



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**

Modellazione strutturale

(Cap. 6 CNR DT 210/2013)



CISM - INTERNATIONAL CENTRE FOR MECHANICAL SCIENCES
08/02/2024





Vetro stratificato

Comportamento pre-rottura

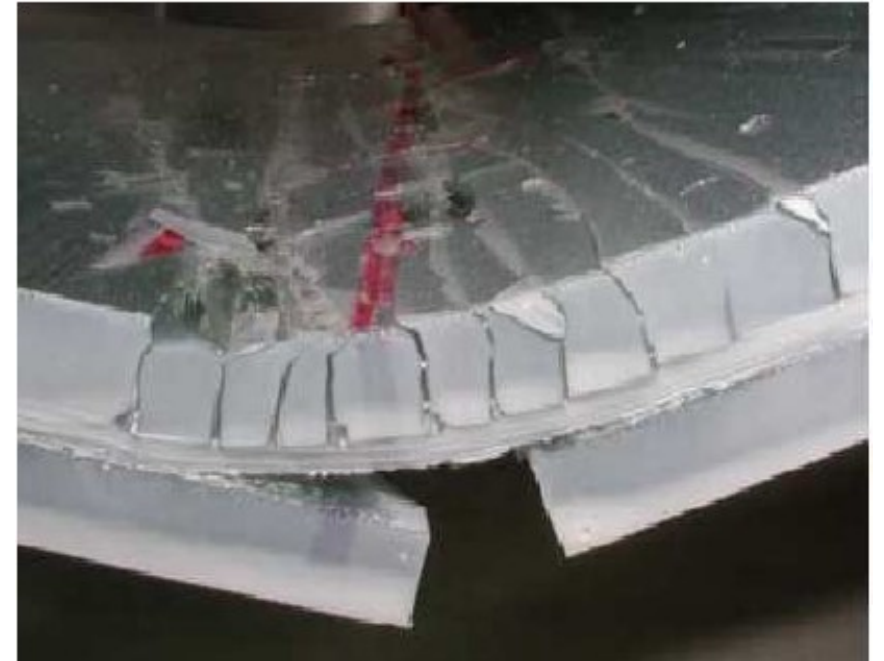
Il comportamento risulta intermedio tra:

- Comportamento a strati indipendenti (*layered*, scorrimento libero, senza attrito, tra le due lastre di vetro)
- Comportamento monolitico (*monolithic*, perfetta adesione tra le due lastre di vetro)



Comportamento post-rottura

Lo scopo principale della stratificazione è quello di trattenere, in caso di rottura delle lastre, i frammenti di vetro che cadendo potrebbero produrre danni a persone o cose. Inoltre, offre capacità portante residua e riduce il rischio di ferite da taglio agli utenti.



PRINCIPI GENERALI DI MODELLAZIONE

1. Materiali

Vetro

- Comportamento dominato dal fenomeno della frattura
- Rilevanza della presenza dei difetti
- Effetto scala
- La velocità di propagazione della frattura induce una dipendenza dalla velocità e dalla durata dei carichi (K_{mod})

Intercalare

- Comportamento viscoelastico → La risposta dipende dalla velocità di deformazione, dalla durata e dalla temperatura

Giunti siliconici

- Materiale *rubber-like* → Non linearità

PRINCIPI GENERALI DI MODELLAZIONE

2. Sistema Strutturale

- Gli elementi strutturali in vetro sono **strutture composite**
- La **geometria** degli elementi richiede analisi di sistemi a lastra o guscio
- L'elevata **snellezza** richiede analisi non lineari
- I **vincoli** richiedono una modellazione specifica
 - Vincoli puntuali
 - Vincoli continui deformabili (giunti siliconici, adesivi,...)
- Presenza di strutture di controvento (pinne o travature di funi), per le quali sono critici i fenomeni di **instabilità**
- La struttura si presenta spesso come un sottosistema secondario con proprie caratteristiche di vibrazione che interagiscono con quelle della struttura primaria

PRINCIPI GENERALI DI MODELLAZIONE

Per ciascun modello di analisi, è necessario definire lo **(1) schema geometrico**, **(2) i modelli costitutivi** e **(3) un adeguato modello di analisi strutturale**.

Ciascuno di essi può essere scelto secondo un diverso **livello di accuratezza**

Il livello di accuratezza della modellazione è sempre da commisurare all'**importanza dell'opera**, essendo questa funzione di vari fattori quali

- **onere economico** della costruzione
Es: facilità di sostituzione di un elemento
- **impegno strutturale** dell'elemento (in relazione alla sua pericolosità in caso di collasso)

Requisiti minimi di modellazione

| Tipo di struttura | Modello costitutivo | Modello geometrico | Modello di analisi |
|---|--|---|----------------------------------|
| Pannelli vincolati su più lati, con ritegni meccanici su più lati | Elastico lineare | Modello 2D a spessore equivalente | Lineare o non lineare geometrico |
| Pannelli vincolati su più lati, con giunti siliconici verticali e orizzontali | Elastico lineare | Modello 2D a spessore equivalente + Modelli del giunto | Lineare o non lineare geometrico |
| Vetrature verticali appese per punti | Elastico lineare (con parametri elastici tarati sulla temperatura e durata dei carichi) | Modello 2D a spessore equivalente + Modello 3D per la concentrazione di tensione nel giunto | Lineare o non lineare geometrico |

Requisiti minimi di modellazione

| Tipo di struttura | Modello costitutivo | Modello geometrico | Modello di analisi |
|-----------------------|---|--|----------------------------------|
| Pinne verticali | Elastico lineare (con parametri tarati sulla temperatura e durata dei carichi) | Modello 3D per la concentrazione di tensione nel giunto | Non lineare geometrico |
| Travi orizzontali | Elastico lineare | Modello 1D-2D + Modello 3D per la concentrazione di tensione nel giunto | Lineare o non lineare geometrico |
| Strutture particolari | Da valutare caso per caso | Da valutare caso per caso | Da valutare caso per caso |

Modellazione costitutiva dei materiali

Vetro

- modulo di elasticità normale (Young)
- coefficiente di Poisson
- densità
- coefficiente di espansione termica $20\div 300^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} E &= 70000 \text{ MPa}, \\ \nu &= 0.22, \\ \rho &= 2500 \text{ kg/m}^3, \\ \alpha &= 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}. \end{aligned}$$

elastico lineare (a prescindere dal livello di accuratezza)
Non si considera la propagazione della frattura

Polimeri per intercalare

per vetro stratificato

A differenza del vetro la risposta costitutiva di questi materiali di interstrato non è in generale di tipo lineare ed è fortemente influenzata da fattori quali la temperatura di esercizio e le condizioni (durata) di carico (paragrafo 2.2.1)

Materiali plastici

utilizzati nei giunti e nei dispositivi di vincolo

Attenzione:

A prescindere dalla complessità del modello adottato, particolare cura deve essere dedicata alla modellazione dei vincoli del pannello e alla descrizione di:

- **dettagli costruttivi** (sistema di fissaggio del pannello alla struttura portante, modalità di trasferimento dei carichi dal vetro alla struttura, etc.)
- **fori**, realizzati per l'alloggiamento degli elementi di ancoraggio (dimensioni, distanza dai bordi, etc.)
- **giunzioni** (tipo di connessione, rigidità della giunzione, eventuali capacità dissipative, etc.)

