

# **RELAZIONE TECNICA**

**VERIFICA E PROGETTO DI BALAUSTRATE IN VETRO STRUTTURALE E  
VERIFICA DEI RELATIVI ANCORAGGI**

## Sommario

1.	CRITERI DI PROGETTAZIONE .....	1
2.	ANALISI DEI CARICHI .....	2
3.	COMBINAZIONI DELLE AZIONI .....	3
4.	PARAMETRI MECCANICI DEI MATERIALI .....	4
7.	CRITERI DI MODELLAZIONE DEL VETRO .....	5
7.1.	Calcolo dello spessore equivalente .....	5
7.1.1.	Modello Wölfel- Bennison .....	5
7.1.2.	Modello Enhanced Effective Thickness (EET) per piastre .....	8
7.1.3.	Confronto .....	11
8.	SOLLECITAZIONI E DEFORMAZIONI.....	11
8.1.	Azione antropica soluzione 2 morsetti per lato .....	12
8.1.1.	Condizione indeformata e disposizione della mesh .....	12
8.1.2.	Sollecitazioni .....	12
8.1.3.	Deformazioni.....	14
8.2.	Azione antropica 3 morsetti per lato .....	15
8.2.1.	Condizione indeformata e disposizione della mesh .....	15
8.2.2.	Sollecitazioni .....	15
8.2.3.	Deformazioni.....	17
8.3.	Peso proprio .....	18
8.3.1.	Condizione indeformata e disposizione della mesh .....	18
8.3.2.	Sollecitazioni .....	18
9.	VERIFICHE DI RESISTENZA.....	19
9.1.	VERIFICHE ALLO SLU .....	19
9.1.1.	Verifica SLU per azione antropica .....	24
9.1.2.	Verifica SLU per peso proprio.....	26
9.2.	VERIFICHE ALLO SLE.....	28
10.	VERIFICA SULLA STABILITA' DEI MORSETTI .....	29
10.1.	Caratteristiche materiali carpenteria metallica.....	31
10.2.	Caratteristiche meccaniche bulloneria.....	32
10.3.	Verifica dei bulloni di ancoraggio .....	33
10.4.	Verifica estrazione dei fissaggi .....	34
11.	POSA DELLE VETRATE .....	35
12.	CRITERI DELLE LASTRE DA IMPIEGARE .....	35
13.	CONCLUSIONI .....	36
14.	DIMENSIONE DEL VETRO E DEL CORRIMANO.....	37

## 1. CRITERI DI PROGETTAZIONE

Le balaustre da montare sui balconi sono in tutto 12 ed hanno un'estensione che varia tra 190cm e 212cm per un'altezza fissa di 94,5cm. Le verifiche esposte nella seguente relazione si riferiscono alla dimensione maggiore (212cm), in quanto il soddisfacimento della seguente condizione garantisce la sicurezza anche per la balaustra di dimensione minore.

Il vetro da impiegare è un vetro temperato termicamente (vetro di sicurezza) stratificato. Infatti viene interposto tra due lastre di vetro da 10mm un intercalare di polivinilbutirrale (PVB) dello spessore di 0,76mm. Il pacchetto completo per cui ha lo spessore di 20,76mm.

La seguente verifica è principalmente volta alla valutazione della sollecitazione nel vetro quando la balaustra è soggetta al peso proprio e all'azione antropica di spinta, volendo utilizzare per l'appunto questo elemento come presidio anti-caduta. L'analisi tensionale è condotta anche per valutare in modo accurato il numero di pinze reggi vetro da inserire.

La seguente progettazione è condotta in accordo alle istruzioni esposte nel CNR DT210 del 2013, in accordo alle Norme Tecniche delle costruzioni del 2008 (D.M. 14-01-2008) e della circolare esplicativa della NTC08 n°617 del 02-02-2009. Nonché in accordo con la Norma UNI 7697.

## 2. ANALISI DEI CARICHI

In accordo alle prescrizioni delle NTC08 per la valutazione del peso proprio della lastra si farà affidamento alla tabella 3.1.I

**Tabella 3.1.I - Pesì dell' unità di volume dei principali materiali strutturali**

MATERIALI	PESO UNITÀ DI VOLUME [kN/m <sup>3</sup> ]
<b>Calcestruzzi cementizi e malte</b>	
Calcestruzzo ordinario	24,0
Calcestruzzo armato (e/o precompresso)	25,0
Calcestruzzi "leggeri": da determinarsi caso per caso	14,0 ÷ 20,0
Calcestruzzi "pesanti": da determinarsi caso per caso	28,0 ÷ 50,0
Malta di calce	18,0
Malta di cemento	21,0
Calce in polvere	10,0
Cemento in polvere	14,0
Sabbia	17,0
<b>Metalli e leghe</b>	
Acciaio	78,5
Ghisa	72,5
Alluminio	27,0
<b>Materiale lapideo</b>	
Tufo vulcanico	17,0
Calcere compatto	26,0
Calcere tenero	22,0
Gesso	13,0
Granito	27,0
Laterizio (pieno)	18,0
<b>Legnami</b>	
Conifere e pioppo	4,0 ÷ 6,0
Latifoglie (escluso pioppo)	6,0 ÷ 8,0
<b>Sostanze varie</b>	
Acqua dolce (chiara)	9,81
Acqua di mare (chiara)	10,1
Carta	10,0
Vetro	25,0
Per materiali non compresi nella tabella si potrà far riferimento a specifiche indagini sperimentali o a normative di comprovata validità assumendo i valori nominali come valori caratteristici.	

Operando a vantaggio di sicurezza e considerando lo spessore di PVB come se fosse vetro, si ottiene il seguente peso proprio della balaustra:

$$0,02076 \times 2,12 \times 0,945 \times 25 = 1,04 \text{ kN ossia } 104 \text{ kg}$$

La spinta antropica sarà considerata in accordo con la tabella 3.1.II

I carichi variabili orizzontali (lineari) indicati nella tabella 3.1.II, devono essere utilizzati per verifiche locali e non si sommano ai carichi utilizzati nelle verifiche dell'edificio nel suo insieme.

I carichi orizzontali lineari a parapetti o mancorrenti alla quota del bordo superiore.

**Tabella 3.1.II** – Valori dei carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici

Cat.	Ambienti	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]	$H_k$ [kN/m]
A	<b>Ambienti ad uso residenziale.</b> Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	<b>Uffici.</b> Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	<b>Ambienti suscettibili di affollamento</b> Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00

In questo caso si rientra nella categoria C2 e si ottiene che il carico lineare da applicare sul bordo più alto della balaustra è di 2kN/m ossia 200kg/m.

### 3. COMBINAZIONI DELLE AZIONI

La resistenza del vetro strutturale è fortemente influenzata dal tempo di applicazione del carico, infatti il materiale quando è sottoposto ad un carico costante nel tempo per applicazioni di lunga durata può collassare per fatica. Per questo motivo la resistenza del vetro strutturale sarà più bassa quando si analizzano carichi che insistono per lungo tempo, come ad esempio il peso proprio e sarà più alta quando si analizzano carichi che insistono per tempi brevi, come ad esempio l'azione del vento o un'azione antropica.

Per questo motivo si farà riferimento a due condizioni di carico e ad ognuna di esse sarà applicato un tempo di riferimento di applicazione.

- Spinta sul bordo superiore, valore 2,00 kN/m, azione antropica, tempo di applicazione 30s (azione transitoria);
- Peso proprio, valore 1,04 kN/m, azione permanente, tempo di applicazione 50 anni.

Per ogni condizione di carico sarà valutata la resistenza a trazione e la massima tensione di trazione nel materiale, la verifica è soddisfatta se il rapporto tra la tensione massima e la resistenza di progetto è minore dell'unità.

La combinazione delle azioni si ottiene sommando tutti i rapporti di verifica (tensione/resistenza) delle varie condizioni di carico e verificando comunque che la somma restituisca un valore minore dell'unità.

## 4. PARAMETRI MECCANICI DEI MATERIALI

Di seguito le caratteristiche meccaniche del vetro strutturale, dell'intercalare polimerico e dell'acciaio utilizzato per ancorare i morsetti metallici sul calcestruzzo.

Il vetro per temperature inferiori a  $300\div 400^{\circ}\text{C}$ , può essere modellato come una materiale elastico lineare. L'ipotesi costitutiva di elasticità lineare per il vetro può essere assunta per qualsiasi "livello di accuratezza" scelto per l'analisi della struttura in esame.

GLi elementi di vetro stratificato le lastre sono collegate da un intercalare di materiale polimerico: polivinil butirrale (PVB); L'elemento interposto è costituito da un foglio di materiale elastomerico che deve presentare una buona aderenza al vetro e un allungamento elevato prima della lacerazione. Le caratteristiche meccaniche dell'elastomero sono fortemente dipendenti dal tempo e dalla temperatura; in ogni caso la rigidità del materiale polimerico è molto inferiore a quella del vetro, per cui anche in presenza di un'efficace aderenza, il polimero è soggetto ad elevati scorrimenti angolari.

Il vetro da utilizzare per la realizzazione delle balaustre ha le seguenti caratteristiche:

Tipo di vetro	Temperato termicamente
Lavorazione	Lucidato
Profilo superficiale del vetro	Vetro tirato
Trattamento della superficie	Nessun Trattamento

Modulo di Young del vetro	<b>E(vetro)</b>	70000 N/mm <sup>2</sup>
Modulo tagliente del vetro	<b>G(vetro)</b>	28689 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	<b><math>\nu</math></b>	0,22
Densità	<b><math>\rho</math></b>	25 kN/m <sup>3</sup>
Modulo tagliente dell'intercalare	<b>G(PVB)</b>	0,40 N/mm <sup>2</sup>

Modulo di Young dell'acciaio	<b>E(acc)</b>	210000 N/mm <sup>2</sup>
Modulo tagliante dell'acciaio	<b>G(acc)</b>	80769 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	<b>v</b>	0,30
Densità	<b>ρ</b>	75 kN/m <sup>3</sup>

## 7. CRITERI DI MODELLAZIONE DEL VETRO

Per via del comportamento fragile del materiale si effettuerà un'analisi in campo elastico lineare. L'analisi agli elementi finiti si può effettuare in campo "geometricamente lineare" quando la freccia massima è minore della metà dello spessore.

La mesh deve avere dimensioni tali da rispondere ai seguenti requisiti:

- Dimensione massima nello spessore della lastra:  $s/2$
- Rapporto tra dimensioni massima e minima dell'elemento:  $\max/\min \leq 6$

Dove

$s$  spessore dell'elemento di vetro monolitico [mm];

$\max$  dimensione massima della mesh [mm];

$\min$  dimensione minima della mesh [mm].

Nelle zone di concentrazione degli sforzi si consiglia di assumere un rapporto tra dimensioni massima e minima della mesh prossimo a 1.

La modellazione delle balaustre sarà effettuata con elementi bidimensionali di tipo "shell", ossia: lastra-piastra.

### 7.1. Calcolo dello spessore equivalente

Il comportamento di un elemento di vetro stratificato con  $n$  strati, a seconda del grado di accoppiamento a taglio offerto dall'intercalare, è intermedio fra quelle di un elemento a strati indipendenti, e quello di un elemento monolitico.

Per la definizione della rigidezza equivalente si applicherà il modello **Enhanced Effective Thickness (EET) per piastre** e si confronterà con il modello di **Wölfel- Bennison** per avere una conferma del calcolo e per valutare il grado di approssimazione di un modello più semplice.

#### 7.1.1. Modello Wölfel- Bennison

Questo metodo di analisi [Wölfel, 1987; Bennison, 2009] è stato ripreso dalla ASTM E1300-09a (Appendix XII). La formulazione, basata su un lavoro originario di Wölfel [Wölfel, 1987] inerente le travi sandwich in acciaio ed, in seguito, applicata da Bennison al

caso del vetro laminato, utilizza per la rigidezza flessionale un valore intermedio fra la rigidezza dell'elemento monolitico e quella dell'elemento a strati indipendenti, definito da un'interpolazione lineare tramite un coefficiente di trasmissione del taglio  $\Gamma$  variabile tra  $\Gamma=0$  (per comportamento a strati indipendenti) e  $\Gamma=1$  (per comportamento monolitico).

Il modello permette di calcolare gli spessori effettivi soltanto per pacchetti stratificati composti da due sole lastre di vetro. In questo caso, il momento di inerzia della trave monolitica equivalente è dato dalla media pesata tra i momenti di inerzia relativi al comportamento a strati indipendenti ( $J_{abs}$ ) e al limite monolitico ( $J_{full}$ ):

$$J_{eq} = \Gamma J_{full} + (1 - \Gamma) J_{abs} = J_1 + J_2 + \Gamma A^* d^2$$

$$A^* = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}$$

$$d = d_1 + d_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} + h_{int}$$

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 9.6 \frac{h_{int} E I_s}{G_{int} l^2 d^2}} = \frac{1}{1 + 9.6 \frac{h_{int} E A^*}{G_{int} l^2 b}}$$

Dove  $J_1$  è il momento d'inerzia del primo strato di vetro, analogamente  $J_2$ ,  $A^*$  è la media pesata delle sezioni delle due lastre di vetro,  $\Gamma$  è il coefficiente di trasmissione del taglio,  $d$  è la distanza dal baricentro della generica lastra dal baricentro della sezione stratificata.

