

COLONNE IN VETRO STRATIFICATO: CRITERI DI PROGETTAZIONE

ANTONIO DE VECCHI, Università di Palermo
EMANUELE GERBINO, Università di Palermo
GIULIA MAZZARELLA, Università di Palermo
NUNZIO SCIBILIA, Università di Palermo

SUMMARY

This paper concerns the key aspects of the design of laminated glass structural elements subjected to axial forces of compression. An analysis of the Italian and European design-code frame is conducted with the analysis of experimental results reported in literature. The present study shows the existing of many problems in the implementation of these structural elements, such as a significant reduction of the theoretical value of compressive strength. Finally, we report the design process and the numerical analysis of laminated glass columns of a canopy prototype designed by the authors, starting by the definition of the loads and boundary conditions, the definition of the supporting structures, the processing of three-dimensional model to finite elements and the final geometry and mechanics of glass structures.

Parole chiave: vetro stratificato strutturale, analisi FEM, progettazione.

1. INTRODUZIONE

I recenti sviluppi tecnologici hanno consentito un sempre maggiore utilizzo del vetro stratificato, non solo con semplice funzione di tamponamento o rivestimento, ma come struttura vera e propria. A questa nuova funzione strutturale richiede il rispetto di regole costruttive e procedure di calcolo, valutazione e controllo paragonabili a quelle utilizzate per gli altri materiali strutturali.

A livello normativo, il comitato europeo di normalizzazione (CEN) ha incaricato il gruppo di lavoro TC-250 all'integrazione degli Eurocodici strutturali esistenti, con requisiti stabiliti attraverso un'ampia consultazione con l'industria ed altre parti interessate, ed alla estensione del campo di applicazione. I lavori per la redazione di tali nuove norme sono già cominciati e la loro pubblicazione è prevista per il

2019. Relativamente alla progettazione di strutture in vetro, il comitato CEN/TC-250 ha già pubblicato un documento pre-normativo, "Guidance for European Structural Design of Glass Components", allo scopo di sviluppare regole di progettazione strutturale di componenti in vetro e che, a seguito di un periodo di prova e di utilizzo critico, dovrebbe tradursi in un nuovo Eurocodice 10 "Design of glass structures".

In Italia, le prescrizioni applicabili alle costruzioni e le altre disposizioni relative alle caratteristiche essenziali dei prodotti da costruzione devono risultare conformi alle specifiche contenute nel D.M. 14/01/2008 (NTC2008) e alla circolare esplicativa n°617 del 02/02/2009. In tali documenti, però, non vi sono indicazioni specifiche sulle strutture in vetro. A integrazione di tali norme e per quanto con esse non in contrasto, possono essere utilizzate le Istruzioni e i documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), in particolare le CNR DT 210-2013 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di costruzioni con elementi strutturali in vetro" che rappresenta attualmente l'unico riferimento per la progettazione strutturale del vetro in Italia.

Il documento CNR DT 210-2013 è stato elaborato applicando modelli di meccanica della frattura ai risultati delle indagini sperimentali, pervenendo a criteri, metodi e coefficienti utili per la progettazione. Gli elementi strutturali presi in considerazione si ottengono da lastre di vetro piano monolitico prodotte industrialmente, le quali possono aver subito seconde lavorazioni come, ad esempio, un processo d'indurimento o la stratificazione con intercalari polimerici. La composizione con polimeri comporta necessariamente che debbano essere considerati anche gli aspetti reologici che ne caratterizzano la risposta meccanica.

Le indicazioni che seguono derivano da conoscenze sperimentali che rappresentano lo stato dell'arte, ma che non possono ancora considerarsi complete; trattano specificatamente tutti gli aspetti connessi all'uso strutturale del vetro quali la resistenza, la stabilità, la rigidità, la durabilità, la robustezza, la realizzabilità, il dimensionamento, il calcolo, la verifica ed infine il controllo.

Per la valutazione e la caratterizzazione delle proprietà meccaniche del vetro vengono adoperati nozioni generali di meccanica della frattura, che costituisce l'approccio più coerente alla valutazione della resistenza di materiali fragili. La resistenza del materiale tiene inoltre conto dei fenomeni di fatica statica, *size effected* e altri aspetti, legati ad esempio alla finitura delle superfici, in particolar modo dei bordi delle lastre di vetro.

Tipo	Classe per verifica pre-rottura	Classe per verifica post-rottura
Elementi verticali vincolati in modo continuo sui bordi	1	1/NV
Elementi verticali con vincoli puntuali	2/1	1/NV
Coperture orizzontali	2	2/1
Parapetti con pericolo di caduta	2	2/1
Pinne (o coste) di rinforzo	2	2/1
Pilastri	Con metodi di livello II o di livello III	Con metodi di livello II o di livello III

Tabella 1- CNR DT 210 – 2013 Tabella 3.9

Relativamente ai principi base di progettazione, data la fragilità intrinseca del materiale vetro, vengono delineati i concetti guida di ridondanza strutturale, robustezza e rottura protetta (*fail safe*); tale visione contempla la possibilità che alcuni componenti possano collassare in situazioni estreme, senza però compromettere la stabilità globale del sistema strutturale e la sicurezza dell'intera struttura nei confronti degli utenti.

Nella definizione delle azioni agenti, viene dato particolare risalto alle azioni termiche e climatiche, così come alle azioni sismiche e alle azioni eccezionali.

