

COPERTURE IN VETRO STRATIFICATO: CRITERI DI PROGETTAZIONE

GIUSEPPE CAMPIONE Università di Palermo

ANTONIO DE VECCHI Università di Palermo

CLAUDIO POLLACI Università di Palermo

NUNZIO SCIBILIA Università di Palermo

SUMMARY

This paper concerns the design activity about laminated glass structures for the evaluation of criteria to optimize the design.

This target is reached by using a preliminary study of the normative frame in national and international field. Forward by studying the bibliography on laminated glass structure.

Application is on canopy designed by authors. Here are reported the step design procedures starting by definition of load, restraints condition for structure element and 3d model generate by using a FEM analysis.

Parole chiave: Vetro stratificato strutturale, Analisi FEM, Progettazione.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si è diffuso il ricorso a strutture di copertura in vetro stratificato, utilizzato

sia integralmente, che insieme ad altri materiali strutturali, ed in particolare l'acciaio inossidabile e l'alluminio. In tale ambito si è sviluppato il progetto di una pensilina realizzata totalmente in vetro.

Il progetto riguarda la realizzazione di una pensilina in vetro stratificato da installare all'interno della cittadella dell'Università degli Studi di Palermo per realizzare un percorso pedonale che colleghi l'edificio della facoltà di Scienze della Formazione con quello della facoltà di Lettere e Filosofia.

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 struttura è modulare, producibile in serie e tale da realizzare, tramite l'utilizzo di più moduli, diverse configurazioni.

La struttura si compone di cinque braccia in vetro stratificato con disposizione radiale in pianta, che fungono da sostegno di una lastra di copertura dello stesso materiale. I bracci sono costituiti da telai ad “L” aventi una colonna di lunghezza 2700 mm e altezza 200 mm, e da una trave a spessore variabile avente differente lunghezza in funzione della sua posizione in pianta ed altezza 200 mm. I bracci sono ricavati da un'unica lastra in vetro stratificato. La lastra di copertura, anch'essa in vetro stratificato, ha forma quadrata in pianta di lato 2000 mm e altezza libera all'intradosso pari a 2770 mm, Figura 1.

Tutti i collegamenti tra i diversi elementi strutturali saranno realizzati in alluminio pressofuso.

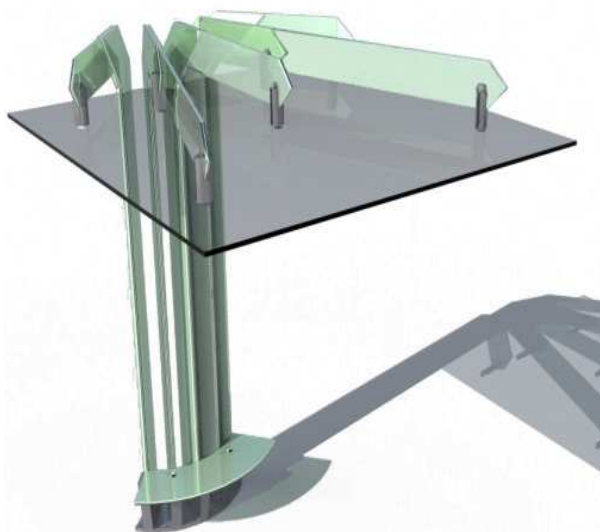


Figura 1 - Rendering della pensilina

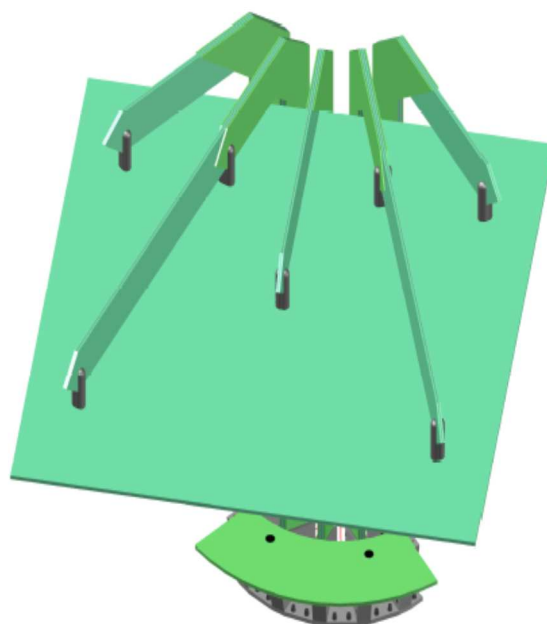


Figura 2 - Particolare della copertura

2. RIFERIMENTI NORMATIVI

L'utilizzo crescente del vetro stratificato come materiale da costruzione è stato oggetto di indagini teoriche e sperimentali che hanno consentito la formulazione di criteri tecnici e di linee guida per la progettazione con l'obiettivo di giungere ad una valutazione affidabile della resistenza alla rottura.