Nella formula del coefficiente di trasmissione del taglio  $b$  è la larghezza della trave,  $l$  è la lunghezza della trave,  $h_{int}$  è lo spessore dell'intercalare polimerico,  $E$  è il modulo di Young del vetro,  $G_{int}$  è il modulo a taglio dell'intercalare.

Per definire lo spessore efficace necessario per il calcolo della deflessione si introduce la seguente quantità:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_2^3 + 12 \Gamma I_s}$$

$$I_s = \frac{d^2 A^*}{b} = \frac{h_1 + h_2}{h_1 h_2} d^2 = h_1 d_1^2 + h_2 d_2^2$$



Mentre gli spessori efficaci per il calcolo delle tensioni, negli strati di vetro risultano essere:

$$h_{1,ef;\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_1 + 2\Gamma d_1}}, \quad h_{2,ef;\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_2 + 2\Gamma d_2}}.$$

Tale modello ha validità limitata perché concepito per travi staticamente determinate, in cui la rigidezza degli strati esterni sia trascurabile rispetto a quella dell'intercalare; è applicabile, con buoni risultati, soltanto a casi in cui la geometria sia del tipo "trave" e nei casi in cui la deformata sia cilindrica, con deflessione massima in mezzeria. Se ne sconsiglia pertanto l'applicazione se non nel caso di lastre rettangolari, semplicemente appoggiate su due lati opposti e soggette a carichi uniformemente distribuiti, ortogonali al piano.

Di seguito i risultati per il **Modello di Wölfel- Bennison**

#### GEOMETRIA DELLA TRAVE (doppio strato + intercalare)

Lunghezza lastra	<b>l(lastra)</b>	2120 mm
Larghezza lastra	<b>b(lastra)</b>	945 mm
Spessore strato 1	<b>h1</b>	10 mm
Spessore strato 2	<b>h2</b>	10 mm
Spessore intercalare	<b>hint</b>	0,76 mm
Sezione strato 1	<b>A1</b>	9450 mm <sup>2</sup>
Sezione strato 2	<b>A2</b>	9450 mm <sup>2</sup>
Sezione intercalare	<b>Aint</b>	718 mm <sup>2</sup>
Area media	<b>A*</b>	4725 mm <sup>2</sup>
Distanza dal baricentro totale dello strato 1	<b>d1</b>	5,4 mm
Distanza dal baricentro totale dello strato 2	<b>d2</b>	5,4 mm
d1+d2	<b>d</b>	10,8 mm

#### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE EQUIVALENTI

Coef. Di trasmissione del taglio	<b>Γ</b>	0,413
Coefficiente	<b>Is</b>	579 mm <sup>3</sup>
Spessore efficace per la deflessione	<b>hef,w</b>	16,95 mm
Spess. Eff. per le tensioni nello strato 1	<b>h1,ef,σ</b>	18,36 mm
Spess. Eff. per le tensioni nello strato 2	<b>h1,ef,σ</b>	18,36 mm
Momento d'inerzia strato 1	<b>J1</b>	78750 mm <sup>4</sup>
Momento d'inerzia strato 2	<b>J2</b>	78750 mm <sup>4</sup>
Momento d'inerzia equivalente	<b>Jeq</b>	383513 mm <sup>4</sup>

### 7.1.2. Modello Enhanced Effective Thickness (EET) per piastre

Tale modello, proposto in [Galuppi, Royer-Carfagni, 2012a], [Galuppi, Royer-Carfagni, 2012b], [Galuppi *et al.* 2013a], è un modello semplice, adatto al calcolo di spessori equivalenti sia per geometrie di tipo “trave” che di tipo “piastra”. Per la trave di vetro stratificato (caso 1D), il metodo propone la definizione di un momento di inerzia equivalente, dato dalla media armonica tra il momento di inerzia della sezione monolitica di uguale spessore (*monolithic limit*) e quello delle sezioni di vetro non connesse da intercalare (*laye-red limit*), pesata tramite un coefficiente  $\eta$  che rende conto del “grado di accoppiamento” tra le lastre di vetro, dovuto dalla presenza dell’intercalare.

Il metodo EET può anche essere esteso al caso bidimensionale (comportamento a piastra) [Galuppi, Royer-Carfagni, 2012b]. Nel caso più ricorrente nella pratica di lastre composte da due strati di vetri con interposto intercalare, la rigidezza flessionale nel caso di comportamento a strati indipendenti, vale

$$D_{abs} = \sum_{i=1}^2 D_i = \sum_{i=1}^2 \frac{E h_i^3}{12(1-\nu^2)}$$

Dove  $\nu$  è il coefficiente di Poisson del vetro. Nel caso limite di comportamento monolitico, la rigidezza flessionale è invece data da

$$D_{full} = D_{abs} + \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} d^2$$

La rigidezza flessionale nel caso intermedio si assume della forma

$$\frac{1}{D_{eq}} = \frac{\eta_{2D}}{D_{full}} + \frac{1-\eta_{2D}}{D_{abs}}$$

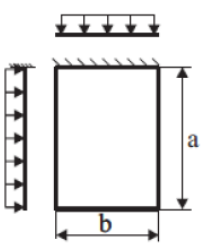
Dove  $\eta_{2D}$  è ancora un coefficiente adimensionale che dipende dalla geometria della piastra, dalle condizioni di carico e vincolo e dalle caratteristiche meccaniche di vetro e intercalare.

Nel caso di due lastre di vetro laminato, tale coefficiente risulta pari a





$$\eta_{2D} = \frac{1}{1 + \frac{h_{int} E}{G_{int} (1-\nu^2)} \frac{D_{abs}}{D_{full}} \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \Psi}$$

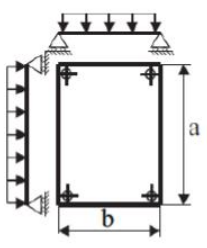
Dove  $h_i$  è lo spessore dell'intercalare polimerico,  $h_i$  è lo spessore dell'i-esimo strato di vetro ( $i=1,2$ );  $D_{abs}$  è la rigidezza flessionale relativa agli strati di vetro,  $D_{full}$  è la rigidezza flessionale relativa al vetro monolitico;  $E$  è il modulo di Young del vetro;  $G_{int}$  è il modulo a taglio dell'intercalare;  $\nu$  è il coefficiente di Poisson del vetro;  $\Psi$  è un coefficiente che dipende dalle condizioni di carico e vincolo.

Si riportano i valori di  $\Psi$  di interesse per questa analisi:

	$\lambda = b/a$	every value
	a(mm)	
	500	11.2000
	600	7.77778
	800	4.37500
	1000	2.80000
	1500	1.24444
	2000	0.70000
	2500	0.44800
	3000	0.31111

Legend:	
	Free edge
	Clamped edge
	Simply supported edge
	Supported corner

	$\lambda = b/a$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
	a(mm)										
	500	30.2878	30.4745	31.0830	32.3923	34.6861	38.1471	42.5340	46.6298	48.1868	45.6010
	600	21.0332	21.1628	21.5854	22.4946	24.0875	26.4911	29.5375	32.3818	33.4631	31.6674
	800	11.8312	11.9041	12.1418	12.6532	13.5492	14.9012	16.6148	18.2148	18.8230	17.8129
	1000	7.57194	7.61861	7.77075	8.09807	8.67152	9.53678	10.63349	11.6575	12.0467	11.4003
	1500	3.36531	3.38605	3.45367	3.59914	3.85401	4.23857	4.72600	5.18109	5.35409	5.06678
	2000	1.89298	1.90465	1.94269	2.02451	2.16788	2.38420	2.65837	2.91436	3.01168	2.85006
	2500	1.21151	1.21898	1.24332	1.29563	1.38744	1.52588	1.70136	1.86519	1.92747	1.82404
	3000	0.841326	0.846513	0.863417	0.899785	0.963502	1.05964	1.18150	1.29527	1.33852	1.26670
	3500	0.618117	0.621928	0.634347	0.661067	0.707879	0.778513	0.868040	0.951629	0.983404	0.930633
	4000	0.473246	0.476163	0.485672	0.506129	0.541970	0.596049	0.664593	0.728591	0.752919	0.712516
	4500	0.373923	0.376228	0.383741	0.399904	0.428223	0.470952	0.525111	0.575677	0.594899	0.562976
	5000	0.302878	0.304745	0.310830	0.323923	0.346861	0.381471	0.425340	0.466298	0.481868	0.456010
	5500	0.250312	0.251855	0.256884	0.267705	0.286662	0.315265	0.351520	0.385371	0.398238	0.376868
	6000	0.210332	0.211628	0.215854	0.224946	0.240875	0.264911	0.295375	0.323818	0.334631	0.316674

Lo spessore effettivo per il calcolo delle deformazioni, essendo queste proporzionali al momento di inerzia e quindi al cubo dello spessore della trave monolitica equivalente, risulta essere pari a:

$$\hat{h}_w = \sqrt[3]{\frac{1}{\frac{\eta}{\sum_{i=1}^N h_i^3 + 12 \sum_{i=1}^N (h_i d_i^2)} + \frac{(1-\eta)}{\sum_{i=1}^N h_i^3}}}$$

Nella relazione c'è il coefficiente generico  $\eta$ , in quanto la formula è valida sia per il caso monodimensionale (trave) che per quello bidimensionale (piastra).

Si può dimostrare (si veda [Galuppi & Royer-Carfagni, 2012a; Galuppi & Royer-Carfagni, 2012b]) che lo spessore equivalente per il calcolo delle tensioni nella lastra  $i$  esima è dato da

$$\hat{h}_{i;\sigma} = \sqrt{\frac{1}{\frac{2\eta|d_i|}{\sum_{i=1}^N h_i^3 + 12\sum_{i=1}^N (h_i d_i^2)} + \frac{h_i}{\hat{h}_w^3}}}$$

Di seguito i risultati per il **Modello Enhanced Effective Thickness (EET) per piastre**

GEOMETRIA DELLA LASTRA (doppio strato+intercalare)

Lunghezza lastra	<b>l(lastra)</b>	2120 mm
Larghezza lastra	<b>b(lastra)</b>	945 mm
Spessore strato 1	<b>h1</b>	10 mm
Spessore strato 2	<b>h2</b>	10 mm
Spessore intercalare	<b>hint</b>	0,76 mm
Sezione strato 1	<b>A1</b>	9450 mm <sup>2</sup>
Sezione strato 2	<b>A2</b>	9450 mm <sup>2</sup>
Sezione intercalare	<b>Aint</b>	718 mm <sup>2</sup>
Area media	<b>A*</b>	4725 mm <sup>2</sup>
Distanza dal baricentro totale dello strato 1	<b>d1</b>	5,4 mm
Distanza dal baricentro totale dello strato 2	<b>d2</b>	5,4 mm
d1+d2	<b>d</b>	10,8 mm

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE EQUIVALENTI

Coef. Che tiene conto del grado di accoppiamento	<b>η</b>	0,733
Spessore efficace per la deflessione	<b>hw</b>	16,68 mm
Spess. Eff. per le tensioni nello strato 1	<b>h1,σ</b>	18,15 mm
Spess. Eff. per le tensioni nello strato 2	<b>h2,σ</b>	18,15 mm
Rigidezza del primo strato	<b>Dabs1</b>	6130027 N/mm
Rigidezza del secondo strato	<b>Dabs2</b>	6130027 N/mm
Somma delle rigidezze degli strati	<b>Dabs,tot</b>	12260053 N/mm
Rigidezza dell'elemento monolitico	<b>Dfull</b>	50911484 N/mm
Rigidezza equivalente	<b>Deq</b>	27619584 N/mm
Coefficiente Ψ	<b>Ψ</b>	2,17 *10 <sup>-6</sup> /mm <sup>2</sup>