Gli elementi strutturali vengono inoltre classificati sulle possibili conseguenze, in termini di perdite sia materiali che umane, derivanti da un loro possibile collasso, in linea con il criterio di gerarchia strutturale presente nelle attuali normative tecniche vigenti. Sono quindi definite le varie classi di conseguenze CC1, CC2 e CC3, alle quali si aggiunge, per completezza, la classe CC0, che comprende tutti quei prodotti da costruzione in vetro specificatamente non strutturali. Gli elementi strutturali vengono quindi distinti in elementi di classe zero, prima classe, seconda classe o terza classe a seconda delle classi di conseguenze prima descritte.

Una proposta di classificazione sulla base delle condizioni d'impiego più comuni è riportata in Tabella 1. Data la natura prestazionale e non prescrittiva del documento, non è in genere possibile associare in maniera univoca a ciascuna categoria strutturale una determinata classe di conseguenza; tale classificazione, varia infine a seconda che si consideri una verifica pre-rottura o post-rottura del vetro.

Nelle Istruzioni CNR DT 210-2013, viene dedicato ampio spazio alla modellazione del comportamento meccanico delle strutture in vetro, in particolare al comportamento del vetro stratificato e ai problemi di stabilità dell'equilibrio. E' evidente infatti come, data l'elevata snellezza, gli elementi in vetro soggetti a carichi di compressione o flessione debbano essere verificati nei confronti di un possibile collasso per perdita di stabilità dell'equilibrio; quest'ultima

risulta fortemente influenzata da fattori quali le condizioni al contorno, rappresentate dai dispositivi di fissaggio dell'elemento, l'eccentricità dei carichi, la presenza di imperfezioni iniziali ed infine la natura e il comportamento del materiale utilizzato nell'intercalare.

Al fine di fornire indicazioni generali per la progettazione di colonne in vetro stratificato, nella trattazione che segue si fa riferimento alle linee guida CNR DT 210-2013.

2. STATO DELL'ARTE

Numerose campagne sperimentali negli anni passati hanno mostrato come la resistenza a compressione degli elementi in vetro risulti significativamente maggiore rispetto alla resistenza a trazione; tale aspetto, ha consentito nuove realizzazioni in cui il vetro strutturale risultasse prevalentemente soggetto a compressione. Sono presenti in letteratura numerose indagini sperimentali per la determinazione delle caratteristiche meccaniche e delle problematiche specificatamente legate alla progettazione di colonne in vetro.

Si è posta particolare attenzione ai risultati ottenuti da Ouwerkerk [7]; la campagna sperimentale è stata condotta con il fine di determinare la resistenza a compressione ed i possibili fenomeni di instabilità di colonne compresse in vetro monolitico aventi sezione ad H, cruciforme e rettangolare. Particolare rilevanza viene data a tre importanti aspetti progettuali quali la suscettibilità delle lastre ai picchi di tensione sui bordi delle colonne, le proprietà di rigidità degli adesivi strutturali impiegati e la presenza di imperfezioni.

Le prove si caratterizzano per le diverse modalità utilizzate nel collegamento dei provini in vetro alla macchina di prova: la connessione alla macchina è stata garantita tramite semplice appoggio del provino alla macchina di prova, interposizione di un foglio di neoprene tra la testa e il piede del provino, interposizione di un foglio di cuoio tra la testa e il piede del provino e la

macchina di prova, per mezzo di adesivi strutturali ad una piastra in acciaio e con interposizione di una schiuma poliuretanicica tra il provino e i bordi della piastra.

La realizzazione di una piastra in acciaio e il suo collegamento al provino per mezzo di adesivi strutturali porta alla rottura della parte centrale della colonna e non ad una rottura localizzata nei punti di applicazione del carico, ovvero alla testa e al piede della colonna. I valori di tensione nella sezione risultano comunque inferiori a quelli teorici a causa dei difetti superficiali. Dall'analisi critica dei risultati riportati in [7] si ritiene che ai fini sperimentali l'utilizzo di adesivi strutturali per la realizzazione delle connessioni vetro-acciaio e vetro-alluminio comporti la riduzione delle variabili che caratterizzano la prova.

Tuttavia, la criticità di detti collegamenti risiede nella capacità dell'adesivo di mantenere costanti nel tempo le proprietà meccanica anche dopo l'esposizione prolungata ai raggi UV. In letteratura sono presenti diversi studi riguardanti la durabilità degli adesivi strutturali; un'ampia sperimentazione sugli adesivi strutturali esistenti è stata effettuata presso l'Università di Gent e i risultati dettagliati sono riportati in [8]. La campagna sperimentale condotta ha riguardato le diverse tipologie di adesivi strutturali presenti in commercio quali: Siliconi, MS-Polimeri, Acrilati, Epossidici e Ionoplastici.

Da un'analisi dei dati presentati si evince come gli adesivi appartenenti alla categoria degli epossidici abbiano una buona durabilità nel tempo. Dal confronto dei valori massimi di tensione registrati prima dell'introduzione nella camera climatica e dopo un'esposizione di 12 settimane, si ricava una riduzione della resistenza a taglio inferiore al 30% rispetto ai valori iniziali. Pertanto, gli adesivi garantiscono durabilità nel tempo dal punto di vista meccanico e costituiscono una possibile alternativa alle unioni meccaniche in ambito progettuale. In ambito sperimentale sono sicuramente da preferire alle unioni meccaniche in quanto riducono le incertezze dei risultati ottenuti.

