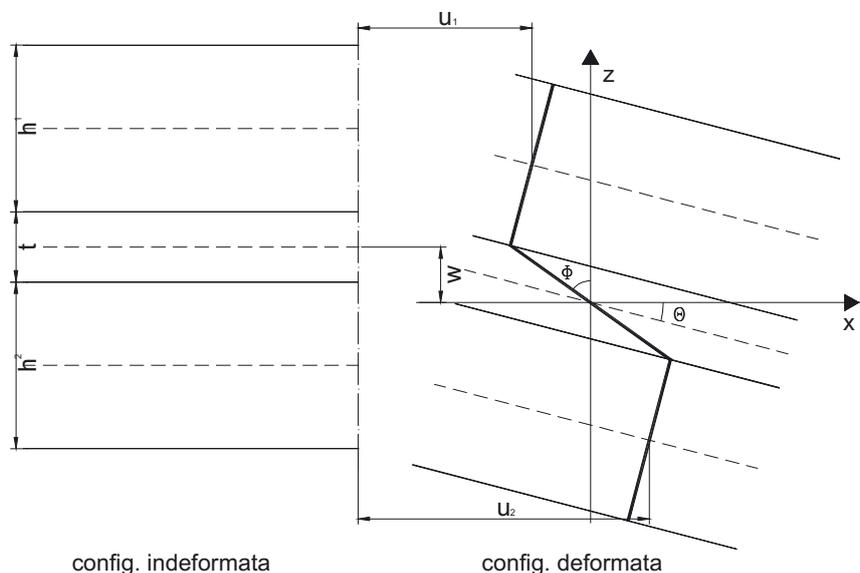


Fig. 5 - Problema della lastra stratificata



Fig. 4 - Particolare della borchia

puntuale posto nella mezzeria della stessa come mostrato in **fig. 3.1**.

In **fig. 3.2** è riportato infine lo schema dei dispositivi impiegati per vincolare la lastra ai quattro vertici (particolare 1) ed in mezzeria (particolare 2).

Tra vetro e metallo è stato disposto del Teflon, materiale ripartitore in grado di limitare la formazione di microfrazioni sul bordo del foro. La borchia del particolare 1, solidale all'attacco del cavo metallico, viene semplicemente appoggiata alla vite fissata al supporto esterno.

4. MATERIALI IMPIEGATI

I due campioni oggetto di studio sono costituiti da elementi in vetro silicato sodocalcico piano realizzati mediante il procedimento float conformi a quanto indicato nella Norma UNI EN 572-1, le cui caratteristiche fisiche e meccaniche sono riportate nella **tab. 4.1**.

Entrambi i campioni sono realizzati accoppiando due pannelli dello



Fig. 6.1 - Posizionamento della lastra per la Fase I



Fig. 6.2 - Posizionamento della lastra per la Fase II



Fig. 6.3 - Applicazione degli estensimetri alla lastra temperata chimicamente



Fig. 6.4 - Applicazione degli estensimetri alla lastra temperata termicamente

spessore di 8 mm + 10 mm in cui il materiale sintetico posto all'interfaccia è, come detto, polivinilbutirrale (PVB) dello spessore di 1,52 mm secondo norma UNI EN ISO 12543.

Una lastra è stata sottoposta a trattamento di tempera termica conformemente alla UNI EN12150, l'altra è stata temperata chimicamente secondo quanto disposto dalla Norma EN 12337. Questi due tipi di trattamento migliorano sensibilmente la resistenza a trazione del vetro [Froli, M, Lani, L.; 2004] conferendo al manufatto uno stato di compressione superficiale residuo senza peraltro alterare le proprietà fisiche e meccaniche indicate in **tab. 4.1**.

5. COMPORTAMENTO STATICO DEL CAMPIONE

Il comportamento meccanico della struttura oggetto di studio è risultato piuttosto complesso: staticamente la lastra è schematizzabile come una piastra inflessa appoggiata su sei punti dei quali i quattro vicini ai vertici possono essere considerati fissi mentre i due posti nella mezzeria dei lati lunghi risultano essere cedevoli elasticamente.

Inoltre i cavi inclinati disposti all'intradosso forniscono uno stato di sforzo agente nel piano della lastra che si sovrappone a quello agente fuori dal piano a causa dei carichi esterni.

La caratteristica principale che definisce il comportamento meccanico del pannello è legata alla possibilità di scorrimento relativo tra facce adiacenti della lastra stratificata. Tale aspetto è dovuto alla capacità del materiale di interfaccia PVB di trasferire le azioni di taglio in maniera limitata. Ciò comporta una notevole difficoltà nella descrizione, attraverso modelli matematici adeguati, del comportamento flessionale del vetro stratificato.

Il modello analitico proposto da Vallabhan (1993) è sviluppato imponendo un minimo all'energia potenziale totale del sistema costituito dai due strati di vetro spessi h_1 e h_2 tra i quali è interposto uno strato t di materiale sintetico deformabile a taglio. Gli strati di vetro si ipotizzano con differenti spessori ed entrambi dotati di energia di deformazione flessionale, mentre il materiale di interfaccia è dotato della sola energia di deformazione a taglio. Gli spostamenti verticali sono assunti uguali, e le sezioni rimangono piane solo nei singoli strati come schematizzato in **fig. 5**.

Da semplici considerazioni geometriche si deduce che mediamente la deformazione a taglio del PVB è data dalle espressioni:

$$\gamma_{xy} = \phi_x + \theta_x = \frac{u_1 - u_2 - \frac{\partial w}{\partial x} \left(\frac{h_1 + h_2}{2} + t \right)}{t} \quad (5.1a)$$

$$\gamma_{yz} = \phi_y + \theta_y = \frac{v_1 - v_2 - \frac{\partial w}{\partial y} \left(\frac{h_1 + h_2}{2} + t \right)}{t} \quad (5.1b)$$

Nella teoria lineare gli spostamenti nel piano u_i e v_i ($i=1,2$) si possono considerare nulli, essendo trascurabili le azioni membranali.

L'espressione dell'energia potenziale totale assume l'espressione:

$$\Phi = \bar{U}_b^{(1)} + \bar{U}_b^{(2)} + \bar{U}_c + \bar{\Omega} \quad (5.2)$$

dove:

$\bar{U}_b^{(i)}$ energia di deformazione flessionale degli strati di vetro $i=1,2$;

\bar{U}_c energia di deformazione a taglio del materiale di interfaccia dovuta a $\gamma_{xz} \gamma_{xy}$;

$\bar{\Omega}$ energia potenziale funzione dei carichi applicati;

La funzione energia di deformazione Φ viene espressa in funzione della sola variabile w . Minimizzando tale funzione si ottiene l'equazione delle piastre stratificate in termini dello spostamento verticale:

$$\left[(D_1 + D_2) \nabla^4 - \frac{G_c}{t} \left(\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} + t \right)^2 \nabla^2 \right] \cdot w = q \quad (5.3)$$

dove gli operatori ∇^2 e ∇^4 sono definiti dalle note espressioni:

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (5.4)$$

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right) \quad (5.5)$$

e inoltre:

$$D_i = \frac{1}{12} \frac{E \cdot h_i}{(1 - \nu^2)}$$

è la rigidezza flessionale della lastra i-esima;

G_c è il modulo di elasticità tangenziale del PVB.

L'espressione (5.3) evidenzia come la nota equazione della piastra sottile sia corretta dalla presenza del materiale di interfaccia attraverso l'introduzione della sua rigidezza a taglio G_c e dello spessore t .

In questa ricerca si è tuttavia preferito rinunciare all'impiego della formulazione di Vallabhan che non consentiva di analizzare stati di sforzo in regioni dotate di singolarità, come gli intorni dei fori, e che invece, come hanno confermato le esperienze, giocano un ruolo decisivo sulla resistenza della intera struttura. Per questo motivo il calcolo degli stati di sforzo è stato condotto con il più potente e versatile metodo degli Elementi Finiti (punto 7).

6. DESCRIZIONE DELLE PROVE E LORO FINALITÀ

Il programma sperimentale si è svolto, per entrambi i campioni, in due fasi: nella prima (FASE 1) è stato misurato il solo effetto della pretensione dei cavi e l'influenza della variazione di temperatura ambientale sul campo di deformazioni superficiali. A tal fine l'elemento è stato posto in un telaio verticale appoggiato in modo continuo su un supporto di teflon come mostrato in **fig. 6.1**. Nella seconda fase (FASE 2) le lastre sono state poste orizzontalmente su appoggi puntuali come mostrato in **fig. 6.2** e sottoposte a cicli di carico mediante applicazione diretta di pesi di acciaio di forma cilindrica, fino al collasso.

In entrambe le fasi la misurazione delle deformazioni specifiche e degli spostamenti è stata effettuata a breve e lungo termine rispettivamente tramite estensimetri elettrici (*strain gauges*) a variazione di resistenza e trasduttori induttivi di spostamento. Gli strumenti sono stati posizionati in entrambe le facce della lastra limitatamente ad un quarto di essa sia in considerazione della doppia simmetria dell'apparato sperimentale.

