

INDAGINI SPERIMENTALI SU COMPONENTI DI UNA PENSILINA IN VETRO STRATIFICATO

Salvatore Benfratello,
Emanuele Gerbino,
Giulia Mazzarella,
Claudio Pollaci,
Nunzio Scibilia.

Università degli Studi di Palermo, Italia
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali
Email: nunzio.scibilia@unipa.it

ABSTRACT

This paper describes the experimental investigations carried out in the DICAM laboratory of the University of Palermo on the laminated glass structural elements of a canopy, to be built in the University Campus. The investigations performed on the mechanical connection system between the support elements and the horizontal slab coverage and the tests on the single "L" frames are described. The paper shows the configuration and the methods of implementation of each test, and the results obtained that validated the analytical models implemented during the structural design of the canopy.

SOMMARIO

La memoria descrive le indagini sperimentali effettuate presso il laboratorio del DICAM dell'Università degli Studi di Palermo su elementi strutturali in vetro stratificato di un modulo di una pensilina da realizzare all'interno della cittadella universitaria. Sono descritte le indagini eseguite sul sistema di connessione meccanica tra i telai ad "L" e la lastra orizzontale di copertura, nonché le prove condotte su uno degli elementi strutturali di supporto. Si riportano la configurazione e le modalità di svolgimento di ciascuna prova, nonché i risultati ottenuti che hanno validato i modelli analitici implementati nel corso della progettazione strutturale della pensilina.

1 INTRODUZIONE

All'interno del PO FERS Sicilia 2007/2013 – Linea di Intervento 4.1.1.1. – Progetto "VESTRA - Elementi strutturali in Vetro STRATificato per applicazioni in ingegneria civile" è stata progettata una pensilina modulare in vetro stratificato. La struttura si compone di cinque telai ad "L" in vetro stratificato con disposizione radiale in pianta, che fungono da sostegno di una lastra di copertura orizzontale. A supporto del modello di calcolo strutturale, implementato nel corso della progettazione della pensilina, sono state condotte prove di laboratorio sia sugli elementi strutturali che sui

sistemi di connessione. I telai sono costituiti da lastre di vetro temperato di spessore 6 ed 8 mm laminate con interlayer in etilene vinilacetato (EVA) di spessore pari a 1.52 mm. Il sistema di connessione meccanica è realizzato con forcelle in acciaio inox.



Fig. 1. Rendering della pensilina in vetro stratificato

2 INDAGINI SPERIMENTALI

La campagna di prove sperimentali è stata effettuata presso i laboratori del DICAM dell'Università degli Studi di Palermo.

Ciascuno dei cinque telai ad "L", di cui si compone la pensilina, è vincolato al piede da una scarpa in alluminio pressofuso, composta da due gusci tra loro collegati per mezzo di viti a testa svastata piana con cava esagonale in acciaio 10.9. La lastra di copertura orizzontale è collegata a ciascun telaio tramite due forcelle in acciaio inox, a meno del telaio centrale il cui collegamento avviene tramite un'unica forcella.

Nel corso della campagna sperimentale sono state condotte prove di flessione sul singolo telaio ad "L" in due distinte condizioni (integro e danneggiato) e prove di trazione sul sistema di connessione trave-lastra. Per lo svolgimento delle prove i due gusci di cui si compone la scarpa utilizzata per vincolare al piede i telai ad "L" sono stati realizzati in acciaio S275.

2.1 Telai ad "L"

La struttura di contrasto per le prove sui telai a "L" è costituita da profili IPE240 accoppiati, collegati mediante due barre filettate di diametro $\Phi 60$ mm ad una piastra in c.a. di spessore 1.20 m.