Un altro aspetto analizzato in letteratura è relativo alla stabilità degli elementi in vetro stratificato soggetti a carichi di compressione. In [5] sono riportati i risultati ottenuti da una campagna sperimentale volta a stabilire la resistenza nei riguardi dell'insorgere di fenomeni di buckling di colonne in vetro, sia monolitico che stratificato, al variare della forma della sezione. L'indagine ha confermato che la resistenza all'instabilità dei pannelli è fortemente influenzata dalla snellezza degli elementi in vetro e che i modelli analitici noti in letteratura per la determinazione del carico critico approssimano correttamente quanto ottenuto sperimentalmente.

Nelle sezioni composte, assemblate mediante incollaggio di lastre di vetro monolitico, risultano essere fattori molto importanti il grado di connessione tra le lastre di vetro e lo spessore delle lastre stesse, in relazione alla possibilità di rotture di tipo fragile.

3. CASO STUDIO

Il caso studio analizzato riguarda il progetto di una pensilina in vetro stratificato che sarà collocata all'interno della cittadella dell'Università degli Studi di Palermo, al fine di realizzare un percorso pedonale di collegamento tra l'edificio della facoltà di Scienze della Formazione e quello della facoltà di Lettere e Filosofia. L'area di progetto è evidenziata in Figura 1.



Figura 1 - Vista aerea dell'area di progetto

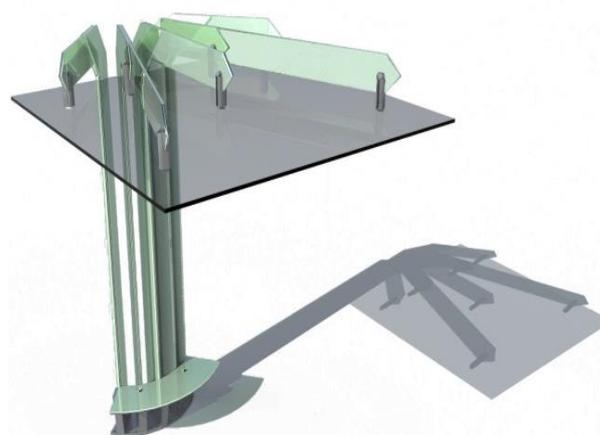


Figura 2 – Rendering della pensilina

L'attività di ricerca e progettazione è inquadrata 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".

La pensilina progettata è modulare, ed è stata ideata per essere prodotta in serie; mediante il posizionamento più moduli accostati è possibile realizzare diverse configurazioni in pianta.

La struttura si compone di cinque bracci in vetro stratificato con sviluppo radiale in pianta, che servono da sostegno ad una lastra di copertura, anch'essa realizzata in vetro stratificato. I bracci sono costituiti da una colonna di lunghezza 2700 mm e altezza 200 mm e da una trave avente altezza 200 mm e lunghezza differente in funzione della sua posizione in pianta. Lo spessore della trave è variabile lungo la sua lunghezza, come meglio descritto nel seguito. La lastra di copertura ha forma quadrata in pianta di lato 2000 mm con un'altezza libera all'intradosso pari a 2770 mm.

I bracci sono realizzati in vetro stratificato; data la maggiore resistenza agli urti, si è scelto di collocare in corrispondenza dei due strati esterni lastre in vetro temperato termicamente di spessore 8 mm ed internamente tre lastre di vetro indurito di spessore 6 mm. L'intercalare adottato è il SentryGlass® Plus (SGP).

I bracci della pensilina, in corrispondenza del tratto orizzontale, modificano la loro sezione, riducendola: vengono infatti interrotte le due lastre esterne in vetro temperato aventi spessore pari a 8 mm, mantenendo costanti le sole tre lastre interne avente spessore pari a 6 mm. Inoltre, le lastre interne saranno del tipo extra-chiaro al fine di migliorarne le caratteristiche ottiche.

La connessione tra i suddetti bracci e la lastra di copertura, realizzata da elementi in alluminio pressofuso, è puntuale e concentrata, per i bracci più corti, in un'unica sezione. Nei due bracci più lunghi, è presente una ulteriore connessione del braccio alle lastre di copertura, per un totale di sette punti di collegamento.

Tutti i collegamenti tra gli elementi strutturali, inclusa la piastra di base delle colonne, sono realizzati in alluminio pressofuso.

3.1. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

3.1.1. Vetro stratificato

Il vetro è un materiale di tipo fragile, omogeneo ed isotropo con comportamento elastico lineare fino alla rottura, sia a trazione che a compressione. Le caratteristiche meccaniche impiegate nella modellazione delle lastre di vetro, in accordo con [1] sono riassunte in Tabella 2:

Caratteristica	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità	ρ	[Kg/m ³]	2550
Modulo di Young	E	[MPa]	70000
Coefficiente di dilatazione termica	α	[$\mu\text{m}/\text{m K}$]	$9 \cdot 10^{-6}$
Coefficiente di Poisson	ν	[-]	0,23
Tenacità – valore critico del fattore di intensificazione degli sforzi (modo I)	K_{Ic}	[MPa m ^{1/2}]	0,75

Tabella 2- Caratteristiche meccaniche del vetro

3.1.2. Intercalare

I materiali plastici impiegati come intercalare sono capaci di collaborare con le lastre di vetro trasferendo tensioni tangenziali tale capacità di collaborare nella sollecitazione di flessione può essere tenuta in considerazione nella fase di progettazione purché siano note le caratteristiche fisico-meccaniche dell'intercalare, sia in funzione della temperatura di esercizio sia del tempo di carico. Tali caratteristiche dipendono fondamentalmente dal tipo di materiale, dalla temperatura e dal processo di stratificazione.