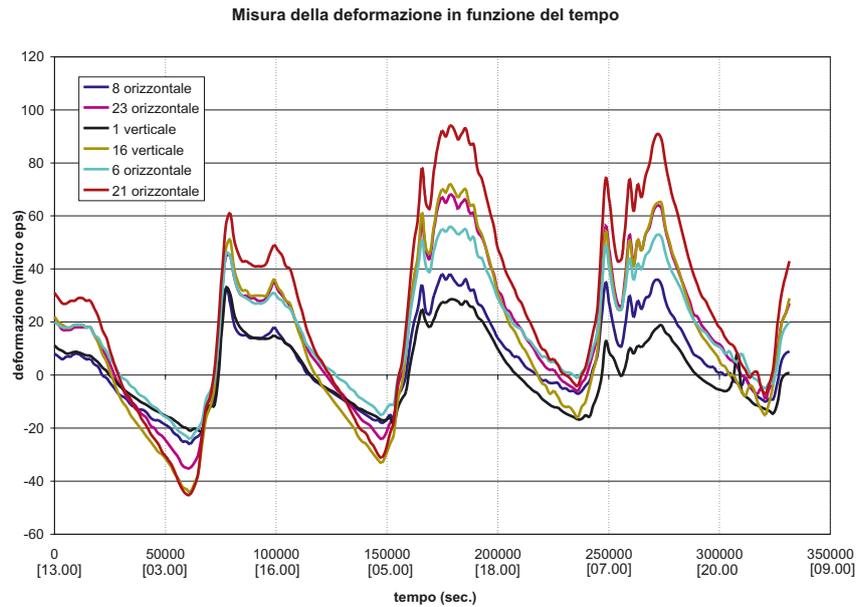


Fig. 6.5 - Andamento della deformazione al variare del tempo [ora siderale] nel campione temperato termicamente

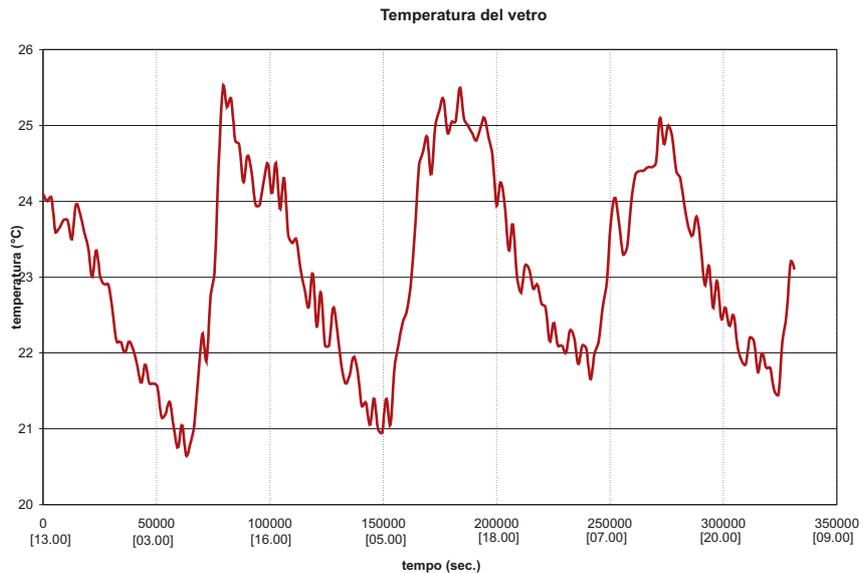


Fig. 6.6 - Andamento della temperatura del vetro temperato termicamente al variare del tempo [ora siderale]

Grandezza		Valore e unità di misura
Densità (18°)	ρ	2500 Kg/m ³
Durezza		6 unità (scala Mohs)
Modulo di Young	E	70 000 MPa
Coefficiente di Poisson	μ	0,2
Calore specifico	c	0,72x10 ³ J/(kg K)
Coefficiente di espansione lineare	α	9x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Conduttività termica	λ	1 W/(m K)
Indice di rifrazione medio alle radiazioni visibili	n	1,5

Tab. 4.1 - Caratteristiche fisiche e meccaniche del vetro

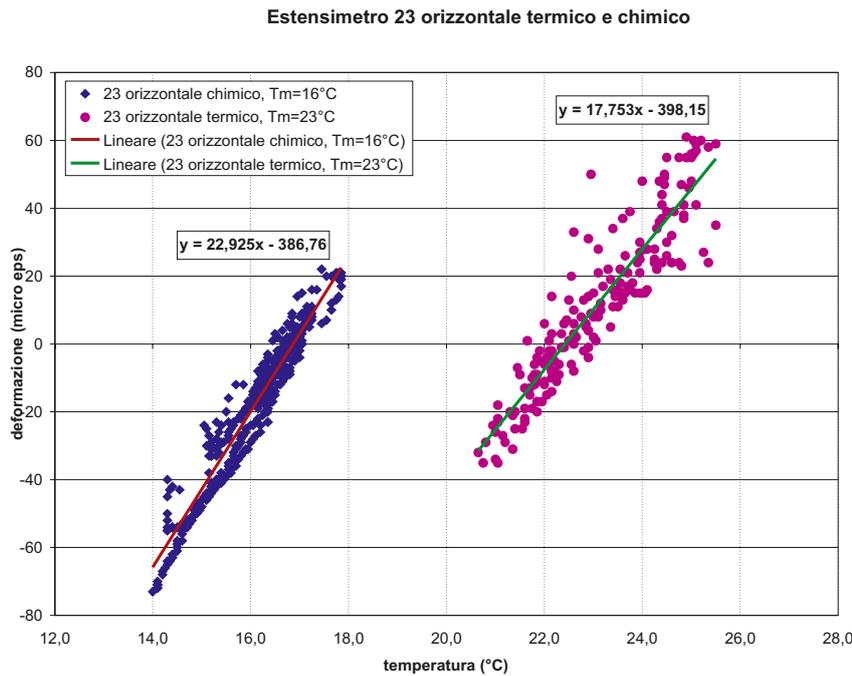


Fig. 6.7 - Correlazioni $\mu\epsilon-T$ secondo l'estensimetro 23 orizzontale per i provini temperati termicamente e chimicamente

6.1 FASE I: Analisi sperimentale dei campioni sottoposti alla sola pre-tensione dei cavi metallici. Comportamento del campione temperato termicamente e del campione temperato chimicamente

In questa fase la struttura è stata posta in posizione verticale e l'effetto del peso proprio è perciò assimilabile a quello indotto in una lastra pesante ed elastica appoggiata su suolo rigido. Lo stato tensionale che si instaura all'interno di essa è quindi descrivibile in forma chiusa. In questa configurazione sono stati tesi i cavi metallici fino ad ottenere una freccia orizzontale massima in mez-

zeria pari a 3 mm. Le due lastre sono state sottoposte ad un monitoraggio di tre giorni nel corso del quale sono state effettuate misure estensimetriche ogni trenta minuti come riportato in fig. 6.5 per il campione temperato termicamente.

Contemporaneamente (fig. 6.6) è stata misurata anche la temperatura del vetro allo scopo di depurare dalla quota puramente termica le deformazioni indotte dai carichi applicati durante la Fase II.

Lo studio delle correlazioni $\mu\epsilon-T$ ha consentito di dedurre la dipendenza in ogni punto di misura. Gli estensimetri, pur essendo situati in punti

anche tra loro molto vicini, hanno infatti evidenziato correlazioni diverse ed è stato quindi necessario calcolare per ciascuno di essi il legame tra temperatura e deformazione termica al fine di effettuare un corretto trattamento dei dati nella successiva Fase II.

Le funzioni $\mu\epsilon-T$ desunte dall'analisi del campione temperato termicamente sono state confrontate con quelle dedotte dall'analisi del campione temperato chimicamente riportando nel medesimo grafico i valori acquisiti come mostra, a titolo di esempio, la fig. 6.7 per l'estensimetro 23.

L'analisi dei grafici evidenzia che i due campioni rispondono diversamente alle variazioni termiche e in particolare si osserva che le equazioni di correlazione tra temperatura e deformazione termica differiscono tra loro soprattutto nel termine noto.

Tale fenomeno è spiegabile ricordando che il materiale di interfaccia PVB è un termoplasto [Albrecht, G., et Al; 2004] e quindi le sue caratteristiche meccaniche dipendono direttamente dalla temperatura in cui il materiale opera. Poiché le misure di deformazione termica sui provini temperati termicamente e chimicamente sono state effettuate per temperature medie ambientali rispettivamente pari a circa 23°C e 16°C, il PVB risulta trovarsi nei due casi in stati diversi di consistenza fisico-meccanica e quindi anche le correlazioni sono definite da equazioni diverse tra loro.

