



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Edile

Resistenza a taglio delle pannellature in vetro per facciata continua

Shear resistance of glass panels for curtain walls

Relatore:

Prof. **Serpilli Michele**

Correlatore:

Prof. **Munafò Placido**

Tesi di Laurea di:

Baldassarri Nicolò

A.A. 2022 / 2023

Sommario

1. Introduzione	7
1.1 Motivazione e interesse dello studio	7
1.2 Tecnologia	8
1.2.1 Descrizione delle facciate in vetro	8
1.2.2 Facciata a moduli	9
1.2.3 Sistemi di fissaggio	11
1.2.4 Il vetro	16
1.2.4.1 Il vetro temperato	18
1.2.4.2 Il vetro stratificato	19
1.2.5 Strato intermedio di PVB	21
1.3 Azioni sulle costruzioni	23
1.3.1 Comportamento sotto l'azione del sisma	23
1.3.2 Comportamento sotto l'azione del vento	24
1.3.3 Comportamento sotto l'azione del carico da neve	24
1.3.4 Comportamento sotto l'azione termica	25
1.3.5 Altri tipi di carichi esterni	26
1.4 Normativa di riferimento	27
2. Materiali e caratteristiche	28
2.1 Tipologie dei pannelli oggetto di studio	29
2.1.1 Tipologia 1	30
2.1.2 Tipologia 2	31
2.1.3 Tipologia 3	32
2.2 Materiali	33
2.2.1 Struttura dei pannelli - LEGNO	33
2.2.2 Struttura dei pannelli - VETRO	34
2.2.3 Struttura dei pannelli - STRATO IN PVB	37
3. Metodologie di prova	38
3.1 Set up sperimentale	39
3.1.1 Telaio laboratorio D.I.C.E.A. Univpm	39
3.1.2 PC e software	41
3.1.3 Datalogger	41
3.1.4 Trasduttori di spostamento	42
3.1.5 Martinetto idraulico e pompa elettrica	43
3.2 Svolgimento delle prove	45
3.2.1 Prova sperimentale 1	46

3.2.2 Prova sperimentale 2	47
3.2.3 Prova sperimentale 3	48
3.2.4 Prova sperimentale 4	49
3.2.5 Prova sperimentale 5	50
3.2.6 Prova sperimentale 6	51
4. Risultati	52
4.1 Risultati prova 1 e prova 4	52
4.2 Risultati prova 2 e prova 3	57
4.3 Risultati prova 5 e prova 6	62
5. Discussione dei risultati	67
6. Conclusioni	70
Ringraziamenti	71
Bibliografia e Sitografia	72

Indice delle figure

Figura 1. Facciata in vetro, biblioteca Springdale di RDHA.....	9
Figura 2. Esempio di edificio con facciata in vetro a moduli	11
Figura 3. Dispositivo fermavetro	12
Figura 4. Dispositivo di sostegno meccanico (a ragno)	15
Figura 5. Procedura di fissaggio per punti	16
Figura 6. Vetro temperato rotto e frantumato	19
Figura 7. Struttura di un vetro stratificato	20
Figura 8. Schema vetro stratificato con PVB ; Tipologie colorate di PVB	22
Figura 9. Pannelli 1 e 4 vetro temperato stratificato 4.4.1	30
Figura 10. Pannelli 5 e 6 vetro temperato stratificato 4.4.1	31
Figura 11. Pannelli 2 e 3 vetro temperato non stratifica	32
Figura 12. Caratteristiche meccaniche e proprietà fisiche legno di mogano	34
Figura 13. Diagramma stress - deformazione acciaio e vetro	34
Figura 14. Telaio in ferro laboratorio.....	39
Figura 15. Supporto di base in acciaio S235.....	39
Figura 16. Dettagli del supporto di base in acciaio S235.....	40
Figura 17. Elementi di fissaggio dei pannelli	41
Figura 18. Datalogger	42
Figura 19. Trasduttori di spostamento e di rotazione.....	42
Figura 20. Martinetto idraulico per carico verticale	44
Figura 21. Martinetto idraulico per carico orizzontale	44
Figura 22. Centralina e pompe elettrica	44
Figura 23. Prova sperimentale 1 pre e post rottura	46
Figura 24. Prova sperimentale 2 pre e post rottura	47
Figura 25. Prova sperimentale 3 pre e post rottura	48
Figura 26. Prova sperimentale 4 pre e post rottura	49
Figura 27. Prova sperimentale 5 pre e post rottura	50
Figura 28. Prova sperimentale 6 pre e post rottura	51
Figura 29. Vista frontale del setup prova 1.....	52
Figura 30. Vista frontale del setup prova 4.....	52
Figura 31. Curve Forza - Spostamento orizzontale	53
Figura 32. Curve Forza - Spostamento diagonale	53
Figura 33. Stato di collasso prova 1	55
Figura 34. Stato di collasso prova 4	55
Figura 35. Dettaglio di rottura del vetro prova 4	55
Figura 36. Dettaglio di rottura del vetro intero prova 4	55
Figura 37. Dettaglio di piegatura della vite di fissaggio prova 4.....	56
Figura 38. Dettaglio di rottura della vite di fissaggio prova 4	56
Figura 39. Dettaglio di rottura del bullone di fissaggio prova 4.....	56
Figura 40. Dettaglio di rottura del telaio del pannello prova 4	56
Figura 41. Vista frontale del setup prova 2.....	57
Figura 42. Vista frontale del setup prova 3.....	57
Figura 43. Curve Forza - Spostamento orizzontale	58
Figura 44. Curve Forza - Spostamento diagonale	58
Figura 45. Stato di collasso prova 2	60
Figura 46. Dettaglio di rottura del vetro prova 2	60
Figura 47. Dettaglio di rottura del vetro prova 2	60

Figura 48. Stato di collasso prova 3	61
Figura 49. Dettaglio di rottura del vetro prova 3	61
Figura 50. Dettaglio di rottura del vetro prova 3	61
Figura 51. Vista frontale del setup prova 5.....	62
Figura 52. Vista frontale del setup prova 6.....	62
Figura 53. Curve Forza - Spostamento orizzontale	63
Figura 54. Curve Forza - Spostamento diagonale	63
Figura 55. Stato di collasso vista frontale prova 5	65
Figura 56. Stato di collasso vista retro prova 5.....	65
Figura 57. Dettaglio di scollaggio del vetro prova 5	65
Figura 58. Dettaglio di rottura del vetro prova 5	65
Figura 59. Stato di collasso prova 6	66
Figura 60. Dettaglio di rottura delle viti dell'hold down di base prova 6	66
Figura 61. Curve Forza - Spostamento orizzontale	67
Figura 62. Curve Forza - Spostamento diagonale	67

Indice delle tabelle

Tabella 1. Composizione del vetro per sistemi a facciata continua.....	17
Tabella 2. Proprietà fisiche del vetro per sistemi a facciata continua	17
Tabella 3. Livelli di prestazione al fuoco	26
Tabella 4. Collisioni da veicoli.....	26
Tabella 5. Geometria dei pannelli 1 e 4.....	30
Tabella 6. Geometria dei pannelli 5 e 6.....	31
Tabella 7. Geometria dei pannelli 2 e 3.....	32
Tabella 8. Valori caratteristici di resistenza a flessione dei vetri	35
Tabella 9. Proprietà e caratteristiche del vetro	35
Tabella 10. Valori del Kmod in variazione al tempo di carico	36
Tabella 11. Proprietà e caratteristiche del PVB	37
Tabella 12. Tabella riassuntiva dei risultati delle prove 1 e 4	54
Tabella 13. Tabella riassuntiva dei risultati delle prove 2 e 3	59
Tabella 14. Tabella riassuntiva dei risultati delle prove 5 e 6	64
Tabella 15. Tabella con i valori medi delle prove.....	68

1. Introduzione

1.1 Motivazione e interesse dello studio

La presente tesi ha come oggetto di studio il comportamento a taglio dei pannelli in vetro per facciata continua. L'importanza di questo studio risiede nella necessità di comprendere come questi pannelli di vetro per facciate continue possano reagire sotto azioni sismiche e azioni del vento, analizzare le prestazioni rispetto a diverse sollecitazioni e valutare la capacità di resistenza derivanti da tali eventi. L'utilizzo di facciate continue in vetro è sempre più diffuso in ambito edilizio, ma il loro comportamento in caso di evento sismico non è ancora abbastanza conosciuto. La complessità di questi sistemi rende necessario uno studio accurato, nel quale si tiene conto di tutte le variabili che entrano in gioco. Sebbene queste strutture siano progettate per garantire una grande resistenza alle sollecitazioni, il loro comportamento dinamico in caso di sisma può essere complesso e difficile da prevedere; infatti durante un terremoto i componenti strutturali della facciata possono subire diverse tipologie di sollecitazioni, quali vibrazioni orizzontali o oscillazioni verticali. Queste oscillazioni possono provocare un aumento delle tensioni interne nella struttura, causando danni e deformazioni permanenti. Grazie alla collaborazione con il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (D.I.C.E.A.) si è voluto analizzare il comportamento di pannelli in vetro per facciata continua sottoposti ad azioni di taglio, al fine di comprendere a pieno la risposta strutturale di questi pannelli simulando differenti scenari su pannelli in vetro di diversa tipologia.

1.2 Tecnologia

1.2.1 Descrizione delle facciate in vetro

I primi esempi di facciate continue in vetro risalgono alla metà del 1800, si tratta di primi esperimenti resi possibili dall'innovazione tecnologica del tempo che permise di realizzare degli scheletri portanti in acciaio e cemento armato, estremamente robusti. Il vero apice, però, si ha dopo la seconda guerra mondiale, quando la facciata continua diventa un oggetto diretto di studio e approfondimento. Sarà poi uno dei più grandi architetti del '900, Le Corbusier, a consacrare definitivamente questa tipologia edilizia inserendola tra i suoi cinque punti per una nuova architettura, insieme ai pilotis, al tetto giardino, alla pianta libera e alla finestra a nastro.

Le facciate continue in vetro sono uno degli elementi più scenografici dell'edilizia contemporanea. Se si pensa ad un grattacielo, ad un moderno centro commerciale o semplicemente ad un palazzo di una grande azienda, quasi sicuramente ciò che la fantasia visualizzerà sarà un edificio lineare e tutto in vetro.

In maniera più tecnica, si tratta di un involucro leggero che sostituisce le pareti esterne e trasferisce i carichi agli elementi strutturali portanti. Dal punto di vista estetico, la sua caratteristica principale è proprio la continuità geometrica, la quasi totale assenza di elementi di rottura, chiamata dagli americani curtain wall.

Di facciate continue ne esistono almeno 5 tipologie:

- Facciata a moduli (o a cellule) – TIPOLOGIA DI FACCIATA OGGETTO DI STUDIO
- Facciata a montanti e traversi
- Facciata strutturale a tamponamenti incollati
- Facciata ad aggancio puntuale
- Facciata a doppia pelle.

Normalmente le strutture portanti delle facciate continue vengono realizzate in alluminio, oppure, ma meno diffuse, in acciaio. Mentre per le coperture viene utilizzato il vetro, che può essere trasparente o opaco, il quale garantisce un'ottima resa in termini di luminosità, di efficienza per l'isolamento sia termico che acustico ed in termini di estetica.



Figura 1. Facciata in vetro, biblioteca Springdale di RDHA

1.2.2 Facciata a moduli

Analizzando la facciata continua in vetro a moduli, o anche detta a cellule, la sua realizzazione prevede una fase antecedente al montaggio di preassemblaggio fuori opera. Gli elementi primari che costituiscono la struttura portante del pannello vengono assemblati in officina in elementi modulari, completi della porzione in vetro trasparente o opaca, e trasportati successivamente in cantiere per la fase di montaggio. Questa soluzione trova applicazione in edifici che si sviluppano in elevazione, come ad esempio i grattacieli, o comunque in casi in cui la costruzione prevede che il montaggio di opere provvisorie risultino poco economiche. In questo caso però, bisogna prevedere un maggiore spazio di stoccaggio in cantiere e delle modalità di trasporto specifiche.

Per la facciata strutturale, il sistema viene chiamato VEC (Vitrages Extérieurs Collés) o Structural Glazings e si contraddistingue per la complanarità e la continuità della superficie vetrata che va a nascondere la parte strutturale in alluminio o in acciaio. La continuità della superficie vetrata viene interrotta solamente nei punti di giunzione tra le lastre, ma all'esterno è quasi impercettibile grazie al piccolo spessore della giunzione; esistono inoltre elementi meccanici per assicurare la tenuta delle lastre al telaio portante, anch'essi non visibili dall'esterno. Gli elementi vetrati possono essere fissi o apribili e sono collegati strutturalmente al telaio attraverso specifici collanti.

Le facciate continue a cellule possono essere completate da elementi di chiusura opachi, detti "spandrel". Sono dei pannelli sandwich in poliuretano, rivestiti da laminati metallici preverniciati, o da pannelli dotati di camera d'aria ventilata e rivestiti in vetro o pietra.

I sistemi di facciata continua sono progettati principalmente tenendo conto degli elementi strutturali dell'edificio e dei dispositivi di collegamento tra facciata continua e struttura dell'edificio stesso. Il sistema nel suo insieme deve essere in grado di resistere ai carichi statici, ai carichi dinamici e alle deformazioni della struttura portante dell'edificio, in modo da assecondare i movimenti dovuti ai cedimenti differenziali, alle inflessioni dei pilastri e delle travi e ai carichi orizzontali.

Gli elementi strutturali e i dispositivi di collegamento vengono progettati anche considerando altri fattori:

- la loro capacità di risposta ai fenomeni di dilatazione e contrazione di tipo termico, in modo da essere in grado di assorbire le sollecitazioni dovute alle differenze di temperatura tra interno ed esterno, le quali potrebbero creare deformazioni agli elementi di chiusura;
- la loro capacità di risposta ai fenomeni di dilatazione e contrazione di tipo igroscopico, in modo da consentire i movimenti differenziali degli elementi di chiusura dovuti alle variazioni di umidità.
- resistenza termica, in modo tale da impedire il passaggio di calore per conduzione, evitando così la nascita di ponti termici, soprattutto nel caso di profili metallici, i quali potrebbero causare fenomeni di condensazione del vapore acqueo localizzati sulle superfici interne delle chiusure;
- resistenza ai fenomeni di ossidazione;
- resistenza all'esposizione dei raggi ultravioletti;
- resistenza alla corrosione delle parti metalliche;
- tenuta all'acqua, prevedendo appositi giunti capaci di impermeabilizzare le zone di accumulo, come gli interstizi e le sporgenze, e di infiltrazione nelle zone di giunzione;
- tenuta all'aria, soluzioni in grado di impedire la trasmissione acustica e le infiltrazioni verso l'interno. Ciò è risolvibile attraverso l'applicazione di sigillanti e guarnizioni;
- tenuta al vapore;
- resistenza al fuoco;
- durabilità e manutenibilità, in quanto bisogna prevedere delle soluzioni capaci di permettere operazioni periodiche di pulizia e di manutenzione degli elementi tecnici. [1]



Figura 2. Esempio di edificio con facciata in vetro a moduli

1.2.3 Sistemi di fissaggio

Le procedure di fissaggio degli elementi di chiusura tengono conto di diversi aspetti, quali:

- la trasmissione sicura di tutti i carichi;
- l'eventuale posa in opera degli elementi tecnici libera da vincoli, con punti di giunzione e di scorrimento;
- la chiara definizione delle sequenze di montaggio e di sostituzione;
- la regolazione degli elementi tecnici di diversa provenienza produttiva e secondo scostamenti nelle tolleranze di produzione.