In ambito nazionale, le *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro* (CNR DT 210/2013) adottano criteri probabilistici per ottenere un adeguato grado di sicurezza nei confronti della rottura degli elementi strutturali in vetro stratificato in funzione di diversi aspetti e classifica tali elementi in quattro distinte classi sulla base delle possibili conseguenze dovute alla crisi di questi elementi:

- CCO: prodotto specificatamente non strutturale;
- CC1: elementi strutturali in seguito alla cui crisi si prevedono conseguenze limitate per perdite di vite umane e conseguenze modeste o trascurabili in termini economici;
- CC2: elementi strutturali in seguito alla cui crisi si prevedono conseguenze medie per perdite di vite umane e conseguenze considerevoli in termini economici;
- CC3: elementi strutturali in seguito alla cui crisi si prevedono conseguenze alte per perdite di vite umane e conseguenze importanti in termini economici;

Tali norme forniscono inoltre indicazioni relative alla modellazione agli elementi finiti (FEM) e alle tecniche utilizzabili per la determinazione delle sollecitazioni di progetto in elementi monodimensionali e bidimensionali, in quanto il vetro presenta notevoli aspetti distintivi che ne contraddistinguono il processo di progettazione rispetto all'approccio tradizionale seguito con i materiali da costruzione classici.

In ambito europeo, il *Joint Research Centre* della Commissione Europea ha pubblicato le *Guidance for European Structural Design of Glass Components – Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Le linee guida europee rappresentano un aggiornamento ed un approfondimento del JRC-Report "*Purpose and justification for new design standards regarding the use of glass product in civil engineering works*" pubblicato nel 2007. La versione definitiva riporta le indicazioni progettuali presenti sia nelle linee guida italiane pubblicate dal CNR sia nella normativa tedesca pubblicata dal DIN (*Deutsches Institut Fur Normung*).

Le norme fanno riferimento ad indagini sperimentali condotte su modelli in scala ed in vera grandezza.

Al fine di fornire indicazioni generali per la progettazione di lastre in vetro stratificato, nel seguito ci si riferirà ad [1].

3. CRITERI DI PROGETTAZIONE

La copertura in vetro stratificato è composta da tre lastre, di cui due lastre temperate ed una indurita, con intercalare polimerico ionoplastico SentryGlas® Plus (SGP), come mostrato in Figura 3. Data la maggiore resistenza agli urti è preferibile collocare esternamente le lastre temperate ed internamente quella indurita. La copertura è considerata in seconda classe di conseguenza (CC2) per quanto riguarda le verifiche allo stato limite ultimo.

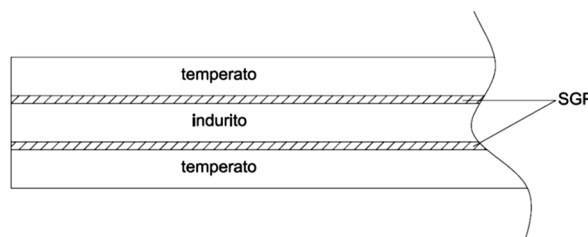


Figura 3 - Composizione della lastra di copertura in vetro stratificato

La lastra ha dimensioni in pianta 2000 x 2000 mm ed è collegata con le travi in vetro di cui sopra in sette punti indicati in Figura 4.

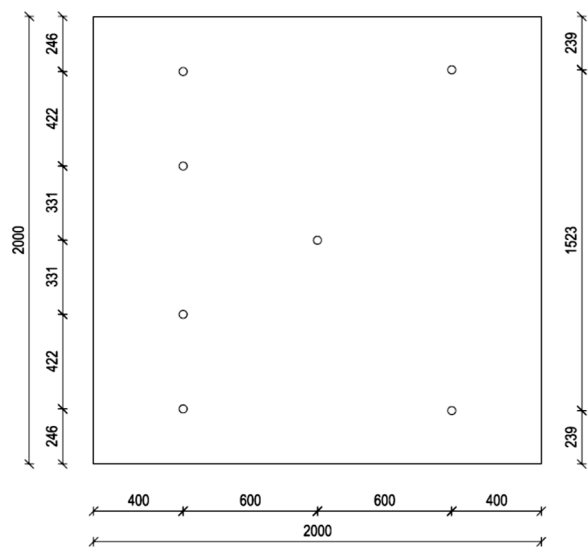


Figura 4 - Pianta della copertura con posizionamento dei collegamenti

3.1. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI

3.1.1. Vetro

La caratterizzazione meccanica del vetro risulta più complessa rispetto ai classici materiali da costruzione perché si basa sull'interpretazione dei risultati sperimentali tramite l'uso di modelli che si fondano sulla meccanica della frattura.

Il vetro è un materiale omogeneo ed isotropo con comportamento elastico lineare fino alla rottura, sia a trazione che a compressione. Le caratteristiche meccaniche del vetro, in accordo con [1] sono riassunte in Tabella 1:

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 1 - Caratteristiche meccaniche del vetro

3.1.2. Intercalare (interlayer)

L'interlayer permette l'accoppiamento tra due o più lastre di vetro, producendo quello che si definisce vetro stratificato. I materiali plastici impiegati come intercalare sono capaci di collaborare con le lastre di vetro trasferendo tensioni tangenziali, sufficienti a produrre un momento resistente da parte dell'elemento composito superiore alla somma dei momenti resistenti delle singole lastre. 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 che del tempo di carico. Tali caratteristiche dipendono fondamentalmente dal tipo di materiale, dalla temperatura e dal processo di stratificazione.