Tipo di analisi

E' sufficiente effettuare un'analisi **geometricamente lineare** quando

$$f_{\max} < \frac{s}{2} \quad \text{per pannelli,}$$

$$f_{\max} < \frac{L}{300} \quad \text{per pinne e travi,}$$

dove

f_{\max}

freccia massima dell'elemento [mm]

s

spessore dell'elemento [mm]

L

luce in semplice appoggio (o lunghezza libera di inflessione L_0), espressa in [mm]

È raccomandata l'analisi non lineare in caso contrario

È espressamente richiesta l'analisi non lineare nei casi in cui vi sia la presenza di un **significativo carico assiale che si accompagna alla flessione**

Elementi di vetro stratificato

(cap.6.3.3)

➤ Livello 1

metodo degli spessori effettivi: l'elemento (trave o piastra) di vetro stratificato viene modellato come un elemento di vetro monolitico che presenta lo stesso comportamento a flessione

➤ Livello 2

l'elemento di vetro stratificato viene modellato come un elemento composto da lastre di vetro connesse da **molle equivalenti deformabili a taglio**

➤ Livello 3

la lastra stratificata viene modellata tridimensionalmente tramite un **codice numerico agli elementi finiti**

Intercalari

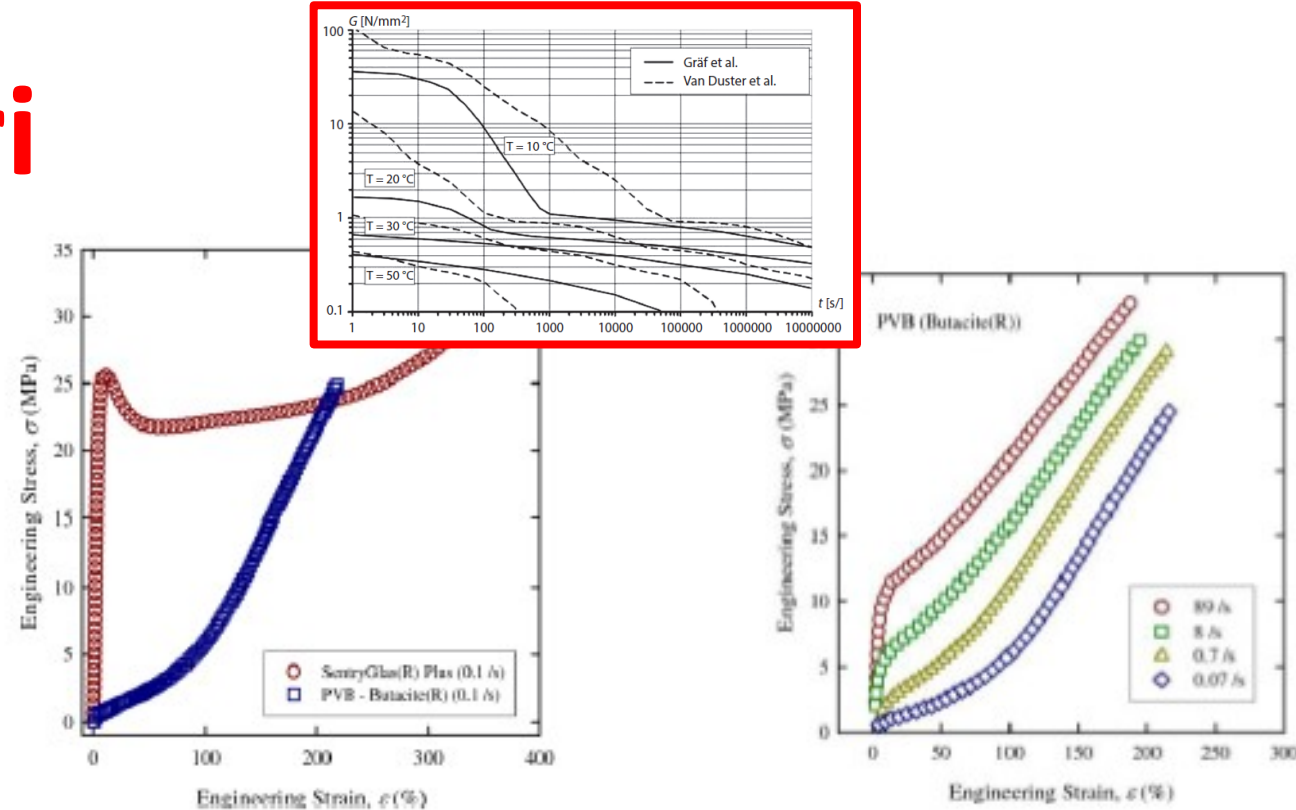


Figura – Diagrammi tensione-deformazione (Dupont): a) confronto SGP-PVB standard a $T=20^\circ\text{C}$; b) confronto tra prove effettuate su PVB alla stessa temperatura e a velocità di carico differenti

La modellazione delle proprietà meccaniche dell'intercalare potrà essere eseguita secondo diversi livelli:

- livello a: *modello con spessore efficace*
- livello b: *modello elastico lineare, con parametri elastici costanti*
- livello c: *modello viscoelastico lineare*
- livello d: *modelli non lineari*