Rispetto alle diverse tipologie dei sistemi di facciata, le procedure di fissaggio sono considerate attraverso l'applicazione di diversi dispositivi:

- **Dispositivi fermavetro:** la tecnica di fissaggio riguarda la giunzione di due elementi di chiusura in vetro in cui i due piani di tenuta sono realizzati da profili elastici in silicone o in etilene-propilene, impedendo così l'infiltrazione dell'acqua. Nei sistemi con dispositivi fermavetro a scatto, i profili esterni chiamati "pressori" generano una pressione lineare sugli elementi di chiusura e sulla struttura a telaio. Le guarnizioni profilate poste nel mezzo contribuiscono alla tenuta e all'elasticità del fissaggio, contribuendo a determinare l'entità della pressione.

Questa tipologia di fissaggio prevede: la separazione del piano di tenuta esterno da quello interno, il collegamento dei giunti verticali ed orizzontali ad un comune sistema di drenaggio; mentre richiede la disposizione della scanalatura in modo che sia libera dalle guarnizioni profilate di tenuta, la disposizione dei tasselli in modo che non impediscano la compensazione della pressione del vapore e del drenaggio, la disposizione differenziata dei giunti verticali e dei giunti orizzontali in caso di drenaggio comunicante.

Invece nel caso di impiego di lastre di vetro monolitiche e non isolanti sono necessarie canalette di raccolta dell'acqua.

È fondamentale evitare l'aggancio degli elementi di protezione solare o anticaduta a questa tipologia di fissaggio al fine di evitare danneggiamenti alla stabilità dell'intero sistema.

Gli elementi di chiusura possono anche essere fissati alle strutture a telaio attraverso la posa laterale per punti. In questo caso, il montaggio avviene per punti ai bordi degli elementi di chiusura in vetro, dove le mensole assorbono le sollecitazioni parallele al piano degli elementi stessi e i piatti assorbono le sollecitazioni perpendicolari al piano degli elementi.



Figura 3. Dispositivo fermavetro

- **Silicone strutturale:** utilizzato nel caso di facciata continua strutturale e/o a doppia parete, specialmente per lo schermo esterno. La configurazione morfologica tiene conto della distanza minima tra gli elementi di chiusura, che deve essere di dimensioni maggiori di 10 - 12 mm, in modo tale da assorbire le dilatazioni termiche e le deformazioni del silicone causate dalle azioni del vento.

Il silicone strutturale tiene anche conto della distanza di separazione tra il telaio e gli elementi di chiusura, in modo tale da evitare la trasmissione delle tensioni agenti sui profili.

Per i sistemi di facciata strutturale bisogna prevedere inoltre l'aggiunta di elementi di tenuta perimetrale all'interno del telaio, in modo tale da sostenere le lastre nel caso di cedimento della colla di fissaggio. Questi elementi di tenuta sono inseriti anche per poter ricevere il peso degli elementi di chiusura, nel caso di forza di gravità sulle sigillature, in modo tale da non sollecitare a taglio ed in maniera costante le giunzioni.

Il silicone strutturale deve essere caratterizzato da:

- formulazione neutra, acida, mono-componente e bicomponente;
- assenza di sottoprodotti neutri durante il processo di reticolazione, in modo da evitare reazioni aggressive allo strato di finitura dei montanti e dei traversi;
- resistenza alle condizioni atmosferiche e al deterioramento;
- plasticità.

Infine deve essere in grado di sostenere il peso proprio degli elementi di chiusura, i carichi orizzontali da trasferire alla struttura portante, le sollecitazioni termiche che provocano dilatazioni differenziate negli elementi di chiusura, le sollecitazioni dovute alla componente ultravioletta della radiazione solare e le sollecitazioni dovute alla deformazione della struttura portante sotto l'azione dei carichi orizzontali e verticali.

In generale, l'installazione delle chiusure al telaio considera: l'impiego di elementi dotati di una distorsione di riflessione molto ridotta e della massima cura nel taglio e nella molatura; i processi di reticolazione del silicone; l'applicazione su superfici pulite ed asciutte e la tecnica di assemblaggio delle lastre in vetrocamera.

In questo caso, il sistema di facciata strutturale prevede che il dimensionamento del giunto di incollaggio sia eseguito secondo la forma e la superficie di adesione del sigillante siliconico alle lastre di vetro e al metallo del telaio.

La profondità del giunto, è stabilita dalla seguente relazione:

$$H_1 = \frac{\frac{1}{2} l w l}{d f c}$$

dove:

- H_1 = lunghezza di adesione
- l = lunghezza del lato più corto della lastra di vetro
- wl = carico del vento
- $d f c$ = coefficiente di robustezza dinamica del sigillante siliconico.

Mentre la stabilità del giunto in sigillante siliconico è stabilita dalla seguente relazione:

$$H_2 = \frac{w}{u \text{ sfc}}$$

Dove:

- H_2 = lunghezza di adesione
- w = peso della lastra di vetro
- u = perimetro della lastra di vetro
- sfc = coefficiente di robustezza statica del sigillante.

Partendo da queste relazioni, bisogna confrontare il valore di H_2 con il valore di H_1 , e prendere quindi il valore più alto. Inoltre, il calcolo del dimensionamento dei giunti siliconici va considerato in base alle forme, alla presenza di sforzi particolari, alle dilatazioni termiche degli elementi tecnici e alle esigenze produttive ed esecutive. Di norma varia dai 6 ai 7 mm.

- **Dispositivi a sostegno meccanico:** utilizzati per gli elementi di chiusura in lastre di vetro per il sistema di facciata sospesa. Questi dispositivi, formati da bulloni, sospendono puntualmente le lastre di vetro e trasmettono le sollecitazioni all'intelaiatura composta da cavi di acciaio ancorati alla struttura portante principale o alla struttura portante a telaio in acciaio. I dispositivi a sostegno meccanico sono in grado di assorbire gli sforzi di torsione e di flessione trasmessi dai movimenti strutturali, in particolare hanno una sfera che ruota internamente alle lastre e prevedono degli snodi in grado di assorbire gli eventuali movimenti dei cavi. I pannelli di vetro, per resistere alla concentrazione degli sforzi nei punti di fissaggio dei bulloni, sono di tipo temperato con uno spessore pari a 12 mm, stratificati o in vetrocamera. Dal punto di vista strutturale, il pannello in vetro è composto da: lastra esterna di spessore 12 mm, intercapedine di spessore 15 mm, lastra interna di spessore 6 mm. Le lastre di vetro sono forate su entrambe le facce in corrispondenza dei quattro vertici. Nel caso di lastra singola, i fori possono essere lisci o filettati; nel caso di lastre in vetrocamera, i fori del pannello esterno presentano una svasatura in grado di far entrare la testa delle viti filettate, le quali sono serrate tramite bullonatura regolabile. In questo caso l'integrità dell'isolamento viene garantita attraverso l'uso di distanziatori a corona circolare adeguatamente sigillati.

L'esecuzione del sistema di facciata sospesa prevede:

- la sospensione delle lastre di vetro a due punti di fissaggio superiori, i quali devono sostenere il proprio peso ed essere in grado di assorbire i movimenti differenziali nel piano di facciata, dovuti ai movimenti della struttura portante;
- prevedere la sospensione delle lastre di vetro non provocando tensioni attraverso dei cuscinetti oscillanti;
- prevedere l'utilizzo di rotulles attraverso un fissaggio per quattro punti da bilanciare con collegamento diretto ai montanti verticali o ai cavi in acciaio.
- prevedere infine la realizzazione dei giunti di continuità tra le lastre di vetro attraverso sigillanti siliconici estrusi e in pasta, i quali devono fronteggiare il deterioramento dovuto agli agenti atmosferici e l'assorbimento delle dilatazioni dovute ai movimenti della struttura portante.



Figura 4. Dispositivo di sostegno meccanico (a ragno)

- **Procedure di fissaggio per punti:** questo tipo di fissaggio viene utilizzato nelle zone angolari del perimetro, su supporti metallici in acciaio, che a loro volta sono collegati alla struttura portante principale o ad una struttura a telaio in acciaio. Possono essere con o senza perforazioni; in caso di perforazioni, il montaggio è risolto attraverso delle connessioni che impediscono l'incastro e il contatto tra la struttura portante e le lastre, senza opere di incastro e con la chiusura a pressione eseguita tramite delle piaste. [2]

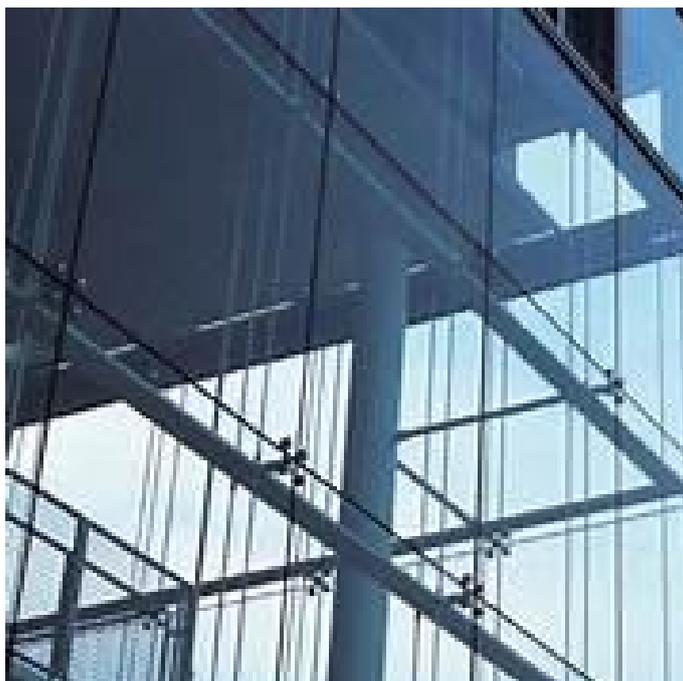


Figura 5. Procedura di fissaggio per punti

1.2.4 Il vetro

L'analisi degli elementi di chiusura in vetro utilizzati per l'applicazione ai sistemi di facciata è introdotta dalla spiegazione relativa ai procedimenti produttivi, oltre che ai caratteri funzionali e morfologici. L'obiettivo è quello di rilevarne la composizione e le proprietà rispetto alle prestazioni fisiche, meccaniche, termiche, luminose ed acustiche.

Il vetro è costituito da una soluzione solida, ottenuta dalla fusione di una miscela omogenea di silicio (elemento vetrificante), sodio (elemento fondente, sotto forma di solfato o di carbonato) e dal calcio (elemento stabilizzante, sotto forma di carbonato). È composto da molecole completamente disordinate che non realizzano nessun reticolo cristallino, determinando così la condizione di trasparenza.

Il vetro utilizzato nei sistemi di facciata continua è di tipo sodico-calcico; durante la produzione, le sostanze della miscela vengono riscaldate fino a diventare fluido-viscose, per poi essere sottoposte a raffreddamento. In questo modo gli ioni e le molecole non hanno la possibilità di posizionarsi in modo regolare, cioè non riescono a formare un reticolo cristallino, ottenendo quindi uno stato molecolare disordinato.

Il vetro è costituito da miscele di silicati, trasparenti secondo le diverse gradazioni, e precisate da uno stato di aggregazione in cui le molecole presentano la disposizione casuale propria dei liquidi.

Nella seguente tabella si può osservare la costituzione del vetro rispetto alle principali quantità chimiche della miscela sottoposta ai processi di riscaldamento e di raffreddamento che conducono ad uno stato molecolare disordinato:

Silice (Si)	69 – 74 %
Calce (CaO)	5 – 12 %
Ossido di sodio (Na ₂ O)	12 – 16 %
Magnesia (MgO)	0 – 6 %
Allumina (Al ₂ O ₃)	0 – 3 %

Tabella 1. *Composizione del vetro per sistemi a facciata continua*

Il vetro sodico-calcico utilizzato per le facciate continue è resistente agli acidi e alle soluzioni alcaline, ed è dotato di una superficie dura. Si comporta in maniera elastica, non dispone di alcuna riserva plastica e, grazie alle elevate forze di legame atomico, possiede una rigidità meccanica molto elevata. Di seguito, nella tabella, vengono riportate le proprietà fisiche del vetro usato per facciate continue. Sono indicati i principali valori che determinano la resistenza agli acidi e alle soluzioni alcaline, la resistenza superficiale, l'elasticità e la rigidità meccanica:

Caratteristiche	Simbolo	Valore e unità
Densità a 18°C	r	2500 Kg/m ³
Durezza superficiale		6 – 7 (secondo la scala di Mohs)
Modulo elastico di Young	E	70000 N/mm ²
Coefficiente di Poisson	v	0,23
Calore specifico	c	0,72 x 10 ³ J/(Kg x K)
Coefficiente di dilatazione lineare	a	9 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Conducibilità termica	λ	W/mK
Indice di rifrazione nel campo visibile (tra 380 e 780nm)	n	1,5

Tabella 2. *Proprietà fisiche del vetro per sistemi a facciata continua*

Le proprietà fisiche del vetro riguardano principalmente la trasparenza alle radiazioni visibili, la permeabilità dei raggi solari e l'opacità alla radiazione termica. La radiazione solare ultravioletta relativa al campo spettrale del visibile può attraversare in parte lo strato di vetro, mentre la radiazione termica relativa al campo spettrale dell'infrarosso proveniente dalle superfici irradiate negli spazi interni è in buona parte riflessa, in funzione della quantità di ossido di ferro e dello spessore del vetro. [3]

1.2.4.1 Il vetro temperato

Il vetro temperato (regolato dalla norma Europea UNI EN 12150) è una variante del vetro comune che, attraverso un processo di riscaldamento e raffreddamento avvenuto in maniera rapida, riesce ad ottenere una maggiore resistenza meccanica. Per questo motivo, il vetro temperato diventa uno dei materiali più utilizzati per le applicazioni in cui viene richiesta una maggiore resistenza alle sollecitazioni, sia meccaniche che termiche.

Il processo inizia con la pulizia accurata del vetro, che viene poi sagomato in base alle dimensioni richieste. La lastra viene posta in un forno e riscaldata ad una temperatura di circa 620°C per 10-15 minuti, in base allo spessore della lastra stessa. In questo modo, il vetro raggiunge uno stato di ammorbidimento e diventa facilmente modellabile. A questo punto, la lastra viene raffreddata rapidamente attraverso un getto di aria compressa, che la raffredda ad una velocità di circa 30-60°C al secondo. Questo processo prende il nome di “tempra” e fa sì che la lastra di vetro si raffreddi in modo disomogeneo e crei delle tensioni residue nella struttura. Il risultato ottenuto è un vetro che ha una resistenza meccanica e termica maggiore rispetto al vetro comune.

Il vetro temperato, infatti, ha una resistenza alla rottura che è sei/sette volte superiore a quella di una lastra di vetro comune; ha una resistenza a temperature che si avvicinano ai 250°C; ha una resistenza meccanica all’urto di quattro volte superiore rispetto al vetro comune; ha una resistenza alla pressione di piegatura che va dai 120 ai 200 N/mm² e una resistenza alla compressione di 1000 N/mm². Un’altra proprietà molto importante del vetro temperato è che, in caso di rottura, ha la capacità di rompersi in piccolissimi frammenti non taglienti, riducendo in questa maniera il rischio di lesioni gravi a persone e/o a cose. [4]



Figura 6. Vetro temperato rotto e frantumato

1.2.4.2 Il vetro stratificato

Il vetro stratificato è un particolare vetro composto da due o più lastre unite tra loro da una pellicola di materiale plastico, la quale risulta essere resistente agli urti e agli strappi. Questa tipologia di vetro viene identificata attraverso un numero a due o più cifre che indicano lo spessore in millimetri delle varie lastre di vetro che lo compongono, seguito da una cifra separata con un punto che indica invece il numero totale delle pellicole di PVB (polivinilbutirrale) collocate fra le lastre di vetro.

In caso di rottura violenta, questa tipologia di lastra ha la capacità di non “esplodere”, ma mantiene attaccati i pezzi di vetro, evitando così lesioni da taglio a persone. La rottura di un vetro stratificato, infatti, sembra assomigliare ad una ragnatela, e non c'è quindi dispersione dei pezzi di vetro poiché questi rimangono al loro posto proprio grazie allo strato di PVB.