I materiali comunemente adoperati come interlayer nel vetro stratificato sono il polivinilbutirrale (PVB) e l'etilene vinilacetato (EVA).

Il PVB è un polimero vinilico amorfo termoplastico caratterizzato da lunghe catene

polimeriche ramificate e geometricamente disordinate. I risultati reperiti in letteratura e derivanti da prove sperimentali sono stati confrontati con le caratteristiche meccaniche dichiarate dal produttore e sono riportate di seguito:

- Modulo Elastico, E: 0,95 GPa;
- Tensione di Snervamento: 13,7 GPa;
- Deformazione a rottura: 4,9 %.

L'EVA è un polimero che si avvicina ai materiali elastomerici in morbidezza e flessibilità, ma può essere elaborato come altri materiali termoplastici. Il materiale ha una buona chiarezza e brillantezza, resistenza a bassa temperatura e resistenza ai raggi UV.

Esigenze tecnologiche legate alla stratificazione del vetro e caratteristiche meccaniche superiori rispetto ai due precedenti materiali hanno suggerito di utilizzare come intercalare il SentryGlas® Plus (SGP), le cui caratteristiche meccaniche, indicate dal produttore, riportate nella Tabella 2, fanno riferimento ad una temperatura di esercizio di 50°C:

	t=3 s	t=10 min	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 2 - Caratteristiche meccaniche del SGP

3.1.3. Alluminio

Le scarpe di collegamento delle colonne alla fondazione e tutti i collegamenti tra gli elementi strutturali sono realizzati con la lega di alluminio serie 4000 così come definita da [2]. La serie 4000 è una lega di alluminio e silicio con resistenza superiore a quella dell'alluminio puro mantenendo una duttilità molto elevata.

Le caratteristiche meccaniche assegnate al materiale, in accordo con la norma sopra citata, sono elencate in Tabella 3:

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 3 - Caratteristiche meccaniche dell'alluminio

3.2. ANALISI DEI CARICHI

Si sono considerati i seguenti carichi:

peso proprio del vetro in copertura:

peso per unità di volume 22.50 kN/m³.

azione del vento:

essendo gli elementi strutturali in vetro soggetti al fenomeno della fatica statica, risulta rilevante oltre il massimo valore dell'azione anche la sua durata. In particolare, per quel che riguarda la pressione del vento si fa riferimento ad azioni di durata $t = 3$ sec e ad azioni di durata $t = 10$ min. In accordo con le procedure previste da [3] sono state determinate le seguenti azioni sulla pensilina, vedi Tabella 4.

Azione	Durata	Unità di misura	Valore
Vento in pressione	3 sec	[kN/m ²]	0.16
Vento in depressione	3 sec	[kN/m ²]	-0.40
Vento orizzontale	3 sec	[kN/m ²]	0.77
Vento in pressione	10 min	[kN/m ²]	0.05
Vento in depressione	10 min	[kN/m ²]	-0.13
Vento orizzontale	10 min	[kN/m ²]	0.25

Tabella 4 - Azione del vento

azione della neve:

in accordo con quanto previsto da [4] è stato calcolato un carico omogeneamente distribuito sulla superficie della copertura di 0.48 kN/m².

azione di manutenzione:

si considera un carico da manutenzione uniformemente distribuito di intensità pari a 0.49 kN/m².

Ai fini delle verifiche agli stati limite le azioni sono tra loro combinate secondo quanto prescritto in [4].

3.3. RESISTENZE DI PROGETTO

Le verifiche strutturali sono svolte secondo il criterio della massima tensione principale di trazione. La tensione resistente da adottare nella progettazione è quella in grado di assicurare la probabilità di collasso indicata in [1].

Il valore di progetto della resistenza a trazione per flessione del vetro da considerare per le verifiche può essere espressa dalla relazione:

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

Dove:

$f_{g,k}$ è il valore caratteristico della tensione nominale, il cui valore minimo stabilito affinché il materiale possa assolvere alle funzioni strutturali è 45 N/mm²;

k_{mod} è un fattore riduttivo dipendente dalla durata di applicazione del carico;

k_{ed} e sono fattori riduttivi dipendenti dalla finitura del bordo dell'elemento di vetro lungo il bordo od all'interno di un foro;

k_{sf} è un coefficiente riduttivo dipendente dal grado di finitura del vetro;

λ_{gA} , λ_{gL} sono due coefficienti di scala che dipendono rispettivamente dalla superficie di vetro in cui è applicato il carico e dalle sollecitazioni sui bordi;

R_M , γ_M sono coefficienti parziali di sicurezza.