Materiali plastici

Silicone di sigillatura

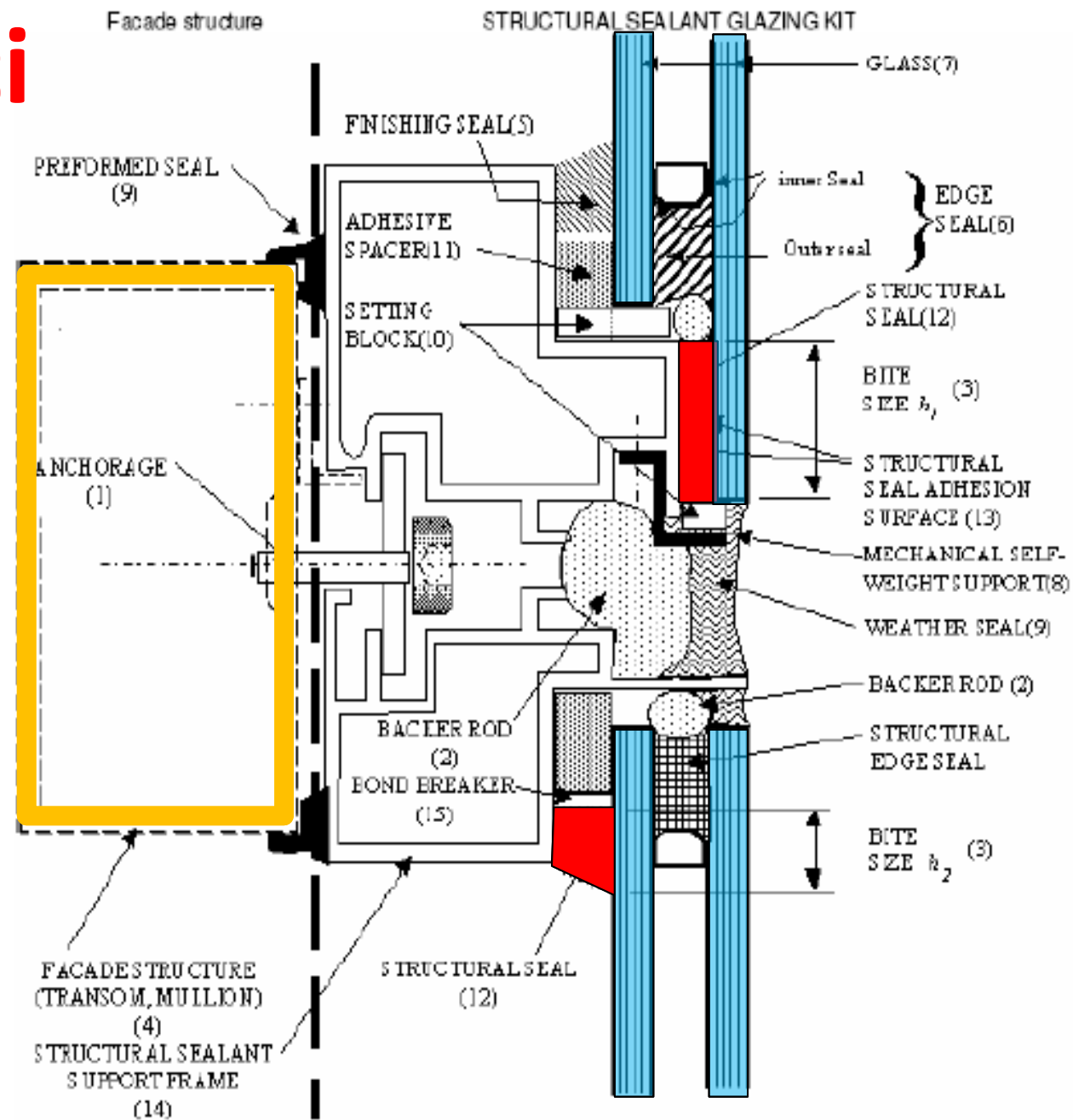
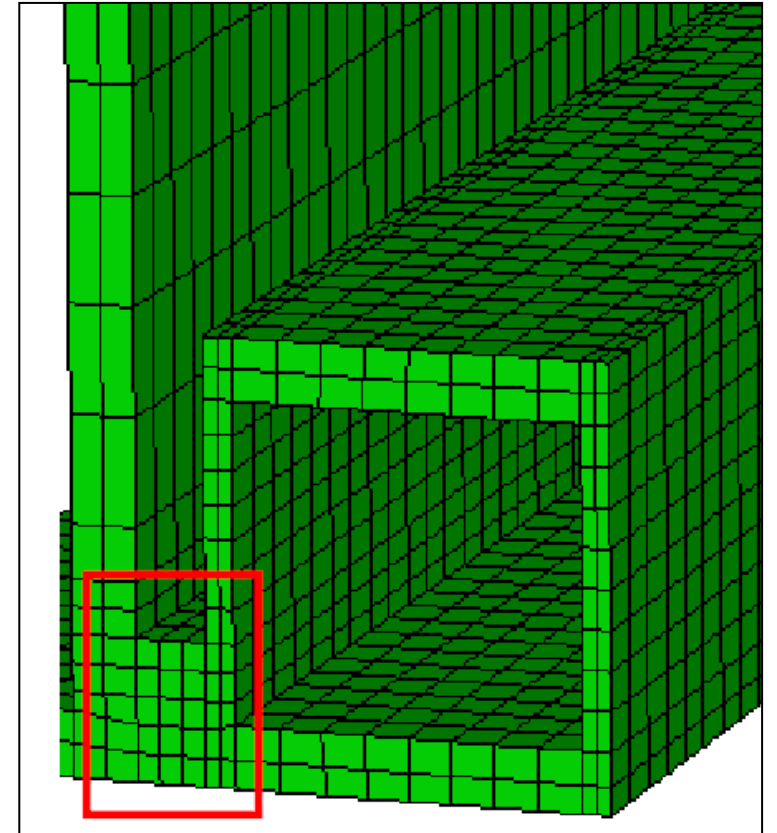
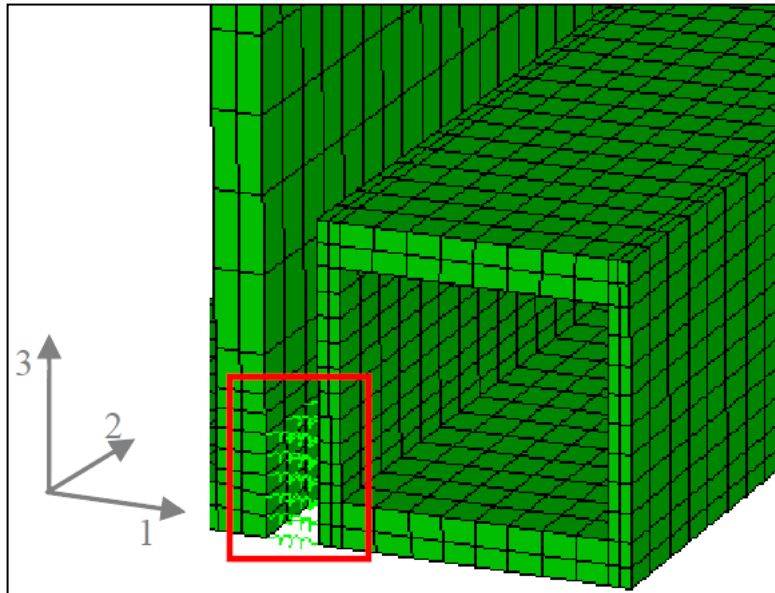


Figura 6.3. Esempio di giunti siliconici. [ETAG 002- Part 1]

Livelli di modellazione del giunto siliconico

- **livello 0** sostituzione con un vincolo equivalente
- **livello 1** modello elastico lineare, con parametri elastici costanti e separati
➔ **molle equivalenti (assiale + taglio (2))**
- **livello 2** modello elastico lineare, con parametri elastici costanti e continui
- **livello 3** modelli non lineari



Modellazione numerica

Per quanto riguarda la modellazione, nel caso di simulazioni ad elementi finiti la *mesh*, dovrà essere almeno tale da rispettare le seguenti condizioni:

- dimensione massima nello spessore della lastra: $\frac{s}{2}$,
- rapporto tra dimensioni massima e minima dell'elemento: $\frac{max}{min} \leq 6$,

Nelle **zone di concentrazione della tensione** è preferibile invece assumere un rapporto:

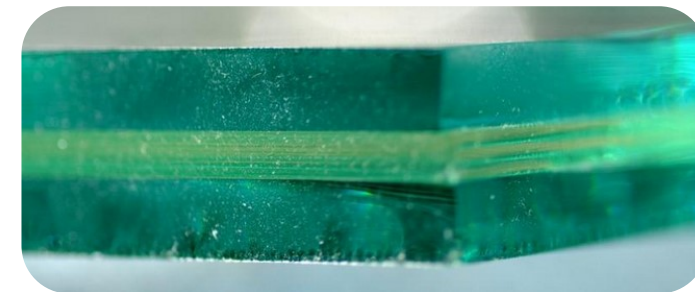
$$\frac{max}{min} \leq 1$$

Livello 1: metodo degli spessori effettivi

Il comportamento della lastra è intermedio fra quello **a strati indipendenti**, con totale assenza di connessione tra le lastre, libere di scorrere

$$\chi = \frac{M}{EJ_{abs}}$$

$$J_{abs} = \sum_{i=1}^n J_i$$



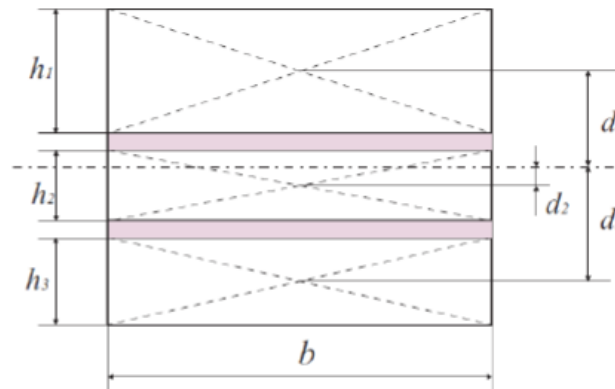
e quello di **lastra monolitica**, con totale accoppiamento

$$\chi = \frac{M}{E J_{full}},$$

$$J_{full} = \sum_{i=1}^n (J_i + A_i d_i^2) = J_{abs} + \sum_{i=1}^n A_i d_i^2$$

d_i = distanza del baricentro dell' i -esima lastra dal baricentro geometrico della sezione stratificata, mostrata in Figura 6.15 [mm];