Per quanto riguarda le caratteristiche di sicurezza ed acustica, queste dipendono dal numero di lastre presenti e dal loro spessore, ma soprattutto dipendono dal numero di pellicole di PVB e dal loro trattamento.

Il vetro stratificato può essere impiegato per diversi scopi e per risolvere problematiche specifiche, come ad esempio l'antifondamento e/o la protezione dall'eccessivo rumore.

I vetri stratificati riescono a garantire un determinato coefficiente di sicurezza anti-infortunio poiché è possibile scegliere il numero di pellicole di PVB applicate tra le lastre di vetro; per permettere

l'innalzamento del coefficiente di sicurezza, però, bisogna tener conto anche di altri fattori che incidono su questo aspetto, come ad esempio i punti di chiusura del telaio.

Dal punto di vista acustico invece, per ottenere un vetro stratificato che soddisfi determinate condizioni bisogna impiegare pellicole speciali insonorizzate e molto elastiche, le quali hanno la funzione di ammortizzare le vibrazioni che si creano tra le lastre di vetro, ottenendo così un miglioramento del comfort acustico. [5]

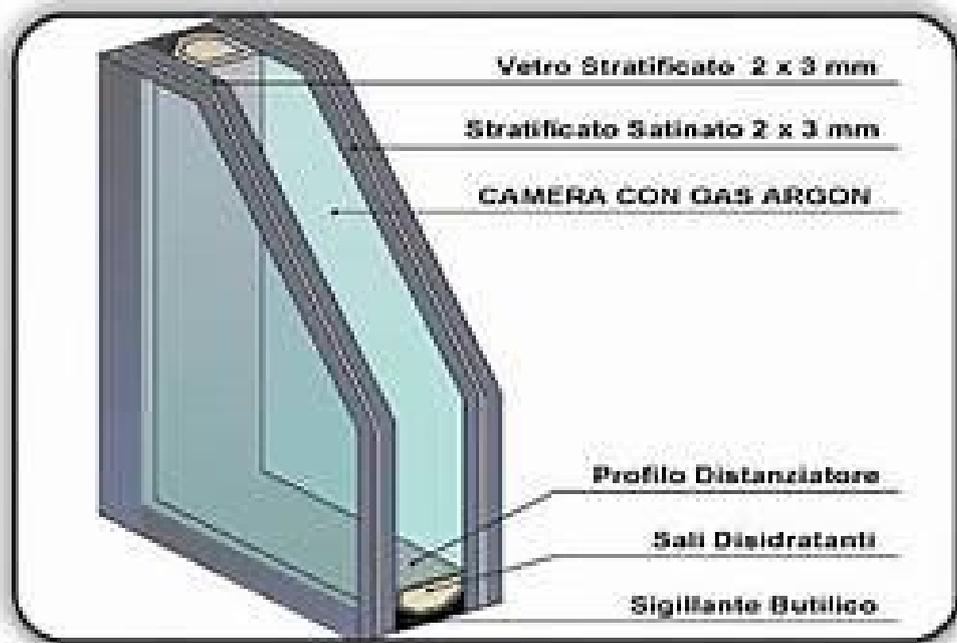


Figura 7. Struttura di un vetro stratificato

1.2.5 Strato intermedio di PVB

Il PVB (polivinilbutirrale) è un materiale plastico preparato facendo reagire alcool polivinilico e butiraldeide. La resina di PVB si presenta sotto forma di granuli o di polvere bianca molto fine, che è possibile estrarre per formare un film, oppure sciogliere in solventi.

Questo strato sottile di PVB viene posizionato tra le lastre di vetro, fornendo un'ottima resistenza agli urti e agli impatti e riducendo così il rischio di rottura e scheggiatura. In caso di rottura del vetro, il PVB agisce quindi come adesivo. È in grado di mantenere i frammenti di vetro rotti uniti, impedendone così la caduta e prevenendo il rischio di lesioni a persone.

Essendo un materiale plastico, ha una notevole capacità di deformazione elastica, che gli consente di assorbire e dissipare l'energia creata dalle sollecitazioni meccaniche.

Un parametro fondamentale di questo materiale è il parametro G, modulo di taglio, che rappresenta la capacità del materiale di resistere alle deformazioni torsionali. È un parametro importante perché la lastra di vetro viene sottoposta a sollecitazioni di tipo trasversale ma anche torsionale e il PVB svolge il ruolo di trasferimento delle sollecitazioni tra i due strati di vetro in cui si trova incluso. Inoltre, riduce del 99% la trasparenza della lastra in vetro alla luce ultravioletta e incrementa le proprietà per quanto riguarda l'isolamento acustico.

Quindi il comportamento del vetro dipende anche dalle caratteristiche meccaniche del PVB, che variano in base al grado di cristallinità, al tipo di materiale e allo spessore dello strato intermedio. Queste influiscono sulla distribuzione delle sollecitazioni tra i due strati di vetro e di conseguenza anche sulle deformazioni del pannello in caso di sollecitazioni termiche.

Di solito, il PVB utilizzato per pannelli in vetro per facciate continue ha uno spessore che varia dai 0,38 mm ai 0,76 mm, ma possono essere prodotti degli strati di spessori maggiori o minori a seconda delle specifiche del progetto, delle azioni agenti sulla struttura, del tempo di applicazione e infine anche della temperatura di riferimento nella progettazione dell'azione sollecitante. [6]

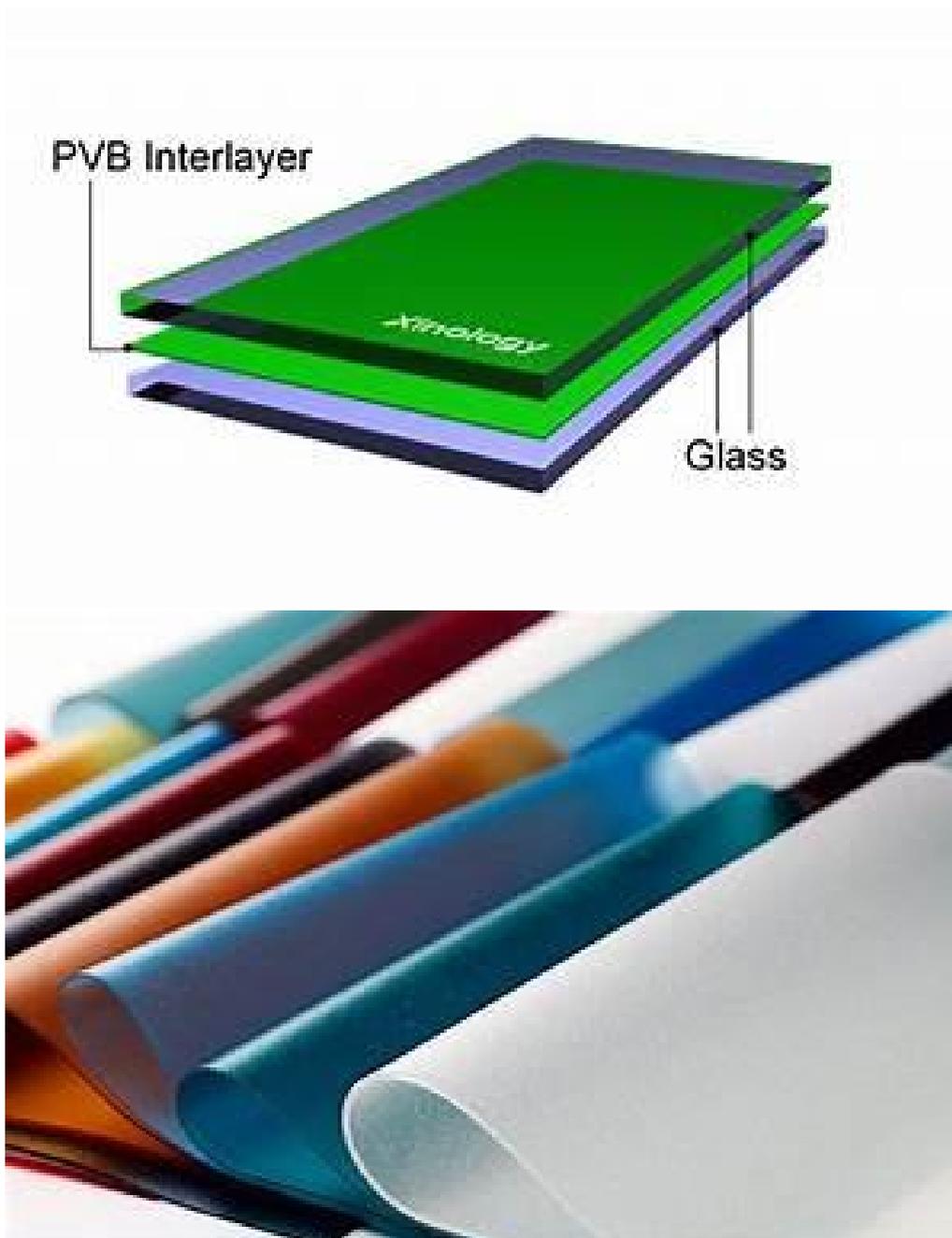


Figura 8. Schema vetro stratificato con PVB ; Tipologie colorate di PVB

1.3 Azioni sulle costruzioni

1.3.1 Comportamento sotto l'azione del sisma

Durante un evento sismico le strutture tendono ad avere una reazione alle accelerazioni date in input al suolo che sono combinazioni di componenti orizzontali e verticali, manifestando così spostamenti fuori del piano e all'interno del piano oltre ad importanti rotazioni.

La risposta sismica della struttura è influenzata sia dagli elementi strutturali che da quelli non strutturali di cui è composta. Le sollecitazioni trasferite dalla struttura portante agli elementi secondari possono risultare un problema e superare i range di danneggiamento dei materiali, provocando così danni. Per questo motivo le azioni sismiche non vanno assolutamente trascurate, ma devono essere accuratamente prese in esame. Il danneggiamento degli elementi secondari non strutturali potrebbe risultare pericoloso per le persone che si potrebbero trovare nelle vicinanze dell'edificio, causando lesioni in caso di rottura. Per evitare ciò, gli elementi di facciata considerati secondari devono essere collegati alla struttura portante attraverso dei giunti che consentono alla struttura stessa di oscillare senza che questo movimento coinvolga la facciata. Grazie alla normativa italiana si riesce a quantificare lo spostamento orizzontale come percentuale dell'altezza. Si deve perciò ottenere che gli spostamenti di interpiano ottenuti dall'analisi siano inferiori ai limiti definiti in base alla tipologia della struttura e dei suoi collegamenti. Questi limiti sono compresi tra lo 0,3% e l'1% dell'altezza di piano, in funzione della tipologia strutturale e delle caratteristiche dei principali elementi non strutturali. Quindi si può considerare come spostamento di interpiano l'1% dell'altezza di interpiano a vantaggio di sicurezza; questo sarà lo spostamento imposto che i giunti di collegamento tra la facciata e la struttura portante principale dovranno assorbire. In questo modo le oscillazioni orizzontali e verticali causate dal sisma non saranno trasferite alla struttura di facciata continua, semplificandone la verifica. [7]

1.3.2 Comportamento sotto l'azione del vento

Un altro aspetto fondamentale è quello del carico dovuto all'azione del vento, il quale ha subito un incremento di circa il 25% nella nuova normativa italiana rispetto ai vecchi valori; inoltre, il periodo di ritorno è stato modificato da 50 anni a 500 anni e di conseguenza il carico è stato aumentato. Bisogna anche notare che i valori di seguito elencati sono ottenuti tenendo conto di prefissare condizioni al contorno e non sono utilizzabili in generale, ma hanno solamente lo scopo di fornire un'idea generale del comportamento della struttura sotto l'azione del vento.

Al variare della posizione geografica in cui ci si trova, i valori variano:

- Milano passa da 58 Kg/mq a 73 Kg/mq (+26%)
- Roma passa da 67 Kg/mq a 84 Kg/mq (+26%)
- Trieste passa da 98 Kg/mq a 115 Kg/mq (+17%). [7]

1.3.3 Comportamento sotto l'azione del carico da neve

Passando ora al carico da neve, è possibile notare che sono state eseguite delle semplificazioni nelle condizioni di carico, ma anche questo ha subito un sensibile aumento dell'azione in oggetto.

Come detto precedentemente, i valori elencati di seguito, non sono utilizzabili in generale poiché sono relativi a casi specifici, come ad esempio l'altezza sul livello del mare pari a 0. Questi valori hanno il solo scopo di quantificare in linea generale gli incrementi avvenuti rispetto alle normative precedenti. Anche in questo caso si ha un aumento del periodo di ritorno associato al carico da neve, che passa da 200 anni a 500 anni, il quale porta ad un incremento dello stesso carico di circa il 12%. Inoltre è importante precisare che la differenza notevole che può presentare il carico da neve è dovuta alla zona geografica in cui si deve realizzare l'opera.

- Milano passa da 128 Kg/mq a 144 Kg/mq
- Roma passa da 92 Kg/mq a 103 Kg/mq
- Palermo passa da 60 Kg/mq a 67 Kg/mq. [7]

1.3.4 Comportamento sotto l'azione termica

Il carico termico rappresenta un carico esterno raramente considerato nelle verifiche, spesso si rivolge più attenzione ai carichi del vento e della neve. Ma nella nuova normativa le azioni termiche per gli edifici devono essere specificate assegnando in particolare le seguenti grandezze:

- una componente di temperatura uniforme (ΔT_u) che è data dalla differenza tra la temperatura media attuale (T) di un elemento e la sua temperatura iniziale. $T_0 + \Delta T_u = T - T_0$
- una componente di temperatura linearmente variabile, data dalla differenza tra le temperature sulle superfici di intradosso ed estradosso di un elemento strutturale (ΔT_M).

Per edifici fuori terra la temperatura esterna può assumere i seguenti valori:

- Temperatura minima invernale: -15 °C
- Temperatura massima estiva:
 - Superficie riflettente:
 - Esposta a Nord-Est: 45 °C
 - Esposta a Sud-Ovest: 63 °C
 - Superficie chiara:
 - Esposta a Nord-Est: 47 °C
 - Esposta a Sud-Ovest: 75 °C
 - Superficie scura:
 - Esposta a Nord-Est: 49 °C
 - Esposta a Sud-Ovest: 87 °C

Quindi è possibile notare che la situazione peggiore si ha nel caso di superficie scura esposta a Sud-Ovest in estate, dove la temperatura esterna da considerare è pari a 87 °C e quella interna è pari a 25 °C . La media di questi due valore è: $T = \frac{(87+25)}{2} = 44\text{ °C}$. Invece, nel caso in cui la struttura venga realizzata nel periodo invernale con temperatura pari a 0 °C si ha $\Delta T_u = T - T_0 = 44 - 0 = 44\text{ °C}$. [7]

1.3.5 Altri tipi di carichi esterni

Infine è corretto considerare anche altri tipi di carichi esterni, i quali in passato non venivano presi in considerazione in modo adeguato, quali: incendio, esplosione ed urti. Di seguito si riportano alcune tabelle riguardanti i livelli di prestazione al fuoco e la forza di impatto sprigionata da diverse tipologie di veicoli che porta alla rottura della lastra in vetro. [7]

Livello 1	Nessun requisito specifico di resistenza al fuoco dove le conseguenze del crollo delle strutture siano accettabili o dove il rischio di incendio sia trascurabile
Livello 2	Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro
Livello 3	Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture tali da evitare, per tutta la durata dell'incendio, il collasso delle strutture stesse
Livello 4	Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse
Livello 5	Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse

Tabella 3. Livelli di prestazione al fuoco

Tipo di strada	Tipo di veicolo	Forza [KN]
Autostrada	Autocarri	1000
Area urbana	Autocarri	500
Cortili	Auto passeggeri	50
	Autocarri	150
Autorimesse	Auto passeggeri	40

Tabella 4. Collisioni da veicoli

1.4 Normativa di riferimento

Nell'architettura contemporanea il ruolo dell'involucro, e quindi anche delle facciate continue, sta diventando sempre più importante e queste sono utilizzate sempre più frequentemente e la scelta delle stesse segue logiche senza dubbio estetiche ma soprattutto prestazionali.