### 7.1.3. Confronto

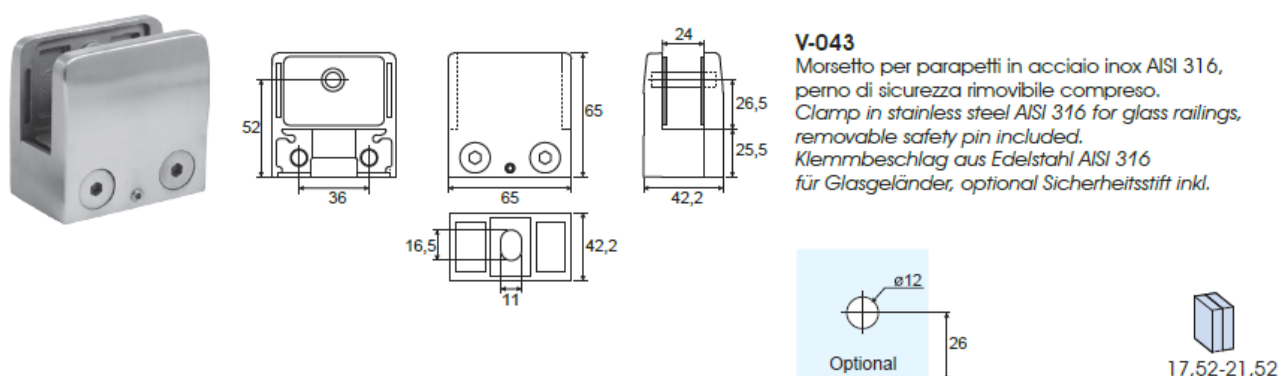
		W.B.		EET per piastre
Spessore efficace per la deflessione	$h_{ef,w}$	16,95 mm	$h_{ef,w}$	16,68 mm
Spess. Eff. per le tensioni nello strato 1	$h_{1,ef,\sigma}$	18,36 mm	$h_{1,ef,\sigma}$	18,15 mm
Spess. Eff. per le tensioni nello strato 2	$h_{1,ef,\sigma}$	18,36 mm	$h_{1,ef,\sigma}$	18,15 mm

Per la modellazione si farà affidamento sui risultati ottenuti dal modello EET per piastre. Si mette in evidenza che le tensioni del generico strato di vetro si devono ricavare modellando gli elementi con lo spessore  $h_{i,\sigma}$ , applicando il carico di progetto, mentre per la valutazione delle deformazioni si deve modellare l'elemento utilizzando lo spessore  $h_w$ .

## 8. SOLLECITAZIONI E DEFORMAZIONI

Le sollecitazioni sono ricavate attraverso modellazione agli elementi finiti della lastra di vetro. Prestando particolare attenzione alla disposizione dei vincoli sull'area di impronta del morsetto e del foro per il perno di sicurezza.

Si riporta il tipo di morsetto impiegato:

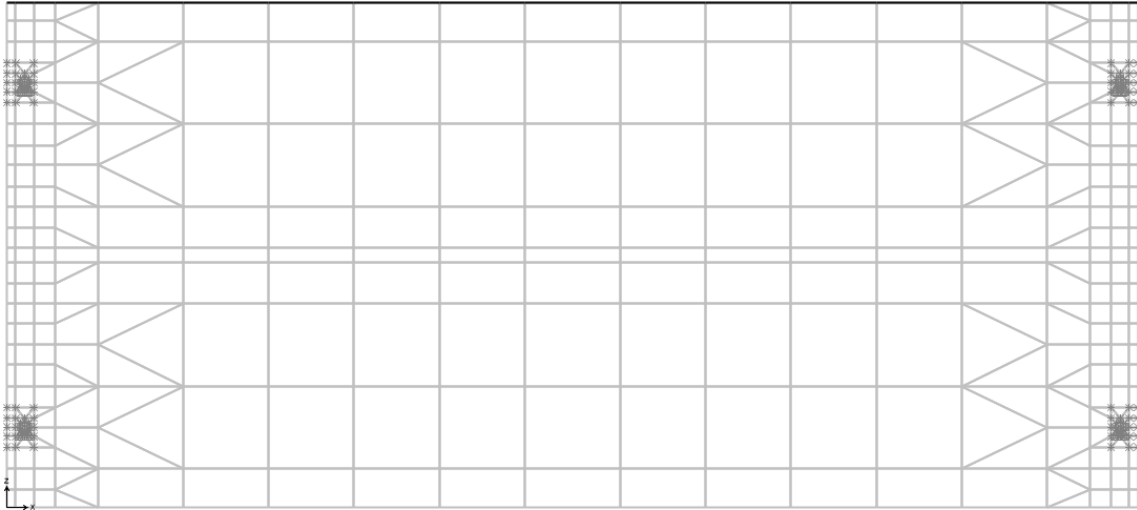


In particolare si applica una cerniera spaziale sui nodi posti sul bordo del foro e si applica un blocco della traslazione nella direzione perpendicolare al piano del vetro esclusivamente sui nodi che si trovano nell'area di impronta del morsetto.

Si valutano separatamente l'azione antropica applicata sul bordo superiore della lastra e il peso proprio applicato in modo distribuito.

## 8.1. Azione antropica soluzione 2 morsetti per lato

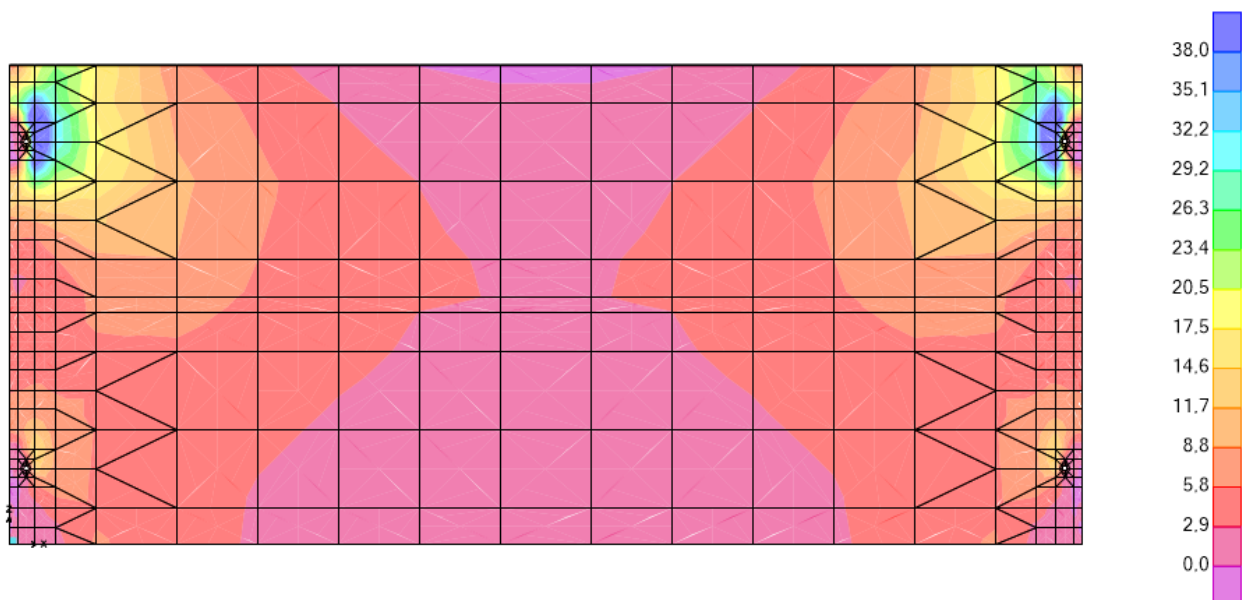
### 8.1.1. Condizione indeformata e disposizione della mesh



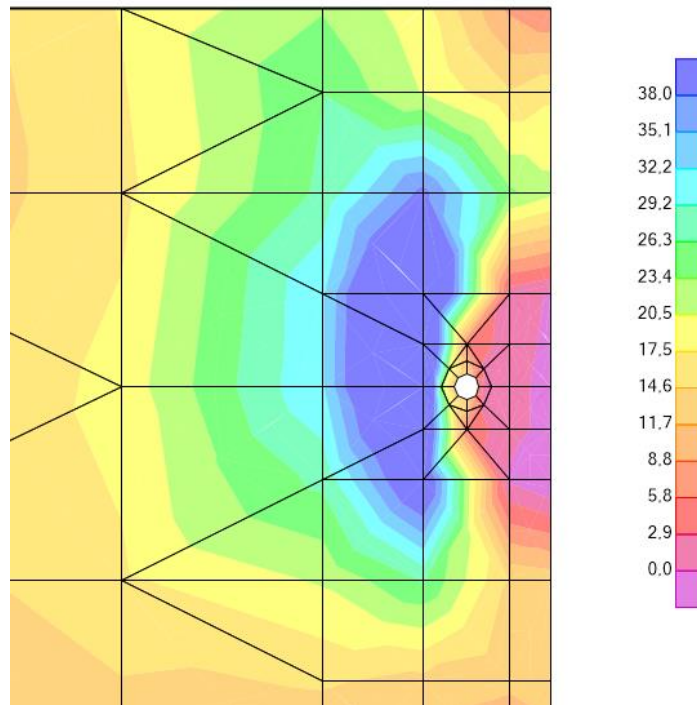
### 8.1.2. Sollecitazioni

La spinta fuori piano applicata sul bordo superiore mette in evidenza come i punti critici siano individuabile nei pressi dei due morsetti superiori.

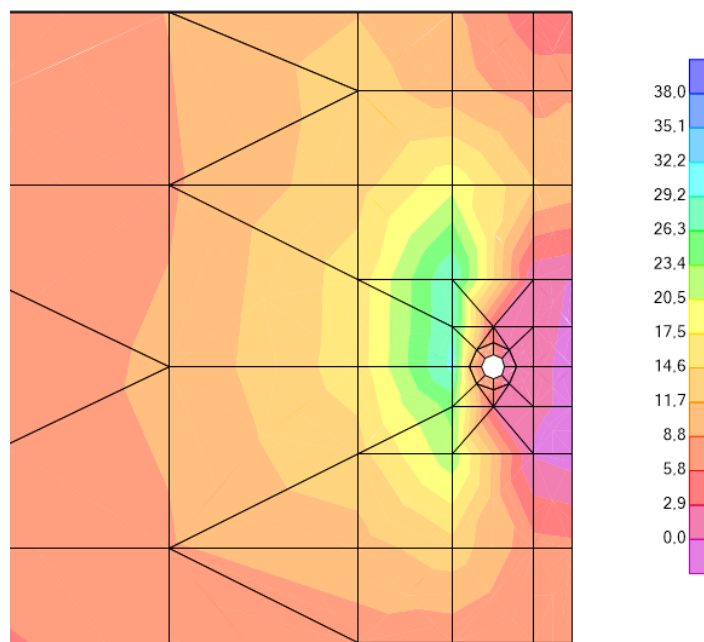
- Di seguito la mappa delle tensioni principali di trazione quando l'azione di spinta è di 2kN/m.



- Di seguito la mappa delle tensioni principali di trazione nei pressi del morsetto quando l'azione di spinta è di 2kN/m. La zona blu indica una tensione superiore a 38 MPa.



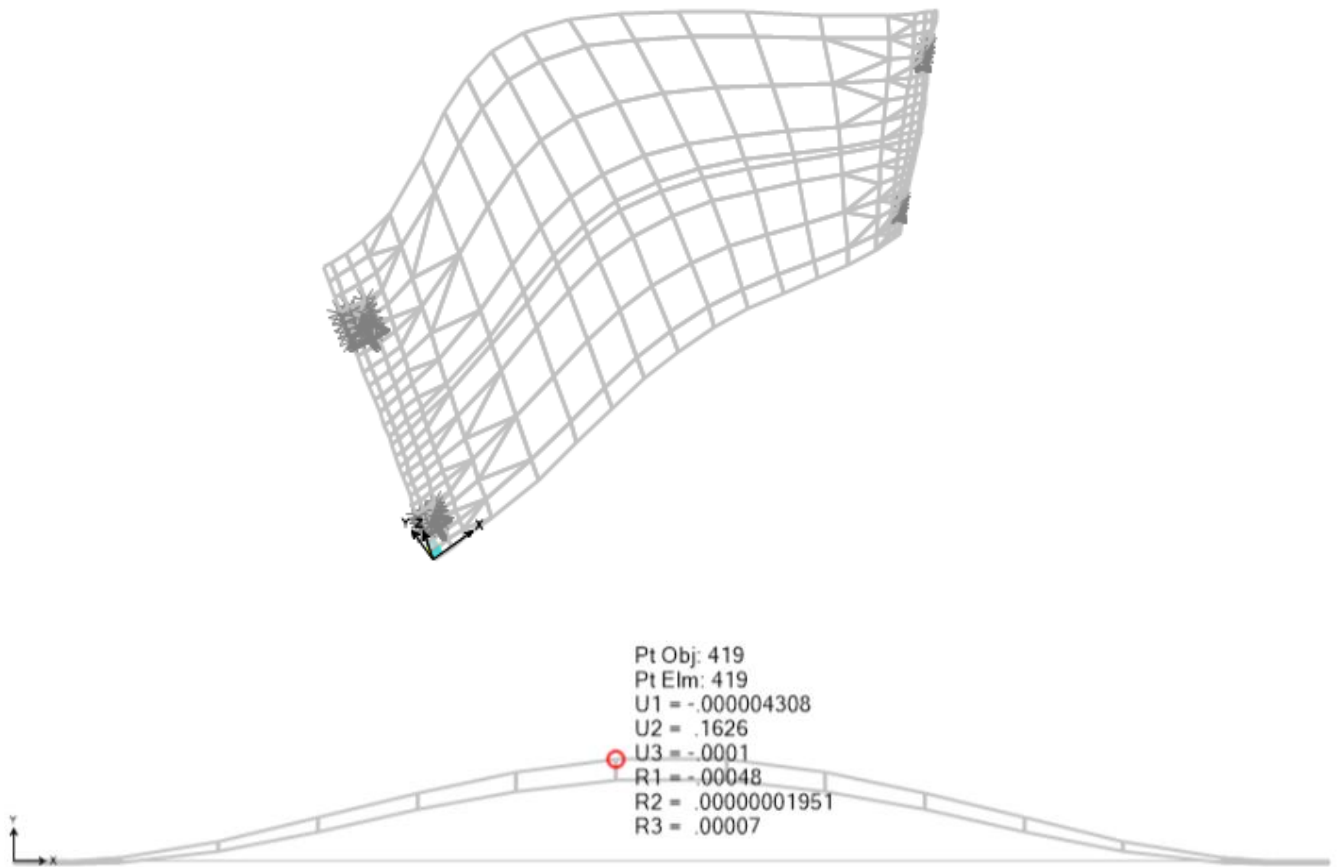
- Di seguito la mappa delle tensioni principali di trazione nei pressi del morsetto quando l'azione di spinta è di 1kN/m. In questo caso si attingono al massimo 29 MPa.