In definitiva, per quanto detto sopra, la correlazione trovata tra la deformazione termica e la temperatura è valida solo se impiegata, successiva-



Fig. 6.8 - Posizionamento della lastra e carico



Fig. 6.9 - Posizionamento finale dei pesi

mente, con temperature contenute entro l'intervallo di definizione della legge $\mu\epsilon-T$.

6.2 Fase II. Posizionamento delle lastre in orizzontale su 4 appoggi puntuali e applicazione del carico. Analisi dei risultati del campione temperato termicamente e del campione temperato chimicamente

In questa fase le lastre sono state messe in posizione orizzontale, appoggiate su quattro piedritti metallici e caricate direttamente in modo da realizzare un carico uniformemente distribuito, come mostrato in **fig. 6.8**.

Per ogni estensimetro è stata acquisita la deformazione specifica e di conseguenza sono state determinate le direzioni principali e l'intensità delle relative tensioni principali ipotizzando con ottima approssimazione un comportamento del materiale elastico lineare isotropo.

Dalle misure di temperatura effettuate nel corso della prova e utilizzando le correlazioni definite in Fase I, è stato possibile scindere la deformazione meccanica da quella termica essendo valido il principio di sovrapposizione degli effetti per questi valori di deformazione e di temperatura:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon^T + \epsilon_{mec} \quad (6.1)$$

con:

ϵ_{tot} : deformazione misurata;

ϵ^T : deformazione termica;

ϵ_{mec} : deformazione meccanica.

L'aspetto principale che si è voluto indagare in questa ricerca è la misura in cui il PVB è in grado di trasferire sforzi di taglio in una piastra inflessa di vetro stratificato. A tale scopo è possibile effettuare una prima valutazione, assolutamente preliminare, analizzando l'andamento delle tensioni in punti di uguali coordinate situati sulle superfici esterne della piastra.

Una misura indicativa del grado di connessione offerto dal PVB è data dal confronto tra il rapporto tra le tensioni in punti superficiali opposti.

$$\Theta = \frac{\sigma_{sup}}{\sigma_{inf}} \quad (6.2)$$

dove:

σ_{sup} : tensione meccanica all'estradosso della lastra;

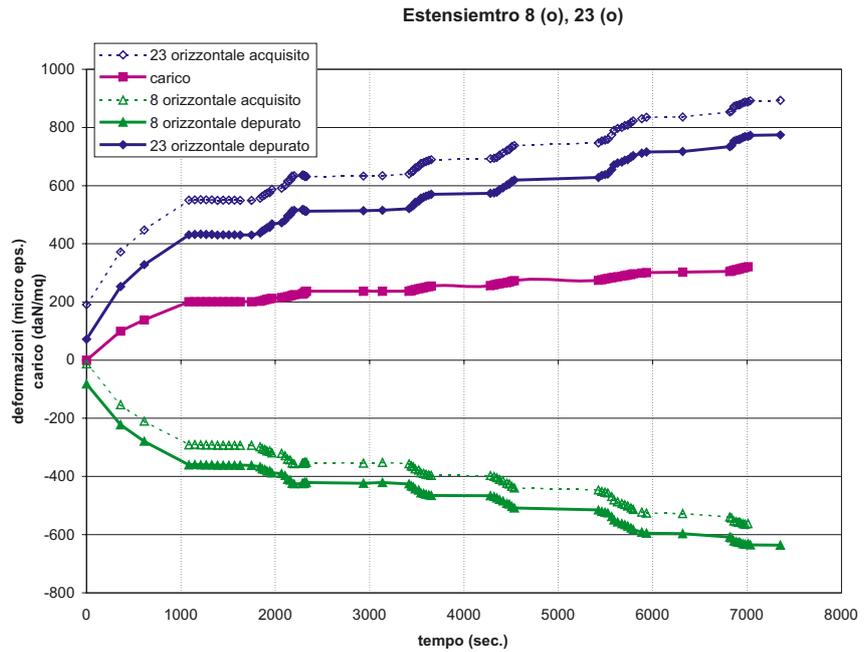


Fig. 6.10 - Misura della deformazione per gli estensimetri 8 e 23 orizzontale

Rapporto Q tra le tensioni principali degli estensimetri 8 e 23

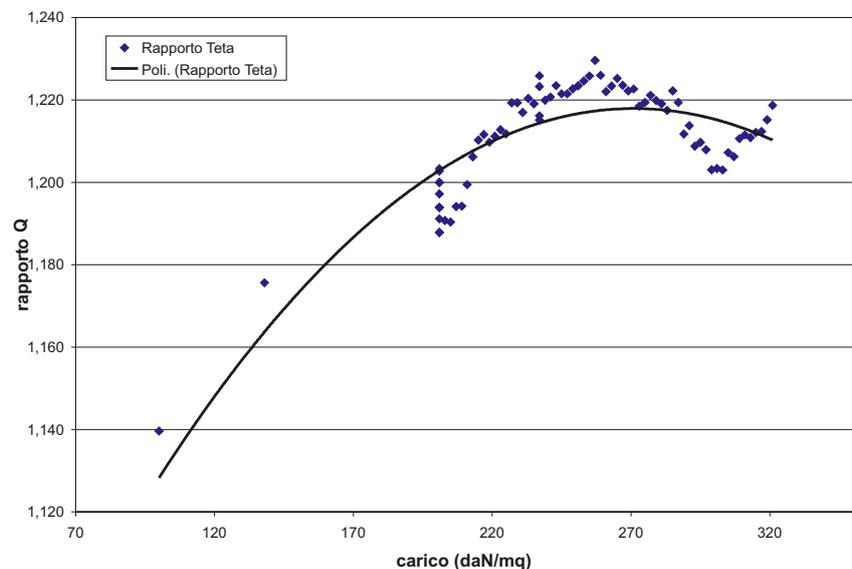


Fig. 6.11 - Andamento di Θ in funzione del carico applicato

σ_{inf} : tensione meccanica all'intradosso della lastra; $\bar{\Theta}$ ed il rapporto $\bar{\Theta}$ tra gli spessori h_1 e h_2 dei vetri che compongono lo stratificato:

$$\bar{\Theta} = \frac{h_{sup}}{h_{inf}} = \frac{10mm}{8mm} = 1,25 \quad (6.3)$$

Il rapporto $\bar{\Theta}$ assume il valore pari a 1 se il comportamento strutturale del vetro stratificato è assimilabile

a quello di una lastra monolitica, mentre assume il valore $\bar{\Theta}$ se il comportamento è assimilabile a quello di una struttura di tipo semplicemente "layered" in cui cioè il materiale plastico non è in grado di trasferire alcun sforzo di taglio. Valori intermedi corrispondono a stati in cui il PVB è in grado di trasmettere parzialmente tensioni tangenziali.

La valutazione del rapporto $\bar{\Theta}$ è tan-

Rigidezza tangenziale D ₂₂ [N/mm ³]	Modulo di elasticità tangenziale G [MPa]	Temperatura [°C]	Durata dei carichi [sec.]
140	212,80	0	<20
50	76,00	10(0)	10 (15 ore)
20	30,40	10 (0)	30 (30 ore)
10	15,20	10 (0)	50 (70 ore)
5	7,60	10 (0)	200 (190 ore)
3	4,56	20 (10)	4 (2 ore)
2	3,04	20 (10)	6 (5 ore)
1	1,52	20 (10)	15 (55 ore)
0,60	0,91	20 (10)	60 (40 ore)
0,35	0,53	30 (20)	20 (15 ore)

Tab.7.1 - Valori di D₂₂ assegnati al PVB

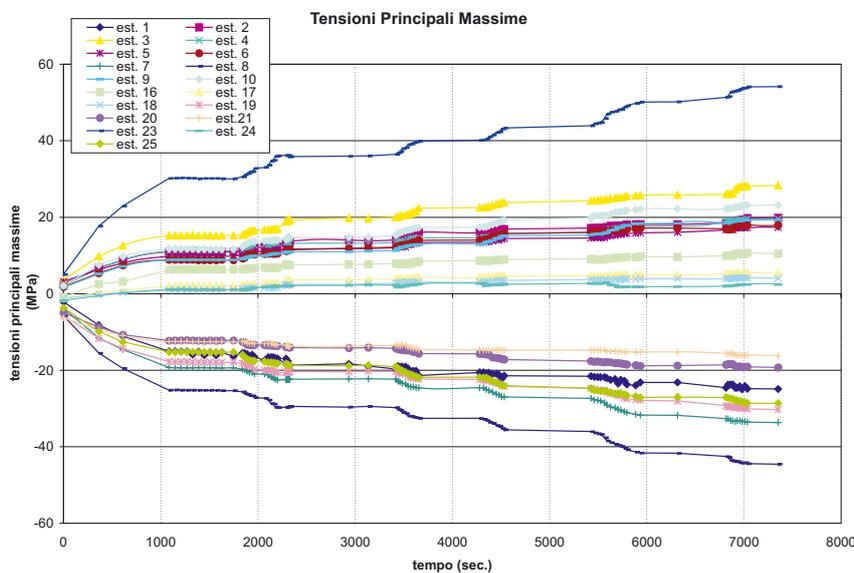


Fig.6.12 - Andamento delle tensioni massime principali per il provino temperato termicamente

to più significativa quanto più grandi sono i valori rilevati delle tensioni σ_{sup} e σ_{inf} . Sarà quindi determinante calcolare tale rapporto con i valori prossimi alla rottura in modo da descrivere il comportamento strutturale del vetro stratificato in maniera compiuta.