Esigenze legate alla resistenza degli elementi in vetro della pensilina hanno imposto di utilizzare come intercalare il SGP®, realizzato in materiale polimerico ionoplastico. Considerando una temperatura di esercizio di 50°C, le caratteristiche meccaniche dell'intercalare SGP® fornite dal produttore sono riportate nella Tabella 3:

	t=3 s	t=10min	t=∞
E[N/mm ²]	78,800	12,600	6,000
G[N/mm ²]	26,400	4,200	2,000
ν	0,493	0,499	0,500

Tabella 3- Caratteristiche meccaniche SentryGlas® Plus

3.1.3. Alluminio

La lega di alluminio che verrà utilizzata in pressofusione per la realizzazione degli ancoraggi tra i bracci e la lastra, e per realizzare il vincolo di incastro al piede delle colonne, appartiene alla serie 4000 ed è caratterizzata da una resistenza superiore a quella dell'alluminio puro, pur mantenendo una duttilità molto elevata come riportato in [2].

Le caratteristiche meccaniche del materiale, in accordo con il sopra citato documento CNR, sono elencate in Tabella 4.

Caratteristica	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità	ρ	[Kg/m ³]	2700
Modulo di Young	E	[MPa]	70000
Coefficiente di dilatazione termica	α	[°C ⁻¹]	$23 \cdot 10^{-6}$
Coefficiente di Poisson	ν	[-]	0,23
Modulo di elasticità tangenziale	G	[MPa]	27000

Tabella 4- Caratteristiche meccaniche dell'alluminio

3.2. CARICHI AGENTI

Il peso proprio degli elementi strutturali, è valutato considerando il peso specifico per unità di volume riportato in *Tabella 2*. L'azione del vento è valutata con riferimento ad una durata $t = 3 \text{ sec}$ e $t = 10 \text{ min}$. Essendo gli elementi strutturali in vetro soggetti a fenomeni di fatica statica, è necessario valutare, oltre al massimo valore dell'azione, anche gli effetti della sua durata. Il carico da neve, definito in funzione dei parametri che caratterizzano il sito dove ricade la costruzione, è modellato come uniformemente distribuito sulla superficie della copertura.

I carichi accidentali da azione antropica, agenti sulla copertura piana e sulle colonne della pensilina, sono stati valutati secondo quanto indicato in [4]

Peso proprio	22500	N/m ³
Vento, _{pressione,copertura,10min}	51,14	N/m ²
Vento, _{depressione,copertura,10min}	-127,84	N/m ²
Vento, _{pressione,copertura,3sec}	160,15	N/m ²
Vento, _{depressione,copertura,3sec}	-400,84	N/m ²
Vento, _{orizzontale bracci,3sec}	770,01	N/m ²
Vento, _{orizzontale bracci,10min}	248,01	N/m ²
Neve	480	N/m ²
Manutenzione	500	N/m ²
Accidentale lineare	1000	N/m
Accidentale concentrato	250	N

Tabella 5—Carichi agenti sulla pensilina

3.3. RESISTENZA DI PROGETTO

Le verifiche strutturali sono effettuate secondo il criterio della massima tensione principale di trazione.

Il valore di progetto della resistenza a trazione per flessione del vetro $f_{g,d}$ da considerare per le verifiche è stata valutata secondo la seguente relazione, i cui coefficienti sono descritti nel documento CNR-DT210/2013 (eq. 7.5)

$$f_{g,d} = f_{g,k} \frac{k_{mod} k_{ed} k_{sf} \lambda_{gA} \lambda_{gl}}{R_M \cdot \gamma_M} \quad (1)$$

L'equazione prevede la riduzione del valore caratteristico della resistenza a trazione $f_{g,k}$ in funzione di diversi coefficienti riduttivi che tengono conto: della durata del carico e delle condizioni ambientali (k_{mod}), della finitura del bordo (k_{ed}), dalla presenza o meno di trattamenti superficiali (k_{sf}), dell'area sottoposta alla massima tensione sollecitante (λ_{gA}) e delle sollecitazioni sul bordo (λ_{gl}). Inoltre, tiene conto di un fattore riduttivo di sicurezza (γ_M) e del suo coefficiente moltiplicativo (R_M) funzione della classe delle verifiche.

Nel documento CNR è considerato un incremento di resistenza contributo di resistenza $f_{b,k}$ dovuto ai trattamenti superficiali e al bordo delle lastre (2).

$$\frac{k'_{ed} k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{R_{M,v} \cdot \gamma_M} \quad (2)$$

I coefficienti tengono conto sia della finitura del bordo (k'_{ed}), sia dei trattamenti di presollecitazione (k_v).

4. MODELLO A ELEMENTI FINITI

Data la complessità della struttura, al fine di determinare le sollecitazioni dovute alle azioni di progetto è stata effettuata una modellazione agli elementi finiti con l'ausilio del programma di calcolo SAP2000.