Al fine di poter analizzare il comportamento di questa tipologia di struttura, non solamente nel territorio italiano ma in tutta Europa, si fa riferimento ad una normativa internazionale come quella europea, ovvero la UNI EN 13830:2020 "Facciate continue – Norma di prodotto". Nella norma si specificano i requisiti delle facciate continue utilizzate come involucro edilizio al fine di fornire resistenza agli agenti atmosferici, sicurezza d'esercizio e risparmio energetico ed infine anche la ritenzione del calore. Inoltre, la norma fornisce metodi di prova, valutazione, calcolo e criteri di prestazione volti ad assicurare la conformità del pannello. La UNI EN 13830:2020 viene applicata a facciate continue che vanno dalla posizione verticale fino a +/- 15° dalla verticale stessa. La norma, inoltre, è applicabile ai kit per facciate continue nella loro interezza, inclusi gli elementi di fissaggio. Secondo la norma, queste facciate sono destinate ad essere utilizzate come parte integrante dell'involucro edilizio. La UNI EN 13830:2020, però, non comprende:

- il kit di vetratura patente, quali tetti inclinati con vetratura;
- le costruzioni con vetratura del soffitto;
- le facciate realizzate di pannelli di calcestruzzo prefabbricato come parte della parete (per questa tipologia costruttiva bisogna fare riferimento alla norma EN 14992).

Al contrario, per il vetro come materiale, si è fatto riferimento alle normative:

- UNI 6534-74:1994 "Vetrazioni in opere edilizie. Progettazione, materiali e posa in opera";
- UNI 7143-72:1972 "Spessore dei vetri piani per detrazioni in funzione delle loro dimensioni, dell'azione del vento e del carico neve";
- UNI EN 1288-4:2001 "Vetro per edilizia. Determinazione della resistenza a flessione del vetro. Prova su vetro profilato". [8]

2. Materiali e caratteristiche

In questa seconda parte, procederemo con l'illustrazione dei sistemi esposti precedentemente, fornendo una descrizione dettagliata delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali che compongono i pannelli. In particolare, si presenteranno tutte le proprietà dei materiali presi in esame, comprese le loro prestazioni e le loro caratteristiche fisiche. In aggiunta, si porrà particolare attenzione ai fattori che influiscono sulla resistenza e sulla capacità di supportare il carico.

Grazie all'aiuto del laboratorio di dipartimento D.I.C.E.A. è stato possibile eseguire delle prove di resistenza a taglio, che ci hanno permesso di considerare gli aspetti strutturali rilevanti per quanto riguarda la progettazione dei pannelli in vetro per facciate continue, mettendo in luce le criticità dei singoli componenti e cercando di simulare nel modo più accurato possibile un caso di applicazione reale.

2.1 Tipologie dei pannelli oggetto di studio

La facciata continua può essere composta da pannelli in vetro di diversa tipologia, con dimensioni che vanno da 0,60 m a 0,80 m di larghezza ed un'altezza variabile compresa tra 1,45 m e 1,80 m. I pannelli della facciata saranno principalmente collegati da supporti di bloccaggio in acciaio inossidabile lavorati a macchina, i quali saranno posizionati ai quattro angoli del pannello. Questi, serviranno per collegare tra loro i pannelli e per collegare i pannelli di vetro alla struttura portante dell'edificio. Inoltre, per garantire un supporto continuo, le giunzioni orizzontali e verticali dei pannelli di vetro saranno realizzate mediante l'uso di una doppia guarnizione siliconica ventilata, la quale fornirà una tenuta sicura ed affidabile. Questa tipologia di supporto è in grado di fornire un'ottima performance strutturale, assicurando anche comfort dal punto di vista dell'isolamento termico ed acustico per la parte interna della facciata continua.

Utilizzando pannelli in vetro stratificati con pellicola interna in PVB è possibile evitare la dispersione dei frammenti di vetro in caso di rottura, ad esempio dovuta ad urto, riducendo così il rischio di danni a terzi che si trovano nelle vicinanze. Al contrario, l'utilizzo di doppi vetri stratificati e termoinduriti rappresentano un'ulteriore garanzia di sicurezza, considerando che offrono una adeguata rigidità residua post rottura, garantendo la stabilità e la tenuta della facciata anche in caso di eventi improvvisi o accidentali.

Come accennato precedentemente, sono state sottoposte a prove sperimentali tre diverse tipologie di pannelli, che si differenziano per caratteristiche e dimensioni.

1. La prima tipologia riguarda pannelli in vetro formati da:
 - telaio in legno di mogano di dimensioni 145 x 60 x 6,5 cm;
 - lastre di vetro stratificate, termoindurite attraverso un processo termico e ultra chiare della Pilkington [9], da 4.4.1, ovvero uno stratificato composta da vetri di 4 mm + 4 mm + 1 strato di PVB di spessore pari a 0,75 mm. I componenti sono incollati tra loro tramite colla con uno spessore di 0,8 mm.
2. La seconda tipologia riguarda pannelli in vetro formati da:
 - telaio in legno di mogano di dimensioni 180 x 80 x 6 cm;
 - lastre di vetro stratificate, termoindurite attraverso un processo termico e ultra chiare della Pilkington [9], da 4.4.1, ovvero uno stratificato composta da vetri di 4 mm + 4 mm + 1 strato di PVB di spessore pari a 0,75 mm. I componenti sono incollati tra loro tramite colla con uno spessore di 0,8 mm. e 180 x 80 x 6 cm

3. La terza tipologia di pannelli è composta da un telaio in legno di mogano di dimensioni pari a 145 x 60 x 6,5 cm e da lastre di vetro della Pilkington termoidurite, ultra chiare ma non stratificate, ovvero da due lastre di 6 mm di spessore separate da una camera d'aria.

2.1.1 Tipologia 1

Pannelli 1 e 4: vetro temperato stratificato 4.4.1 (4 mm + 4 mm + 1 strato di PVB).

Si tratta di un pannello di vetro composto da due vetri di spessore pari a 4 mm uniti da un foglio di PVB di spessore pari a 0,75 mm, incollati tramite colla di spessore di 0,8 mm.

I vetri sono termoiduriti attraverso un processo termico che garantisce una maggiore resistenza meccanica agli urti. Inoltre lo strato di PVB garantisce una migliore prestazione in caso di rottura.

Nome	Altezza	Larghezza	Spessore	Spessore PVB
P1	145 cm	60 cm	6,5 cm	0,75 mm
P4	145 cm	60 cm	6,5 cm	0,75 mm

Tabella 5. Geometria dei pannelli 1 e 4



Figura 9. Pannelli 1 e 4 vetro temperato stratificato 4.4.1

2.1.2 Tipologia 2

Pannelli 5 e 6: Vetro temperato stratificato 4.4.1 (4 mm + 4 mm + 1 strato di PVB).

Si tratta di un pannello di vetro di dimensioni diverse dai precedenti, composto da due vetri di spessori pari a 4 mm uniti da un foglio di PVB di spessore pari a 0,75 mm. I vetri sono termoiduriti attraverso un processo termico che garantisce una maggiore resistenza meccanica agli urti e lo strato di PVB garantisce una migliore prestazione in caso di rottura.

Nome	Altezza	Larghezza	Spessore	Spessore PVB
P5	180 cm	80 cm	6 cm	0,75 mm
P6	180 cm	80 cm	6 cm	0,75 mm

Tabella 6. Geometria dei pannelli 5 e 6



Figura 10. Pannelli 5 e 6 vetro temperato stratificato 4.4.1

2.1.3 Tipologia 3

Pannelli 2 e 3: Vetro temperato non stratificato.

Si tratta di un pannello di vetro composto da due lastre di spessore pari a 6 mm indurite termicamente, il che garantisce una maggiore resistenza meccanica agli urti. Non essendo presente lo strato di PVB, non si avrà una prestazione di trattenuta dei frammenti di vetro in caso di rottura da urto o esplosione.

Nome	Altezza	Larghezza	Spessore	PVB
P2	145 cm	60 cm	6,5 cm	NO
P3	145 cm	60 cm	6,5 cm	NO

Tabella 7. Geometria dei pannelli 2 e 3



Figura 11. Pannelli 2 e 3 vetro temperato non stratifica

2.2 Materiali

2.2.1 Struttura dei pannelli - LEGNO

La parte strutturale dei pannelli è stata realizzata in legno di mogano. Il mogano è un legno molto duro, compatto e pesante, facile da lavorare e resistente ai parassiti; grazie a queste caratteristiche è diventato un valido concorrente del più noto e diffuso legname di noce. Le caratteristiche del mogano sono:

- buona lavorabilità e facilità di taglio: è facile da lavorare e tagliare con i giusti utensili;
- buona attitudine all'assemblaggio: tramite viti e colla si assembla in maniera semplice ed efficace, mentre con i chiodi tende a spaccarsi ed è opportuno pre-forarlo;
- ottima attitudine alla finitura: nonostante l'elevata porosità si presta anche ad essere laccato;
- buona resistenza meccanica, in particolare alla flessione e alla compressione;
- elevata durezza: si lascia scalfire difficilmente;
- buona stabilità: grazie alla struttura a grana incrociata è in grado di mantenere la forma anche se sottoposto a delle sollecitazioni;
- buona durabilità: è in grado di resistere molto bene al passare del tempo, anche se esposto agli agenti atmosferici, inoltre resiste ai parassiti e ai funghi;
- elevata porosità: è in grado di assorbire facilmente l'umidità, ma può essere essiccato o stagionato facilmente;
- ottima capacità di stagionatura: non si spacca e deforma durante l'essiccazione o stagionatura;
- elevato peso specifico che oscilla intorno ai 600 Kg/m³. [10]

Di seguito si riporta la tabella delle NTC 18 (Norme Tecniche per le Costruzioni) in cui è possibile visualizzare i valori caratteristici di resistenza e le proprietà fisiche del legno massiccio [11]:

EN 14080: 2013 "strutture di legno - legno massiccio incollato"

Elementi in legno massiccio incollato (§3.15): elementi strutturali con dimensioni della sezione trasversale non superiore a 280 mm, composti da 2 a 5 lamelle aventi la stessa classe di resistenza, andamento della fibratura pressoché parallelo e uno spessore delle tavole compreso tra 45 mm e 85 mm (incluso).

Proprietà	Simbolo	GL20c	GL22c	GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c
Resistenze (MPa)		N/mm ²						
Flessione	$f_{m,g,k}$	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00	30.00	32.00
trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,g,k}$	15.00	16.00	17.00	19.00	19.50	19.50	19.50
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,g,k}$	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,g,k}$	18.50	20.00	21.50	23.50	24.00	24.50	24.50
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,g,k}$	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
Taglio	$f_{v,g,k}$	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
Rototaglio	$f_{r,g,k}$	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Modulo elastico [GPa]		N/mm ²						
modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,g,mean}$	10,400.00	10,400.00	11,000.00	12,000.00	12,500.00	13,000.00	13,500.00
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,g,0,05}$	8,600.00	8,600.00	9,100.00	10,000.00	10,400.00	10,800.00	11,200.00
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,g,mean}$	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
modulo elastico caratteristico perpendicolare alle fibre	$E_{90,g,0,05}$	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00
modulo di taglio medio	$G_{g,mean}$	650.00	650.00	650.00	650.00	650.00	650.00	650.00
modulo di taglio caratteristico	$G_{g,0,05}$	540.00	540.00	540.00	540.00	540.00	540.00	540.00
Modulo a rototaglio medio	$G_{r,g,mean}$	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
Modulo a rototaglio caratteristico	$G_{r,g,0,05}$	54.00	54.00	54.00	54.00	54.00	54.00	54.00
Massa volumica [kg/m ³]		kg/m ³						
massa volumica caratteristica	$\rho_{g,k}$	355.00	355.00	365.00	385.00	390.00	390.00	400.00
massa volumica media	$\rho_{g,mean}$	390.00	390.00	400.00	420.00	420.00	430.00	440.00

Figura 12. Caratteristiche meccaniche e proprietà fisiche legno di mogano

2.2.2 Struttura dei pannelli - VETRO

Il vetro è un materiale ritenuto fragile poiché, se sottoposto ad un carico, la risposta alle sollecitazioni è perfettamente lineare fino al raggiungimento della rottura improvvisa.

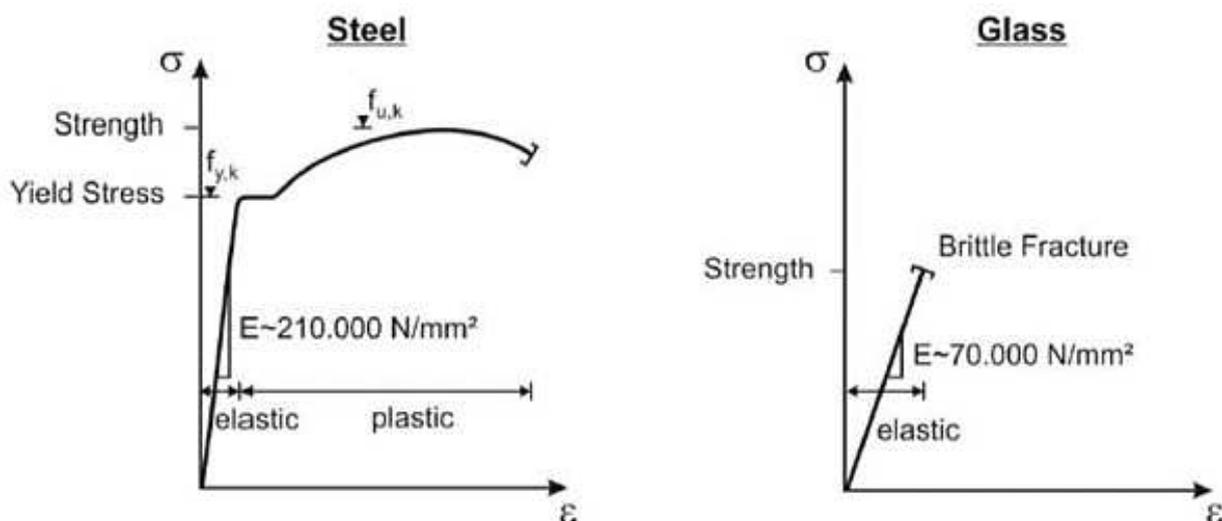


Figura 13. Diagramma stress - deformazione acciaio e vetro

Esaminando i due diagrammi posti sopra, è possibile notare immediatamente di come nel digramma del vetro manchi il ramo di deformazione plastica ed incrudimento, rispetto a quello dell'acciaio.

Questo porta ad una rottura improvvisa del vetro, una volta che si è raggiunto il suo limite elastico. La fragilità del materiale comporta quindi delle differenze nella risposta a compressione e a trazione.