Nel corso delle prove sono stati effettuati diversi cicli di carico e scarico in modo da monitorare i diversi comportamenti a breve e lungo termine che caratterizzano il vetro stratificato. Qui si riportano solo alcuni risultati ottenuti nel programma di carico *finale* nel corso del quale si è cercato di portare a rottura i due campioni.

Nella sequenza di carico *finale* si è proceduto aumentando il carico progressivamente fino ad un valore di 350 daN/m² circa nel tentativo

di provocare il collasso delle lastre. Tale evento non è stato raggiunto nella lastra temperata termicamente e, per motivi di sicurezza, la prova è stata interrotta.

Questa sequenza di carico, sebbene non abbia portato il campione alla rottura, ha indotto sul pannello uno stato tensionale elevato confrontabile con i valori *Limite di Rottura* indicati dalla Normativa prEN13474 (CEN TC/129; 2005). Gli spostamenti indotti dal carico finale, di notevole entità, sono stati comunque assecondati in maniera appropriata dal sistema di fissaggio che ha consentito la rotazione delle quattro *borchie* poste ai vertici della piastra.

In fig. 6.10 si riporta l'andamento delle deformazioni degli estensimetri 8 e 23 nella lastra temperata termicamente in funzione del tempo

di prova. Questi strumenti hanno fornito le misure più significative in quanto sono posizionati in corrispondenza del puntone di mezzeria dove si hanno le massime sollecitazioni di trazione.

Il rapporto Θ , calcolato in corrispondenza del carico finale per gli estensimetri 8 e 23, fornisce il valore:

$$\Theta = \frac{774 \mu\epsilon}{636 \mu\epsilon} = 1,22 \quad (6.4)$$

Si osserva che il comportamento della lastra stratificata è, in corrispondenza del foro di mezzeria, assimilabile a quello "layered". È importante precisare che questo comportamento può dipendere non solo dal livello di carico cui è sottoposta la struttura, come intuibile, ma anche dalla posizione geometrica in cui viene effettuata l'indagine e più precisamente dalla vicinanza o meno dai fori dove in generale è lecito aspettarsi un comportamento di questo tipo.

È interessante riportare in grafico l'andamento del rapporto Θ in funzione del carico per apprezzare come questo incide sul comportamento della lastra stratificata. In fig. 6.11 si riporta il Θ calcolato negli estensimetri 8 e 23.

Il grafico mostra che per valori del carico inferiori a 150 daN/m² il materiale di interfaccia è in grado di trasmettere le azioni tangenziali in maniera piuttosto consistente risultando le tensioni agenti sulle superfici della lastra paragonabili tra loro. Con un carico di 250 daN/m² il comportamento strutturale del vetro stratificato si avvicina invece decisamente a quello limite in cui il PVB non è in grado di trasferire alcuno sforzo di taglio ed in cui il rapporto Θ assume appunto il valore di 1,25.

Gli estensimetri 10 e 25 consentono di apprezzare il comportamento strutturale al centro della lastra, lontano dai fori. In questo caso per il carico finale risulta essere:

$$\Theta = \frac{\varepsilon_{inf}}{\varepsilon_{sup}} = \frac{409 \mu\varepsilon}{331 \mu\varepsilon} = 1,23 \quad (6.5)$$

Si deduce quindi, sempre in via preliminare, che anche lontano dai fori e per questo livello di carico il comportamento strutturale di questa lastra è il medesimo di quello rilevato vicino ai fori.

Dall'analisi degli andamenti delle tensioni principali del provino temperato termicamente e riportato in figura 6.12, è immediato notare come solo nell'estensimetro 23 si ha una tensione importante di circa 54 MPa. La lastra è quindi soggetta a degli sforzi di trazione inferiori a 20 MPa per gran parte della sua estensione e la rottura avverrà di conseguenza per il raggiungimento, in zone molto limitate, di uno stato tensionale superiore alla resistenza del materiale il quale, privo di qualsiasi capacità di redistribuzione plastica delle tensioni, provocherà il collasso dell'intera struttura pur essendo soggetta quasi ovunque a tensioni di trazione lontane dai valori limite.

Al fine di portare a collasso il campione temperato termicamente, è stato predisposto un programma di carico speciale, capace di indurre una elevata tensione di trazione proprio in corrispondenza dei fori di mezzeria a discapito degli altri punti della lastra. Un peso di 13 kN è stato posizionato in maniera eccentrica per massimizzare ulteriormente la tensione di trazione nei dintorni del foro di mezzeria, come disposto in [fig. 6.13](#), venendo ovviamente meno alla condizione di simmetria. La massima tensione misurata ha raggiunto circa 100 MPa in corrispondenza dell'estensimetro 23.

Il campione temperato chimicamente ha subito una fessurazione prematura durante il programma di carico a lungo termine. La tipologia di rottura è quella tipica del vetro temperato chimicamente, caratterizzata da fessure isolate che consentono alla struttura di possedere una capacità residua di portare i carichi grazie alla azione di collegamento mutuo esercitata dal PVB.

Nonostante il danneggiamento prematuro, si è voluto comunque sot-

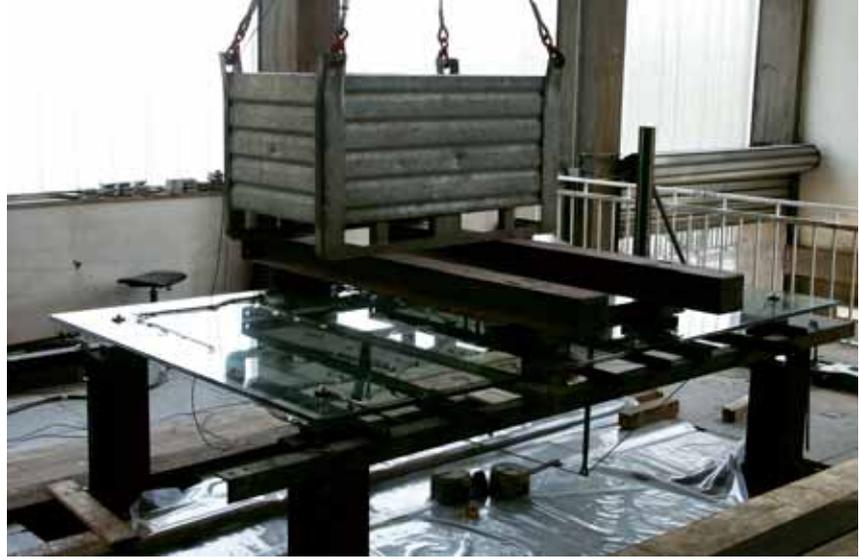


Fig. 6.13 - Carico concentrato eccentrico



Fig. 6.14 - Collasso della lastra di vetro temperato termicamente

toporre il campione alla stessa sequenza di carico *finale* applicata al pannello temperato termicamente con lo scopo di indagare la capacità portante residua della lastra [Kott, A., Vogel, T., 2003].

Durante l'applicazione del carico sono state effettuate misure estensimetriche con una scansione di 4 secondi e contemporaneamente è stato rilevato l'abbassamento in mezzeria mediante un trasduttore induttivo di spostamento.

Il carico finale, uguale a quello della lastra temperata termicamente, è stato mantenuto costante fino al raggiungimento del collasso totale avvenuto dopo circa 15 minuti. Il cedimento strutturale è avvenuto in maniera graduale evidenziando come il vetro stratificato, temperato chimicamente, abbia una migliore "duttilità" strutturale, dovuta alla diversa forma di rottura, rispetto al

vetro temperato termicamente.

In [fig. 6.17](#) si riporta l'andamento delle deformazioni acquisite dagli estensimetri 10 e 25 verticali posizionati nel centro della lastra assieme al livello di carico.

Da questa figura appare con evidenza il susseguirsi di perturbazioni del segnale causate dalla propagazione delle fessure esistenti e dalla formazione di nuove. Si evidenzia altresì come la presenza di numerose fessure sul pannello di 8 mm, dove è applicato l'estensimetro n° 10, non alteri la capacità di questo strato di trasferire i carichi.

Nelle [figg. 6.19, 6.20 e 6.21](#) sono riportate infine delle immagini fotografiche che evidenziano la ragnatela delle fessure nel vetro temperato chimicamente, riproducibili con buona approssimazione il tipico quadro delle linee isostatiche.