Il sistema di vincolo della scarpa alla suddetta struttura è realizzato inferiormente da due travi HEA120 in acciaio S275, irrigidite con piastre di spessore di 10 mm, e superiormente da due profili scatolari di sezione 150x90 mm, realizzati con piatte in acciaio S275 di spessore 20 mm. Il carico è trasmesso al telaio mediante due piatte in acciaio di spessore 10 mm, collegati con barre filettate di diametro $\Phi 10$ mm, serrate con una coppia di 28 Nm. Tra il vetro e l'acciaio è interposto un foglio di neoprene di spessore di 3 mm e durezza 70 Shore. Le due piastre sono collegate ad una traversa costituita da due profili UPN 100 accoppiati, connessa ad un martinetto monoassiale bidirezionale con cella di carico da 50 kN.

Sono stati testati due telai ad "L" in scala reale, ciascuno costituito da una colonna di altezza 2700 mm e larghezza 200 mm e da una trave a sbalzo di lunghezza 2150 mm. Il telaio presenta alla base cinque lastre in vetro temperato, stratificate con intercalare polimerico di tipo EVA, di cui le due esterne di spessore di 8 mm e le tre interne di spessore di 6 mm.

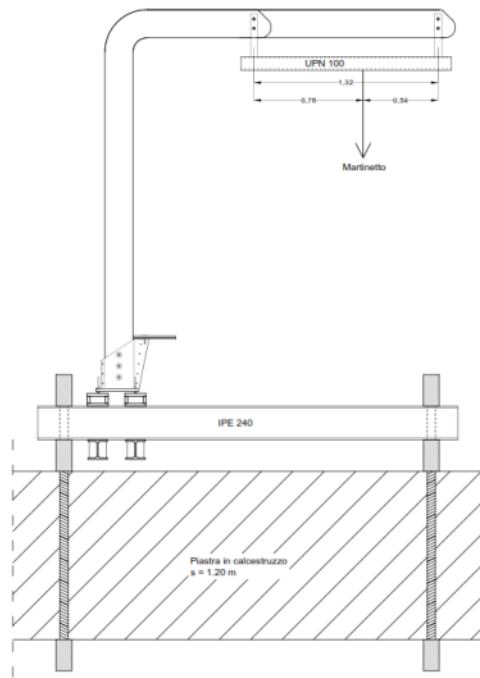


Fig. 2. Configurazione della prova sui telai



Fig. 3. Struttura di vincolo al piede e per la trasmissione del carico all'elemento testato



La sezione del telaio si rastrema in funzione degli stati tensionali, mantenendo le tre lastre centrali per tutto lo sviluppo.

Sono stati provati due telai di cui uno integro ed un secondo danneggiato; tale ultima configurazione di prova simula uno degli scenari di collasso di progetto, che prevede il danneggiamento in tutte le colonne di una delle lastre esterne di spessore 8 mm. Le prove sono state condotte in controllo di spostamento.

A supporto delle indagini sperimentali è stato preliminarmente implementato un modello di calcolo agli elementi finiti, in cui il telaio in vetro stratificato è discretizzato con elementi bidimensionali di tipo "layered shell" e vincolato alla base con un incastro [13].

2.2 Elementi di connessione meccanica

Sono state condotte prove sul sistema di collegamento tra la trave in vetro stratificato dei telai ad "L" e la lastra di copertura della pensilina, costituita da tre lastre in vetro aventi spessore 6 e 8 mm. Il sistema di collegamento si compone di due elementi di connessione:

- un disco in acciaio inox di diametro 90 mm e spessore 5 mm, inserito all'interno della lastra centrale, dove è preliminarmente realizzato un foro di diametro 100 mm;
- una forcina in acciaio inox costituita da un piatto circolare di diametro 90 mm e spessore 10 mm saldato a due mezzi tondidi diametro 30 mm e lunghezza di 150 mm.

La forcina è collegata alla lastra attraverso due barre filettate $\Phi 10$ mm saldate al disco in acciaio prima del processo di stratifica.