Valutando opportunamente i coefficienti appena descritti, sia per lastre di vetro temperato che indurito, ed applicando l'equazione (1) si è calcolata la resistenza di progetto delle singole lastre riportate nella Tabella 5.

	t = 3 sec [MPa]	t = 10 min [MPa]	t = 50 anni [MPa]
Temperato	50.92	49.22	46.36
Indurito	21.29	19.60	16.73

Tabella 5 - Resistenze di progetto delle lastre di copertura

4. ELABORAZIONE DEL MODELLO AD ELEMENTI FINITI

Al fine di determinare le sollecitazioni indotte dalle azioni di progetto definite al §3.2 è stata effettuata una modellazione agli elementi finiti con l'ausilio di un software di calcolo strutturale.

Il metodo degli elementi finiti (FEM) è una tecnica numerica idonea a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche. I singoli elementi che compongono la struttura sono stati discretizzati in elementi finiti in funzione delle loro dimensioni nonché del loro comportamento sotto l'azione dei carichi.

Per elementi strutturali la cui crisi provoca conseguenze di livello elevato (CC2 o CC3), [1] rimanda a studi specifici con metodo di livello II o livello III.

Il livello impiegato per la modellazione della pensilina è il livello II; così come riportato in [1] al capitolo 6, relativo alla modellazione degli elementi in vetro. A questo livello si associa 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. Le molle a taglio che simulano l'intercalare possono anche essere modellate come elementi visco elastici. Inoltre, assume notevole importanza la modellazione degli elementi di collegamento tra le colonne e la lastra in vetro stratificato che, come descritto al §3.1.3, saranno realizzati con una lega di alluminio e silicio. Per modellare correttamente il comportamento di tali elementi di collegamento è stato effettuato uno studio comparativo tra due distinte modellazioni che ha permesso di impiegare un accettabile compromesso tra un modesto onere computazionale ed un'adeguata precisione della soluzione. Infine, tutti i bracci della pensilina sono stati vincolati al piede con un incastro perfetto.

4.1. MODELLAZIONE DELLA COPERTURA

Il processo di modellazione della struttura si è svolto attraverso successivi stadi di progettazione; questo processo iterativo si è reso necessario al fine di minimizzare gli errori di modellazione e contemporaneamente rendersi conto delle sollecitazioni agenti sulla struttura. Ad ogni successivo stadio di modellazione il livello di dettaglio dei singoli elementi strutturali è progressivamente aumentato, ottimizzando la soluzione.

L'analisi si è svolta attraverso quattro successivi modelli agli elementi finiti. La validazione del singolo modello è stata eseguita valutando la congruenza degli spostamenti sotto l'azione del peso proprio della struttura. In fase di pre-dimensionamento la lastra di copertura è stata ipotizzata composta da due lastre di vetro (una

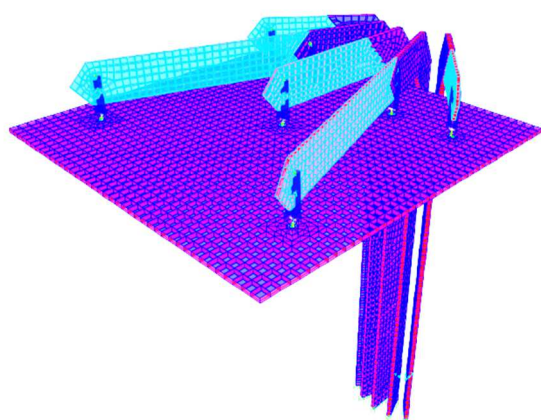


Figura 5 - Modello numerico della pensilina

temperata e l'altra indurita) di spessore 8 mm con intercalare in SGP dello spessore di 1.60 mm.

Vengono descritte brevemente le caratteristiche dei modelli utilizzati nei diversi step di progettazione. Il primo modello prevede che le travi e le colonne siano vincolate al piede con un incastro perfetto. Questi elementi sono modellati con elementi di tipo *frame* che non permettono dunque di ottenere e quindi localizzare picchi di tensione; la lastra di copertura è discretizzata con elementi di tipo *shell* di lato 50 mm. Il collegamento tra le travi e la lastra è stato modellato mediante elementi *frame* che, vista la geometria dell'ancoraggio, si suppone non siano in grado di trasferire sollecitazioni flessionali nei due estremi. Nel modello 2 sia la lastra di copertura che il collegamento con le travi in vetro è mantenuta tale al modello 1; tuttavia le colonne e le travi sono state anch'esse discretizzate con elementi di tipo *shell*.

I primi due modelli sono realizzati applicando metodi di livello 1, così come descritto in [1]. Questo livello di progettazione prevede il vetro stratificato venga modellato come un elemento monolitico che presenti lo stesso comportamento a flessione. In particolare si è fatto riferimento al modello *Enhanced Effective Thickness (EET)*, [18]. Facendo riferimento a tale modello sono stati calcolati gli spessori equivalenti degli elementi strutturali utilizzati.

Nel modello 3 è stato implementato il metodo di livello 2 previsto da [1]. Gli elementi strutturali con elementi vengono quindi modellati con elementi *layered-shell*. Infine nel modello 4 sono stati discretizzati i collegamenti tra bracci e copertura con delle molle la cui rigidità è equivalente a quella dell'ancoraggio modellato con elementi *solid* e di cui si dirà nel successivo paragrafo.