Le esperienze condotte sui due cam-



Fig. 6.15 - Modalità di collasso della lastra temperata termicamente



Fig. 6.16 - Particolare della lastra temperata termicamente collassata

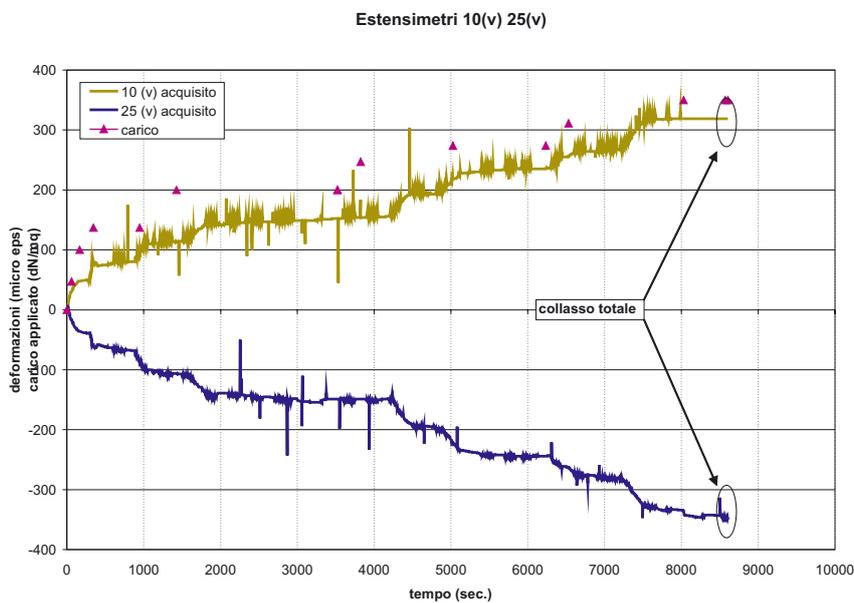


Fig. 6.17 - Andamento delle deformazioni acquisite dagli estensimetri 10(v) e 25(v) nella lastra temperata chimicamente

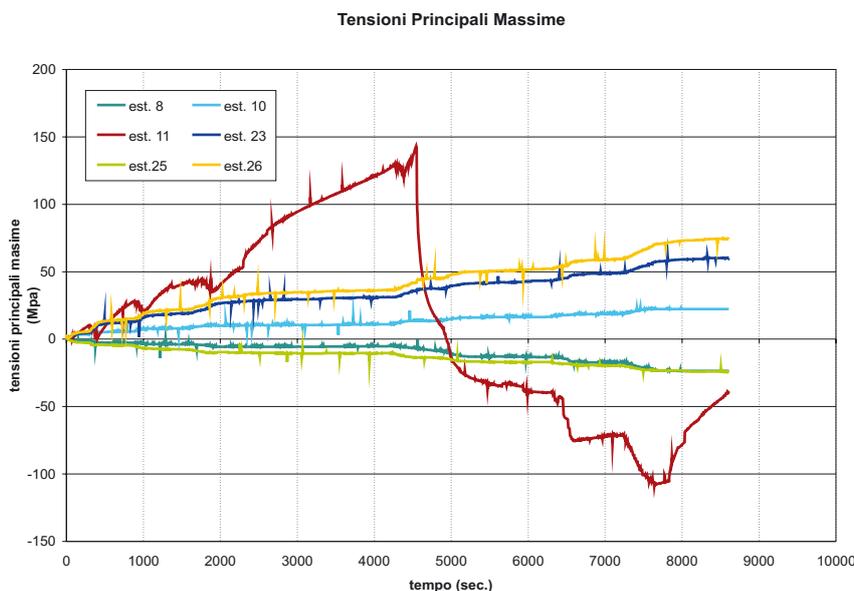


Fig. 6.18 - Andamento delle massime tensioni principali nella lastra temperata chimicamente

pioni hanno consentito di chiarire numerosi aspetti legati al comportamento meccanico di strutture complesse che è risultato dipendere in maniera decisiva dalle dimensioni geometriche, dalle modalità di vincolo oltre che, naturalmente, dal materiale impiegato.

Di seguito vengono riassunti gli aspetti più significativi dedotti dalle prove sperimentali dei due campioni di lastra.

Lastra temperata termicamente

1. La stima, effettuata in Fase I, della correlazione tra temperatura della lastra e deformazione termica, ha permesso nella Fase II di scindere il contributo meccanico da quello termico, in modo da apprezzare lo stato tensionale che si instaura nel pannello a seguito dell'applicazione del carico esterno.

2. Per i carichi applicati a lungo termine non sono stati rilevati apprezzabili fenomeni viscoelastici.

3. Le tensioni maggiori si hanno in corrispondenza del foro di mezzera.

4. L'analisi preliminare del grado di connessione tra i due strati di vetro, effettuata analizzando il rapporto Θ , ha mostrato come il materiale di interfaccia è in grado di trasferire azioni di taglio in maniera limitata quando la struttura è soggetta ad un carico paragonabile a quello di rottura.

5. Il collasso della struttura è immediato interessando contemporaneamente entrambi gli strati che compongono lo stratificato, la lastra collassata non possiede alcuna capacità residua di portare i carichi.

Lastra temperata chimicamente

L'analisi sperimentale della lastra temperata chimicamente è stata condizionata dalla rottura prematura dello strato di 8 mm, con formazione di microfessure dopo circa due ore di applicazione di un carico costante relativamente basso. Evidentemente il trattamento di tempera è risultato difettoso a causa delle considerevoli dimensioni geometriche della struttura che hanno impedito un adeguato alloggiamento del campione di vetro nella vasca di scambio ionico. La prova ha comunque evidenziato importanti aspetti di una struttura sottoposta ad un trattamento di tempera non convenzionale in relazione



Fig. 6.19 - Vista della lastra collassata



Fig. 6.20 - Particolare del puntone di mezzera



Fig. 6.21 - Particolare dell'appoggio

alla sua dimensione. Le peculiarità riscontrate dall'esperienza sono elencate qui di seguito.

1. La diversa temperatura media ambientale in Fase I e in Fase II, rispetto all'esperienza precedente, ha conferito al materiale di interfaccia una maggiore rigidità a taglio. Tale proprietà ha influito sia sulla correlazione temperatura-deformazione termica che sul comportamento flessionale del pannello.

2. La formazione delle fessure nel pannello di 8 mm è avvenuta in maniera progressiva, senza pregiudicare, apparentemente, la capacità portante della struttura.

3. Gli strumenti posizionati lontano dalle fessure hanno continuato ad acquisire le deformazioni specifiche in maniera corretta non risentendo del danneggiamento parziale della struttura.

Il collasso totale della lastra è risultato quindi caratterizzato dalle modalità di rottura tipiche del vetro temperato chimicamente i cui frammenti, di dimensioni caratteristiche molto maggiori dello spessore, consentono assieme al materiale di interfaccia, lo sviluppo di una non trascurabile portanza post-critica.

7. MODELLAZIONE NUMERICA AGLI ELEMENTI FINITI

Attualmente il modello ad Elementi Finiti più raffinato capace di riprodurre numerosi aspetti fisici è quello definito da elementi solidi per i singoli strati di vetro e da elementi interfaccia che simulano il comportamento del PVB. Assegnando opportuni moduli tangenziali G agli elementi interfaccia è possibile cogliere la gamma dei comportamenti che caratterizza il vetro stratificato in funzione della temperatura e della durata dei carichi.

L'adozione di questo modello permette di descrivere il comportamento tridimensionale della struttura. L'aspetto importante della valutazione dell'andamento tensionale sullo spessore nei dintorni non è apprezzabile con gli altri modelli semplificati mentre è possibile con l'uso di elementi solidi.

In **fig. 7.1** è riportato il modello agli elementi finiti della lastra in vetro stratificato. Si possono notare gli elementi "solidi" per la modellazione del vetro e quelli "interfaccia" per la modellazione del PVB. I nodi del modello di ciascuna lastra sono circa 35000 e gli elementi circa 7500.

Le analisi fin qui descritte sono state condotte assumendo per il modulo di elasticità tangenziale del PVB valori tratti dalla letteratura [Schuller, C; 2003]. Il valore della rigidità tangenziale D_{22} assegnata agli elementi di interfaccia può variare in realtà in un ampio intervallo, in funzione della temperatura e della

durata dei carichi, nel quale il PVB può sviluppare un apprezzabile comportamento a taglio. Le rigidità D_{11} e D_{22} (normale e tangenziale) impiegate nella modellazione degli elementi di interfaccia sono legate alle grandezze meccaniche E e G del PVB attraverso il legame:

$$\begin{cases} E = 1,52 \cdot D_{11} \\ G = 1,52 \cdot D_{22} \end{cases} \quad (7.1)$$

Nella **tab. 7.1** sono riportati i valori adottati in funzione della temperatura e della durata dei carichi in cui la struttura può operare.