### 8.1.3. Deformazioni

- Si riporta in ultimo la deformata quando l'azione di spinta fuori del piano è di 2kN/m



In corrispondenza di  $u_2$  si ha la massima deflessione che corrisponde a 0,16mm



## 8.2. Azione antropica 3 morsetti per lato

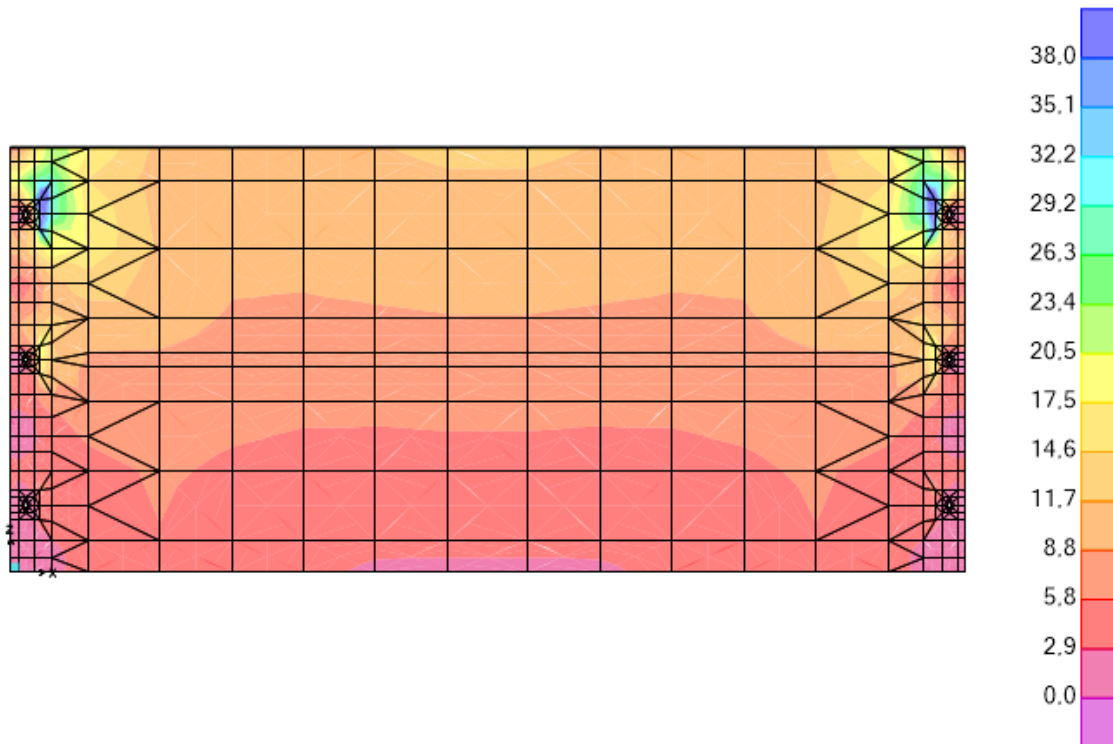
### 8.2.1. Condizione indeformata e disposizione della mesh



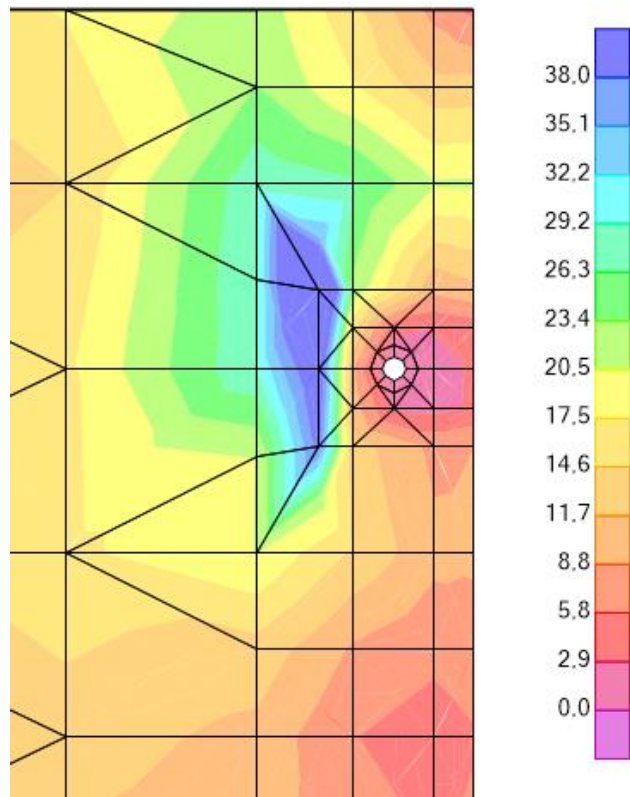
### 8.2.2. Sollecitazioni

La spinta fuori piano applicata sul bordo superiore mette in evidenza come i punti critici siano individuabile nei pressi dei due morsetti superiori.

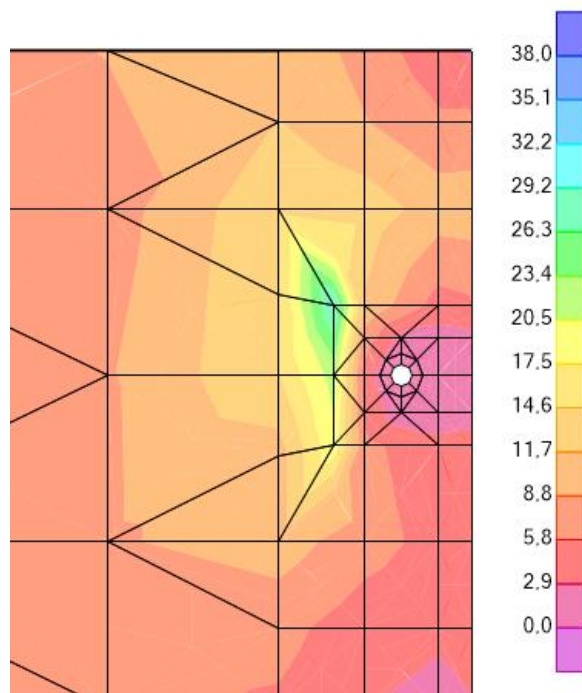
- Di seguito la mappa delle tensioni principali di trazione quando l'azione di spinta è di 2kN/m.



- Di seguito la mappa delle tensioni principali di trazione nei pressi del morsetto quando l'azione di spinta è di 2kN/m. La zona blu indica la porzione di vetro in cui si sono attinti e superati i 38 MPa.

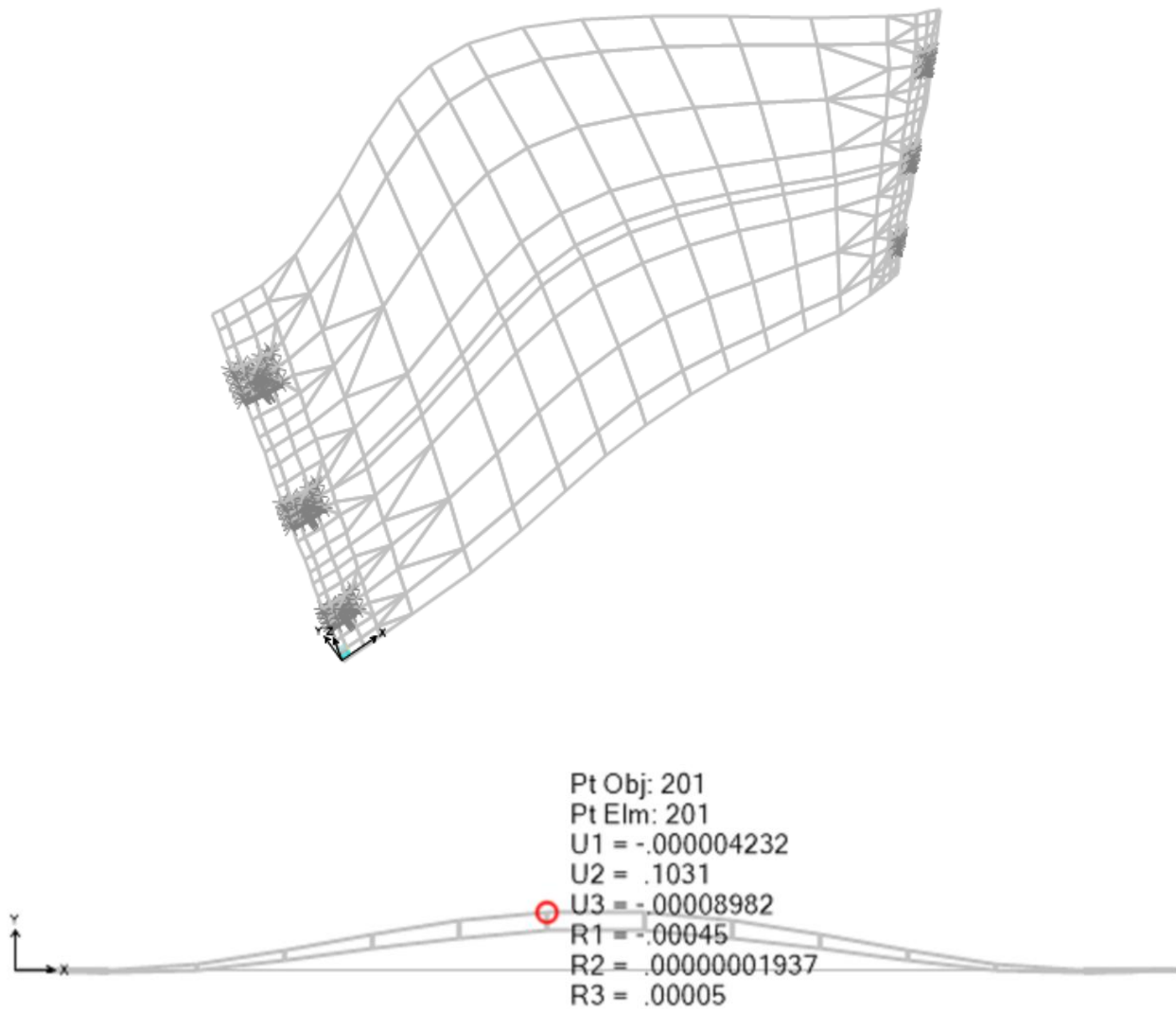


- Di seguito la mappa delle tensioni principali di trazione nei pressi del morsetto quando l'azione di spinta è di 1kN/m. In questo caso si attingono al massimo 26 MPa.