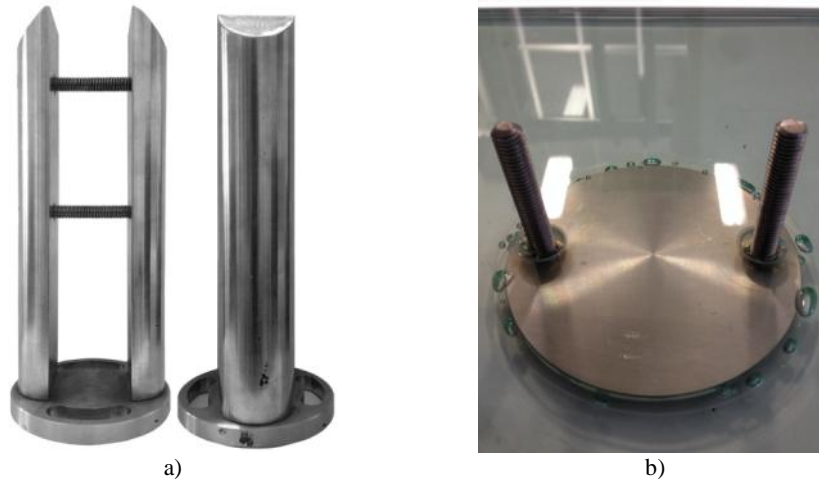


Fig. 4. Componenti del sistema di collegamento trave-lastra: a) forcilla in acciaio inox b) disco in acciaio inox stratificato nella lastra di copertura

Le prove di trazione sul sistema di collegamento trave-lastra sono condotte utilizzando lastre in vetro stratificato di forma quadrata e lato di 400 mm, superiore a quattro volte il diametro del foro nella lastra centrale dove è inserito il disco in acciaio. La lastra di vetro stratificato è ottenuta dalla laminazione, con intercalare polimerico di tipo EVA, di tre lastre di vetro temperato di diverso spessore. In particolare, la lastra all'estradosso ha uno spessore di 8 mm mentre la lastra centrale e la lastra all'intradosso hanno uno spessore di 6 mm.

Le lastre utilizzate nel corso della campagna sperimentale sono state sottoposte a due differenti processi di stratifica che si differenziano per la durata del processo di stratifica e per il numero di film di EVA utilizzati. In particolare il primo metodo di stratifica prevede tempo di stratifica di 1 ora e l'utilizzo di due film di EVA per uno spessore complessivo del singolo interlayer di 1.52 mm; il secondo metodo prevede tempo di stratifica di 2 ore e l'utilizzo di quattro film di EVA per uno spessore complessivo di 3.04 mm.

Sono stati testati otto sistemi di connessione trave-lastra, equamente suddivisi tra i due metodi di realizzazione.

Le prove sono condotte con una macchina universale trazione-compressione con cella di carico da 600 kN in controllo di spostamento con incremento di 1 mm/min. Preliminarmente è stata predisposta una struttura di contrasto, realizzata con profili scatolari e piatti in acciaio, per il posizionamento della lastra.

3 RISULTATI OTTENUTI

Si riportano i risultati ottenuti dalla sperimentazione sui due elementi strutturali.

3.1 Telai ad "L"

Sono stati testati due telai in due diverse condizioni di danneggiamento.

Telaio n°1 – il telaio simula lo scenario di collasso indicato dalle Istruzioni CNR-DT210/2013 che prevede il danneggiamento di una delle lastre che compongono l'elemento strutturale in vetro. È stata pertanto danneggiata una lastra esterna da 8 mm.