I valori in parentesi sono relativi a condizioni atmosferiche e di carico alternative; ad una temperatura più bassa corrisponde, a parità di rigidità del PVB, una durata dei carichi maggiori.

È stato studiato il comportamento meccanico della struttura analizzando la distribuzione delle tensioni al variare delle caratteristiche meccaniche del PVB. Attraverso questa mo-

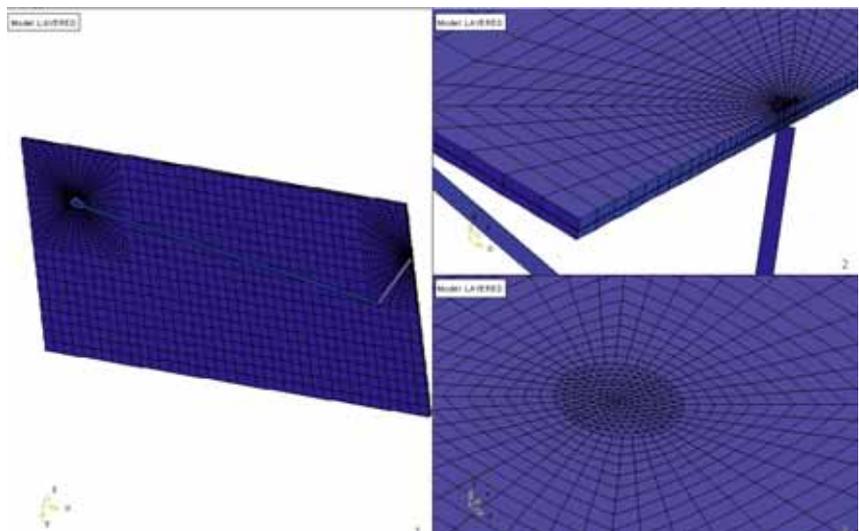


Fig. 7.1 - Modello F.E. dell'elemento in vetro stratificato

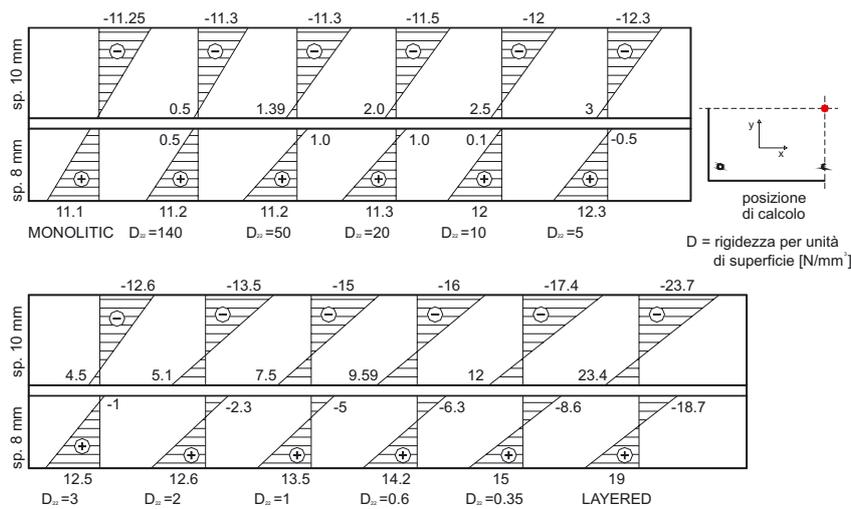


Fig. 7.2 - Andamento della tensione σ_{yy} [MPa] sullo spessore nel punto di mezzeria (LC3)

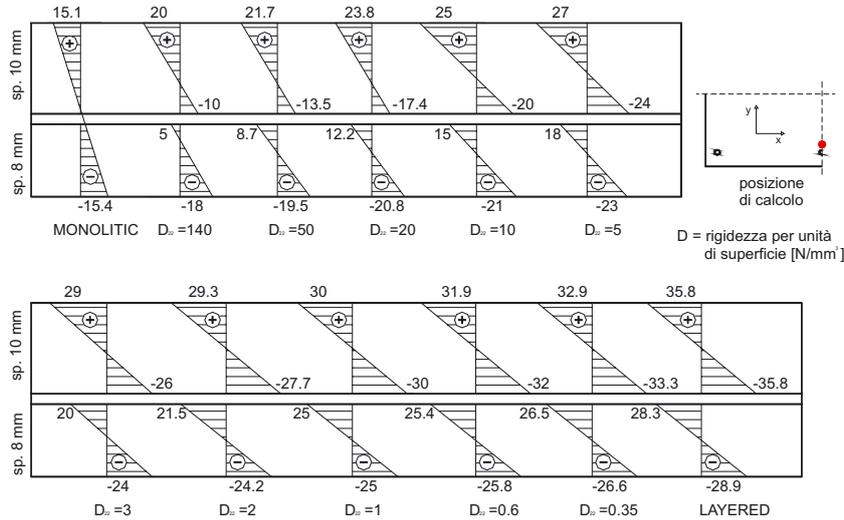


Fig. 7.3 - Andamento della tensione σ_{xx} [MPa] sullo spessore vicino al foro di mezzeria (LC3)

dellazione è stato possibile cogliere la variazione della tensione sullo spessore che caratterizza le strutture stratificate, comportamento legato al fatto che le sezioni rimangono piane solo in ogni singolo strato di vetro. Si passa da un comportamento tipico delle lastre "monolitiche" a quello delle strutture "layered" in cui il materiale di interfaccia è in grado di trasmettere degli sforzi di taglio in maniera molto limitata o nulla. In fig. 7.2 e 7.3 si riportano per una condizione di carico "LC3" di 1,80 kN/m² gli andamenti, sullo spessore, delle tensioni principali σ_{yy} e σ_{xx} [MPa] rispettivamente al centro della lastra ed in prossimità del foro di mezzeria.

Analizzando l'andamento tensionale riportato in fig. 7.2, che è rappresentativo di un punto lontano dai fori, si osserva che:

1. per valori di D_{22} variabili tra 3 e 140 MPa l'andamento della tensione principale è assimilabile a quello tipico del vetro monolitico;
2. il passaggio da comportamento ideale "monolitico" a quello "layered" porta ad un incremento della tensione massima di trazione del 100% ;
3. valori di D_{22} variabili tra 3,00 a 0,35 MPa, relativi a situazioni ambientali di comune esercizio della struttura, forniscono degli andamenti tensionali tipici delle strutture "layered" con un incremento del valore massi-

mo della tensione del 50% circa. Analizzando la fig. 7.3, che rappresenta un punto in prossimità dei fori, si osserva che:

1. anche per $D_{22} = 140$ MPa, valore della rigidezza del PVB relativa a temperature estremamente rigide, il comportamento meccanico dell'elemento non è assimilabile a quello del vetro monolitico;
2. il passaggio da comportamento ideale "monolitico" a quello "layered" porta ad un incremento della tensione massima di trazione del 130% circa;
3. già per $D_{22} = 20$ MPa il PVB è in grado di trasmettere azioni di taglio in maniera molto limitata.

Da quanto detto si può concludere che anche ipotizzando un unico valore caratteristico del modulo di elasticità tangenziale G del PVB la capacità di trasferire le azioni di taglio da uno strato all'altro dipende dalla posizione all'interno del pannello. Il grado di connessione tra vetri stratificati infatti dipende in generale dal rapporto tra rigidezza flessionale e rigidezza a taglio della lastra. Vicino ai fori si ha così un apprezzabile grado di scorrimento anche assegnando una elevata rigidezza G al materiale sintetico.

Ai fini progettuali è utile introdurre la grandezza adimensionale "Strength Factor" introdotta da Nagalla [Nagalla et Al.;1985] e definita come:

$$SF = \frac{\sigma_{mono}}{\sigma_{lam}} \quad (7.2)$$

σ_{mono} : tensione massima di trazione nel punto analizzato nel caso di lastra monolitica;

σ_{lam} : tensione massima di trazione nel punto analizzato della lastra stratificata con PVB avente capacità specifiche di trasferire sforzi di taglio;

In fig. 7.4 si riporta l'andamento dello SF calcolato al centro della lastra secondo la (7.2).

In fig. 7.5 si riporta l'andamento dello SF calcolato in prossimità del foro di mezzeria calcolato secondo la (7.2).

I grafici sopra esposti mettono in evidenza come in prossimità del foro di mezzeria il materiale di interfaccia sia in grado di trasmettere le azioni di taglio da uno strato all'altro in maniera molto più limitata che lontano dai fori come avviene, ad esempio, al centro della lastra.

Questo comportamento, confermato anche da ricerche precedentemente effettuate su campioni di piccole dimensioni [Schuler, C. et Al.;2004], è determinato, come affermato precedentemente, dal rapporto tra la rigidità flessionale della lastra e quella a taglio.