Glass materials for product (whichever composition)	Values for characteristic bending strength $f_{b,k}$ for prestressed glass processed from:		
	Thermally toughened safety glass to EN 12150-1, and heat soaked thermally toughened safety glass to EN 14179-1	Heat strengthened glass to EN 1863-1	Chemically strengthened glass to EN 12337-1
Float glass or draw sheet glass	120 N/mm ²	70 N/mm ²	150 N/mm ²
Patterned glass	90 N/mm ²	55 N/mm ²	100 N/mm ²
Enamelled float or draw sheet glass	75 N/mm ²	45 N/mm ²	-
Enamelled patterned glass	75 N/mm ²	45 N/mm ²	-

Tabella 8. Valori caratteristici di resistenza a flessione dei vetri

Nel caso di studio si considerano dei vetri induriti termicamente stratificati e non, con resistenza di 70 N/mm²; questo valore è dato dallo stato tensionale di precompressione alterato del vetro che permette così una resistenza a flessione migliore rispetto ad altre tipologie. Un'altra caratteristica di cui tener conto è il coefficiente di Poisson ν , il quale fa riferimento alla risposta allungamento/restringimento della sezione quando questa è soggetta ad un'alterazione dello stato tensionale, cioè quando si ha un allungamento in una direzione il provino restringe la sezione in risposta. Altro fattore importante è il coefficiente di espansione termica αT , il quale ci indica come il materiale risponde alla dilatazione lineare per effetto termico, espresso dalla misura dell'allungamento dell'unità di lunghezza di provino per variazione di temperatura di 1°K. [12]

Caratteristica	Simbolo	Valore
Densità (a 20°C)	ρ	2500 Kg/m ³
Modulo elastico	E	70000 Mpa
Coefficiente di Poisson	ν	0.2
Resistenza caratteristica a flessione	$F_{g,k}$	70 Mpa
Coefficiente di dilatazione termica	αT	$9 \times 10^{-6} K^{-1}$

Tabella 9. Proprietà e caratteristiche del vetro

Il parametro cardine dei pannelli in vetro per facciata continua è la resistenza alla flessione di progetto del vetro stesso, che viene disposta in modi differenti in base alle normative di riferimento. La formula a cui facciamo riferimento è proposta dalla norma EN 16612:2019:

$$f_{g,d} = \frac{K_{mod} K_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{K_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,v}}$$

- K_{mod} = fattore che tiene conto della durata dell'azione
- $f_{g,k}$ = valore di resistenza caratteristica a flessione
- $f_{b,k}$ = valore caratteristico della resistenza alla flessione del vetro
- $f_{g,d}$ = valore di progetto della resistenza alla flessione per il vetro
- K_{sp} = fattore di superficie
- γ_{MA} = fattore correttivo per vetro ricotto
- γ_{MV} = fattore correttivo per vetro pretensionato

Il valore più incidente che varia al variare del tipo di carico è il fattore che tiene conto della durata dell'azione, il K_{mod} . Questo valore varia ogni volta che l'azione che stiamo considerando sul vetro varia.

Nella tabella che segue è possibile visualizzare i valori del K_{mod} proposti dalla normativa EN 16612:2019.

Action	Load duration	K_{mod}
Wind gusts	5 s (or less)	1,0
Wind storm accumulative	10 min equivalent	0,74
Balustrade loads – no crowds (e.g. building use categories A, B, C1 and E)	30 s	0,89
Balustrade loads – crowds	5 min	0,77
Maintenance loads	30 min	0,69
Snow	3 weeks	0,45
Cavity pressure variations on insulating glass units	8 h	0,58
Dead load, self weight, altitude effects on insulating glass units	Permanent (50 years)	0,29

Tabella 10. Valori del K_{mod} in variazione al tempo di carico

Per ogni azioni considerata sul pannello e per ogni tipologia di combinazione di carico, si è proceduto a studiare il valore della resistenza a taglio dei pannelli, fino ad arrivare alla loro rottura.

2.2.3 Struttura dei pannelli - STRATO IN PVB

Le lastre di vetro dei pannelli sono tenute insieme da un foglio incollante costituito da PVB (polivinilbutirrale). Si tratta di un polimero che viene posto tra i due pannelli di vetro e pressato all'interno di un'autoclave ad una temperatura di 250°C. Questo tipo di interlayer conferisce alle lastre di vetro un'ottima resistenza agli urti, migliorando anche le loro proprietà, come la trasparenza e l'isolamento sia termico che acustico.

Le proprietà di resistenza dei pannelli sono legate alla temperatura di esercizio e al grado di adesione tra il materiale plastico e il vetro. L'aumento della percentuale di umidità fa diminuire l'adesione, mentre fa aumentare il rischio di delaminazione, cioè la perdita di capacità di trattenere i frammenti di vetro da parte del PVB, con conseguente perdita di sicurezza e minore resistenza agli urti. Per questo motivo è fondamentale mantenere una condizione di isolamento dei pannelli.

Un altro parametro fondamentale è quello della temperatura a cui il pannello di vetro è esposto, che potrebbe influenzare in modo sensibile le proprietà di resistenza, poiché queste sono reologiche e variano notevolmente al variare della temperatura di azione della sollecitazione. [13]

Caratteristica	Valore
Densità (a 20 °C)	1060 Kg/m ³
Modulo elastico	2,1 MPa
Coefficiente di Poisson	0.49
Coefficiente di dilatazione termica	8 x 10 ⁻⁵ K ⁻¹

Tabella 11. Proprietà e caratteristiche del PVB

3. Metodologie di prova

Nel seguente capitolo si descriverà il metodo di svolgimento delle prove, le quali sono state eseguite nel Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (D.I.C.E.A.) dell'Università Politecnica delle Marche. Inoltre, di seguito si riportano dettagliatamente le caratteristiche delle strutture di supporto dei pannelli di vetro per facciata continua e delle strumentazioni utilizzate nelle prove, quali pompa idraulica, martinetti idraulici e trasduttori di spostamento.

3.1 Set up sperimentale

3.1.1 Telaio laboratorio D.I.C.E.A. Univpm

La struttura utilizzata per eseguire le prove è composta da:

- telaio in ferro, poggiato a pavimento, composto da una traversa mobile bullonata su due montanti;



Figura 14. Telaio in ferro laboratorio

- supporto di base formato da una trave in acciaio S235, saldata a due piastre che a loro volta sono bullonate al pavimento.



Figura 15. Supporto di base in acciaio S235

Il supporto di base in acciaio è stato dimensionato per evitare che, durante l'esecuzione delle prove, non vi siano deformazioni tali da compromettere la validità dei dati ottenuti e per poter accogliere i pannelli di vetro. Ha una lunghezza di 1500 mm e una sezione a C di 215 x 200 mm. La sezione a C della trave è stata realizzata mediante la saldatura di 3 piastre di 15

mm di spessore; quella superiore è stata forata per permettere l'inserimento dei bulloni per il fissaggio dei pannelli da sottoporre a prova. Al fine di evitare ulteriori deformazioni del supporto durante i vari test, sono stati disposti dei fazzoletti in acciaio, di dimensioni 170 x 215 x 15 mm in prossimità dei fori, dove si ha una maggior concentrazione degli sforzi.

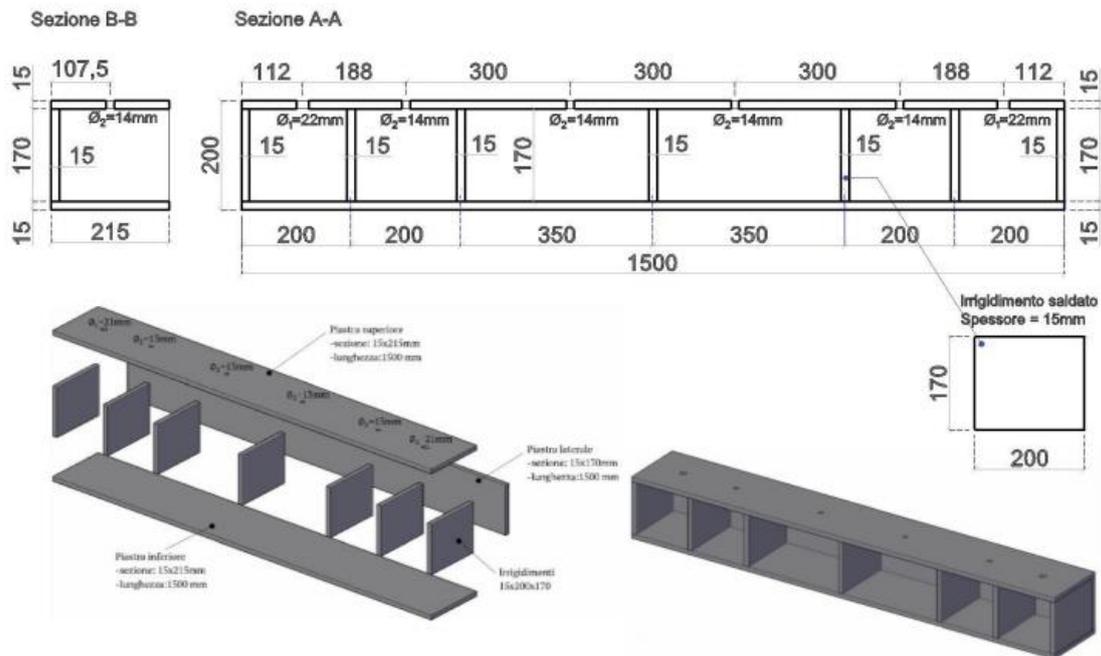


Figura 16. Dettagli del supporto di base in acciaio S235

I pannelli di vetro sono fissati al supporto di base e ciò è necessario ai fini dell'affidabilità dei risultati ottenuti dalle prove; questo passaggio, infatti, mira ad eliminare i fenomeni di rotazione rigida e scorrimento alla base.

I due hold-down sono fissati tramite chiodatura ai montanti dei pannelli e tramite bulloni da 20 mm di diametro alla trave d'acciaio. Essi garantiscono la stabilità contro la rotazione rigida e l'ancoraggio degli hold-down ai telai in legno dei pannelli evita lo scorrimento orizzontale.

Di seguito vengono riportati alcuni particolari tecnici del supporto di base.



Figura 17. Elementi di fissaggio dei pannelli

3.1.2 PC e software

Una volta ultimato il fissaggio del pannello, si è proceduto al set up strumentale. Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato il software Catman della HBM che permette di settare i vari strumenti e le modalità con cui vengono acquisiti i dati.

Nel nostro caso, l'acquisizione dei dati è stata effettuata in maniera automatica.

3.1.3 Datalogger

I segnali provenienti dagli strumenti vengono ricevuti ed elaborati dal datalogger Spider8 della HBM. Tale strumento dispone di otto canali per l'acquisizione dei dati. Nel nostro caso sono stati utilizzati solo sei canali: cinque per l'acquisizione dei segnali provenienti dai trasduttori di spostamento e uno per l'acquisizione dei segnali provenienti dal trasduttore di pressione.

L'acquisizione dei dati è avvenuta tramite l'impostazione del datalogger con una frequenza pari a 2 Hz, cioè 2 scansioni al secondo, poi inviati al software Catman.



Figura 18. Datalogger

3.1.4 *Trasduttori di spostamento*

I trasduttori utilizzati sono sempre della HBM con fondo scala di 50 mm (W50). Sono stati utilizzati per l'acquisizione degli spostamenti, entrambi della stessa tipologia, basati sul principio di misurazione dell'induttore differenziale (half bridge induttivo). Il completamento del ponte di Wheatstone, alla base della misurazione, viene effettuato dal datalogger spider8.

Il protocollo ASTM E564-06 indica almeno dieci serie di letture della deflessione uniformemente distanziate nel tempo e la lettura dello spostamento sulla parte superiore dei pannelli. In questo caso la lettura della deflessione nel piano viene effettuata in modo continuo nel tempo, è stato inoltre registrata la rotazione alla base dei pannelli.



Figura 19. Trasduttori di spostamento e di rotazione

3.1.5 Martinetto idraulico e pompa elettrica

I carichi orizzontali e verticali sono stati applicati mediante l'utilizzo di martinetti idraulici Enerpac da 50 tonnellate (490 kN) con una corsa massima di 150 mm, saldati su delle piastre bullonate al telaio in acciaio del laboratorio. I martinetti sono collegati ad una centralina Enerpac e una pompa elettrica con carico massimo di 700 bar.

Al fine di ottenere i valori di pressione, e conseguentemente, di carico applicati, al martinetto idraulico di carico orizzontale sono stati collegati i trasduttori provenienti dalla centralina. I dati acquisiti dai trasduttori di pressione, rilevati in bar, sono inviati al pc e convertiti sul software in forza misurata in Newton (N).

I martinetti idraulici vengono fissati a delle piastre in acciaio realizzate in laboratorio, saldate a loro volta al telaio in acciaio, in modo da avere una distribuzione del carico sul pannello regolare e in sicurezza.

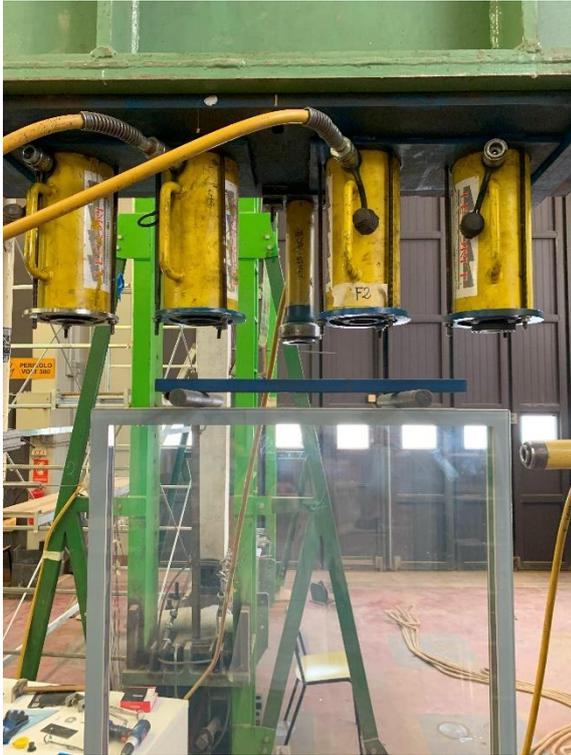


Figura 20. *Martinetto idraulico per carico verticale*



Figura 21. *Martinetto idraulico per carico orizzontale*



Figura 22. *Centralina e pompe elettrica*

3.2 Svolgimento delle prove

I pannelli, una volta fissati al telaio, come spiegato precedentemente, vengono sottoposti ad un carico verticale, generato dal martinetto idraulico posizionato sulla traversa del telaio in acciaio, nella parte superiore del pannello, in modo tale da simulare un carico che si potrebbe trovare al di sopra di esso. Per distribuire il carico applicato in maniera uniforme sono stati posizionati due tubi in acciaio pieno ed una piastra a C sempre in acciaio sulla parte superiore del pannello. Il carico verticale applicato durante le sei prove è all'incirca di 120 Kg.

I pannelli sono sottoposti anche ad un carico orizzontale, sempre generato da un martinetto idraulico, il quale è posizionato sul montante del telaio in acciaio. Nella punta del martinetto viene posizionata una piastra in neoprene in modo da avere una distribuzione uniforme del carico sul telaio del pannello in esame. Al fine di valutare la resistenza a taglio, il carico orizzontale viene applicato secondo le modalità previste dalla American Society for Testing and Materials (ASTM) [14], ovvero a velocità costante, in 4 fasi.

Prima dell'inizio della prova, si esegue un precarico di 0,50 KN; la prova è poi articolata in quattro fasi:

1. la prima fase consiste nel caricare il pannello di vetro fino ad arrivare ad una forza applicata con modulo di 2 KN, per poi scaricare;
2. la seconda fase segue le stesse modalità esecutive della prima, in termini di carico e scarico;
3. la terza fase segue le stesse modalità esecutive della prima e della seconda;
4. nella quarta fase, l'ultima, il pannello di vetro viene caricato fino a rottura, oppure fino a quando non viene raggiunto uno spostamento laterale massimo (rilevato dal trasduttore di spostamento) oppure fino a che non viene raggiunto uno spostamento di ribaltamento massimo (rilevato dal secondo trasduttore di ribaltamento).

Tutte le prove eseguite sui pannelli terminano con la loro rottura. Questi, al termine dell'aumento del carico trasmesso dal martinetto idraulico, sono arrivati a rottura e, quindi non hanno la capacità di assorbire il suddetto carico.

3.2.1 Prova sperimentale 1

Per la prima prova sperimentale, è stato utilizzato un pannello di vetro stratificato temperato 4.4.1 (4 mm + 4 mm + 1 strato di PVB di spessore 0,75 mm) di dimensioni 145 x 60 x 6,5 cm.