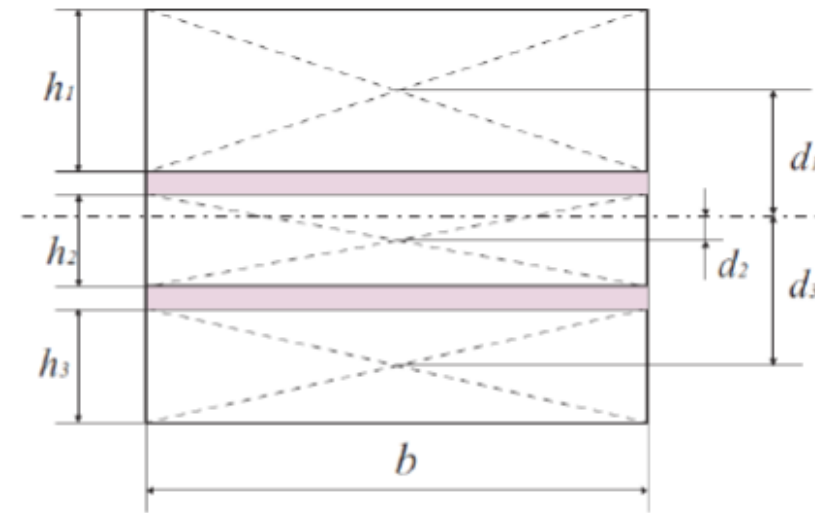
A_i = area della sezione trasversale dell' i -esima lastra [mm²].



Cahier 3488_V2 (francese)

Normativa TRLV (tedesca)

Progetto di Norma Europea prEN 16612 (2013)



Modello di Wölfel- Bennison
(caso di lastra composta da 2 lastre di vetro)

$$J_{eq} = \Gamma J_{full} + (1 - \Gamma) J_{abs}$$

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

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 9.6 \frac{h_{int} EI_s}{G_{int} l^2 d^2}} = \frac{1}{1 + 9.6 \frac{h_{int} EA^*}{G_{int} l^2 b}}$$

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

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

Il grado di accoppiamento dipende:

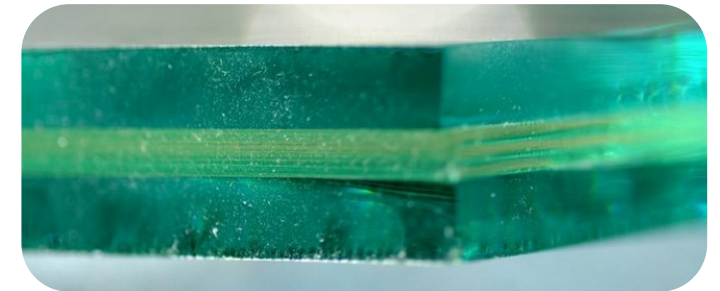
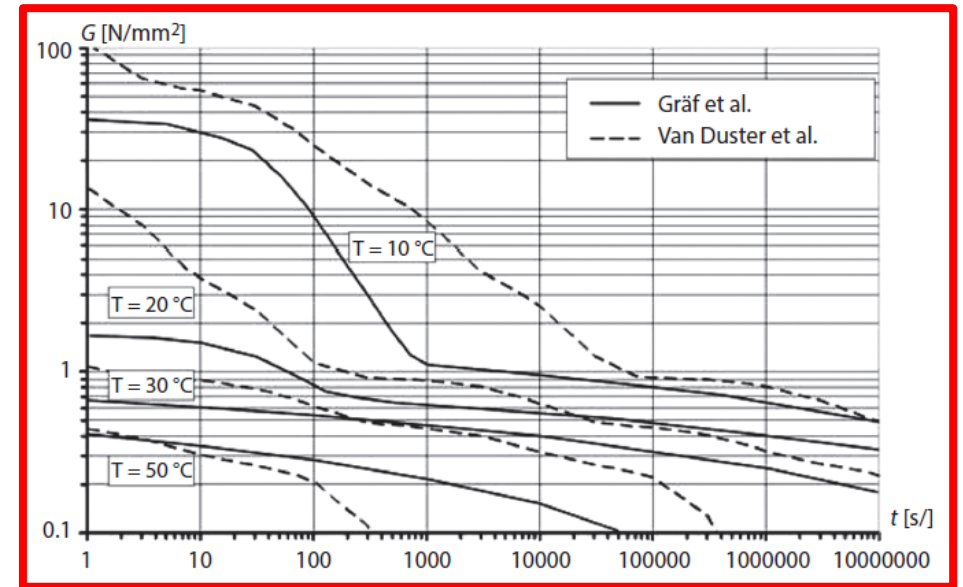
- Dalla **rigidezza** dell'intercalare

➔ e quindi dalla durata dei carichi e dalla temperatura

- Dalla **geometria** della lastra (rapporto di forma, snellezza)
- Dal tipo di **schema strutturale** (schema di carico, vincoli)

N.B.: spessore equivalente utile per:

- modellazione ad elementi finiti
- modelli analitici semplici (ma solo in determinate condizioni)



Una volta definito il grado di accoppiamento possono essere calcolati separatamente:

- Lo spessore efficace per il calcolo della **deformazione**

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

- Lo spessore efficace per il calcolo della **tensione**, in generale uno diverso per ogni strato

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

Modello Enhanced Effective Thickness (EET)

$$\frac{1}{J_{eq}} = \frac{\eta_{lD}}{J_{full}} + \frac{1 - \eta_{lD}}{J_{abs}},$$