### 8.2.3. Deformazioni

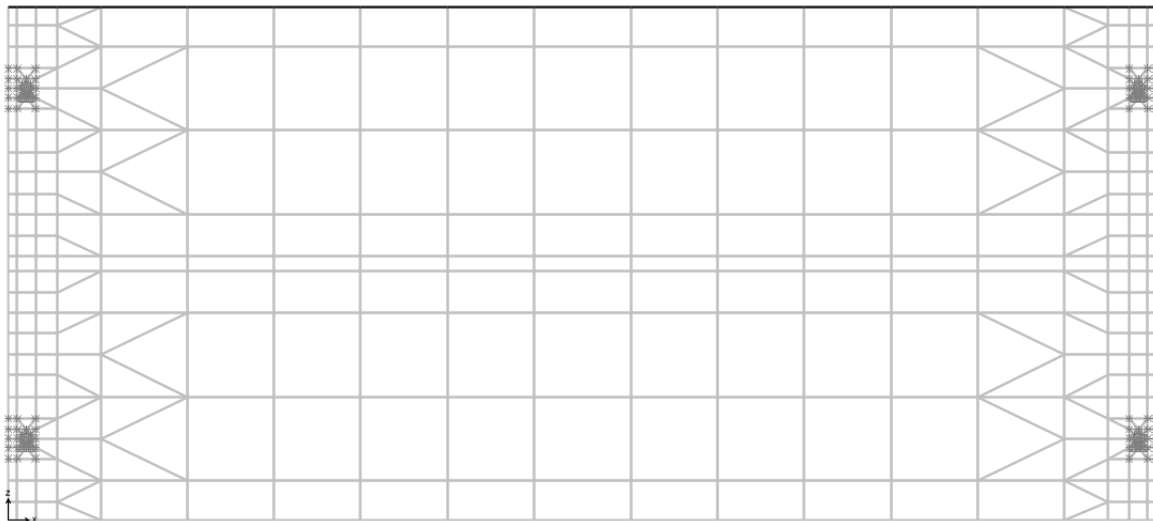
- Si riporta in ultimo la deformata quando l'azione di spinta fuori del piano è di 2kN/m



In corrispondenza di  $u_2$  si ha la massima deflessione che corrisponde a 0,10mm

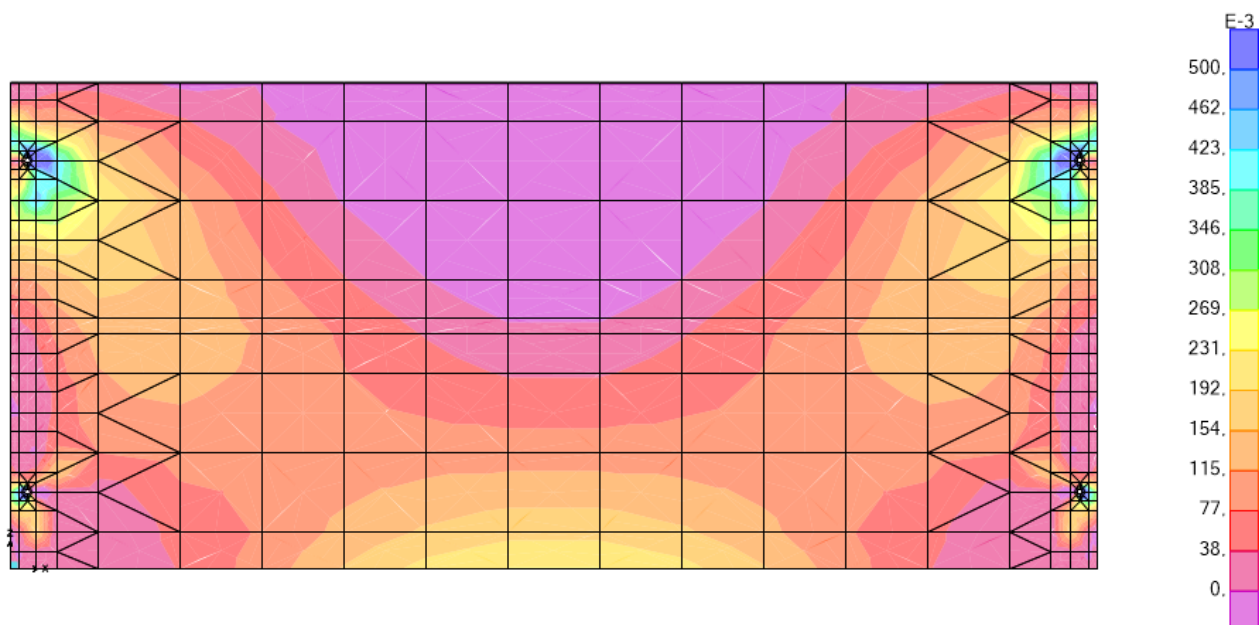
## 8.3. Peso proprio

### 8.3.1. Condizione indeformata e disposizione della mesh



### 8.3.2. Sollecitazioni

Di seguito la mappa delle tensioni principali di trazione nel caso in cui la lastra di vetro è soggetta al peso proprio. Le sollecitazioni sono 100 volte più piccole rispetto al caso precedente. Infatti in prossimità dei morsetti superiori si attinge la tensione positiva di 0,5MPa palesando di fatto una condizione meno preoccupante rispetto alla precedente.



## 9. VERIFICHE DI RESISTENZA

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

Lo SLE considera la struttura integra sollecitata dai valori di servizio delle azioni. In genere viene valutata la deformabilità degli elementi, che deve essere limitata così da non pregiudicare la funzionalità della costruzione (non solo la funzionalità strutturale).

Gli SLU considerano la struttura integra, sollecitata dai valori estremi delle azioni esterne, e si compongono di: (1) SLU per rottura del vetro, (2) SLU per rottura di un materiale in composizione con il vetro, (3) SLU per crisi dell'interfaccia di un collegamento. La verifica dello SLU per rottura del vetro si effettua controllando che, in ogni punto, la tensione sollecitante sia inferiore alla tensione resistente del vetro. La massima tensione principale di trazione deve essere confrontata con la resistenza di progetto  $f_{g;d}$  del materiale. La verifica alla SLU per rottura del materiale in composizione riguarda principalmente gli intercalari e gli incollaggi. Condizione per il soddisfacimento di questo SLU è che in tutti i punti la tensione sollecitante sia inferiore alla tensione resistente del materiale stesso.

### 9.1. VERIFICHE ALLO SLU

In genere le verifiche strutturali vanno svolte secondo il criterio di Galileo, della massima tensione principale di trazione.

Il valore di progetto (di calcolo) della resistenza a trazione per flessione del vetro  $f_{g;d}$ , da considerare per le verifiche agli SLU e allo SLC, può essere assunto della forma:

$$f_{g;d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot k_{\text{ed}} \cdot k_{\text{sf}} \cdot \lambda_{\text{gA}} \cdot \lambda_{\text{gl}} f_{g;k}}{R_M \gamma_M} + \frac{k'_{\text{ed}} k_v \cdot (f_{b;k} - f_{g;k})}{R_{M,v} \gamma_{M,v}}$$

Dove:

- $f_{g;k}$ : valore caratteristico nominale della tensione resistente a trazione per flessione del vetro ricotto (quindi prima degli eventuali trattamenti termici di rafforzamento). Nei casi comuni vale la UNI EN 572-1 per la quale  $f_{g;k} = 45 \text{ N/mm}^2$ . Nel caso in cui il valore nominale di  $f_{g;k}$  sia inferiore al succitato valore, il vetro non rientra nei materiali considerati dalle presenti Istruzioni.
- $k_{\text{mod}}$ : fattore riduttivo dipendente dalla durata del carico e dalle condizioni ambientali (di temperatura e umidità). I valori di  $k_{\text{mod}}$  per alcuni tempi di carico (azioni costanti nel tempo) sono indicati nella terza colonna della Tabella 2.2.

Tabella 2.2. Fattore  $k_{mod}$  ricavato dalla teoria LEFM per  $f_g = 45$  MPa,  $v_0 = 0.0025$  m/s e  $n = 16$ , per vari valori  $t_L$  della durata del carico. Confronto con i valori riportati nella prEN16612-2013.

Durata $t_L$	$k_{mod}$ LEFM	$k_{mod}$ prEN16612	Esempio
3÷5 s	0.91-0.88	1.00	vento (raffica)
30 s	0.78	0.89	transito temporaneo
10÷15 min	0.65÷0.64	0.74÷0.72	vento (cumulato)
11 ore	0.50	0.57	variazioni temperatura giornaliera
1 settimana	0.42	0.48	neve (1 settimana)
3 mesi	0.36	0.41	neve (3 mesi)
6 mesi	0.35	0.39	variazioni temperatura stagionale
50 anni	0.26	0.29	Peso proprio

- $K_{ed}$  e  $k'_{ed}$ : fattori riduttivi della tensione resistente, rispettivamente per vetro ricotto e presollecitato, dipendenti dalla finitura del bordo dell'elemento di vetro o foro e dalla distanza  $d$  dal bordo del punto ove  $f_g/d$  viene calcolata, da applicarsi ad elementi con bordo in trazione (es. travi, pinne, ecc.). Per  $d > 5s$  ( $s$  = spessore lastra), oppure per lastre inflesse, si assume  $k_{ed}=k'_{ed}=1$ . Per  $d \leq 5s$ , tali coefficienti dovrebbero essere calcolati con uno studio teorico e/o sperimentale *ad hoc*. A titolo di riferimento, la Tabella 7.3 riporta alcuni valori dei coefficienti di bordo, stimati in alcuni casi elementari.

Tabella 7.3. Valori orientativi dei coefficiente  $k_{ed}$  e  $k'_{ed}$  per verifiche in prossimità del bordo di elementi di vetro e fori, nel caso di elementi con bordo in trazione.

Tipo di vetro	Valori* di $k_{ed}$ e $k'_{ed}$ in corrispondenza di bordo**							
	Tagliato		Sfilettato		Greggio		Lucidato***	
	$k_{ed}$	$k'_{ed}$	$k_{ed}$	$k'_{ed}$	$k_{ed}$	$k'_{ed}$	$k_{ed}$	$k'_{ed}$
Ricotto	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
Indurito	da evitare		da evitare		0.8	0.8	0.8	0.8
Temperato termicamente	da evitare		da evitare		0.8	0.8	0.8	0.8
Temperato chimicamente	da evitare		da evitare		0.6	0.7	0.6	0.7
Ricotto stampato	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
(*) Valori da utilizzarsi per verifiche in zone a distanza $d < 5s$ dal bordo o da fori ( $s$ = spessore lastra). Per $d > 5s$ e per lastre inflesse si assume $k_{ed} = 1$ .								
(**) Le lavorazioni ai bordi sono intese ai sensi della UNI EN ISO 12543-5.								
(***) Nel caso di travi e pinne di vetro dove le trazioni massime sono in corrispondenza delle coste, si raccomanda di utilizzare bordi lucidati a profilo liscio curvo.								

- $k_{sf}$  = fattore riduttivo della tensione resistente, dipendente dal profilo superficiale del vetro. Il valore di  $k_{sf}$  deve essere calcolato con uno studio teorico e/o sperimentale *ad hoc*, in accordo con le procedure di cui al capitolo 9. Alcuni valori di riferimenti sono raccolti nella Tabella 7.4.

Tabella 7.4. Valori orientativi dei coefficiente  $k_{sf}$  per i vari profili superficiali del vetro.

Vetro	$k_{sf}$	
	Nessun trattamento <sup>(2)</sup>	Sabbiato
Vetro float	1	0.6
Vetro tirato	1	0.6
Vetro smaltato (float o tirato) <sup>(1)</sup>	(1)	(0.6)
Vetro stampato	0.75	0.45
Vetro smaltato stampato <sup>(1)</sup>	(0.75)	(0.45)
Vetro lustro armato	0.75	0.45
Vetro stampato armato	0.6	0.36
(1) Questi tipi di vetro non sono generalmente disponibili come vetri ricotti, ma è comunque necessario utilizzare il valore di $k_{sf}$ per il calcolo della resistenza del vetro pre-sollecitato		
(2) Per vetri acidati, è necessario utilizzare i valori di $k_{sf}$ relativi a "Nessun trattamento"		

- $\lambda_{gA}$  = fattore di scala, che considera l'area sottoposta alla massima tensione sollecitante. Questo coefficiente tiene conto che, per ragioni statistiche, è più grande la probabilità di riscontrare difetti in un'area più grande che in un'area più piccola. In mancanza di ulteriori approfondimenti si può utilizzare l'espressione:

$$\lambda_{gA} = \left( \frac{0.24 \text{ m}^2}{k A} \right)^{1/7}, \text{ con } 0.75 \leq \lambda_{gA} \leq 1,$$

Dove  $A$  rappresenta l'area totale della lastra soggetta a trazioni, mentre il coefficiente  $k$  che ne definisce l'area efficace è riportato nella Tabella 7.5 per le più ricorrenti condizioni di vincolo. Nel caso in cui le verifiche di resistenza vengano effettuate a una distanza dal bordo  $d < 5 s$  ( $s$  = spessore lastra), si assume  $\lambda_{gA} = 1$ .

Tabella 7.5. Valori indicativi del coefficiente  $k$  per la definizione dell'area efficace in lastre inflesse da carichi ortogonali al piano (relativi al parametro di Weibull  $m = 7$ ).