Le istruzioni CNR DT210-2013 per gli elementi strutturali la cui crisi comporta conseguenze di livello elevato, ovvero elementi di terza classe, quali sono le colonne in vetro, rimandano a studi specifici con metodi di livello II o livello III.

Il livello impiegato per la modellazione delle colonne della pensilina è il livello II; così come riportato in [1], al capitolo 6 relativo alla modellazione degli elementi in vetro.

	Colonne	Travi tratto iniziale	Travi tratto terminale	Lastra di copertura
Layer1	8 mm – vetro temperato	8 mm – vetro temperato		8 mm- vetro temperato
Interlayer	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP		1,60 mm – SGP
Layer2	8 mm – vetro indurito	8 mm – vetro indurito	8 mm – vetro indurito	8 mm – vetro indurito
Interlayer	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP	
Layer3	8 mm – vetro indurito	8 mm – vetro indurito	8 mm – vetro indurito	
Interlayer	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP		
Layer4	8 mm – vetro temperato	8 mm – vetro temperato		

Tabella 6 - Sezioni degli elementi in vetro stratificato definite nella fase di pre-dimensionamento

Per detto livello di dettaglio è necessario utilizzare un modello semplificato multistrato in cui le lastre di vetro vengono considerate deformabili solo a flessione e l'intercalare viene modellato mediante uno strato di molle equivalenti, deformabili solo a taglio.

Un altro aspetto importante è la corretta modellazione degli elementi che realizzano il collegamento tra la lastra di copertura e le colonne in vetro stratificato. Gli elementi finiti impiegati per la modellazione delle connessioni, che come esposto al capitolo precedente, verranno realizzati in lega di alluminio tipo EN AC 46100 pressofuso, sono stati scelti in modo da fornire il corretto grado di connessione. Per tali elementi, è stato realizzato uno studio comparativo tra varie modellazioni possibili, in modo tale da impiegare una soluzione corretta e che non comportasse un eccessivo onere computazionale.

Infine, tutti i bracci della pensilina sono stati vincolati al piede con un incastro perfetto.

4.1. MODELLAZIONE DELLE COLONNE IN VETRO STRATIFICATO

Al fine di ridurre al minimo i possibili errori di modellazione nonché di avere una previsione delle sollecitazioni cui è soggetta la struttura, la modellazione è stata svolta per step successivi aumentando di volta in volta il grado di dettaglio dei singoli elementi strutturali. In totale l'analisi è stata svolta su quattro differenti modelli agli elementi finiti. La validazione dei singoli modelli è stata effettuata valutando la congruenza delle reazioni vincolari sotto l'azione del peso proprio della struttura con i carichi agenti.

Di seguito si descrivono brevemente le caratteristiche dei modelli analizzati nei diversi passi della progettazione. Le sezioni di vetro stratificato, definite in fase di pre-dimensionamento della struttura ed utilizzate in tutti i modelli sono riportate nella Tabella 6.

Modello 1 (Figura 3): a lastra di copertura è stata discretizzata mediante elementi di tipo *shell*

e sono stati utilizzati elementi di tipo *frame* per i bracci, vincolati al piede con un incastro perfetto. Il collegamento tra i bracci e la lastra di copertura è stato discretizzato mediante elementi di tipo *frame* che, vista la geometria dell'ancoraggio, si suppone non siano in grado di trasmettere sollecitazioni di tipo flettente ai due estremi. I limiti del modello risiedono nell'impossibilità di ottenere i valori dei possibili picchi di tensione. Questo primo modello ha consentito di valutare l'ordine di grandezza delle sollecitazioni della struttura, utile ad evitare errori di modellazione nelle fasi successive.

Modello 2 (Figura 4): i bracci della pensilina, così come fatto per la lastra di copertura, sono stati discretizzati con elementi di tipo *shell*. Come nella modellazione precedente, i bracci della pensilina sono vincolati al piede con un incastro perfetto. Il collegamento tra i bracci e la lastra di copertura è di tipo puntuale ed analogo a quanto fatto nel Modello 1. La discretizzazione dei bracci con elementi *shell* consente di apprezzare le concentrazioni di tensione sia in prossimità degli spigoli vivi che in prossimità della variazione di sezione nei bracci. Tale ultimo aspetto è risultato di fondamentale importanza nella ottimizzazione geometrica della struttura della pensilina.

Nel Modello 1 e nel Modello 2 gli spessori assegnati agli elementi *shell* sono stati determinati con riferimento al metodo *Enhanced Effective Thickness (EET)* descritto in [1]. Per questi modelli, è stato applicato un moltiplicatore del peso proprio pari al rapporto tra l'area della sezione reale e quella della sezione equivalente così da valutare correttamente il peso proprio dell'intera struttura.

Gli spessori equivalenti sono stati determinati sia per gli elementi monodimensionali del primo modello, che per elementi bidimensionali di entrambi i modelli, in funzione del valore del modulo di elasticità tangenziale *G* del polimero usato come intercalare. Essendo tale parametro dipendente anche dalla durata del carico agente, i modelli elaborati risultano quindi in numero pari agli intervalli di tempo adottati per la durata di applicazione dei carichi agenti.

	t 3 s	t 10 min	t 10 anni
Colonne	34,30	29,45	26,04
	mm	mm	mm
Travi	34,30	29,45	26,04
tratto iniziale	mm	mm	mm
Travi	17,36	16,64	15,91
tratto terminale	mm	mm	mm

Tabella 7 – Spessori equivalenti degli elementi in vetro stratificato

Nella Tabella 7 sono riportati i valori degli spessori equivalenti per il calcolo delle deformazioni degli elementi strutturali, determinati per la diversa durata delle azioni di progetto.