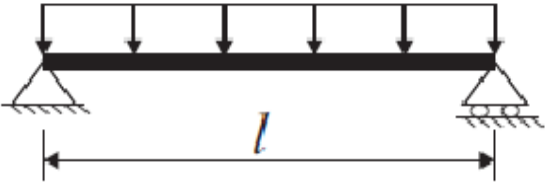
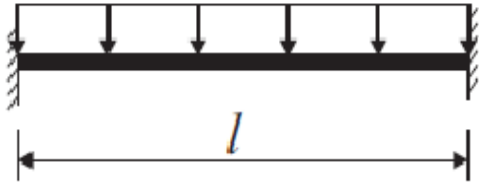
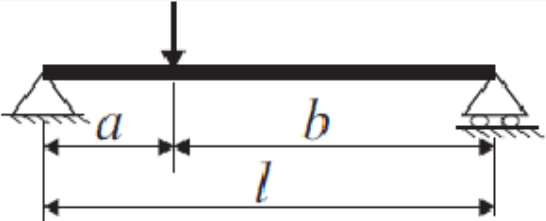
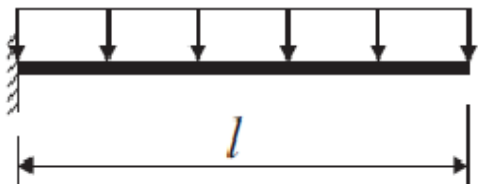
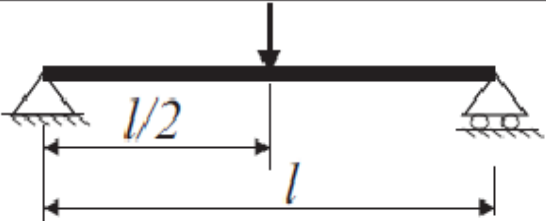
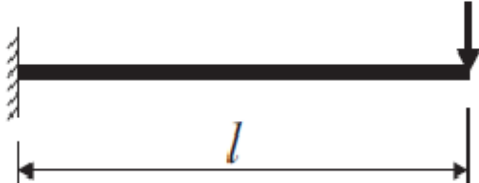
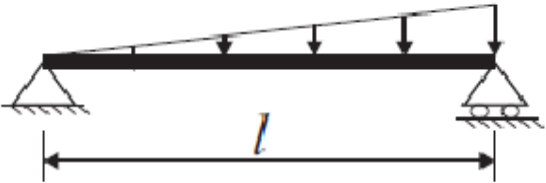
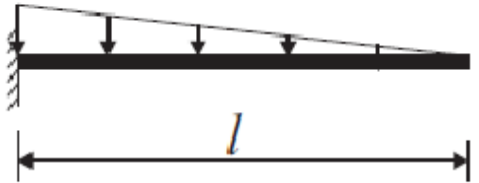
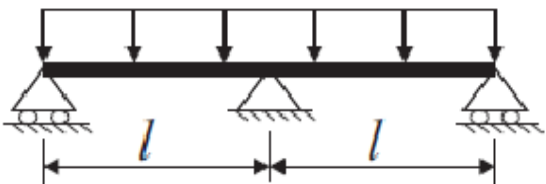
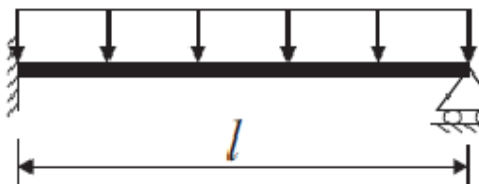
Per il caso di trave composta da due sole lastre di vetro, il coefficiente η_{lD} è dato da:

$$\eta_{lD;2} = \frac{1}{1 + \frac{Eh_{int}}{G_{int}b} \frac{J_{abs}}{J_{full}} A^* \Psi}$$

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

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

Tabella 6.3 Travi di vetro laminato: valori del coefficiente Ψ per differenti condizioni di carico e vincolo.

| Condizioni di carico e di vincolo | Ψ | Condizioni di carico e di vincolo | Ψ |
|--|------------------------|---|---------------------|
|  | $\frac{168}{17 l^2}$ |  | $\frac{42}{l^2}$ |
|  | $\frac{15}{l^2 + 2ab}$ |  | $\frac{14}{5 l^2}$ |
|  | $\frac{10}{l^2}$ |  | $\frac{5}{2 l^2}$ |
|  | $\frac{10}{l^2}$ |  | $\frac{45}{14 l^2}$ |
|  | $\frac{21}{l^2}$ |  | $\frac{21}{l^2}$ |

Cap. 6.6 Appendice - Abachi e tabelle

- Formule e tabelle utili per il calcolo delle **massime tensioni di trazione** e delle **deformazioni in lastre piane**, soggette a **carichi uniformemente distribuiti**, che possono essere utilizzate per elementi di vetro monolitico
- Le formule possono essere applicate **solo a pannelli appoggiati con continuità lungo i lati**
- I risultati riportati sono stati ottenuti nell'ipotesi di comportamento a piastra sottile (modello di von Karman)
- E' considerato sia il caso **non lineare** che quello **lineare**

Le formule si applicano ai casi di:

- a) lastra rettangolare
 - appoggiata su tutti i lati
 - appoggiata su tre lati
 - appoggiata su due lati
- b) lastra triangolare appoggiata su tutti i lati, con
 - triangolo rettangolo o triangolo isoscele
 - altre tipologie triangolari
- c) lastra circolare
- d) casi particolari
 - lastra trapezoidale (tre lati ortogonali e un lato inclinato)
 - lastra con quattro lati, di cui tre ortogonali e un lato ad arco
 - lastra con quattro lati, di cui due paralleli e gli altri due inclinati (anche non paralleli)

Esempio: lastra rettangolare appoggiata su tutti i lati

Per le lastre rettangolari appoggiate su tutti i lati e soggette a grandi deformazioni, la massima tensione σ_{\max} e il massimo spostamento w_{\max} dovute all'azione di calcolo F_d , possono essere calcolate mediante le formule riportate nel seguito.

Dette a e b le dimensioni della lastra, si consideri a come la dimensione minore, con h lo spessore della lastra. Il fattore di forma è dato da $\lambda = a/b$ e l'area della lastra è calcolata come $A = ab$.

La massima tensione σ_{\max} dovuta all'azione di calcolo F_d può essere valutata come:

$$\sigma_{\max} = k_1 \frac{A}{h^2} F_d . \quad (6.94)$$

Per la determinazione pratica della freccia w_{\max} si ricorre invece alla relazione

$$w_{\max} = k_4 \frac{A^2}{h^3} \frac{F_d}{E} . \quad (6.95)$$

I valori dei coefficienti adimensionali k_1 e k_4 sono indicati in Tabella 6.9 e in Tabella 6.10. Nel caso di lastre rettangolari appoggiate su tutti i lati, k_1 e k_4 dipendono dal fattore di forma λ e dal carico normalizzato p^* tramite l'espressione