Condizioni di vincolo	$k$
Lastra rettangolare vincolata in modo continuo su 4 bordi	0.145
Lastra rettangolare vincolata in modo continuo su 2 bordi	0.054
Lastra rettangolare incastrata in un bordo; carico distribuito uniformemente	0.013
Lastra rettangolare incastrata in un bordo; carico distribuito su una linea parallela al bordo incastrato	0.019
Lastra rettangolare vincolata su 4 punti in prossimità degli angoli; carico uniformemente distribuito	0.071



- $\lambda_{gl}$  = fattore di scala per le sollecitazioni sul bordo, da applicarsi ad elementi con bordo *specificatamente* in trazione (es. travi di costa, pinne, ecc.). Tale coefficiente tiene conto che, da un punto di vista statistico, la lunghezza del bordo è penalizzante. Per verifiche a distanza  $d > 5 s$  ( $s$  = spessore lastra), o nel caso di piastre inflesse da carichi ortogonali al piano medio, si assume convenzionalmente  $\lambda_{gl} = 1$ . In mancanza di ulteriori approfondimenti, per verifiche ad una distanza  $d < 5 s$  dal bordo si possono assumere i seguenti valori

$$\lambda_{gl} = \left( \frac{0.1667 \cdot 0.45 \text{ m}}{k_b l_b} \right)^{1/5} \leq 1 \text{ per bordi lucidati; } \lambda_{gl} = \left( \frac{0.0741 \cdot 0.45 \text{ m}}{k_b l_b} \right)^{1/12.5} \leq 1 \text{ per bordi molati.}$$

In queste espressioni  $l_b$  rappresenta la lunghezza totale del bordo soggetto a trazione. Il coefficiente  $k_b$  dipende dalla distribuzione delle tensioni nel bordo: in mancanza di più precisi approfondimenti, si possono utilizzare i valori della successiva Tabella 7.6.

Tabella 7.6. Coefficienti  $k_b$  per il calcolo dell'effetto scala in prossimità del bordo.

Finitura del bordo	Distribuzione delle tensioni lungo il bordo		
	costante	parabolica	triangolare
Bordo greggio	$k_b = 1$	$k_b = 0.2434$	$k_b = 0.0741$
Bordo lucidato	$k_b = 1$	$k_b = 0.3694$	$k_b = 0.1667$

- $f_b/k$  = valore caratteristico della resistenza a flessione del vetro a seguito di un trattamento di rafforzamento. In mancanza di dati specifici, si possono assumere i valori di Tabella 7.7, che devono es-sere comprovati mediante delle prove di accettazione dei materiali.

Tabella 7.7. Resistenza caratteristica a flessione del vetro a seguito di un trattamento di rafforzamento (da eseguirsi nel rispetto delle procedure indicate nel Capitolo 9).

Tipo di vetro	Valori della resistenza caratteristica a flessione $f_{b,k}$ per vetro presollecitato [MPa]		
	Vetro temperato termicamente (UNI EN 12150), vetro temperato termicamente e sottoposto a heat soak test (UNI EN 14179)	Vetro indurito termicamente (UNI EN 1863)	Vetro indurito chimicamente* (UNI EN 12337)
Vetro float o tirato	120	70	150
Vetro stampato	90	55	100
Vetro smaltato (float o tirato)	75	45	/
Vetro smaltato stampato	75	45	/
(*) Data la difficoltà del processo di tempera chimica, risulta di particolare importanza che il materiale venga controllato e qualificato.			



- $k_v$  = fattore riduttivo dell'incremento di resistenza a trazione del vetro prodotto mediante un trattamento di presollecitazione (tempera, indurimento), da assumere nullo nel caso di vetro ricotto (assenza di rafforzamento). Il coefficiente  $k_v$  deve essere calcolato con uno studio teorico e/o sperimentale ad hoc. Valori orientativi di  $k_v$  sono riportati in Tabella 7.8.

Tabella 7.8. Valori orientativi del fattore riduttivo dell'incremento di resistenza a trazione del vetro conseguente ad un trattamento di presollecitazione.

Trattamento di presollecitazione	$k_v$
Nessun trattamento	0
Trattamento termico con processo orizzontale	1
Trattamento termico con processo verticale	0.60
Indurimento chimico*	0.95
(*) Il coefficiente indicato potrà essere utilizzato solo nel caso in cui il vetro indurito termicamente sia controllato e qualificato secondo le procedure indicate nella Sezione 9.	

- $\gamma_M$  = coefficiente parziale per la resistenza a trazione per flessione del vetro ricotto, comprensivo delle incertezze del modello e della geometria, relativo allo SLU. Per questo coefficiente, si possono utilizzare i valori riportati nella Tabella 7.9.

Tabella 7.9. Fattori parziali del vetro ricotto e del vetro presollecitato.

	Vetro ricotto*	Vetro presollecitato*
Coefficienti parziali	$\gamma_M = 2.50$	$\gamma_{M,v} = 1.35$
(*) Valori per verifiche allo SLU. Per quanto riguarda lo SLC, per le porzioni di vetro rimaste integre si potrà applicare i coefficienti relativi allo SLU.		

- $R_{M,v}$  = fattore riduttivo che consente di passare dalla classe 1 alla classe 2. Per questo coefficiente si possono utilizzare i valori riportati nella Tabella 7.10.

All'interno della stessa categoria, la scelta della classe di verifica più o meno restrittiva dipende dall'importanza dell'opera, dalla pericolosità in caso di collasso del vetro, e del fatto che siano previste/prevedibili contromisure immediate di salvaguardia che riducano le conseguenze del collasso (puntellature, protezioni, recinzioni). Un elemento è considerato verticale se l'angolo che il suo piano forma con la verticale è minore di  $15^\circ$ . Un elemento che non ricade in questa definizione è considerato orizzontale. La sigla NV indica "Nessuna Verifica". Quando la rottura del vetro presenta rischi trascurabili per danni e perdite di vite umane, la verifica post-rottura può essere omessa.

Tipo	Classe per verifica pre-rottura*	Classe per verifica post-rottura
Elementi verticali** vincolati in modo continuo sui bordi	1	1/NV***
Elementi verticali** con vincoli puntuali	2/1	1/NV***
Coperture orizzontali**	2	2/1
Parapetti con pericolo di caduta	2	2/1
Pinne (o coste) di rinforzo	2	2/1
Solai, travi portanti	2	2

Tabella 7.10. Fattori riduttivi  $R_M$  dei coefficienti parziali per verifiche in prima o seconda classe.

Classe	Vetro ricotto	Vetro presollecitato
prima	$R_M = 0.7$	$R_{M,v} = 0.9$
seconda	$R_M = 1$	$R_{M,v} = 1$

La verifica di resistenza allo SLU andrà effettuata confrontando la massima tensione principale di trazione con la resistenza di progetto  $fg;d$ .

E' importante notare che, essendo il fattore  $kmod$  dipendente dalla durata di applicazione del carico, la resistenza di progetto varia a seconda del tipo di carico.

La verifica si ritiene soddisfatta se la somma dei rapporti tra tensione massima e valore resistente calcolato in relazione al tempo di applicazione del carico è minore dell'unità.

$$\frac{\sigma_{\max}^G}{f_{g;d}^G} + \frac{\sigma_{\max}^q}{f_{g;d}^q}$$

### 9.1.1. Verifica SLU per azione antropica

Si calcola la resistenza a trazione per flessione del vetro in accordo con la condizione di carico. Di seguito un resoconto:

#### GEOMETRIA

Parapetti con pericolo di caduta
----------------------------------

Larghezza della lastra

**B**

2120 mm

Altezza della lastra

**H**

945 mm

## TIPO DI VINCOLO E TIPO DI CARICO

Lastra rettangolare vincolata su 4 punti in prossimità degli angoli; carico uniformemente distribuito

Piastra prevalentemente inflessa

Bordo molato

## TEMPO DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DELLA RESISTENZA

Tempo di riferimento

**tl**

30s

Norma di riferimento

EN16612

*ES: Transito temporaneo*

## COEFFICIENTI RIDUTTIVI

Fattore riduttivo per durata del carico	<b>k<sub>mod</sub></b>	0,780
Fattore riduttivo per finitura del bordo	<b>k<sub>ed</sub></b>	1,000
Fattore riduttivo per finitura del bordo	<b>k<sub>ed'</sub></b>	1,000
Fatt. riduttivo per via del profilo superficiale	<b>k<sub>sf</sub></b>	1,000
Fattore per area efficace	<b>k</b>	0,071
Fattore di scala	<b>λ<sub>gA</sub></b>	0,750
Fattore di scala sul bordo	<b>λ<sub>gA</sub></b>	1,000
Fattore di scala sollecitazioni sul bordo	<b>λ<sub>gl</sub></b>	1,000
Fatt. riduttivo dell'incremento di resistenza	<b>k<sub>v</sub></b>	1,000
Coef. parziale di sicurezza per la resist. a traz.	<b>γ<sub>M</sub></b>	1,350
Fatt. riduttivo per ver. in prima o seconda classe	<b>RM;v</b>	1,000

## RESISTENZE CARATTERISTICHE

Tens. Resistente a trazione per flessione	<b>f<sub>g,k</sub></b>	45,00 N/mm <sup>2</sup>
Tens. Resistente a trazione per flessione a seguito di un trattamento di rafforzamento	<b>f<sub>b,k</sub></b>	70,00 N/mm <sup>2</sup>

## RESISTENZA DI PROGETTO

Condizione di verifica

**SLU**

Classe per verifica

Pre-rottura

**2**

Tens. Res. a trazione per flessione di calcolo

**f<sub>g,d</sub>**

38,02 N/mm<sup>2</sup>

Tens. Res. a trazione per flessione di calcolo sul  
bordo o in prossimità dei fori  $f_{g,d}$  38,02 N/mm<sup>2</sup>

- Quando l'azione antropica è di 2kN/m, in accordo a quanto prescritto dalle NTC08 in funzione dei luoghi suscettibili di affollamento, la verifica NON E' SODDISFATTA, infatti in prossimità dei morsetti superiori sia nel caso a due morsetti che nel caso a 3, esiste una discreta porzione di vetro in cui si attinge una tensione superiore a 38MPa (limite di resistenza a trazione per flessione del materiale).
- Quando l'azione antropica di spinta è di 1kN/m la VERIFICA E' SODDISFATTA, Infatti sia nel caso a due morsetti che a tre la massima tensione di trazione è di 29 MPa. È importante osservare che la spinta di 1kN/m non è lineare con quanto prescritto dalle NTC08 anche se rappresenta un'azione più aderente a quella a cui potrebbe essere sottoposta la balaustra.

### 9.1.2. Verifica SLU per peso proprio

#### GEOMETRIA

Parapetti con pericolo di caduta

Larghezza della lastra

B

2120 mm

Altezza della lastra

H

945 mm

#### TIPO DI VINCOLO E TIPO DI CARICO

Lastra rettangolare vincolata su 4 punti in prossimità degli angoli; carico uniformemente distribuito

Piastra prevalentemente soggetta a sforzo normale

Bordo molato

#### TEMPO DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DELLA RESISTENZA

Tempo di riferimento

$t_l$

50anni

Norma di riferimento

EN16612

ES: Peso proprio

## COEFFICIENTI RIDUTTIVI

Fattore riduttivo per durata del carico	<b>k<sub>mod</sub></b>	0,260
Fattore riduttivo per finitura del bordo	<b>k<sub>ed</sub></b>	0,800
Fattore riduttivo per finitura del bordo	<b>k<sub>ed'</sub></b>	0,800
Fatt. riduttivo per via del profilo superficiale	<b>k<sub>sf</sub></b>	1,000
Fattore per area efficace	<b>k</b>	0,071
Fattore di scala	<b>λ<sub>gA</sub></b>	0,750
Fattore di scala sul bordo	<b>λ<sub>gA</sub></b>	1,000
Fattore di scala sollecitazioni sul bordo	<b>λ<sub>gl</sub></b>	0,602
Fatt. riduttivo dell'incremento di resistenza	<b>k<sub>v</sub></b>	1,000
Coef. parziale di sicurezza per la resist. a traz.	<b>γ<sub>M</sub></b>	1,350
Fatt. riduttivo per ver. in prima o seconda classe	<b>RM;v</b>	1,000

## RESISTENZE CARATTERISTICHE

Tens. Resistente a trazione per flessione	<b>f<sub>g,k</sub></b>	45,00 N/mm <sup>2</sup>
Tens. Resistente a trazione per flessione a seguito di un trattamento di rafforzamento	<b>f<sub>b,k</sub></b>	70,00 N/mm <sup>2</sup>

## RESISTENZA DI PROGETTO

Condizione di verifica	<b>SLU</b>	
Classe per verifica	Pre-rottura	<b>2</b>
Tens. Res. a trazione per flessione di calcolo	<b>f<sub>g,d</sub></b>	25,02 N/mm <sup>2</sup>
Tens. Res. a trazione per flessione di calcolo sul bordo o in prossimità dei fori	<b>f<sub>g,d</sub></b>	17,95 N/mm <sup>2</sup>

- In questo caso la verifica è ampiamente soddisfatta in quanto la massima sollecitazione di trazione presente sul bordo dell'elemento attinge gli 0,5MPa, ben lontana dal valore limite di 17,95 MPa.