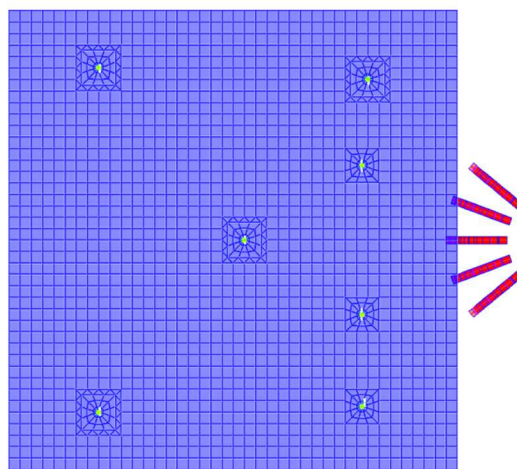


Figura 6 - Particolare della modellazione della copertura

Il modello definitivo (modello 4) ha consentito di dimensionare opportunamente gli elementi strutturali che compongono la pensilina. Le colonne sono composte da cinque lastre di vetro (tre interne dello spessore di 6 mm e due esterne dello spessore di 8 mm). La copertura è invece composta da tre lastre di vetro dello spessore di 6 mm.

4.2. MODELLAZIONE DEGLI ANCORAGGI

Per modellare correttamente il comportamento degli elementi di collegamento è stato effettuato uno studio comparativo tra una modellazione dell'ancoraggio che prevede l'utilizzo di un elemento di tipo *frame* (figura 7a) ed una modellazione che prevede l'uso di un elemento di tipo *solid*, (figura 7b).

I due modelli così definiti sono stati sottoposti ad una forza unitaria F che ha permesso attraverso gli spostamenti δ di determinarne le rigidzze k nelle tre direzioni essendo:

$$\begin{aligned} F_z &= k_z \cdot \delta_z \\ F_x &= k_x \cdot \delta_x \\ F_y &= k_y \cdot \delta_y \end{aligned} \quad (2)$$

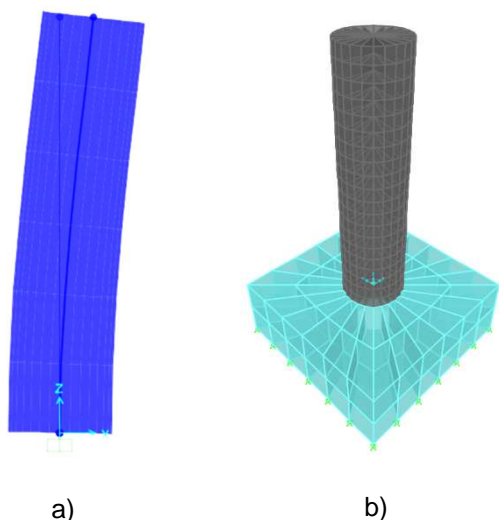


Figura 7 - Modellazione dell'ancoraggio con elemento *frame* (a) e con elemento *solid* (b).

Viste le ridotte dimensioni dell'ancoraggio si è reso necessario un infittimento delle mesh dell'elemento *solid*. Partendo da una dimensione massima del singolo elemento pari a 40 mm questo è stato suddiviso di volta in volta in due elementi sino alla convergenza dei risultati.

La Tabella 6 mostra i valori delle rigidzze ottenute al variare delle dimensioni del singolo elemento *solid*, mostrando la convergenza dei risultati per elementi di dimensioni pari a 2,5 mm.

		F [N]	δ [mm]	k [N/mm]
h = 40 mm	x	100	0,05985	1670
	y	100	0,05985	1670
	z	100	0,00118	84745
h = 20 mm	x	100	0,06903	1448
	y	100	0,06903	1448
	z	100	0,00157	63694
h = 10 mm	x	100	0,07332	1363
	y	100	0,07332	1363
	z	100	0,00122	81967
h = 5 mm	x	100	0,07436	1344
	y	100	0,07436	1344
	z	100	0,00124	80645
h = 2,5 mm	x	100	0,07484	1336
	y	100	0,07484	1336
	z	100	0,00127	78740

Tabella 6 - Definizione della dimensione minima della mesh dell'elemento *solid*

Definite le rigidzze k_x , k_y , e k_z , l'ancoraggio è stato discretizzato nel modello utilizzando molle di rigidzza equivalente i cui valori, confrontati con quelli dell'elemento *frame* utilizzato nei modelli precedenti, sono riportati nella Tabella 7.

		<i>frame</i>	<i>solid</i>
K [N/mm]	x	1529,05	1336
	y	1529,05	1336
	z	142857,10	78740

Tabella 7 - Valori di rigidzza delle molle e confronto con i valori dell'elemento *frame*

Inoltre, per valutare gli effetti dei fori sulla lastra di copertura questi sono stati inseriti nella modellazione e collegati rigidamente alle molle utilizzate per discretizzare gli ancoraggi (Figura 8).