Come primo step, il pannello è stato fissato alla base tramite due piastre in acciaio. La piastra di destra, è stata collegata al pannello tramite chiodatura e bullonata (bullone di diametro pari a 20 mm) alla trave in acciaio di base. La piastra di sinistra, invece, è stata collegata alla base tramite un bullone di diametro di 20 mm, mentre sorregge il pannello per contrasto senza collegamenti. Le due piastre servono ad evitare lo spostamento laterale e il ribaltamento.

Una volta eseguito il fissaggio, il pannello è stato sottoposto ad un carico verticale di 1 kN costante per tutta la durata della prova, poi è stato azionato un precarico di 0,50 kN per un fase di assestamento di carico. Poi sono stati applicati tre cicli di carico fino a 2 kN, di volta in volta caricati e scaricati per ogni fase. Infine per l'ultima fase, la quarta, il pannello è stato caricato fino a rottura.

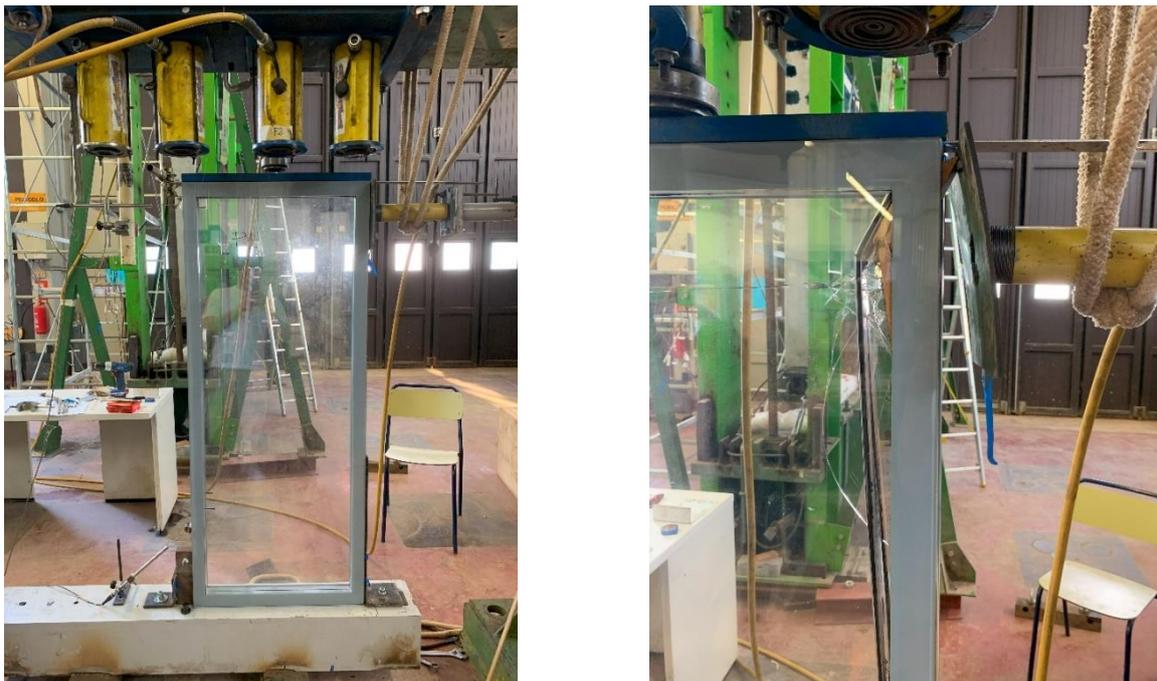


Figura 23. Prova sperimentale 1 pre e post rottura

3.2.2 Prova sperimentale 2

Per la seconda prova sperimentale, è stato utilizzato un pannello di vetro temperato ma non stratificato (due lastre di vetro di spessore pari a 6 mm con camera d'aria nel mezzo) di dimensioni 145 x 60 x 6,5 cm.

Come primo step, il pannello è stato fissato alla base tramite due piastre in acciaio. La piastra di destra, è stata collegata al pannello tramite chiodatura e bullonata (bullone di diametro pari a 20 mm) alla trave in acciaio di base. La piastra di sinistra, invece, è stata collegata alla base tramite un bullone di diametro di 20 mm, mentre sorregge il pannello per contrasto senza collegamenti. Le due piastre servono ad evitare lo spostamento laterale e il ribaltamento.

Una volta eseguito il fissaggio, il pannello è stato sottoposto ad un carico verticale di 1 kN costante per tutta la durata della prova, poi è stato azionato un precarico di 0,50 kN per un fase di assestamento di carico. Poi sono stati applicati tre cicli di carico fino a 2 kN, di volta in volta caricati e scaricati per ogni fase. Infine per l'ultima fase, la quarta, è stato applicato un carico di circa 8 kN, che ha portato il pannello a rottura.



Figura 24. Prova sperimentale 2 pre e post rottura

3.2.3 Prova sperimentale 3

Per la terza prova sperimentale, è stato utilizzato un pannello di vetro temperato ma non stratificato (due lastre di vetro di spessore pari a 6 mm con camera d'aria nel mezzo) di dimensioni 145 x 60 x 6,5 cm.

Come primo step, il pannello è stato fissato alla base tramite due piastre in acciaio. La piastra di destra, è stata collegata al pannello tramite chiodatura e bullonata (bullone di diametro pari a 20 mm) alla trave in acciaio di base. La piastra di sinistra, invece, è stata collegata alla base tramite un bullone di diametro di 20 mm, mentre sorregge il pannello per contrasto senza collegamenti. Le due piastre servono ad evitare lo spostamento laterale e il ribaltamento.

Una volta eseguito il fissaggio, il pannello è stato sottoposto ad un carico verticale di 1 kN costante per tutta la durata della prova, poi è stato azionato un precarico di 0,50 kN per un fase di assestamento di carico. Poi sono stati applicati tre cicli di carico fino a 2 kN, di volta in volta caricati e scaricati per ogni fase. Infine per l'ultima fase, la quarta, è stato applicato un carico di circa 11 kN, che ha portato il pannello a rottura.



Figura 25. Prova sperimentale 3 pre e post rottura

3.2.4 Prova sperimentale 4

Per la quarta prova sperimentale, è stato utilizzato un pannello di vetro stratificato temperato 4.4.1 (4 mm + 4 mm + 1 strato di PVB di spessore 0,75 mm) di dimensioni 145 x 60 x 6,5 cm.

Come primo step, il pannello è stato fissato alla base tramite due piastre in acciaio. La piastra di destra, è stata collegata al pannello tramite chiodatura e bullonata (bullone di diametro pari a 20 mm) alla trave in acciaio di base. La piastra di sinistra, invece, è stata collegata alla base tramite un bullone di diametro di 20 mm, mentre sorregge il pannello per contrasto senza collegamenti. Le due piastre servono ad evitare lo spostamento laterale e il ribaltamento.

Una volta eseguito il fissaggio, il pannello è stato sottoposto ad un carico verticale di 1 kN costante per tutta la durata della prova, poi è stato azionato un precarico di 0,50 kN per un fase di assestamento di carico. Poi sono stati applicati tre cicli di carico fino a 2 kN, di volta in volta caricati e scaricati per ogni fase. Infine per l'ultima fase, la quarta, è stato applicato un carico di circa 20 kN, che ha portato il pannello a rottura.



Figura 26. Prova sperimentale 4 pre e post rottura

3.2.5 Prova sperimentale 5

Per la quinta prova sperimentale, è stato utilizzato un pannello di vetro stratificato temperato 4.4.1 (4 mm + 4 mm + 1 strato di PVB di spessore 0,75 mm) di dimensioni 180 x 80 6 cm.

Come primo step, il pannello è stato fissato alla base tramite due piastre in acciaio. La piastra di destra, è stata collegata al pannello tramite chiodatura e bullonata (bullone di diametro pari a 20 mm) alla trave in acciaio di base. La piastra di sinistra, invece, è stata collegata alla base tramite un bullone di diametro di 20 mm, mentre sorregge il pannello per contrasto senza collegamenti. Le due piastre servono ad evitare lo spostamento laterale e il ribaltamento.

Una volta eseguito il fissaggio, il pannello è stato sottoposto ad un carico verticale di 1,2 kN costante per tutta la durata della prova, poi è stato azionato un precarico di 0,50 kN per un fase di assestamento di carico. Poi sono stati applicati tre cicli di carico fino a 2 kN, di volta in volta caricati e scaricati per ogni fase. Infine per l'ultima fase, la quarta, è stato applicato un carico di circa 17 kN, che ha portato il pannello a rottura.



Figura 27. Prova sperimentale 5 pre e post rottura

3.2.6 Prova sperimentale 6

Per la sesta prova sperimentale, è stato utilizzato un pannello di vetro stratificato temperato 4.4.1 (4 mm + 4 mm + 1 strato di PVB di spessore 0,75 mm) di dimensioni 180 x 80 x 6 cm.

Come primo step, il pannello è stato fissato alla base tramite due piastre in acciaio. La piastra di destra, è stata collegata al pannello tramite chiodatura e bullonata (bullone di diametro pari a 20 mm) alla trave in acciaio di base. La piastra di sinistra, invece, è stata collegata alla base tramite un bullone di diametro di 20 mm, mentre sorregge il pannello per contrasto senza collegamenti. Le due piastre servono ad evitare lo spostamento laterale e il ribaltamento.

Una volta eseguito il fissaggio, il pannello è stato sottoposto ad un carico verticale di 1,2 kN costante per tutta la durata della prova, poi è stato azionato un precarico di 0,50 kN per un fase di assestamento di carico. Poi sono stati applicati tre cicli di carico fino a 2 kN, di volta in volta caricati e scaricati per ogni fase. Infine per l'ultima fase, la quarta, si è notato che il pannello ha subito un cedimento raggiunti i 10 kN di carico per poi arrivare a rottura definitiva a circa 17 kN.



Figura 28. Prova sperimentale 6 pre e post rottura

4. Risultati

Nel presente capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove sperimentali in laboratorio effettuate sui pannelli di vetro per facciata continua, presentati nel Capitolo 3.2 Svolgimento delle prove.

4.1 Risultati prova 1 e prova 4

Le seguenti prove sono state eseguite su pannelli di vetro stratificato temperato 4.4.1, su cui sono stati eseguiti tre cicli di carico e scarico ognuno da 2 kN più il quarto ciclo fino alla rottura. In **Figura 29** ed in **Figura 30**, vengono mostrati i setup dei pannelli prima dell'inizio della prova. I trasduttori utilizzati per la registrazione degli spostamenti orizzontali e diagonali sono quelli descritti nel Capitolo 3.1.4 Trasduttori di spostamento.



Figura 29. Vista frontale del setup prova 1



Figura 30. Vista frontale del setup prova 4

Durante l'applicazione dei primi tre cicli di carico e scarico da 2 kN, non sono state osservate particolari deformazioni dei pannelli e gli spostamenti residui in fase di scarico sono stati limitati. L'ultimo ciclo di carico prevedeva il raggiungimento della rottura dei campioni.

Di seguito si riportano i grafici “Forza – Spostamento orizzontale” e “Forza – Spostamento diagonale”:

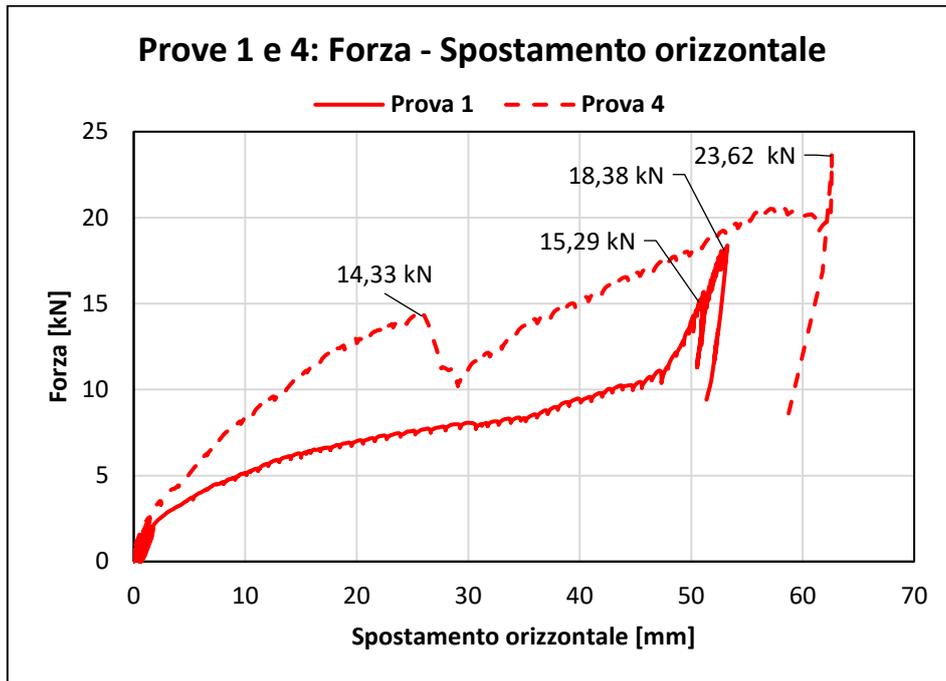


Figura 31. Curve Forza - Spostamento orizzontale

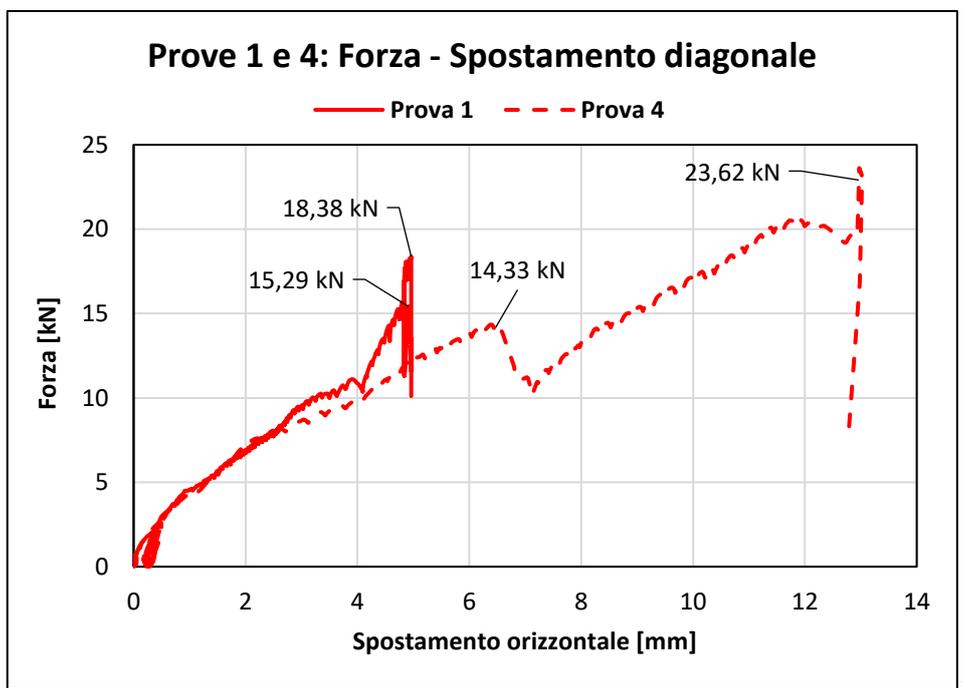


Figura 32. Curve Forza - Spostamento diagonale

Analizzando le curve della prova 1 è possibile notare un andamento pressoché lineare.

In entrambi i grafici si vede che arrivati al carico di 15,29 kN, si registra una perdita di carico improvvisa, dovuta alla rottura di una singola lastra di vetro, causata molto probabilmente dalla mancanza della piastra e dei tubolari in ferro per la distribuzione uniforme del carico verticale. Lo spostamento orizzontale è di 51,16 mm, mentre quello diagonale di 4,83 mm.

Al raggiungimento del carico massimo di 18,38 kN, la struttura in legno del pannello si è rotta per punzonamento da martinetto idraulico, registrando uno spostamento orizzontale di 53,25 mm e uno diagonale di 4,96 mm.