Si può affermare che la verifica globale allo stato limite ultimo non è soddisfatta per i motivi riportati nei paragrafi precedenti.

## 9.2. VERIFICHE ALLO SLE

Per quanto riguarda le verifiche agli stati limite di esercizio, in generale gli spostamenti massimi tollerabili dagli elementi vetrati devono essere valutati in base alla specifica applicazione.

Tabella 7.11 Valori della freccia di progetto per vincolo lineare.

Vetro singolo (monolitico o stratificato)		Vetrata isolante		No. lati vincolati
Centro lastra	Bordo lastra	Centro lastra	Bordo lastra	
$1/60^{(1)}$ di $L_{\min}$ ; < di 30 mm <sup>(3)</sup>		$1/60^{(1)}$ di $L_{\min}$ ; < di 30 mm <sup>(3)</sup>	$1/200^{(2)}$ di $L_{\min}$ ; < di 12 mm <sup>(4)</sup>	4
	$1/100^{(2)}$ di $L_{\inf}$ ; < di 50 mm <sup>(3)</sup>		$1/150^{(2)}$ di $L_{\inf}$ ; < di 50 mm <sup>(3)</sup>	3
	$1/100^{(2)}$ di $L_{\inf}$ ; < di 50 mm <sup>(3)</sup>		$1/150^{(2)}$ di $L_{\inf}$ ; < di 50 mm <sup>(3)</sup>	2

Tabella 7.12 Valori della freccia di progetto per vincolo puntuale.

Vetro singolo (monolitico o stratificato)	Vetrata isolante	$L_{\inf}^{(3)}$
$1/100^{(1)}$ dell' interasse dei punti di vincolo $L_{\inf}$ e < di 50 mm <sup>(2)</sup>	$1/150^{(1)}$ dell' interasse dei punti di vincolo $L_{\inf}$ e < di 50 mm <sup>(2)</sup>	Figura 7.1-a
$1/50$ della lunghezza a sbalzo $L_{\inf}$ e < di 50 mm <sup>(2)</sup>	$1/75$ della lunghezza a sbalzo $L_{\inf}$ e < di 50 mm <sup>(2)</sup>	Figura 7.1-b

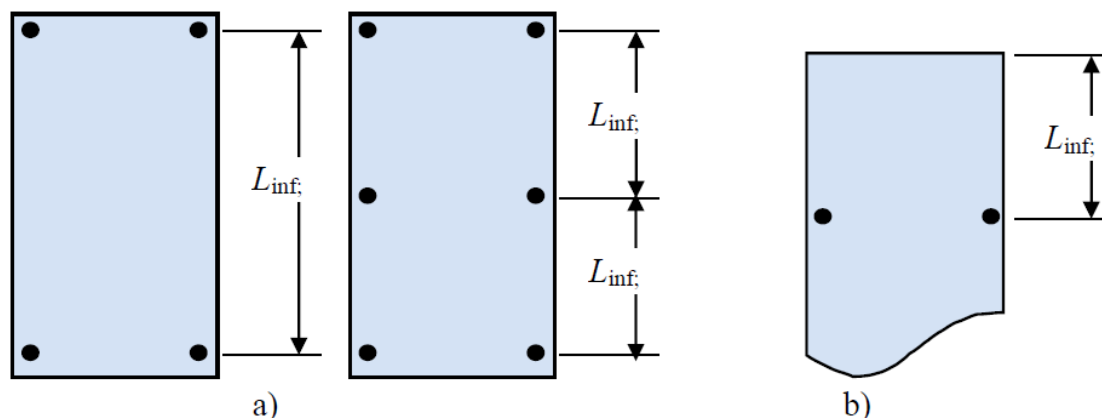


Tabella 7.13 Valori indicativi degli spostamenti massimi consentiti – Casi particolari.

Tipo di vetro	Spostamento massimo su due appoggi consecutivi a distanza $d$	Massimo spostamento assoluto ammesso
Vetro singolo - solaio	$d/500$	5 mm
Vetro singolo – parapetto incastrato al piede <sup>(1)</sup>	$d/50$	25 mm <sup>(2)</sup>
<sup>(1)</sup> In questo caso $d$ indica l'altezza del parapetto <sup>(2)</sup> da BS 6180:2011 §8.5.1		

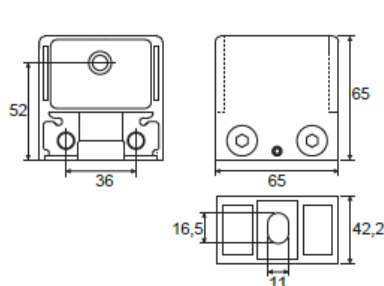
Quando un elemento è soggetto a due (o più) generiche azioni, la deflessione in un punto allo Stato Limite di Esercizio viene valutata sulla base del principio di sovrapposizione degli effetti come la somma delle deflessioni, in quello stesso punto, dovute alle diverse azioni.

Per la condizione più vincolate si ottiene una freccia limite di:

$2000/500=4,00\text{mm}$  la verifica allo stato limite di esercizio è soddisfatta perché dal modello agli elementi finiti si ricava come massimo valore di deflessione: 0,16mm.

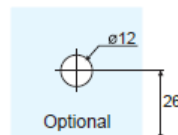
## 10. VERIFICA SULLA STABILITA' DEI MORSETTI

Si utilizzerà il morsetto V-043 Metalglass in acciaio inox. La verifica in questa fase non si concentra sulla resistenza del morsetto stesso bensì sulla resistenza dell'ancoraggio, ossia bullone e tassello.



### V-043

Morsetto per parapetti in acciaio inox AISI 316, perno di sicurezza rimovibile compreso.  
*Clamp in stainless steel AISI 316 for glass railings, removable safety pin included.*  
*Klemmbeschlag aus Edelstahl AISI 316 für Glasgeländer, optional Sicherheitsstift inkl.*

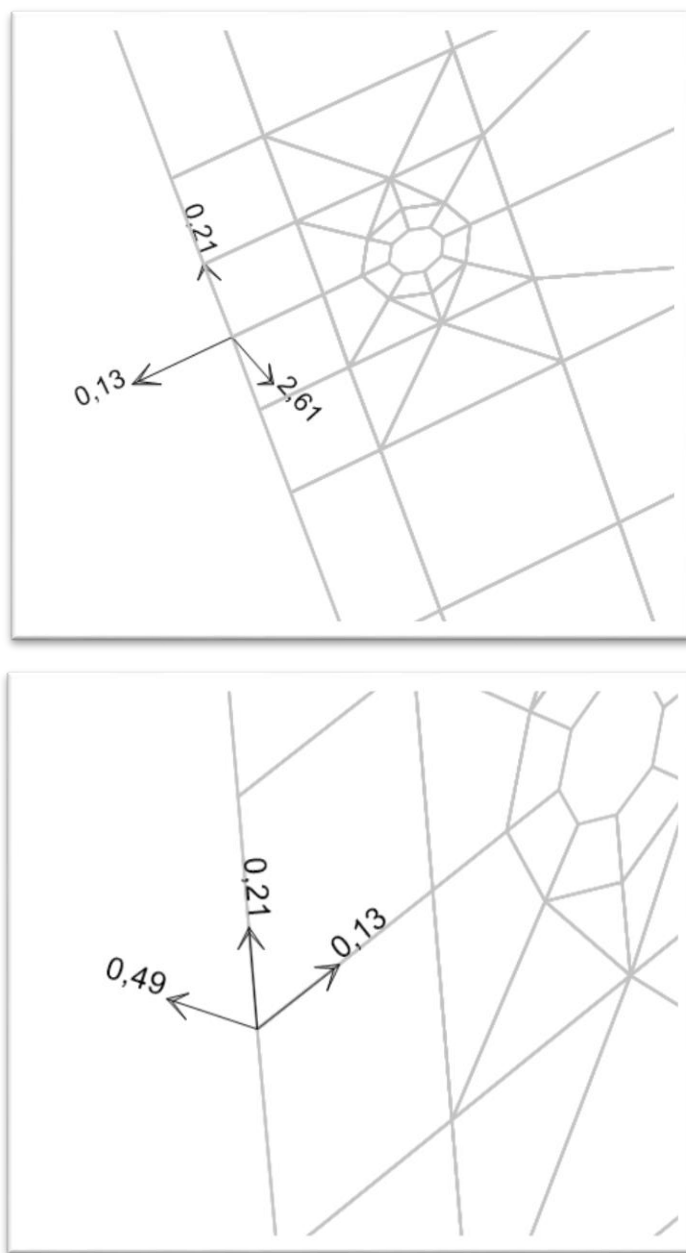


17,52-21,52

Di seguito le sollecitazioni trasmesse al bullone e al tassello a seguito della spinta di 2kN/m per il caso di 2 pinze per lato, rispettivamente per il morsetto in alto e quello in basso; le forze risultanti sono espresse in kN.

Per maggiore verifica si calcola la forza risultante sul pannello  $2,12\text{m} \times 2\text{kN/m} = 4,24\text{kN}$ ; pari a 2,12kN per lato. Se si sommano i vettori nella direzione della spinta si ottiene  $2,61 - 0,49 = 2,12\text{kN}$ . Per cui il modello è staticamente corretto.

Si utilizzerà la sollecitazione più alta (2,61kN) e si verifica a taglio il bullone, in questo caso si utilizzano bulloni M12.





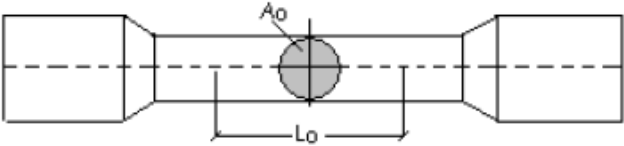
## 10.1. Caratteristiche materiali carpenteria metallica

Acciai laminati				
Norma e tipo di acciaio	Spessore nominale della membratura			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
EN 10025-2	$f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{tk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{tk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>S 235</b>	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	420	550

La resistenza di calcolo  $f_{yd}$  si determina:  $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_M$

Coefficiente	Campo di impiego	Valore
$\gamma_{M0}$	Resistenza delle Sezioni di Classe 1-2-3-4	1,05
$\gamma_{M1}$	Resistenza all'instabilità delle membrature	1,05
$\gamma_{M1}$	Resistenza all'instabilità delle membrature di ponti stradali e ferroviari	1,10
$\gamma_{M2}$	Resistenza, nei riguardi della frattura, delle sezioni tese (indebolite dai fori)	1,25

Valori di $f_{yd}$						
	$f_{yk}$	235	275	355	420	460
	$\epsilon_{syd}$ %	0,11	0,13	0,17	0,20	0,22
$\gamma_{M0}$	1,05	223,81	261,90	338,10	400,00	438,10
$\gamma_{M1}$	1,05	223,81	261,90	338,10	400,00	438,10
$\gamma_{M1}$	1,10	213,63	250,00	322,72	381,81	418,18
$\gamma_{M2}$	1,25	188,00	220,00	284,00	336,00	368,00

Allungamento minimo percentuale					
 <p style="text-align: center;"><math>L_0 = 5,65\sqrt{A_0}</math></p>					
Spessore nominale in mm					
Designazione	>3 <40	>40 <63	>63 <100	>100 <150	>150 <250
<b>S235JR</b>	26	25	24	22	21
S275JR	22	21	20	18	17
S355JR	22	21	20	18	17

## 10.2. Caratteristiche meccaniche bulloneria

I bulloni utilizzati nelle giunzioni devono appartenere alle sotto indicate classi della norma UNI EN ISO 898-1:2001, associate nel modo indicato nella tabella sottostante (D.M:14.01.2008):

Carichi di rottura minimi<sup>3)</sup> – per filettatura metrica ISO a passo fine