$$p^* = \left(\frac{A}{4h^2} \right)^2 \frac{F_d}{E} .$$

$$\sigma_{\max} = k_1 \frac{A}{h^2} F_d$$

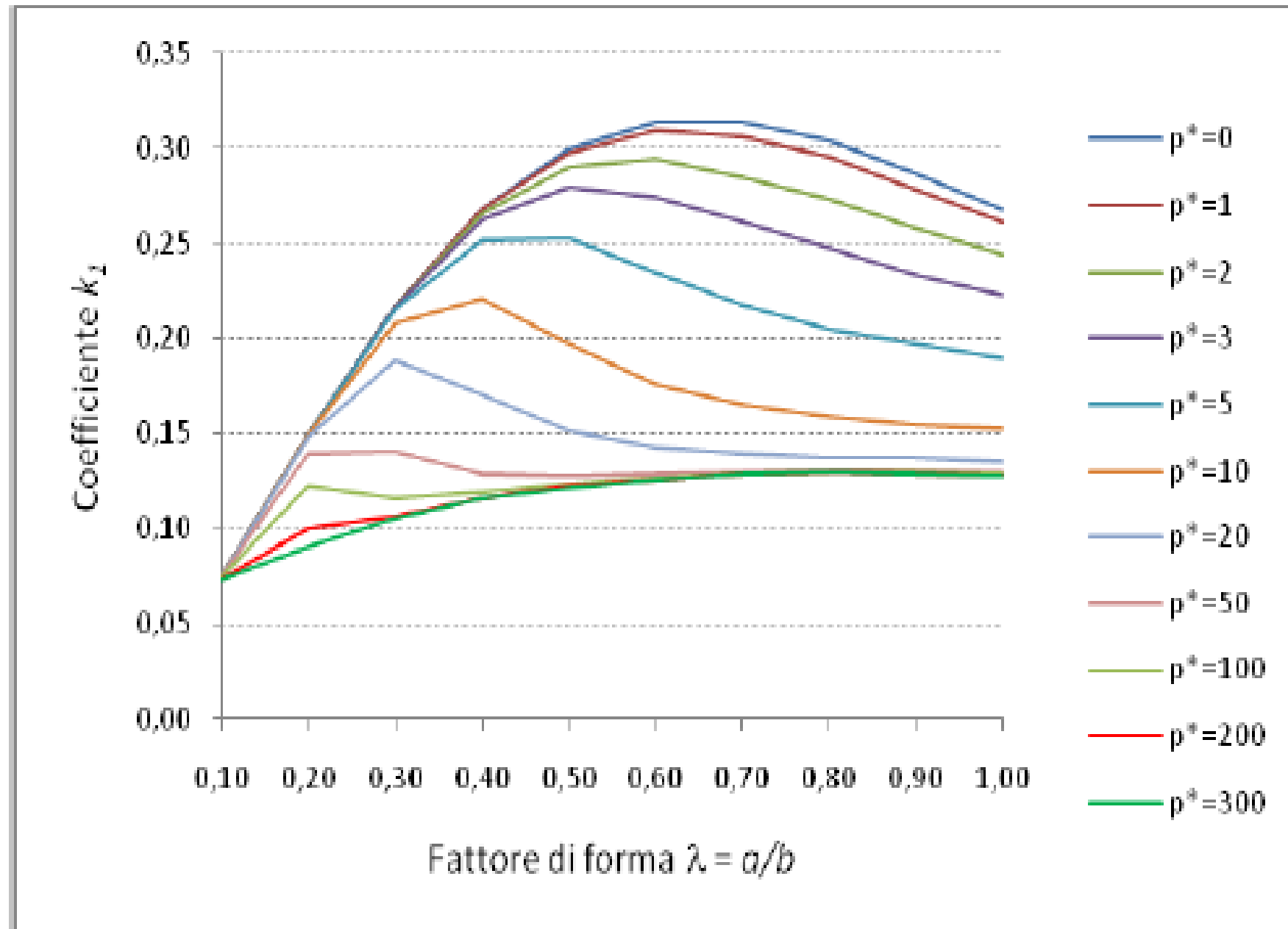


Figura 6.29. Valori del coefficiente adimensionale k_1 definiti in funzione del fattore di forma λ e del carico p^* .

Tabella 6.9. Valori del coefficiente k_1 per il calcolo della tensione massima.

| $\lambda=a/b$ | p^* | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 300 |
| 1,0 | 0.268 | 0.261 | 0.244 | 0.223 | 0.190 | 0.152 | 0.135 | 0.130 | 0.129 | 0.128 | 0.128 |
| 0,9 | 0.287 | 0.278 | 0.258 | 0.234 | 0.197 | 0.155 | 0.137 | 0.131 | 0.130 | 0.129 | 0.129 |
| 0,8 | 0.304 | 0.295 | 0.273 | 0.247 | 0.205 | 0.159 | 0.138 | 0.131 | 0.130 | 0.130 | 0.130 |
| 0,7 | 0.314 | 0.306 | 0.285 | 0.261 | 0.218 | 0.165 | 0.140 | 0.130 | 0.129 | 0.129 | 0.129 |
| 0,6 | 0.314 | 0.309 | 0.294 | 0.274 | 0.235 | 0.176 | 0.143 | 0.129 | 0.127 | 0.126 | 0.126 |
| 0,5 | 0.300 | 0.298 | 0.290 | 0.279 | 0.253 | 0.197 | 0.151 | 0.128 | 0.124 | 0.123 | 0.122 |
| 0,4 | 0.268 | 0.268 | 0.266 | 0.262 | 0.252 | 0.221 | 0.171 | 0.129 | 0.119 | 0.116 | 0.116 |
| 0,3 | 0.217 | 0.217 | 0.217 | 0.216 | 0.215 | 0.208 | 0.189 | 0.141 | 0.116 | 0.107 | 0.105 |
| 0,2 | 0.149 | 0.149 | 0.149 | 0.149 | 0.149 | 0.149 | 0.148 | 0.140 | 0.123 | 0.100 | 0.091 |
| 0,1 | 0.075 | 0.075 | 0.075 | 0.075 | 0.075 | 0.075 | 0.075 | 0.075 | 0.075 | 0.074 | 0.073 |

$$k_1 = \frac{1}{4 \left[\frac{1}{z_2^2} + \frac{p^{*2}}{(z_3^2 + (z_4 p^*)^2)} \right]^{0.5}},$$

dove

$$z_2 = 24\lambda \left[0.0447 + 0.0803 \left(1 - \exp \left(-1.17 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1.073} \right) \right) \right],$$

$$z_3 = 4.5 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^2 + 4.5, \quad z_4 = 0.585 - 0.05 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right).$$

I valori del coefficiente k_1 sono considerati validi nel caso in cui il coefficiente di Poisson ν sia compreso tra 0.20 e 0.24. Se necessario, tali valori possono essere interpolati linearmente. Per piccole deformazioni (teoria lineare) si considera $p^* = 0$.