Anche dall'analisi delle curve della prova 4 è possibile notare lo stesso andamento lineare crescente. Al carico applicato di 14,33 kN, si è registrata una perdita di carico improvvisa, dovuta alla rottura delle viti dell'hold down di destra fissato al pannello, notando contestualmente la rotazione rigida del campione. Lo spostamento orizzontale è di 26,04 mm, mentre quello diagonale di 6,53 mm.

All'arrivo nel punto di massimo carico applicato di 23,62 kN, si è riscontrata la rottura del campione e la rottura di tutte le viti dell'hold down di destra, compreso il bullone per il fissaggio al supporto di base, con uno spostamento orizzontale di 62,60 mm e uno spostamento diagonale di 12,97 mm.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei risultati delle prove:

Prove	Carico max [kN]	Spostamento orizzontale max [mm]	Spostamento diagonale max [mm]
P1	18,38	53,25	4,96
P4	23,62	62,60	12,97
Media	21	57,93	3,24

Tabella 12. Tabella riassuntiva dei risultati delle prove 1 e 4

Di seguito si riportano i dettagli di rottura delle prove:



Figura 33. Stato di collasso prova 1



Figura 34. Stato di collasso prova 4



Figura 35. Dettaglio di rottura del vetro prova 4

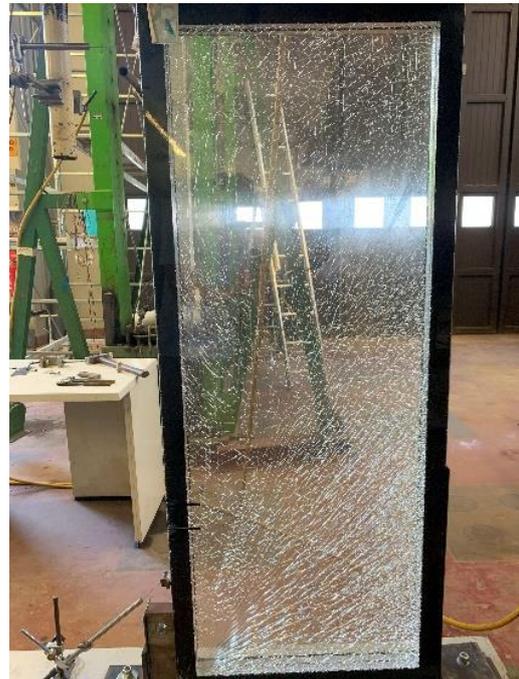


Figura 36. Dettaglio di rottura del vetro intero prova 4



Figura 37. Dettaglio di piegatura della vite di fissaggio prova 4



Figura 38. Dettaglio di rottura della vite di fissaggio prova 4



Figura 39. Dettaglio di rottura del bullone di fissaggio prova 4



Figura 40. Dettaglio di rottura del telaio del pannello prova 4

4.2 Risultati prova 2 e prova 3

Per la seconda e per la terza prova sono stati utilizzati dei pannelli di vetro temperato non stratificato, su cui sono stati eseguiti sempre tre cicli di carico e scarico ognuno da 2 kN ed il quarto ciclo fino alla rottura. In **Figura 41** ed in **Figura 42**, vengono mostrati i setup dei pannelli prima dell'inizio della prova. I trasduttori utilizzati per la registrazione degli spostamenti orizzontali e diagonali sono quelli descritti nel Capitolo 3.1.4 Trasduttori di spostamento.



Figura 41. Vista frontale del setup prova 2



Figura 42. Vista frontale del setup prova 3

Durante l'applicazione dei primi tre cicli di carico e scarico da 2 kN, non sono state osservate particolari deformazioni dei pannelli e gli spostamenti residui in fase di scarico sono stati limitati. L'ultimo ciclo di carico prevedeva il raggiungimento della rottura dei campioni.

Di seguito si riportano i grafici “Forza – Spostamento orizzontale” e “Forza – Spostamento diagonale”:

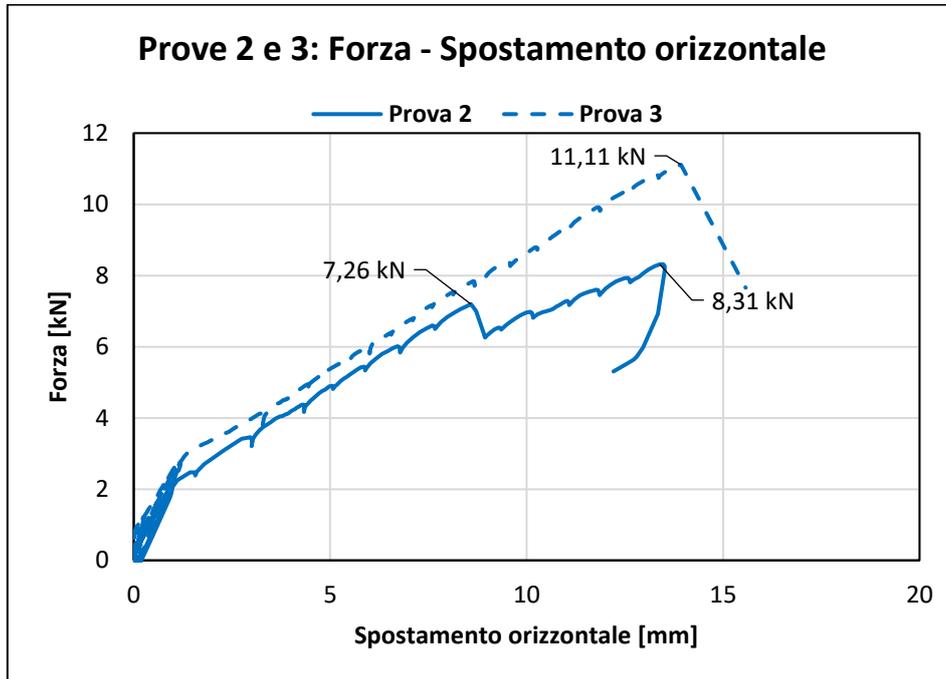


Figura 43. Curve Forza - Spostamento orizzontale

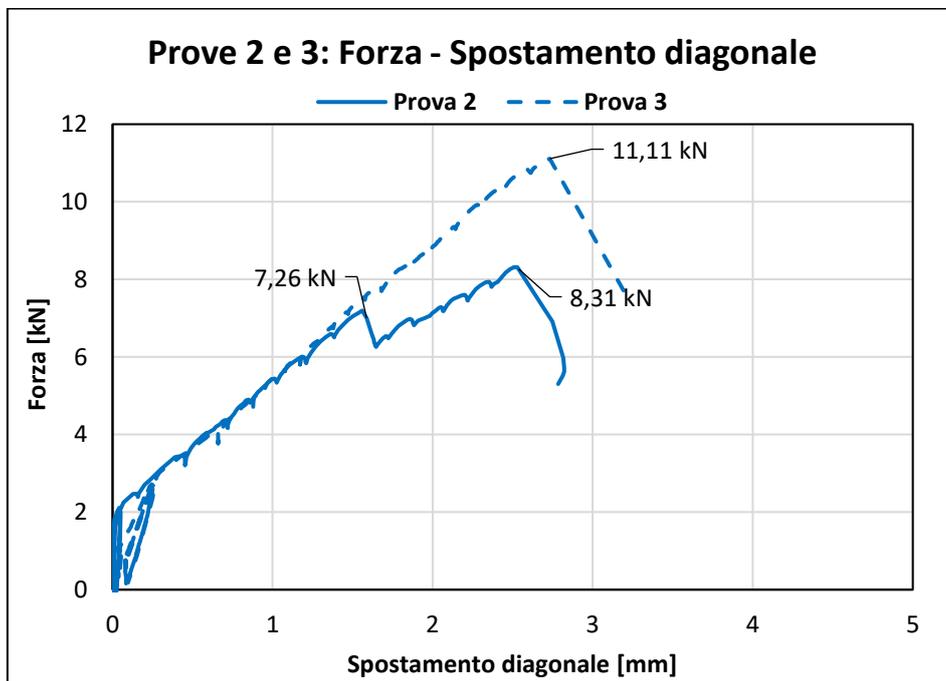


Figura 44. Curve Forza - Spostamento diagonale

Analizzando le curve della prova 2, è possibile visualizzare un andamento lineare crescente.

Al carico applicato di 7,26 kN, si nota una perdita di carico improvvisa, dovuta ad una rottura parziale di una singola lastra di vetro del campione, registrando uno spostamento orizzontale pari a 10,97 mm e uno diagonale di 2,04 mm.

Si è proceduto poi all'aumento del carico fino a 8,31 kN e a rottura totale della lastra di vetro. Lo spostamento orizzontale è di 13,48 mm e quello diagonale di 2,53 mm.

Ispezionando il campione a fine prova, si può concludere che la rottura è stata causata per compressione dall'hold down di sinistra, poiché il pannello ha ruotato rigidamente.

Analizzando le curve della prova 3, è possibile notare un andamento più lineare e crescente fino alla rottura del pannello e senza perdite di carico. La rottura di una singola lastra di vetro, si è registrata per un carico applicato massimo di 11,11 kN con spostamento orizzontale pari a 13,93 mm e spostamento diagonale pari a 2,73 mm. Anche in questo caso, la rottura è causata per compressione dell'hold down di sinistra.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei risultati delle prove:

Prove	Carico max [kN]	Spostamento orizzontale max [mm]	Spostamento diagonale max [mm]
P2	8,31	13,48	2,53
P3	11,11	13,93	2,73
Media	9,71	13,71	2,63

Tabella 13. Tabella riassuntiva dei risultati delle prove 2 e 3

Di seguito si riportano i dettagli di rottura delle prove:



Figura 45. Stato di collasso prova 2



Figura 46. Dettaglio di rottura del vetro prova 2



Figura 47. Dettaglio di rottura del vetro prova 2



Figura 48. Stato di collasso prova 3



Figura 49. Dettaglio di rottura del vetro prova 3

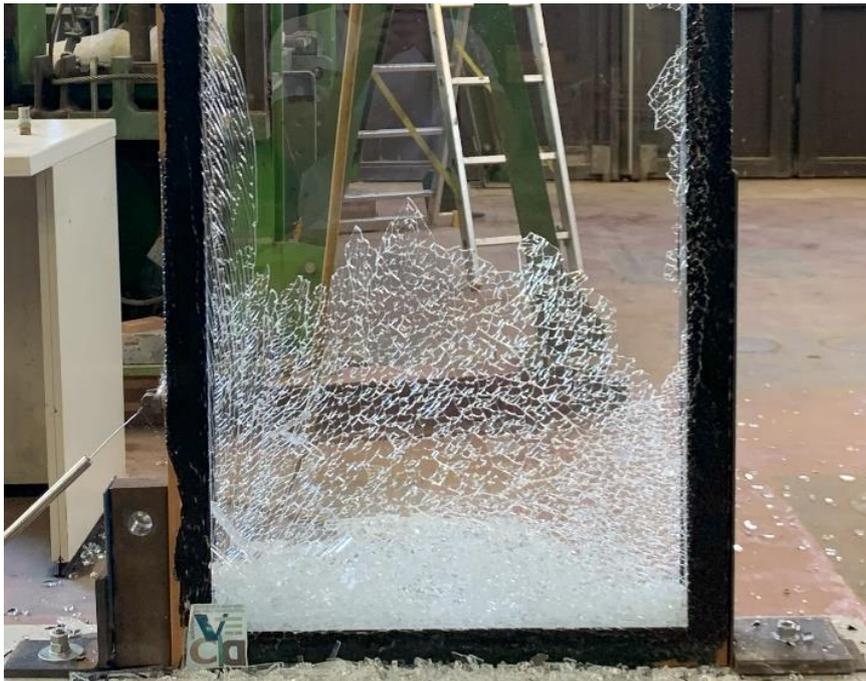


Figura 50. Dettaglio di rottura del vetro prova 3

4.3 Risultati prova 5 e prova 6

Per la quinta e per la sesta prova sono stati utilizzati dei pannelli di vetro temperato stratificato 4.4.1, su cui sono stati eseguiti sempre tre cicli di carico e scarico ognuno da 2 kN ed il quarto ciclo fino alla rottura. In **Figura 51** ed in **Figura 52**, vengono mostrati i setup dei pannelli prima dell'inizio della prova. I trasduttori utilizzati per la registrazione degli spostamenti orizzontali e diagonali sono quelli descritti nel Capitolo 3.1.4 Trasduttori di spostamento.



Figura 51. Vista frontale del setup prova 5



Figura 52. Vista frontale del setup prova 6

Durante l'applicazione dei primi tre cicli di carico e scarico da 2 kN, non sono state osservate particolari deformazioni dei pannelli e gli spostamenti residui in fase di scarico sono stati limitati. L'ultimo ciclo di carico prevedeva il raggiungimento della rottura dei campioni.

Di seguito si riportano i grafici “Forza – Spostamento orizzontale” e “Forza – Spostamento diagonale”:

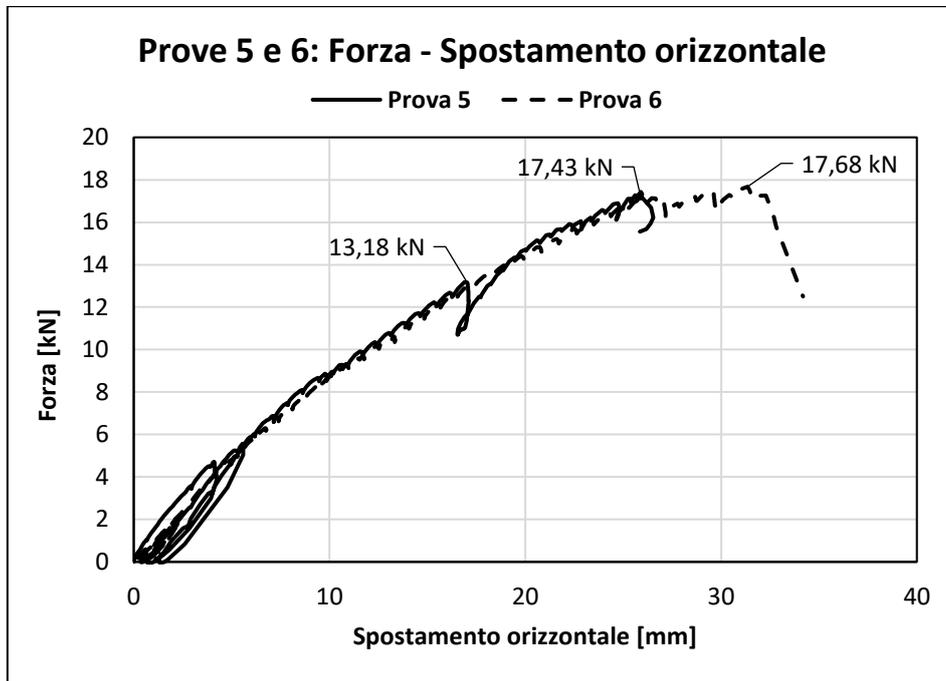


Figura 53. Curve Forza - Spostamento orizzontale

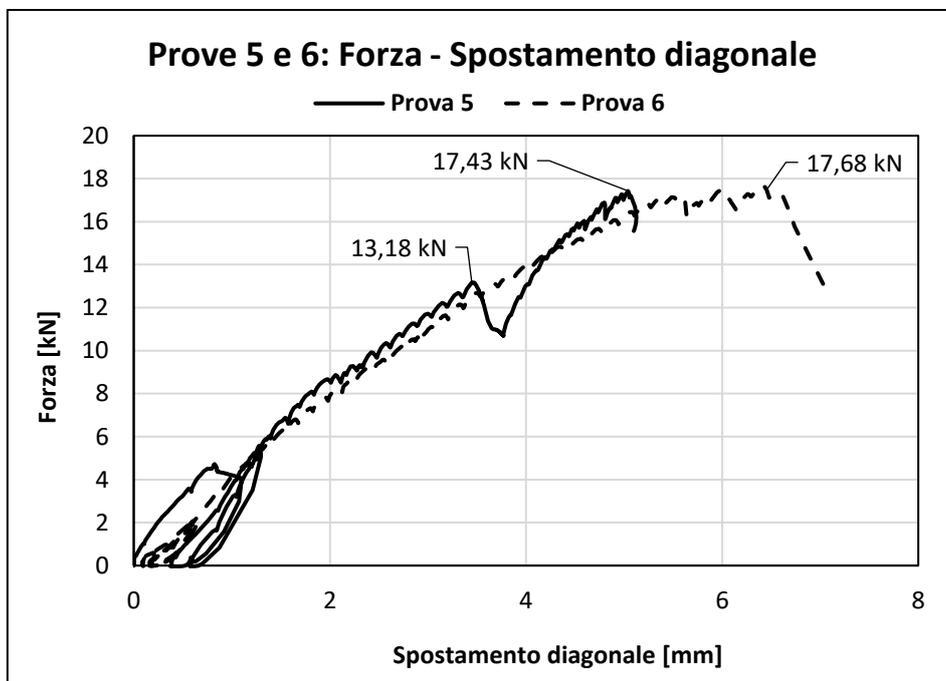


Figura 54. Curve Forza - Spostamento diagonale

Analizzando le curve della prova 5 è possibile notare un andamento lineare crescente. In entrambi i grafici si vede che arrivati al carico di 13,18 kN, c'è una perdita di carico improvvisa, dovuta ad un malfunzionamento del trasduttore di spostamento orizzontale utilizzato. Al raggiungimento del carico massimo di 17,43 kN, il pannello ha subito uno stato di collasso registrando uno spostamento orizzontale di 25,91 mm e uno diagonale di 5,04 mm. Ispezionando il campione a fine prova, si può concludere che la rottura è stata causata per compressione dall'hold down di sinistra, poiché il pannello ha ruotato in maniera rigida. Inoltre si è notato che una singola lastra di vetro si è scollata dalla struttura portante, causata dal danneggiamento della colla.