Modello 3 : gli elementi in vetro stratificato sono stati modellati utilizzando elementi di tipo *layered-shell* ed adottando la configurazione *shell-exterior* dell'elemento finito.

Modello 4 (Figura 5): gli elementi in vetro stratificato sono stati discretizzati con elementi di tipo *layered-shell*, così come nel Modello 3. La modifica introdotta è relativa agli ancoraggi tra la lastra di copertura ed i bracci; in quest'ultimo modello, sono stati discretizzati con molle di rigidezza equivalente, tarate sulla base di uno studio comparativo con una modellazione dello stesso ancoraggio elaborata con elementi di tipo *solid*. L'introduzione di molle di rigidezza equivalente, oltre ad aver comportato un minor onere computazionale, ha permesso di cogliere correttamente il comportamento globale della struttura e di valutare il grado di interazione tra i cinque bracci, il cui unico collegamento avviene per mezzo della lastra di copertura.

5. RISULTATI DELLE ANALISI

Le analisi condotte sui quattro modelli prima descritti hanno fornito risultati in sostanziale accordo tra loro. Di seguito sono riportati quelli relativi al solo Modello 4, che risulta essere il più completo.

I risultati sono stati analizzati sia in termini di spostamenti che in termini di tensioni. Per le verifiche in termini di spostamento sono stati scelti cinque punti di controllo in testa ai bracci come riportato in Figura 6.

Dalle prime verifiche fatte allo Stato Limite di Esercizio sono risultati spostamenti orizzontali alla testa delle colonne superiori ai valori indicati in [1] al paragrafo 7.5.

Le prime analisi in termini di tensione hanno evidenziato una loro concentrazione in corrispondenza del cambiamento di spessore tra il tratto iniziale e il tratto terminale delle travi.

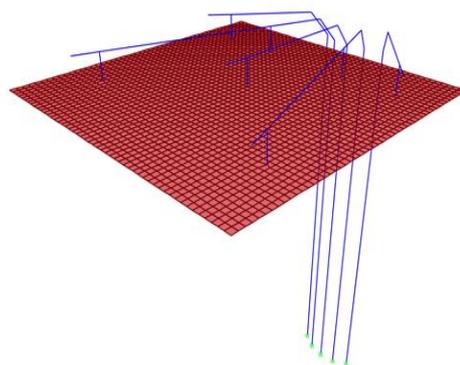


Figura 3 – Schema strutturale del Modello 1

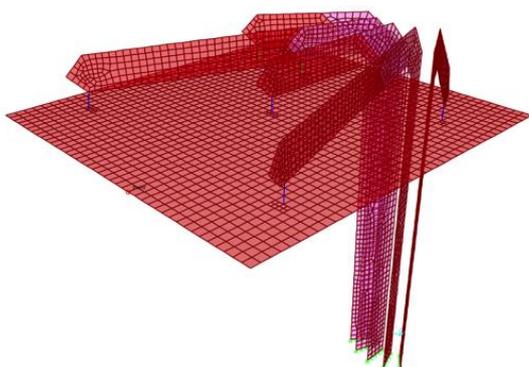


Figura 4 - Schema strutturale del Modello 2

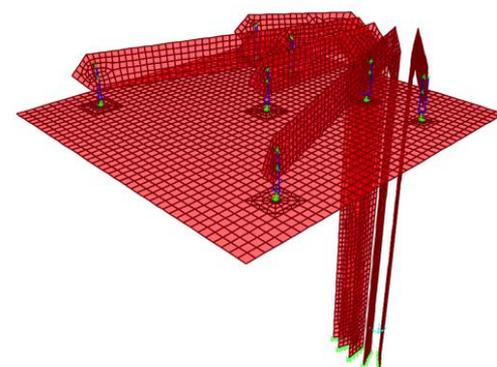


Figura 5- Schema strutturale del Modello 4

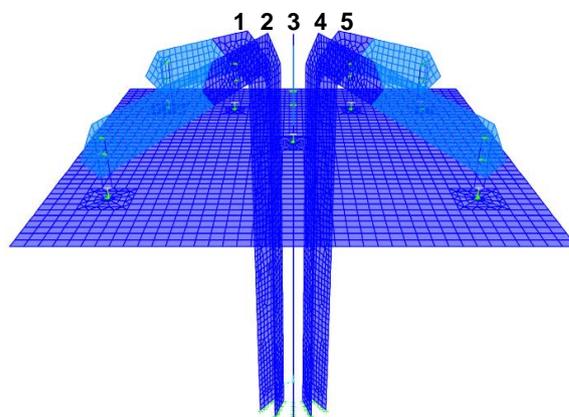


Figura 6 - Punti di controllo degli abbassamenti

	Colonne	Travi tratto iniziale	Travi tratto terminale	Lastra di copertura
Layer 1	8 mm – vetro temperato	8 mm – vetro temperato		6 mm- vetro temperato
Interlayer	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP		1,60 mm – SGP
Layer 2	6 mm – vetro indurito	6 mm – vetro indurito	6 mm – vetro indurito	6 mm – vetro indurito
Interlayer	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP
Layer 3	6 mm – vetro indurito	6 mm – vetro indurito	6 mm – vetro indurito	6 mm – vetro indurito
Interlayer	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP	
Layer 4	6 mm – vetro indurito	6 mm – vetro indurito	6 mm – vetro indurito	
Interlayer	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP	1,60 mm – SGP	
Layer 5	8 mm – vetro temperato	8 mm – vetro temperato		