Fig. 5. Inflexione fuori piano del telaio n. 1 (sopra) e propagazione della cricca nel telaio n. 2 (sotto)

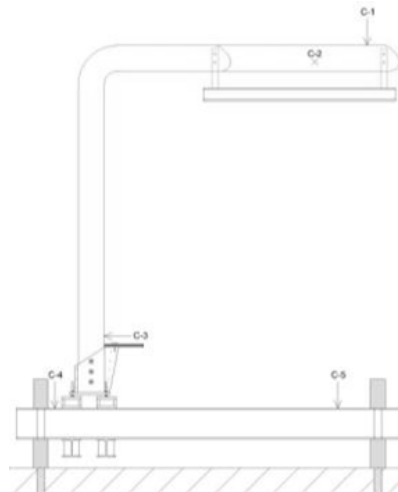


Fig. 6. Telaio n.1 – Punti di controllo

Nel corso della prova di carico sono stati misurati, tramite comparatori centesimali con escursione di 50 mm, gli spostamenti nei punti di controllo indicati in Fig.6. La prova è stata condotta in controllo di spostamento ad una velocità costante di 13,88 mm/min.

In una prima fase, il carico è stato incrementato sino al raggiungimento di un valore di circa 3.60 kN ed il telaio è stato tenuto sotto carico per un tempo di 72 ore. Al termine di suddetto periodo il carico è stato incrementato fino a rottura, rilevando un valore ultimo di 11.58 kN, superiore a tre volte l'azione di progetto. La rottura del telaio n.1 ha interessato le lastre interne adiacenti la lastra esterna danneggiata. L'asimmetria della sezione, ai fini della definizione della rigidità complessiva dell'elemento strutturale, ha comportato l'insorgere di fenomeni di instabilità flessor-torsionale fuori dal piano, così come mostrato in Fig. 5.

Telaio n°2 - il telaio simula lo stato di esercizio che non prevede il danneggiamento di nessuna delle cinque lastre di cui si compone. Analogamente alla prova condotta sul telaio n° 1, la velocità di applicazione del carico è costante e pari a 13.88 mm/min.

La prova è stata effettuata in un unico step, incrementando il carico fino a rottura, ovvero al raggiungimento di un valore di circa 11.30 kN.

Il valore del carico di rottura è prossimo a quello misurato nella prova precedente sul telaio n°1 ma le modalità di rottura dei due provini risultano differenti.

La Fig. 5 mostra come il collasso della struttura sia dovuto alla propagazione incontrollata di una cricca, formatasi nella zona di contatto tra il telaio in vetro e la scarpa in acciaio.

3.2 Elementi di connessione meccanica

Sono state utilizzate due differenti tipologie di realizzazione dei provini da testare:

- Metodo di stratifica n°1, prevede l'uso di due film di EVA, ciascuno di spessore di 0.76 mm (spessore totale 1.52 mm), e tempo di stratifica di 1 ora.
- Metodo di stratifica n°2, che prevede l'uso di quattro film di EVA ciascuno di spessore di 0.76 mm (spessore totale 3.04 mm), e tempo di stratifica di 2 ore.

Nelle Figg. 7 e 8 sono riportati i risultati ottenuti dalle prove di trazione sui provini testati, di cui quattro prodotti con il metodo n°1 e quattro con il metodo n°2.