Un modulo G del PVB pari a 7 MPa fornisce al centro della lastra un SF pari a 0,90, ciò porta ad una tensione massima di trazione nel vetro stratificato che è circa uguale a quella che si ha nella stessa lastra considerata monolitica. Viceversa in prossimità del foro la tensione massima di trazione nel vetro stratificato è circa il doppio di quella che si ottiene ipotizzando un comportamento monolitico del pannello.

8. STIMA DELLE CARATTERISTICHE DEL PVB

È possibile stimare le caratteristiche meccaniche in sito del materiale di interfaccia di un vetro stratificato confrontando il modello numerico della struttura con i dati sperimentali desunti dall'esperienza in laboratorio [Schuler, C. et Al. ;2004]. Tale approccio non rappresenta un metodo diretto per misurare il modulo di elasticità tangenziale del materiale di interfaccia, ma consente di determinare dei valori con una accuratezza sufficiente per poterli impiegare in fase di analisi strutturale e di progettazione.

Del resto metodi diretti eseguiti mediante prove di taglio su campioni di piccole dimensioni, forniscono valori applicabili solo se riferiti a quella particolare situazione strutturale essendo la capacità del PVB di trasferire azioni di taglio legata a fattori geometrici come le dimensioni della struttura e la presenza di fori nella lastra. Sarebbe quindi inopportuno applicare i valori desunti da una caratterizzazione su piccoli campioni a strutture più complesse come sono le lastre vincolate puntualmente impiegate per realizzare coperture o facciate sospese.

Dal modello numerico si trovano dei risultati, in termini di spostamenti, tensioni e deformazioni, che sono funzione delle caratteristiche assegnate al modulo di elasticità tangenziale G del PVB. Dall'analisi sperimentale si acquisiscono invece i dati in funzione della temperatura in cui è stata eseguita la misurazione

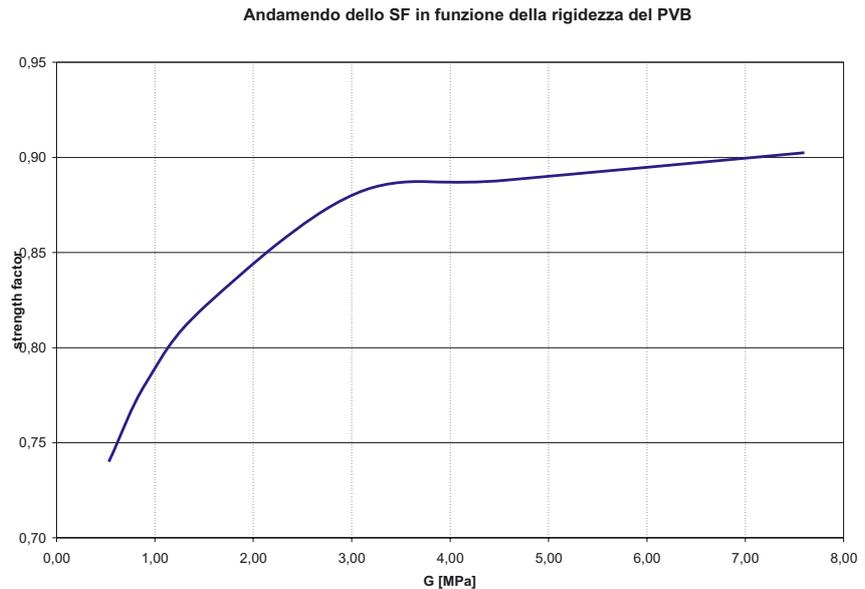


Fig. 7.4 - Andamento del SF calcolato in mezzeria in funzione del modulo G [MPa] assegnato PVB

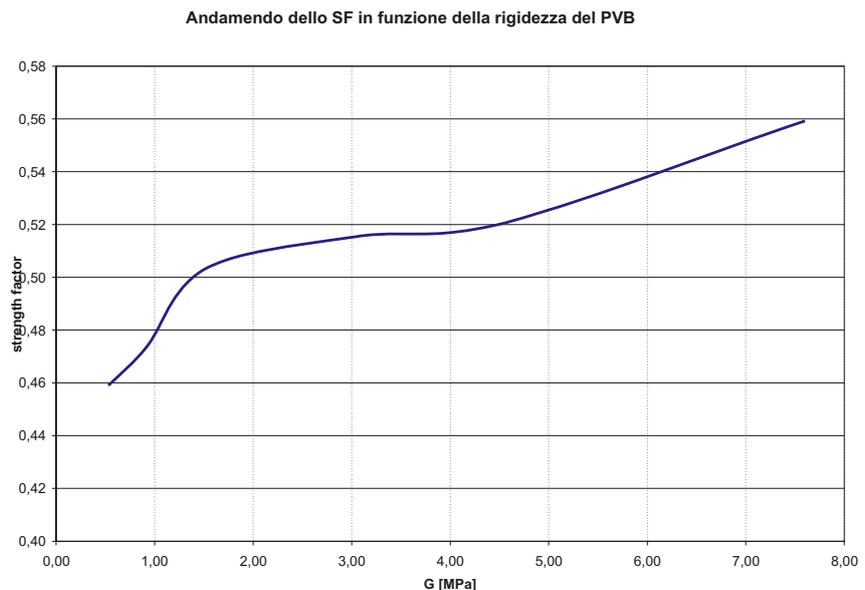


Fig. 7.5 - Andamento del SF calcolato in prossimità del foro di mezzeria in funzione del modulo G [MPa] assegnato PVB

e del tempo di prova. Tarando opportunamente il modello numerico ed uguagliando i risultati numerici con i dati sperimentali è possibile stimare il valore in sito del modulo di elasticità tangenziale del materiale di interfaccia [Vallabhan, C.V.G. e Al.; 1993].

La prima stima è stata effettuata uguagliando la massima tensione principale di trazione misurata all'estradosso in prossimità del foro di mezzeria nell'estensimetro 23 per

la condizione di carico LC5 definita in 200 daN/m² come riportato in **tab. 8.1**.

Si riporta in **fig. 8.1** l'andamento nello spessore del vetro delle tensioni principali desunte dall'analisi agli elementi finiti e in laboratorio.

Il confronto tra modello teorico e sperimentale è riassunto in **tab. 8.2** dove sono riportati i rapporti ζ tra le tensioni teoriche σ_t e quelle reali σ_r , avendo assegnato il valore di $G=0,912$ MPa ($D_{22}=0,60$ N/mm³) al

Grandezza di stima	Posizione	Condizione di carico	Temperatura del vetro
Tensione σ_{max}	estensimetro 23	LC5=200 daNN/m ²	25 °C

Tab. 8.1 - Parametri impiegati per la stima del modulo di elasticità tangenziale del PVB

Posizione	Rapporto $\zeta = \sigma_t / \sigma_r$
Estensimetro 23	0,99
Estensimetro 8	0,97

Tab. 8.2 - Confronto tra modello teorico per G=1,52 MPa del PVB e modello sperimentale

PVB nella modellazione numerica. Nella **fig. 8.1** è riportato anche il rapporto Θ tra la tensione teorica all'estradosso e quella all'intradosso, il comportamento strutturale del pannello stratificato tenderà a quello tipico delle strutture *layered* se il rapporto Θ tenderà al valore 1,25, viceversa un Θ pari a 1 è tipico delle strutture monolitiche.

Il carico di 200 daN/m² è stato mantenuto costante, in fase di analisi in laboratorio, per 10 minuti senza che si riscontrasse alcun fenomeno dovuto alla viscosità del materiale di interfaccia. Il valore stimato di G è quindi funzione della sola temperatura del vetro. Dalla stima eseguita secondo parametri riportati in tabella 8.2 si può concludere che il valore

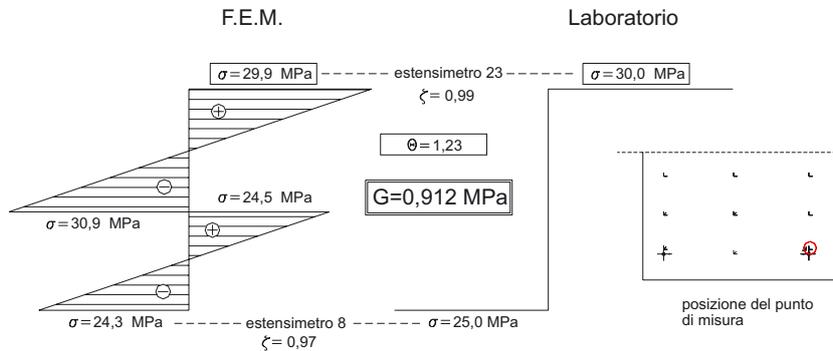


Fig. 8.1 - Confronto tra modello numerico e sperimentale - estensimetri 8, 23

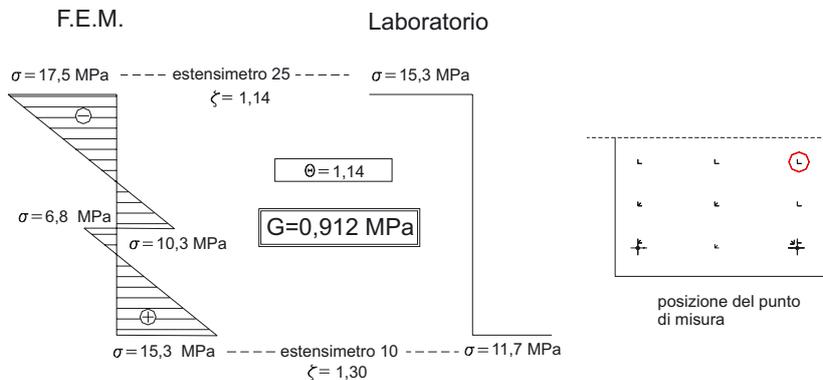


Fig. 8.2 - Confronto tra modello numerico e sperimentale - estensimetri 10, 25

del modulo di elasticità tangenziale del PVB è G=0,912 MPa. Tale valore fornisce non solo un rapporto ζ pari a uno nell'estensimetro di riferimento della stima, ma anche nell'estensimetro opposto, convalidando ulteriormente il risultato ottenuto.