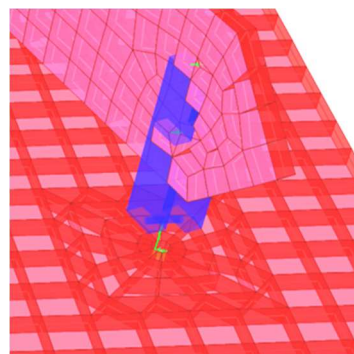


Figura 8 - Particolare della modellazione degli ancoraggi

5. RISULTATI

Per valutare opportunamente l'effetto delle azioni sulla lastra di copertura in termini di spostamento sono stati scelti alcuni punti di controllo (Figura 9) che permettono di cogliere il comportamento globale della struttura.

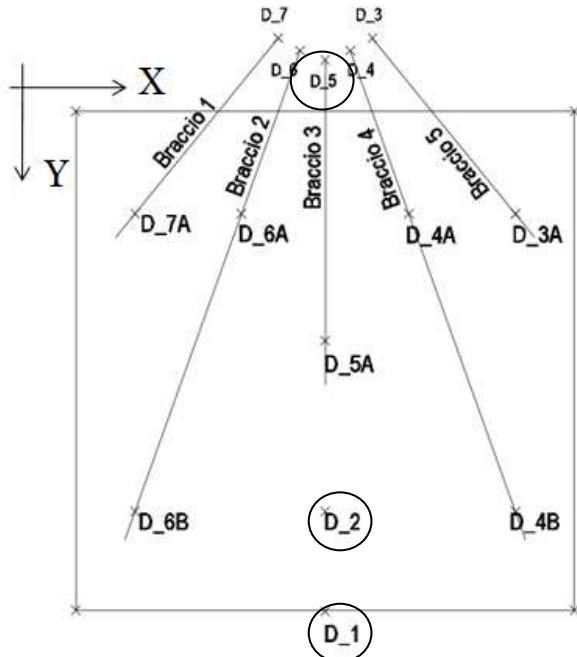


Figura 9 - Schema della copertura

Sono valutati gli spostamenti in direzione X e Z dei punti D_1, D_2 e D_5, mostrati in Figura 9. Gli spostamenti ottenuti dall'elaborazione dei dati forniti dal modello di calcolo sono assoluti e quindi per valutare correttamente le frecce e gli spostamenti laterali sono stati depurati dagli spostamenti degli altri punti di riferimento. In Tabella 8 sono mostrati gli spostamenti massimi in direzione X e Z dei tre punti di controllo e dei punti di riferimento D_6B, D_4B e D_5A.

	X [mm]	Z [mm]
D_1	-34.01	-10.84
D_2	-28.84	-8.35
D_5	-18.66	-0.28
D_4B	-28.84	-8.21
D_6B	-28.84	-7.43
D_5A	-20.43	-4.51

Tabella 8 - Spostamenti agli SLE dei punti di controllo

Vengono valutati gli spostamenti relativi tra: (1) D_1 e D_5A in direzione X e Z; (2) D_2 e D_6B in direzione Z; (3) D_5 in direzione X. I risultati sono mostrati in Tabella 9.