$$w_{\max} = k_4 \frac{A^2}{h^3} \frac{F_d}{E}$$

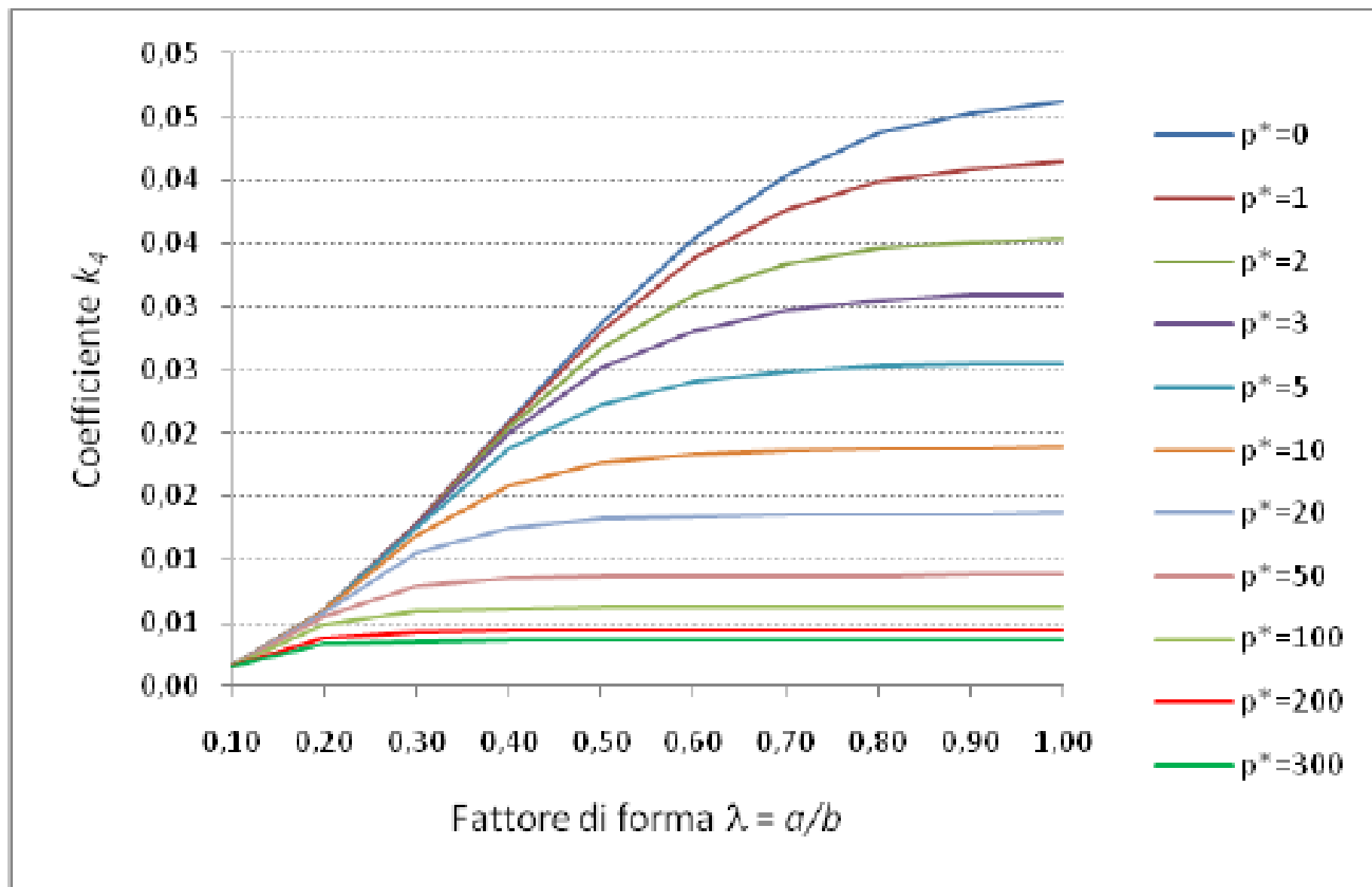


Figura 6.30. Valori del coefficiente adimensionale k_4 definiti in funzione del fattore di forma λ e del carico p^*

Tabella 6.10. Valori del coefficiente k_4 per il calcolo dello spostamento massimo.

| $\lambda=a/b$ | p^* | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 300 |
| 1,0 | 0.0461 | 0.0414 | 0.0354 | 0.0310 | 0.0255 | 0.0189 | 0.0137 | 0.0088 | 0.0062 | 0.0044 | 0.0036 |
| 0,9 | 0.0452 | 0.0409 | 0.0351 | 0.0309 | 0.0254 | 0.0188 | 0.0136 | 0.0088 | 0.0062 | 0.0044 | 0.0036 |
| 0,8 | 0.0437 | 0.0399 | 0.0346 | 0.0305 | 0.0253 | 0.0188 | 0.0136 | 0.0087 | 0.0062 | 0.0044 | 0.0036 |
| 0,7 | 0.0404 | 0.0377 | 0.0333 | 0.0297 | 0.0248 | 0.0186 | 0.0136 | 0.0087 | 0.0062 | 0.0044 | 0.0036 |
| 0,6 | 0.0354 | 0.0339 | 0.0309 | 0.0281 | 0.0240 | 0.0183 | 0.0134 | 0.0087 | 0.0062 | 0.0044 | 0.0036 |
| 0,5 | 0.0287 | 0.0281 | 0.0267 | 0.0251 | 0.0232 | 0.0176 | 0.0132 | 0.0086 | 0.0062 | 0.0044 | 0.0036 |

I valori del coefficiente k_4 riportati nella Tabella 6.10 sono considerati validi nel caso in cui il coefficiente di Poisson ν sia compreso tra 0.20 e 0.24. Se necessario, tali valori possono essere interpolati linearmente. Per piccole deformazioni (teoria lineare) si considera $p^* = 0$.

$$k_4 = \frac{\left[\frac{\left(\left(\frac{1}{z_1^4} + 4p^{*2} \right)^{0.5} - \frac{1}{z_1^2} \right)}{2} \right]^{0.5}}{16p^*},$$

dove

$$z_1 = 192(1-\nu^2)\lambda^2 \left[0.00406 + 0.00896 \left(1 - \exp \left(-1.123 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1.097} \right) \right) \right].$$

Nota: Per $p^*=0$, $k_4 = \frac{z_1}{16}$.

Livello 2

A questo livello si utilizza un modello semplificato multistrato in cui le lastre di vetro vengono considerate deformabili solo a flessione, e l'intercalare viene modellato mediante uno strato di molle equivalenti deformabili solo a taglio.

Il modello deriva da quello introdotto da Newmark [Newmark et al., 1951] per i connettori nelle travi miste acciaio-calcestruzzo