Filettatura	Sezione resistente nom. $A_s$ mm <sup>2</sup>	Classe di resistenza									
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
		Carico di rottura minimo ( $A_s \cdot R_m$ ) N									
M 8 x 1	39,2	12 900	15 700	16 500	19 600	20 400	23 500	31 360	35 300	40 800	47 800
M10 x 1	64,5	21 300	25 800	27 100	32 300	33 500	38 700	51 600	58 100	67 100	78 700
M10 x 1,25	61,2	20 200	24 500	25 700	30 600	31 800	36 700	49 000	55 100	63 600	74 700
M12 x 1,25	92,1	30 400	36 800	38 700	46 100	47 900	55 300	73 700	82 900	95 800	112 400
M12 x 1,5	88,1	29 100	35 200	37 000	44 100	45 800	52 900	70 500	79 300	91 600	107 500
M14 x 1,5	125	41 200	50 000	52 500	62 500	65 000	75 000	100 000	112 000	130 000	152 000
M16 x 1,5	167	55 100	66 800	70 100	83 500	86 800	100 000	134 000	150 000	174 000	204 000
M18 x 1,5	216	71 300	86 400	90 700	108 000	112 000	130 000	179 000	—	225 000	264 000
M20 x 1,5	272	89 000	109 000	114 000	136 000	141 000	163 000	226 000	—	283 000	332 000
M22 x 1,5	333	110 000	133 000	140 000	166 000	173 000	200 000	276 000	—	346 000	406 000
M24 x 2	384	127 000	154 000	161 000	192 000	200 000	230 000	319 000	—	399 000	469 000
M27 x 2	496	164 000	198 000	208 000	248 000	258 000	298 000	412 000	—	516 000	605 000
M30 x 2	621	205 000	248 000	261 000	310 000	323 000	373 000	515 000	—	646 000	758 000
M33 x 2	761	251 000	304 000	320 000	380 000	396 000	457 000	362 000	—	791 000	928 000
M36 x 3	865	285 000	346 000	363 000	432 000	450 000	519 000	718 000	—	900 000	1 055 000
M39 x 3	1030	340 000	412 000	433 000	515 000	536 000	618 000	855 000	—	1 070 000	1 260 000

Classe di resistenza	Temperatura				
	+ 20° C	+ 100° C	+ 200° C	+ 250° C	+ 300° C
	Carico unitario di snervamento, $R_{eL}$ o carico unitario di scostamento dalla proporzionalità, $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]				
5.6	300	270	230	215	195
8.8	640	590	540	510	480
10.9	940	875	790	745	705
10.9	940	—	—	—	—
12.9	1100	1020	925	875	825

Tabella 11.3.XII.a

	Normali			Ad alta resistenza	
Vite	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
Dado	4	5	6	8	10

Tabella 11.3.XII.b

Classe	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	300	480	649	900
$f_{tb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400	500	600	800	1000

Le verifiche si riferiscono alla condizione più gravosa.

### 10.3. Verifica dei bulloni di ancoraggio

Sollecitazioni massime	
$F_{v,Ed}$ (N)	2610
$F_{t,Ed}$ (N)	130

Bulloni	
Classe	4,6
d (mm)	12
$\gamma_{M2}$	1,25
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240
$f_{tb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400
$A_n$ (mm <sup>2</sup> )	113
$A_{res}$ (mm <sup>2</sup> )	84

Piastra di collegamento	
Acciaio	S235
t (mm)	3
$\gamma_{M2}$	1,25
$d_0$ (mm)	13
$f_{tk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	360

Verifica di resistenza con formula 4.2.65

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1 \quad \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}}$$

0,166

$F_{v,Rd}$ (N)	16128
$F_{t,Rd}$ (N)	24192

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}}$$

0,005

Verifica a rifollamento con formula 4.2.61

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \text{ con } F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

Tipo di unione: Esposta a fenomeni corrosivi o ambientali				
$e_1$ (mm)	30	15,6	$\leq e_1 \leq$	52
$e_2$ (mm)	30	15,6	$\leq e_2 \leq$	52

$\alpha = \min \{e_1/(3d_0) ; f_{tb}/f_{tk} ; 1\}$  per bulloni di bordo // al carico applicato

$\alpha = \min \{p_1/(3d_0)-0,25 ; f_{tb}/f_{tk} ; 1\}$  per bulloni interni // al carico applicato

$k = \min \{2,8e_2/d_0-1,7 ; 2,5\}$  per bulloni di bordo \_|\_ al carico applicato

$k = \min \{1,4p_2/d_0-1,7 ; 2,5\}$  per bulloni interni \_|\_ al carico applicato

$\alpha_{MIN}$	0,519
$k_{MIN}$	1,746

$F_{b,Rd}$ (N)	9400
----------------	------




$$\frac{F_{v, Ed}}{F_{b, Rd}}$$

0,278

LA VERIFICA E' SODDISFATTA

## 10.4. Verifica estrazione dei fissaggi

Il valore di estrazione rappresenta la sollecitazione massima di trazione da esercitare in direzione assiale al "fissaggio per estrarre quest'ultimo dalla sottostruttura. Il valore dipende dal "fissaggio e dalla sottostruttura. Si utilizzano degli ancoranti meccanici del tipo tassello in acciaio.

	Ancoranti meccanici per carichi leggeri		
	tassello in ottone	tassello in ottone ad espansione guidata	tassello in acciaio
			
	p. 370	p. 372	p. 373
Benestare Tecnico Europeo			
marcatura CE			
carico max di trazione (kN)	0,45+3,45	6+22 <sup>6)</sup>	7,5+16,5 <sup>6)</sup>
carico max di taglio (kN)	0,30+3,50		
diametri disponibili (mm)	M4+M12	M6+M10	M6+M12
calcestruzzo	■	■	■
muratura piena	■	■	■

Il carico massimo di trazione è minore di  $F_{t,ed} = 130N$ , per cui la verifica si ritiene soddisfatta.

## 11. POSA DELLE VETRATE

La posa delle vetrate deve essere eseguita in conformità alla prEN 12488:2013 ed alle eventuali prescrizioni del produttore. Telai e sistemi di fissaggio non devono compromettere le caratteristiche e le prestazioni della vetrata.

In relazione alla sicurezza, devono essere rispettate, anche tutte le altre prescrizioni emanate dalle Autorità competenti (Vigili del fuoco, ecc.) o previste dalle norme di riferimento pertinenti. Le vetrate trasparenti poste in luoghi di passaggio, a rischio di impatto per la loro scarsa visibilità, devono essere segnalate sia in fase di montaggio/cantiere che, successivamente, durante l'impiego.

Le vetrate asimmetriche (per composizione e/o tipo di trattamento della superficie) devono essere orientate con il lato sottoposto ad impatto durante le prove rivolto verso la direzione di provenienza della sollecitazione da contrastare durante l'impiego.

Nel caso di vetrate isolanti con un solo vetro di sicurezza, e con urto prevedibile da un solo lato, il vetro di sicurezza deve essere installato sul lato di possibile impatto delle persone durante l'impiego. In fase progettuale devono comunque essere valutate le conseguenze della rottura di entrambi i lati.

## 12. CRITERI DELLE LASTRE DA IMPIEGARE

In presenza di potenziale rischio di danno, per la scelta del vetro, ci si deve attenere alle prescrizioni dei prospetti 1 e 2 esposta nella norma UNI7697.

Nei casi non previsti fare riferimento al punto 9 della norma UNI7697

In tutti i casi in cui la rottura del vetro temprato possa proiettare all'esterno frammenti capaci di generare pericolo per la loro massa, l'altezza di caduta (>4 metri) o l'ubicazione, è consigliabile utilizzare un prodotto temprato termicamente, sottoposto a trattamento Heat Soak Test (HST), in conformità alla UNI EN 14179, che riduce drasticamente il rischio di rotture spontanee. Nei casi in cui la vetrata è solo parzialmente intelaiata o fissata per punti e si utilizza vetro temprato termicamente esso deve essere conforme alla UNI EN 14179.

Per parapetti e balaustre la composizione minima avente classe prestazionale 1B1 secondo UNI EN 12600 deve prevedere uno spessore di intercalari plastici polimerici non minore di 0,76 mm.

**Pertanto è ammesso l'utilizzo di una lastra 10+10 con intercalare da 0,76mm, a patto che la pellicola sia certificata 1B1.**

5- In parapetti /balaustre	5A – Fissaggio continuo su tutto il perimetro	6.1	7.2	1B1	Non applicabile	X	X	X	X
		6.7							
	5B – Altri tipi di fissaggio	6.1	7.2	1B1	Non applicabile	X	X	X	X
		6.7		PR					

La classe EN 12600 1B1 deve essere utilizzata per le aree a rischio più elevato, per esempio nella sicurezza scuole, asili, palestre, locali aperti al pubblico per le grandi vetrine > 6 mq, per il rischio di caduta nel vuoto attraverso il vetro.

### 13. CONCLUSIONI

La verifica allo stato limite ultimo per la lastra di vetro stratificato quando essa è sottoposta all'azione antropica di spinta fuori piano di 2kN/m (prescritta dalle NTC08) non è soddisfatta.

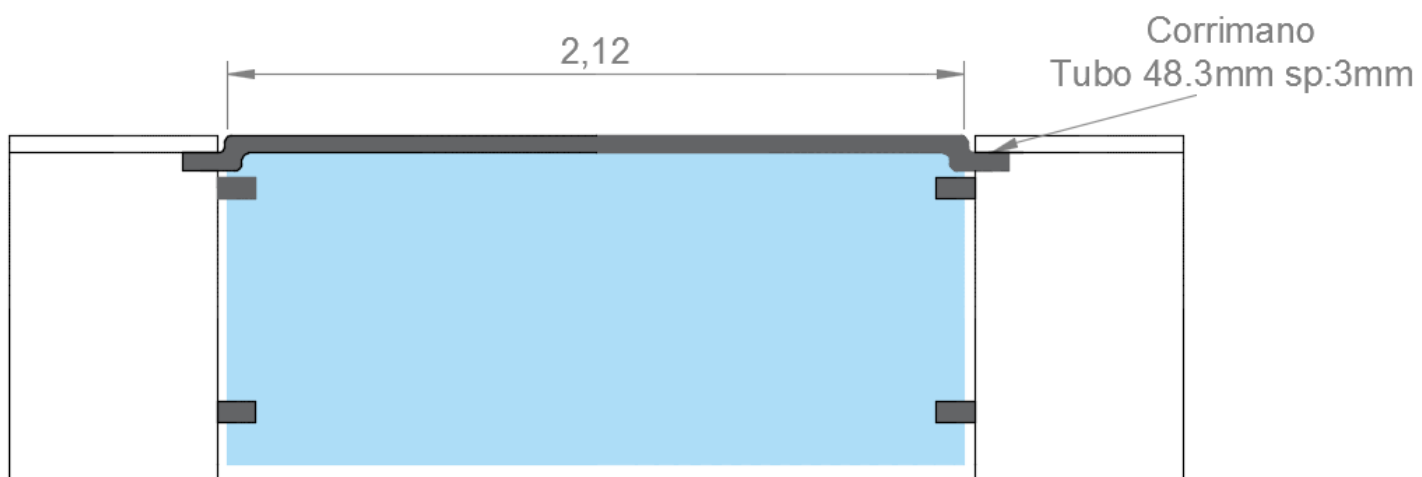
La soluzione per garantire il soddisfacimento della verifica è la seguente:

- Introduzione di un corrimano in acciaio, vincolato lateralmente sui parapetti in calcestruzzo, in grado di assorbire la spinta antropica. In questo modo la balaustra risulta virtualmente scarica e il presidio anti-caduta è garantito dall'elemento metallico.

Ad esclusione della precedente tutte le altre verifiche sono soddisfatte.

## 14. DIMENSIONE DEL VETRO E DEL CORRIMANO

**VETRO STRATIFICATO 10mm+0,76mm+10mm**

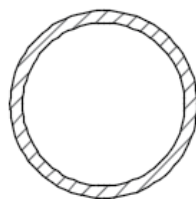


### **PARTICOLARI COSTRUTTIVI**

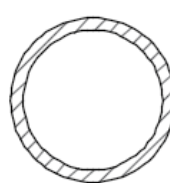
#### SEZIONI

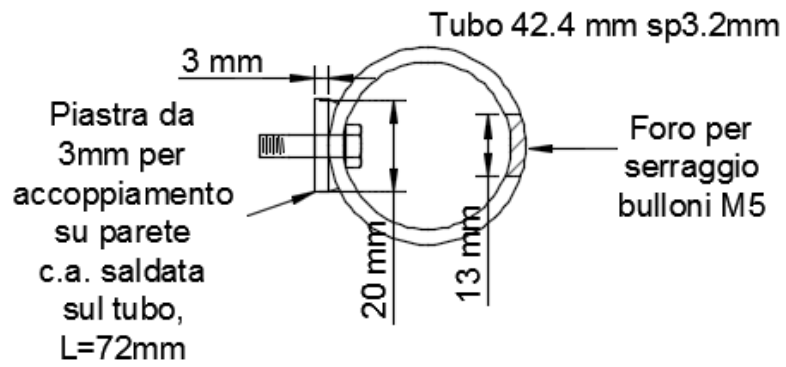
SCALA 1:2

Tubo 48.3 mm sp3.2mm



Tubo 42.4 mm sp3.2mm





## ACCOPPIAMENTO

SCALA 1:2