	X [mm]	Z [mm]
D_1 - D_5A	13.58	6.27
D_2 - D_6B	0.00	0.92
D_5	-18.66	-0.28

Tabella 9 - Spostamenti relativi dei punti di controllo

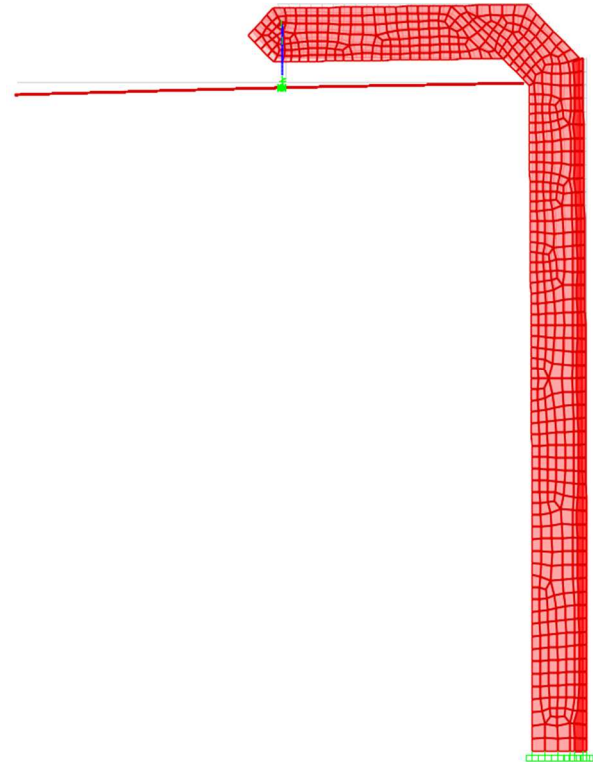


Figura 10 - Abbassamenti della copertura per effetto del peso proprio

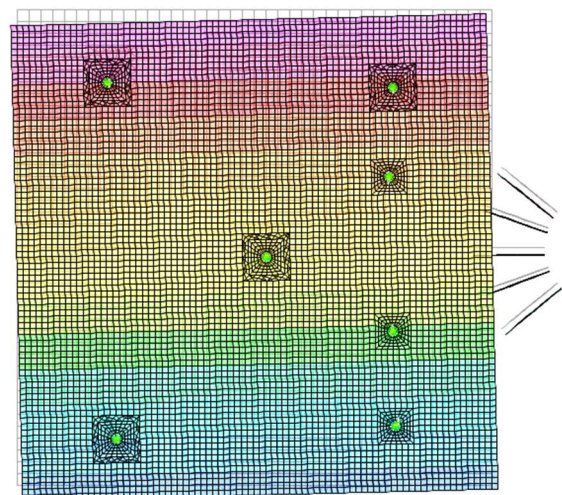


Figura 11 - Spostamenti in direzione X per effetto dell'azione del vento

Sono state valutate le sollecitazioni per effetto delle azioni applicate sulla lastra di copertura.

In Figura 12 si osserva che le tensioni si concentrano in prossimità dei punti di collegamento con le travi.

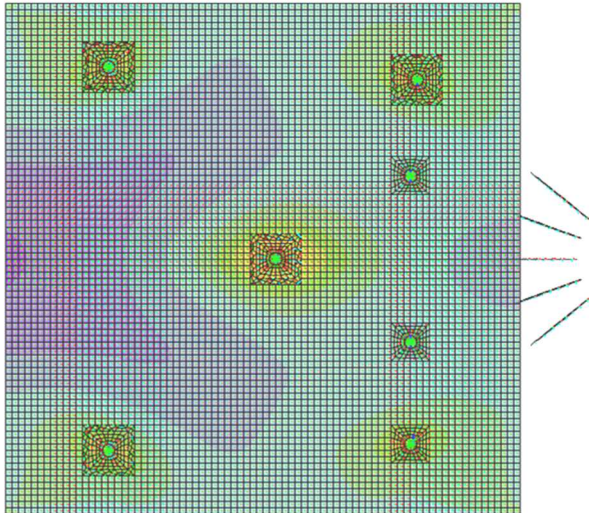


Figura 12 - Mapa delle tensioni sulla lastra di copertura per peso proprio

6. VERIFICHE

Gli stati limite per gli elementi in vetro sono: Stati Limite di Esercizio (SLE), Stati Limite Ultimi (SLU) e Stati Limite di Collasso (SLC).

Lo SLE considera la struttura integra sollecitata dai valori di progetto della azioni. In questo stadio viene valutata la deformabilità che deve essere limitata così da non pregiudicare la funzionalità della costruzione. Non si riconoscono limiti ai valori delle tensioni oltrepassati i quali la funzionalità della costruzione è pregiudicata, per cui lo SLE non include verifiche tensionali.

Gli SLU considerano la struttura integra sollecitata dai valori estremi delle azioni. La verifica allo SLU per rottura del vetro si effettua controllando che la tensione sollecitante sia inferiore alla resistenza di progetto del vetro.

Gli SLC considerano l'elemento vetrato in tutto od in parte frammentato. Lo SLC è quindi teso ad accertare che una costruzione con elementi strutturali di vetro garantisca un adeguato comportamento post rottura a livello globale e locale.

Per quanto riguarda le verifiche agli stati limite di esercizio, gli spostamenti massimi tollerabili degli elementi vetrati devono essere valutati in base alla specifica applicazione ed in ogni caso devono comunque essere valutati criticamente. Trattandosi di lastre di vetro di copertura vincolate

alle travi per punti occorre fare riferimento per le verifiche alla tabella 7.12 di [1].

In particolare con riferimento alla lastra di copertura di progetto:

$$f \leq \frac{1}{100}L_1 ; \quad f \leq \frac{1}{50}L_2 \quad (3)$$

Essendo L_1 l'interasse tra due punti di vincolo ed L_2 la lunghezza di sbalzo. In particolare è stato verificato che: (1) la deflessione massima del punto D_2 sia inferiore ad 1/100 della distanza tra D_{6B} e D_{4B} , posta pari a 1488 mm; (2) la deflessione massima di D_1 sia inferiore ad 1/50 della distanza tra D_{5A} e D_1 , posta pari a 1080 mm; (3) lo spostamento massimo in direzione x del punto D_5 sia inferiore ad 1/100 della quota del punto stesso rispetto al piano di vincolo (2700 mm). In Tabella 10 vengono riassunte le verifiche eseguite:

		f_{calcolo} [mm]	f_{limite} [mm]
D_1	U_x	13.58	21.60
	U_z	6.27	21.60
D_2	U_z	0.92	14.88
D_5	U_x	18.66	27.00

Tabella 10 - Confronto tra gli spostamenti di calcolo e gli spostamenti limite

Le verifiche dei punti di controllo scelti per valutare il comportamento globale della struttura risultano soddisfatte.

Le verifiche agli stati limiti ultimi sono condotte confrontando il valore della resistenza di progetto con il massimo valore di tensione indotta dai carichi. Le verifiche di resistenza e di deformabilità pre-rottura, così come riportato in [1], sono state effettuate sul solo Modello 4 ed hanno dato esito positivo.