Dall'analisi delle curve della prova 6 è possibile notare un andamento lineare crescente. Analizzando l'ultimo tratto delle curve, si nota come si ha una perdita con successiva ripresa del carico, dovuta alla rotazione rigida del pannello che ha come centro di rotazione l'hold down di base di sinistra. All'arrivo nel punto di massimo carico applicato di 17,68 kN, si è riscontrata la rottura di una singola lastra di vetro del campione e la rottura di tutte le viti dell'hold down di destra. Registrando uno spostamento orizzontale di 31,35 mm e uno spostamento diagonale di 6,43 mm.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei risultati delle prove:

Prove	Carico max [kN]	Spostamento orizzontale max [mm]	Spostamento diagonale max [mm]
P5	17,43	25,91	5,04
P6	17,68	31,35	6,43
Media	17,56	28,63	5,74

Tabella 14. Tabella riassuntiva dei risultati delle prove 5 e 6

Di seguito si riportano i dettagli di rottura delle prove:



Figura 55. Stato di collasso vista frontale prova 5



Figura 56. Stato di collasso vista retro prova 5



Figura 57. Dettaglio di scollaggio del vetro prova 5



Figura 58. Dettaglio di rottura del vetro prova 5



Figura 59. Stato di collasso prova 6

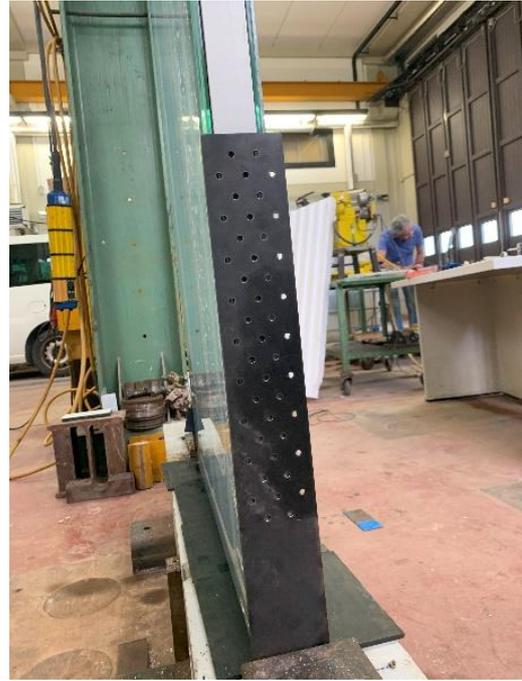


Figura 60. Dettaglio di rottura delle viti dell'hold down di base prova 6

5. Discussione dei risultati

In questo capitolo si riportano i confronti tra i vari risultati ottenuti. Si commentano nello specifico le curve $\tau - \gamma$ di tutte le prove sperimentali eseguite in laboratorio e riportate nei due grafici seguenti. Lungo l'asse delle ordinate si riportano le τ [N/mm²] ottenute dal rapporto tra la forza orizzontale registrata fratto l'area della sezione del pannello (si intende l'area complessiva, cioè l'area del legno più lo spessore delle lastre vetrate). Mentre lungo l'asse delle ascisse si riportano le γ [%] ottenute dal rapporto tra lo spostamento orizzontale registrato diviso l'altezza del pannello.

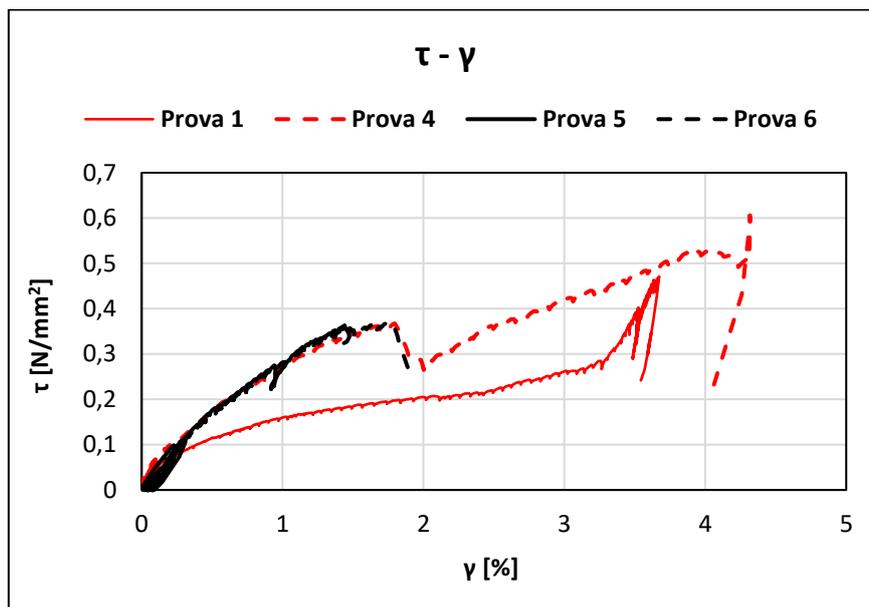


Figura 61. Curve $\tau - \gamma$

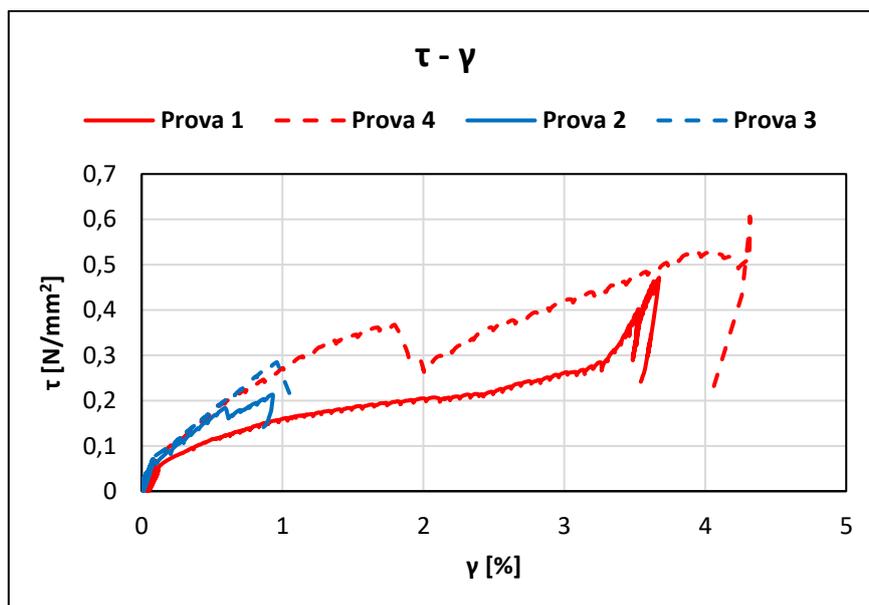


Figura 62. Curve $\tau - \gamma$

Prove	Carico max (valori medi) [kN]	Spostamento orizzontale (valori medi) [mm]	Spostamento diagonale (valori medi) [mm]	τ (valori medi) [N/mm ²]	γ (valori medi) [%]
P1 – P4	21,00	57,93	3,24	0,54	3,99
P2 – P3	9,71	13,71	2,63	0,25	0,94
P5 – P6	17,56	28,63	5,74	0,37	1,59

Tabella 15. Tabella con i valori medi delle prove

Analizzando i grafici precedenti, la tabella riassuntiva e prendendo in considerazione i pannelli della stessa tipologia di vetri ma di differenti dimensioni, tra le prove 1 e 4 e le prove 5 e 6, è possibile notare che:

- le rotture delle prove P1 – P4 sono avvenute per un valore medio di τ pari a 0,54 N/mm², le ultime due P5 – P6 invece sono avvenute per un valore di τ medio di 0,37 N/mm²;
- la deformazione ultima media γ è di 3,99 % per le prove P1 – P4, maggiore rispetto alle P5 – P6 che hanno deformazione ultima media γ pari a 1,59 %;
- dai diagrammi si nota come le curve nel primo tratto coincidono fino ad un valore di τ pari a 0,36 N/mm² (coincidente con la τ massima registrata per i provini P5 – P6). Questo è dovuto al fatto che i due pannelli sono identici ma di altezze diverse.
- per entrambi i pannelli si registra una rottura improvvisa di tipo fragile dovuta al collasso di una o di entrambe le lastre di vetro;
- per i pannelli P5 – P6 si è deciso di bloccare la prova alla prima perdita di carico coincidente con la τ massima pari a 0,36 N/mm². Nel caso dei pannelli P1 – P4, superata la prima rottura dei vetri, si è deciso di continuare la prova: in questo caso l'elemento resistente del pannello vetrato è diventato il telaio di legno.

Considerando invece i pannelli di stesse dimensioni ma di differenti tipologie, tra le prove 1 e 4 e le prove 2 e 3, è possibile osservare che:

- le rotture delle prove P2 – P3 sono avvenute per un valore di τ medio pari a 0,25 N/mm², quasi la metà rispetto al valore di τ medio di 0,54 N/mm² per le prove P1 – P4;

- la deformazione ultima media γ è pari a 0,94 % per le prove P2 – P3, anche questa di gran lunga inferiore rispetto al valore della deformazione ultima media γ pari a 3,99 % dei campioni P1 – P4;
- dall'analisi dei risultati si evidenzia che le modalità di rottura per entrambe le tipologie dei pannelli sono simili ed avvengono con il collasso di una o di entrambe le lastre vetrate. I pannelli con vetro stratificato risultano più performanti sia da un punto di vista della resistenza che da un punto di vista della deformabilità, presentando una resistenza più elevata e maggiori riserve di deformazione.

6. Conclusioni

La campagna sperimentale effettuata ha avuto l'obiettivo di contribuire allo studio del comportamento strutturale di pannelli di vetro per facciata continua di diverse tipologie.

I pannelli oggetto di studio sono stati sottoposti ad una forza orizzontale, applicata in testa e nel loro piano medio, con il compito di simulare un'azione sismica o un'azione del vento, agente sulla struttura portante dei campioni.

Lo scopo della sperimentazione è quello di determinare la resistenza dei pannelli ed il loro comportamento meccanico in tali condizioni.

Dai risultati delle prove è possibile concludere che i pannelli costituiti da vetri stratificati temperati hanno dimostrato di avere una resistenza, sia in termini di carico massimo che di deformazione ultima, di gran lunga superiore rispetto ai pannelli costituiti da vetri sempre temperati ma non stratificati.

Dall'analisi delle prove 1 e 4, confrontate con le prove 2 e 3, si può notare come nei primi due casi ci sia un aumento di circa l'1,16 % di τ massima, così come accade se si analizza la deformazione ultima. Infatti, sempre nelle prime due prove P1 e P4 la deformazione ultima γ è molto superiore rispetto alle prove P2 e P3, con un incremento percentuale di circa il 3,24 %.

Diversamente, dai risultati delle prove costituite tutte e quattro da lastre di vetro stratificato temperato ma di diverse dimensioni, è possibile definire che i campioni hanno dimostrato di avere una certa somiglianza riguardo il comportamento meccanico, relativamente alla resistenza. Si nota in effetti che i primi tratti (trascorrendo il pannello P1) sono praticamente coincidenti fino alla prima perdita di carico. Dallo studio delle prove 1 e 4, confrontate con le prove 5 e 6, si può constatare come nei due primi casi ci sia un aumento di circa lo 0,46 % di τ massima, valore molto ridotto se confrontato con quello del caso precedente. È risultato invece abbastanza significativo l'incremento della deformazione ultima γ tra questi campioni di diverse dimensioni, registrandone un valore ultimo pari all' 1,51 %.

Ringraziamenti

Innanzitutto, ringrazio la mia famiglia, che dopo tanti sacrifici e con il continuo supporto morale mi hanno permesso di concludere questa prima parte di studi.

Ringrazio il mio relatore Serpilli Michele, per la sua grande disponibilità e cortesia nell'avermi seguito passo dopo passo nella stesura della tesi sperimentale.

Ringrazio anche il correlatore Munafò Placido, soprattutto per la disponibilità e cortesia, ma anche per aver messo a disposizione tutto il materiale necessario per lo svolgimento delle varie prove di laboratorio e per le informazioni fornite.

Infine ringrazio i miei amici, che con il loro affetto mi hanno sempre sostenuto in momenti difficili, è anche merito loro il raggiungimento di questo traguardo.

Infine ringrazio tutti coloro che in ogni occasione mi sono stati vicini.

Bibliografia e Sitografia

- [1] Baroni Giorgio, (1984), Tecnologie delle architetture di cristallo. Le facciate leggere continue vetrate, Programma, Padova
- [2] Nardi Guido, (1976), Progettazione architettonica per sistemi e componenti, Angeli, Milano
- [3] Button David, Pye Brian, (1993), Glassin Building. A guide to modern architectural glass performance, Butterworth, Oxford.
- [4] <https://edilizia-in-un-click.starbuild.it/2019/04/differenze-tra-vetro-e-vetro-temprato.html>
- [5] <https://www.finestreantirumore.it/vetro-stratificato/#Che-cos%E2%80%99e-un-vetro-stratificato>
- [6] <https://www.guidafinestra.it/vetro-stratificato-e-pvb/>
- [7] Pietro Dal Pont, Calcolo delle strutture standard e non standard, strutture al limite
- [8] <http://materioteca.iuav.it/SitoRel0/vetro/normativa.html>
- [9] <https://www.pilkington.com/it-it/it/vetro-per-la-casa>
- [10] <https://www.fraiseracademy.it/legno-mogano/>
- [11] https://sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04_4-Legno-resistente_prodotti_legno.pdf
- [12] <https://www.saint-gobain-glass.it/it/proprieta-meccaniche-del-vetro>
- [13] https://www.saint-gobain-glass.it/sites/saint-gobain-building-glass.com/files/2019-06/071680_STADIP%20PROTECT%20v4.pdf
- [14] <https://www.astm.org/about/overview/fact-sheet.html>