Tabella 8 - Sezioni degli elementi in vetro stratificato definitive

Pertanto, le due lastre esterne in vetro temperato aventi spessore 8 mm sono state prolungate di 350 mm in modo da ridurre i picchi di tensione e da scongiurare la rottura prematura ed inaspettata delle travi, nonché il collasso inatteso della struttura.

Da suddette analisi sono state definite sezioni differenti da quelle della fase di pre-dimensionamento riportate nella Tabella 6. Le sezioni definitive così definite sono riportate nella Tabella 8.

Gli abbassamenti massimi nei punti di controllo, registrati a seguito del cambiamento delle sezioni, sono riportati in Tabella 9.

Il valore limite di spostamento, determinato così come indicato in [1] al paragrafo 7.5 e precisamente nella tabella 7.12, è pari a 50 mm. Le verifiche in termini di spostamento risultano quindi soddisfatte.

	U ₁ [mm]	U ₂ [mm]	U ₃ [mm]
1	11,44	-15,08	-0,02
2	4,76	-4,59	-0,06
5	1,27	-18,66	-0,28
4	2,05	-11,73	-0,14
5	8,22	-13,82	-0,13

Tabella 9 - Spostamenti SLE dei punti di controllo

L'inviluppo delle combinazioni allo Stato Limite Ultimo ha evidenziato che la combinazione più gravosa è quella che prevede, oltre al peso proprio della struttura amplificato di un coefficiente pari a 1,5, l'azione del vento di durata 3 secondi, anch'essa amplificata di un coefficiente pari a 1,5, e la presenza del 75% del carico da neve. Le tensioni risultanti dalle azioni così combinate sono state confrontate con i valori di resistenza di progetto, determinati attraverso l'equazione 1 in funzione della diversa durata di applicazione del carico, da cui risulta:

$$\frac{3,61}{17,17} + \frac{14,76}{22,78} + \frac{2,09}{20,70} = 0,95 < 1$$

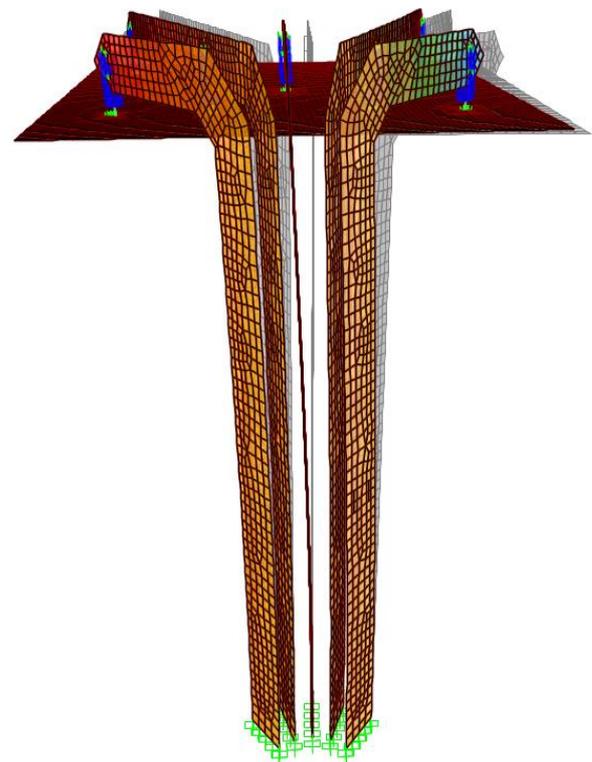


Figura 7 – Configurazione deformata sotto l'azione del vento in direzione orizzontale

Le verifiche in termini di tensione nella configurazione pre-rottura risultano essere soddisfatte.

Relativamente alle verifiche post-rottura, dovendo prevedere che, a causa di un evento imponderabile (azione accidentale, azione eccezionale, atto vandalico), i componenti di vetro si possano frammentare in tutto o in parte, si è proceduto ipotizzando che una delle lastre temprate esterne da 8 mm, risultasse danneggiata contemporaneamente su tutti i bracci della pensilina.

Per la verifica allo SLC è stato implementato e risolto un altro modello di calcolo in cui il

modulo di elasticità del pannello frammentato E_{eff} è stato determinato come indicato in [1] al paragrafo 6.5.3 attraverso la relazione seguente:

$$E_{eff} = k \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot E_p \quad (3)$$

Le istruzioni CNR forniscono un valore di E_{eff} pari a 12000 N/mm² per vetri induriti laminati con SGP con carico applicato per un tempo $t = 60$ sec alla temperatura di 23° e precisano che la rigidità post-rottura del vetro temperato termicamente è pari a un quarto di quella del vetro indurito. Essendo il pannello frammentato in vetro temperato termicamente si adotta un Modulo di Young pari a 3000 N/mm². Inoltre, avendo supposto una temperatura di esercizio pari a 50° ed essendo la durata delle azioni di progetto diversa da 60 sec è possibile scalare il modulo E_{eff} secondo il fattore:

$$\rho = \frac{G(T,t)}{G(23^\circ C, 60s)} \quad (4)$$

dove:

$G(T,t)$ è il modulo a taglio dell'intercalare polimerico espresso in N/mm² relativo alle condizioni di temperatura T e durata di applicazione del carico t ;

$G(23^\circ C, 60 s)$ è il modulo a taglio dell'intercalare polimerico espresso in N/mm² a 23° C e con un carico applicato per 60 sec.