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 la lastra temperata esterna risulti danneggiata.

Per la verifica allo SLC è stato implementato e risolto un nuovo 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:

$$E_{\text{eff}} = k \cdot \frac{l^*}{\lambda} \cdot E_p \quad (4)$$

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

rigidezza post-rottura del vetro temperato termicamente è pari ad 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°C ed essendo la durata delle azioni di progetto diversa da 60 secondi è possibile scalare il modulo E_{eff} secondo il fattore:

$$\rho = \frac{G(T, t)}{G(23^\circ C, 60s)} \quad (5)$$

dove:

- $G(T, t)$ è il modulo a taglio dell'intercalare polimerico relativo alle condizioni di temperatura T e durata di applicazione del carico t espresso in N/mm²;
- $G(23^\circ C, 60 s)$ è il modulo a taglio dell'intercalare polimerico a 23° C e con un carico applicato per 60 sec espresso N/mm².

All'interno del modello si è definito un materiale avente le caratteristiche del vetro riportate nella Tabella 1 ad eccezione del valore del Modulo di Young che assume il valore calcolato con la procedura appena descritta. La norma CNR [1] prevede un declassamento degli elementi strutturali in funzione della loro funzione strutturale. Tuttavia 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 ultima 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, così come riportato in [1], hanno dato esito positivo.

7. CONCLUSIONI

La presente memoria descrive l'iter di progettazione di una pensilina realizzata con una struttura interamente in vetro.

Vengono caratterizzati dal punto di vista meccanico i materiali che compongono la struttura e sono definiti i carichi applicati.

Si mostra la procedura che ha consentito di realizzare il modello agli elementi finiti che ha permesso di ottimizzare il dimensionamento della struttura. Vengono inoltre presentate le

problematiche inerenti alla modellazione e come esse siano stati risolte.

Sono infine presentati i risultati ottenuti e le verifiche operate secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

BIBLIOGRAFIA

[1] **CNR DT 210/2013**: "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di 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] **UNI EN 1706:2010**: "Alluminio e leghe di alluminio, Getti, Composizione chimica e proprietà meccaniche".

[6] **S. BENFRATELLO, G. CAMPIONE, L. PALIZZOLO, N. SCIBILIA**: "Flexural behavior of laminated glass beam with T cross-section", Proc. of 12th ESG Conference, Parma (Italy), 21-24/09/2014.

[7] **G. CAMPIONE, M. DI PAOLA, G. MINAFO'**: "Laminated glass members in compression: experiments and modelling", ASCE Struct. Eng., v.140, n.2, 04013043.

[8] **K. NAKANE, T. OGIHARA, N. OGATA**: "Properties of polyvinylbutyral/TiO₂ nano composites formed by sol-gel process", Composites Part B: Engineering, Volume 35, Issue 3, 2004, Pages 219–222.

[9] **J.B. COLVIN**: "Comparison of Monolithic and Laminated Glass Subjected to Barrier Loads", Proceedings Glass Performance Days (GPD) 2007, Finland.

[10] **E. OUWERKERK**: "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, Master thesis, 2011-06-24.

[11] **J. BELIS, A. VAN HULLE, D. CALLEWAERT, J. DISPESYN:** “Experimental investigation of unconventional canopy prototype suspended by adhesive bonds”, Challenging Glass 3, Bos, Louter, Nijssse, Veer (Eds.), Delft, IOS Press 2012, pages 177-186.

[12] **B. WELLER, T. SCHADOW:** “Designing of bonded joints in glass structures”, Proceedings Glass Performance Days (GPD) 2007, Finland.

[13] **B. SIEBERT:** “Safety aspects of point-fixed glass constructions”, Proceedings Glass Performance Days (GPD) 2007, Finland.

[14] **B. WELLER, J. WÜNSCH, K. HÄRTH:** “Experimental study on different interlayer materials for laminated glass”, Proceedings Glass Performance Days (GPD) 2005, Finland.

[15] **B. WELLER, C. KOTHE, M. KOTHE, J. WÜNSCH:** “Thermo mechanical behaviour of polymeric interlayer materials”, Proceedings Glass Performance Days (GPD) 2009, Finland.

[16] **S. NORVILLE:** “The effect of interlayer thickness on laminated glass strength”, Proceedings Glass Performance Days (GPD) 1997, Finland.

[17] **M. FELDMANN, R. KASPER:** “JRC Scientific and policy reports - Guidance for European Structural design of glass components”, Publications Office of the European Union, 2014.

[18] **L. GALUPPI, G. ROYER CARFAGNI:** “The enhanced Effective thickness method for laminated glass”, Proceedings Glass Performance Days (GPD) 2013, Tampere Finland, June 13-15, 2013.

RINGRAZIAMENTI

L'attività di ricerca è finanziata dal PO FERS Sicilia 2007/2013 – Linea di Intervento 4.1.1.1. – Progetto “*VESTRA - Elementi strutturali in VETRO STRATificato per applicazioni in ingegneria civile*”.