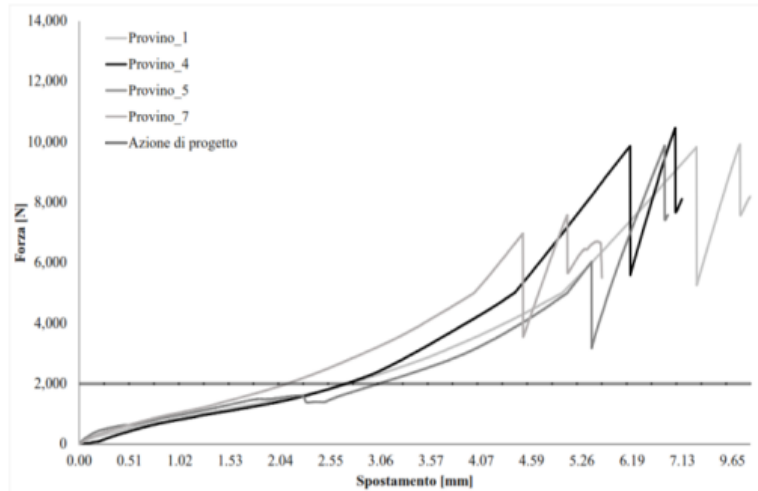


Fig. 7. Risultati ottenuti dai provini ottenuti con il metodo di stratifica n°1

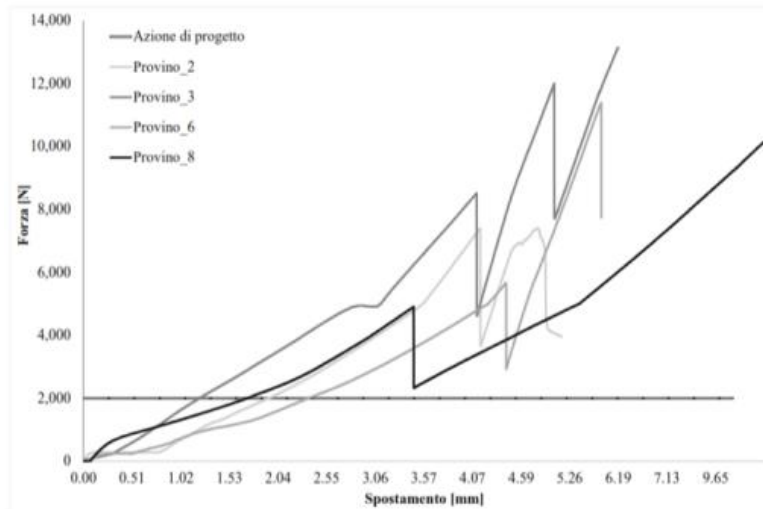


Fig. 8. Risultati ottenuti dai provini ottenuti con il metodo di stratifica n°2

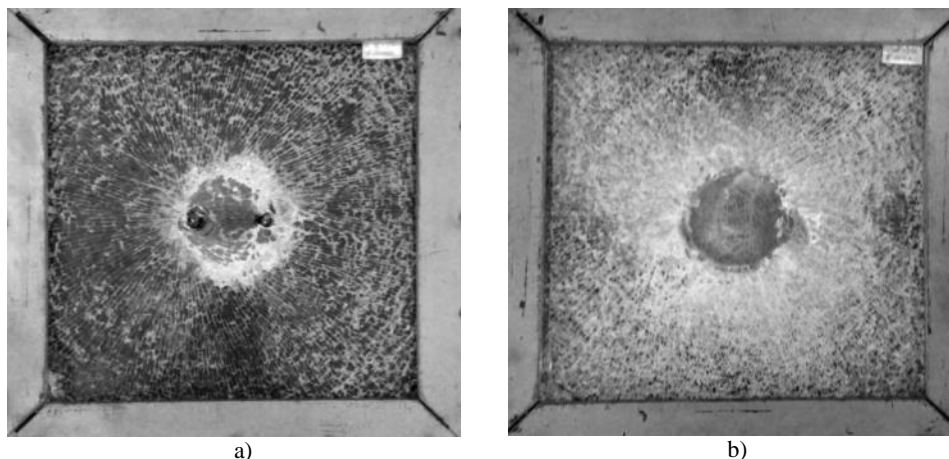


Fig. 9. Provini frammentati: a) metodo di stratifica 1 b) metodo di stratifica 2

	CARICO MEDIO [N]	CARICO MAX [N]	DEVIAZIONE STANDARD [%]
Metodo n°1	9464,43	10468,10	5,86
Metodo n°2	10532,45	13141,80	9,90

Tabella 1. Risultati delle prove sui collegamenti meccanici

Le modalità di rottura dei provini, nonostante questi siano stati prodotti utilizzando modalità di lavorazione differenti, sono risultate analoghe ed in particolare si è rilevato che la prima rottura interessa la lastra all'estradosso di spessore di 8 mm, mentre la rottura della lastra intermedia avviene a valori di carico superiori in seguito alla redistribuzione delle sollecitazioni (Figg. 7 e 8). Tuttavia si rileva che, in seguito alla rottura, le dimensioni dei frammenti delle lastre dei provini prodotti con il secondo metodo di lavorazione hanno dimensioni inferiori se confrontate con quelle dei frammenti dei provini prodotti con il primo metodo (Fig. 9).