All'interno del modello si è definito un materiale avente le caratteristiche del vetro riportate nella *Tabella 2* ad eccezione del valore del Modulo di Young determinato come descritto sopra al variare della durata del carico.

Inoltre, il documento CNR prevede un declassamento degli elementi strutturali in funzione della loro funzione strutturale. Tuttavia, in [1] al paragrafo 3.2.1, viene precisato che per quel che riguarda le colonne in vetro stratificato non è previsto alcun declassamento dell'elemento per verifiche post-rottura. Inoltre, sono state considerate le medesime azioni di progetto per le verifiche pre-rottura senza diminuirne il periodo di ritorno. Si è pertanto verificato che anche in tale configurazione limite la struttura è in grado di conservare una capacità portante sufficiente per far fronte ai carichi permanenti, portanti e portati, nonché ad una aliquota dei carichi variabili stimata congrua per le condizioni di esercizio.

Le verifiche di resistenza e di deformabilità post-rottura hanno dato esito positivo.

6. CONCLUSIONI

Nella presente memoria è riportato l'iter seguito per il progetto di una pensilina che verrà realizzata con elementi in vetro stratificato

strutturale. In particolare, sono state descritte le modalità e di elaborazione del modello agli elementi finiti, svolta con l'ausilio del programma di calcolo *SAP2000 versione 16.1 Ultimate*, l'analisi e la verifica dei risultati ottenuti. La discretizzazione degli elementi strutturali e le verifiche, sia in termini di spostamenti sia in termini di tensioni, sono state effettuate in accordo con le procedure riportate nel documento *CNR DT 210-2013 - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di costruzioni con elementi strutturali in vetro* che rappresenta oggi, in Italia, l'unico riferimento normativo esistente. Nell'ambito del progetto VESTRA verranno realizzate prove di caratterizzazione sui materiali e prove in scala reale della struttura al fine di validare i risultati numerici ottenuti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **CNR DT 210-2013:** "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di costruzioni con elementi strutturali in vetro"
- [2] **CNR DT 208-2011:** "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture in Alluminio".
- [3] **CNR DT 207/2008:** "Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni".
- [4] **D.M. 14/01/2008:** "Nuove norme tecniche per le costruzioni"
- [5] **AIELLO S., CAMPIONE G., MINAFO' G., SCIBILIA N.:** "Compressive behaviour of laminated structural glass members", *Engineering Structures*, December 2011, Vol.33, Issue 12
- [6] **S. BENFRATELLO, G. CAMPIONE, L. PALIZZOLO, N. SCIBILIA:** "Flexural behavior of laminated glass beam with T cross-section".
- [7] **E.OUWERKERK:** "Glass columns. A fundamental study to slender glass columns assembled from rectangular monolithic flat glass plates under compression as a basisto design a structural glass column for a pavillon", June 2011, MSc Thesis, Delft University of Technology .

- [8] **BELIS J. et al.:** "Broad screening of adhesives for glass-metal bonds", 12th International Conference on Architectural and Automotive Glass. Glass Performance Days, 2011. p. 286-289.
- [9] **BLAAUWENDRAAD, J.:** "Buckling of laminated glass columns." 2007, Heron,52(1-2), 147-164.
- [10] **K. NAKANE, T. OGIHARA, N. OGATA:** "Properties of polyvinylbutyral/TiO₂ nano composites formed by sol-gel process".
- [11] **A. LUIBLE, M. CRISINEL:** "Buckling design of glass elements under compression and glass portal bolted connections subjected".
- [12] **J.B. COLVIN:** "Comparison of Monolithic and Laminated Glass Subjected to Barrier Loads".
- [13] **B. WELLWER, T. SCHADOW:** "Design of bonded joints in glass structures".
- [15] **B. WELLWER, J. WUNSCH, K. HARTH:** "Experimental study on different interlayer materials for laminated glass".
- [16] **B. WELLWER, C. KOTHE, M. KOTHE, J. WUNSCH:** "Thermo Mechanical Behaviour of Polymeric interlayer materials".
- [17] **S. NORVILLE:** "The effect of interlayer thickness on laminated glass strength".
- [18] **P. FORABOSCHI:** "Compression use of the structural glass and glass structures".
- [19] **T. HENRIKSEN, W. BIRO:** "Future application of structural use of glass".
- [20] **M. FROLI, L. LANI:** "Adhesion, creep and relaxation properties of PVB in laminated safety glass".
- [21] **M. FELDMANN, R. KASPER:** "JRC Scientific and policy reports - Guidance for European Structural design of glass components".

RINGRAZIAMENTI

L'attività di ricerca è finanziata dal *PO FERS Sicilia 2007/2013 – Linee di intervento 4.1.1.1 – Progetto "VESTRA – Elementi strutturali in VETRO STRATificato per applicazioni di ingegneria civile"*.