Al fine di verificare se il valore stimato di G può essere assunto costante in tutta la lastra è utile confrontare le tensioni teoriche e sperimentali anche per gli altri estensimetri.

In **fig. 8.2** è riportato il confronto per gli estensimetri 10 e 25 che si trovano al centro della lastra.

L'ipotesi di accettare un unico valore del modulo di elasticità tangenziale del PVB risulta confortata dai dati sperimentali. Essa rappresenta ovviamente una notevole semplificazione che appare del resto quasi indispensabile: all'atto pratico risulterebbe infatti estremamente complesso riuscire a stimare il valore da assegnare a G in funzione anche della posizione all'interno della lastra.

9. CONCLUSIONI

In questa ricerca è stato analizzato il comportamento termo-meccanico di una struttura piana di copertura realizzata con una lastra rettangolare in vetro stratificato e temperato rinforzata con dei cavi metallici pretesi posti all'intradosso. Il sistema di supporto, di tipo puntuale, è costituito da sei borchie fissate al pannello mediante fori cilindrici del diametro di 30 mm. Sebbene la lastra oggetto di studio sia caratterizzata da un sistema di vincoli non convenzionale per strutture di questo genere, è possibile estrapolare numerosi risultati ottenuti da questa ricerca specifica per analizzare in maniera più generale il comportamento statico delle lastre di vetro stratificato soggette a carichi fuori dal piano.

Due campioni di lastra, uno temperato termicamente e l'altro temperato chimicamente, sono stati sottoposti a prove di laboratorio. In primo luogo è stata studiata la risposta strutturale della lastra posta in verticale acquisendo le deformazioni specifiche indotte dalle sole variazioni termiche giorno-notte nell'arco di 70 ore circa. Tale indagine è risultata necessaria per scindere le deformazioni termiche da quelle meccaniche nelle prove successive. In una seconda fase sono stati eseguiti differenti cicli di carico diretto effettuati mediante

pesi cilindrici al fine di definire il comportamento strutturale a breve e lungo termine. Questa esperienza ha consentito, tra le altre cose, di stimare in maniera preliminare il grado di connessione offerto dal materiale di interfaccia costituito dal PVB e di valutare eventuali effetti viscosi.

Le due lastre sono state portate a rottura con opportune fasi di carico e scarico; in questa fase si sono rilevate le differenti modalità di collasso sia per quanto riguarda la tipologia della frammentazione che per i valori ultimi di carico applicato. Il campione temperato termicamente ha dimostrato di portare un carico distribuito di circa 350 daN/m² senza che si manifestasse alcun segno di cedimento. Per contro il collasso strutturale, ottenuto con opportuni carichi concentrati, è avvenuto in maniera improvvisa senza nessuna capacità portante residua.

Viceversa il campione temperato chimicamente si è rotto prematuramente essendosi creata una serie di macrofessure nello strato di otto millimetri dopo poche ore di applicazione di un carico relativamente basso (circa 100 daN/m²). Nonostante il danneggiamento parziale e prematuro, la lastra ha continuato a portare il carico applicato che ha raggiunto comunque il valore massimo di circa 350 daN/m² in corrispondenza del quale si è avuto il cedimento finale della struttura dopo circa 30 minuti di permanenza.

Parallelamente all'approccio sperimentale sono stati affrontati i problemi di modellazione numerica della struttura oggetto di indagine con il metodo degli elementi finiti. In particolare la ricerca è stata focalizzata sul comportamento stratificato della lastra il cui studio ha richiesto l'impiego di opportuni elementi finiti capaci di simulare lo scorrimento relativo tra i due pannelli che formano il laminato.

Le numerose analisi numeriche svolte hanno messo in evidenza come il grado di connessione tra i due strati di vetro dipenda dalla posizione della zona indagata, in particolare è stato rilevato come nelle vicinanze dei fori il materiale di interstrato sia in grado di trasferire le azioni di taglio in maniera molto limitata anche per valori alti del proprio modulo di elasticità tangenziale. Ciò implica che l'assunzione di un comportamento

monolitico per un vetro stratificato soggetto a carichi di breve durata, come suggerito dalla prEN 13474 (CEN TC/129; 2005), è giustificato solo nelle zone lontano dai fori oppure per il calcolo degli spostamenti. Tale ipotesi è sicuramente da rifiutare ai fini della valutazione delle tensioni in prossimità dei sistemi di supporto puntuale che rappresentano proprio quelle zone più delicate dove la concentrazione delle tensioni è amplificata dalla presenza dei fori. È stato poi effettuato il confronto tra i risultati ottenuti dal modello teorico con quelli ottenuti dall'esperienza sperimentale che ha consentito di

stimare le caratteristiche meccaniche del materiale plastico, tuttavia fortemente legate alla temperatura in cui è stata eseguita l'esperienza in laboratorio.

Ringraziamenti

Gli autori intendono ringraziare la Società Roberglass s.r.l che ha fornito campioni di vetro temperato e stratificato. La ricerca è stata condotta con il supporto finanziario del MIUR.

Prof. dr. ing. Maurizio Froli

Dr. ing. Leonardo Lani

Dipartimento di Ingegneria Strutturale - Università di Pisa

Bibliografia

Albrecht, G., Schuler, C., Sackmann, V., Gräf, (2004), *Application and Test of Laminated Safety Glass*, Workshop Building with Glass Structures, Dipartimento Ingegneria Strutturale, Università di Pisa.

Behr, R.A., Minor, J., Linden, M., (1986), *Load Duration and Interlayer Thickness Effects on Laminated Glass*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 6.

Böck, H., Unterweger, R., Bergmeister, K., (1998), *Experimentelle Untersuchungen an Glasplatten*, Proceedings of Darmstädter Statik Seminar. Glas im Bauwesen.

CEN TC/129 (2005), prEN 13474, *Glass in building - Design of glass panes - Part 1: Calculation of glass products for fenestration to resist wind, snow and self-weight loads*.

CEN TC/129 (2005), prEN 13474, *Glass in building - Design of glass panes - Part 3: General basis of design, design of glass by calculation for non-fenestration use and design of glass by testing for any use*.

CEN, (1996), prEN 12337, *Glass in Building. Chemically strengthened glass*.

Froli, M., Lani, L., (2004), *Determinazione probabilistica della resistenza a flessione di campioni in vetro temperato termicamente e chimicamente*, Rivista del Vetro, Reed Business Information, n.7.

Kott, A., Vogel, T., (2003), *Remaining Structural Capacity of Broken Laminated Safety Glass*, Glass Processing Days, Tampere (Finland).

Nagalla, S. R., Vallabhan, C. V. G., Minor, J. E., Norville H. S., (1985), *Stresses in Layered Glass Units and Monolithic Glass Plates*, NTIS Accession No. PB86-142015/AS, Glass Research and Testing Laboratory, Texas Tech. Univ., Lubbock, Tex.

Schuler, C., (2003), *Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung*, TU München.

Schuler, C., Sackmann, V., Gräf, H., Bucak, Ö., Albrecht, G., (2004), *Time and Temperature Dependent Mechanical Behaviour and Durability of Laminated Safety Glass*, Structural Engineering International, Vol.14, n°2, IABSE.

Siebert, B., (2004), *FE - Analysis of point bearings for glass*, ISAAG 2004, Munich.

UNI, (1996), UNI EN 572-1, *Vetro per edilizia. Prodotti di base in vetro sodocalcico. Definizioni e proprietà fisiche e meccaniche*.

UNI, (2000), UNI EN ISO 12543, *Vetro per edilizia. Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza*.

UNI, (2001), UNI EN 12150-1, *Vetro per edilizia. Vetro di silicato sodocalcico di sicurezza temperato termicamente. Definizione e descrizione*.

Vallabhan, C.V.G., Das, Y.C., Magdi, M., Asik, M., Bailey, J.R., (1993), *Analysis of Laminated Glass Units*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 199, No. 5.