Per quanto concerne i valori medi del carico di rottura misurati per le due diverse modalità di produzione si rileva una differenza di circa il 10 %, dovuta principalmente alla differente deformabilità derivante dal diverso spessore di interlayer.

4 CONCLUSIONI

La campagna sperimentale effettuata sugli elementi strutturali che compongono una pensilina in vetro è stata condotta al fine di verificare i risultati ottenuti dall'analisi numerica effettuata preventivamente [12]. La sperimentazione ha interessato, oltre ai bracci in vetro stratificato che sostengono la lastra di copertura, anche il sistema di collegamento tra questi due elementi.

Nel primo caso, i risultati ottenuti nelle due configurazioni descritte in termini di carico massimo a rottura confermano quanto atteso; tale valore si attesta a circa tre volte quello d'esercizio.

I risultati ottenuti dai sistemi di connessione confermano altresì quanto atteso dalla modellazione numerica ed hanno fornito delle indicazioni importanti sulla modalità di assemblaggio ottimale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Luible A., Crisinel M., Buckling design of glass element under, 2005.
- [2] Wellwer B., Wunsch J., Harth K., Experimental study on different interlayer materials for laminated glass, Glass Proceeding days 2005, 2005.
- [3] Norville S., The effect of interlayer thickness on laminated glass strength, Glass Proceeding days 2007, 2007.
- [4] Siebert B., Safety aspect of point-fixed glass construction, Glass Performance days 2007, 2007.
- [5] Blaauwendraad J., Buckling of laminated glass columns, Heron English edition, 2007.
- [6] Wellwer B., Kothe C., Kothe M., Wunsch J., Thermo Mechanical Behaviour of Polymeric interlayer materials, Glass Proceeding days 2009, 2009.
- [7] Briccoli Bati S., Ranocchiai G., Reale C., Rovero L., Time-Dependent Behavior of Laminated Glass, Journal of materials in civil Engineering ASCE, Aprile 2010.
- [8] Aiello S., Campione G., Minafò G., Scibilia N., Compressive behavior of laminated structural glass members, Engineering Structures, 2011.
- [9] Ouwerkerk E., Glass columns - A fundamental study to slender glass columns assembled from rectangular monolithic flat glass plates under compression as a basis to design a structural glass column for a pavilion, Delft University of Technology, 2011.
- [10] CNR DT 210/2013, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro, 2013.
- [11] Campione G., Di Paola M., Minafò G., Laminated Glass Members in Compression. Experiments and Modeling, Journal of Structural Engineering, 2013.
- [12] Campione G., De Vecchi A., Pollaci C., Scibilia N., Coperture in vetro stratificato: criteri di progettazione, Atti del XX Congresso C.T.E., 2014.
- [13] De Vecchi A., Gerbino E., Mazzarella G., Scibilia N., Colonne in vetro stratificato: criteri di progettazione, Atti del XX Congresso C.T.E., 2014.
- [14] Benfratello S., Campione G., Palizzolo L., Scibilia N., Flexural behavior of laminated glass beam with T cross-section, Meccanica dei materiali e delle strutture, 2014.
- [15] Campione G. Di Paola M., Minafò G., Laminated glass members in compression experiments and modelling, ASCE Publications, 2014.
- [16] Feldmann M., Kasper R., Guidance for European Structural design of glass components, JRC Scientific and policy reports, 2014.

PAROLE CHIAVE

Elementi strutturali in vetro stratificato, connessioni vetro-acciaio.