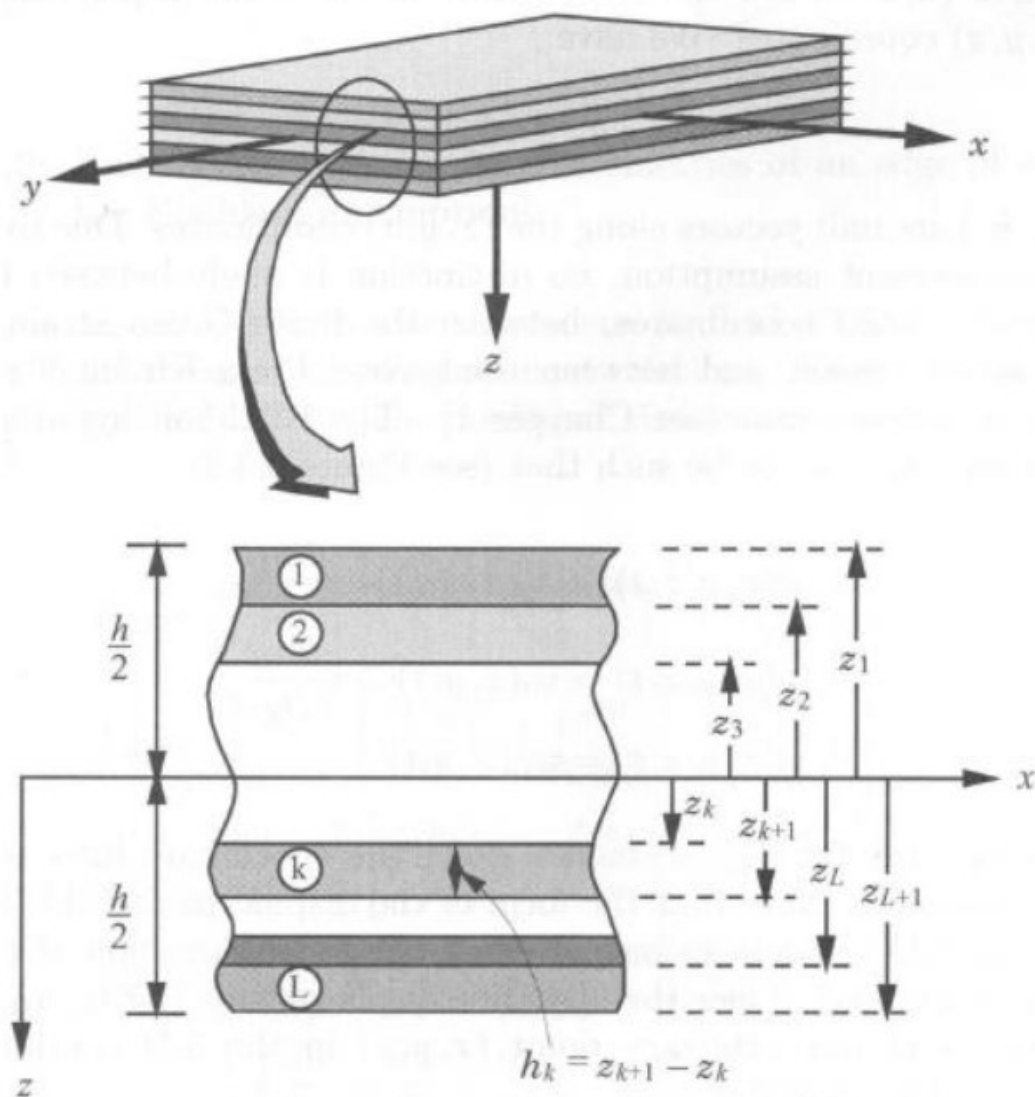
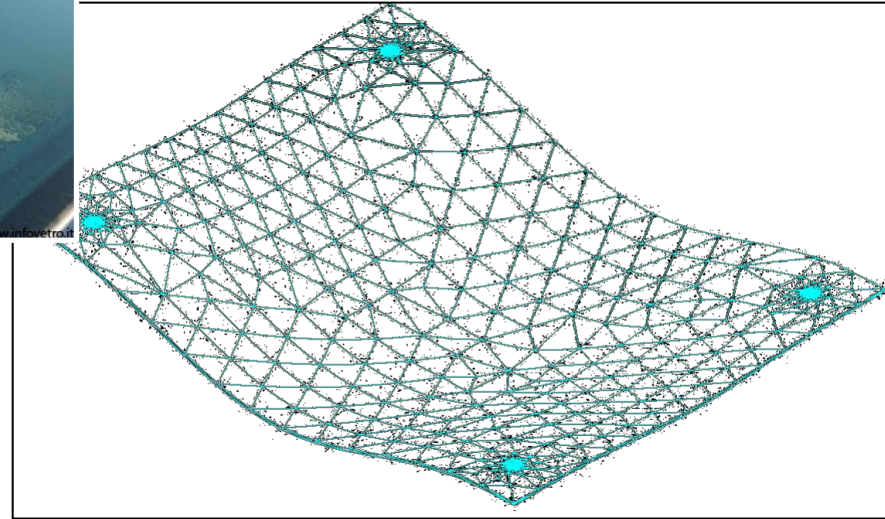


Figura 6.17. Modellazione di un pannello stratificato

Livello 3



Nel caso di modellazione tridimensionale, il dominio della lastra stratificata può essere discretizzato tramite elementi solidi, a 8 – 20 nodi

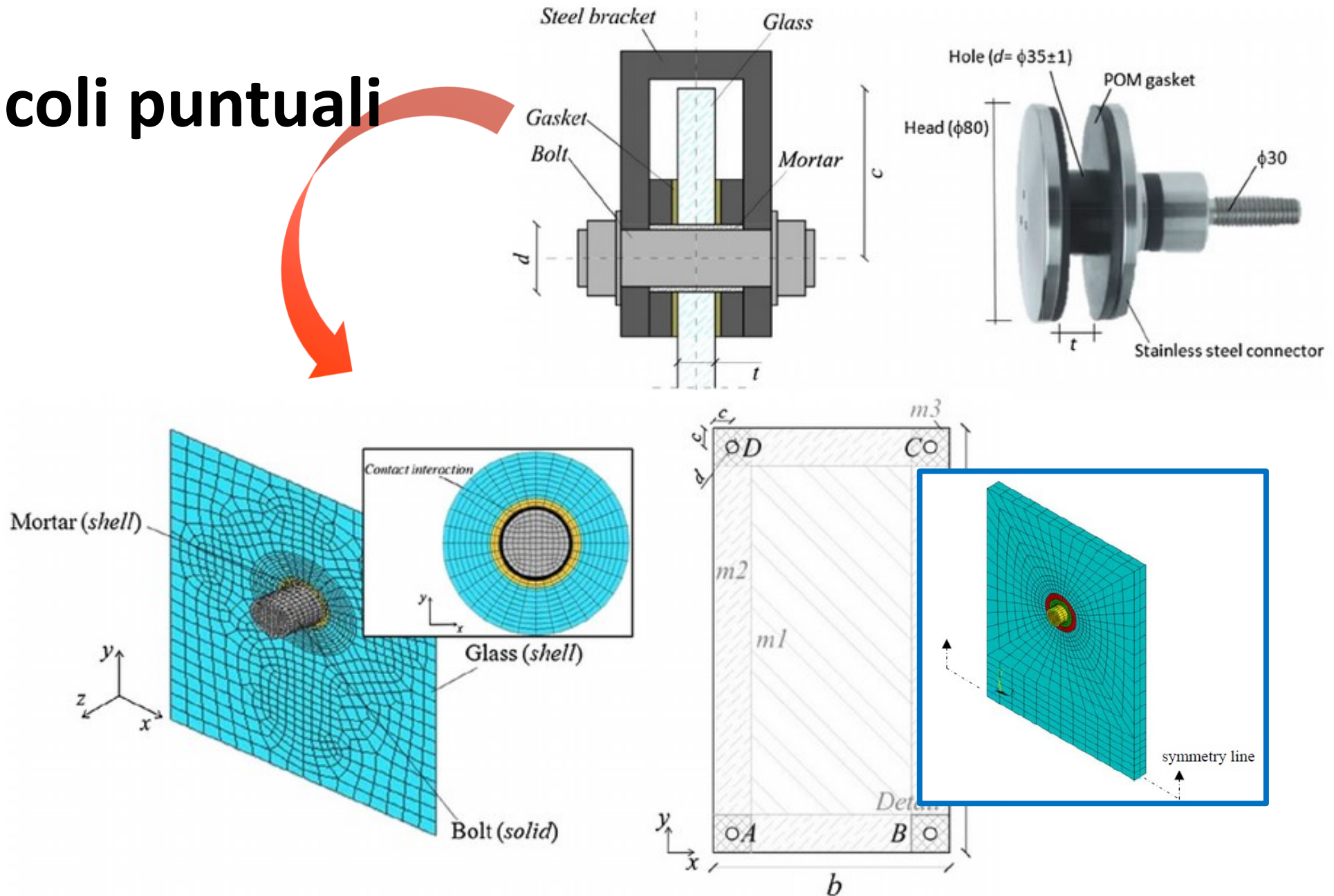
La *mesh* deve essere definita in modo da rispondere ai requisiti indicati per il vetro monolitico (si veda il par. 6.3.2.3)

Il collegamento tra lastre di vetro e intercalare può essere modellato tramite **un vincolo cinematico** che impedisca gli spostamenti relativi all'interfaccia tra i diversi strati o mediante un opportuno **elemento di interfaccia** che consente di simulare la **delaminazione**

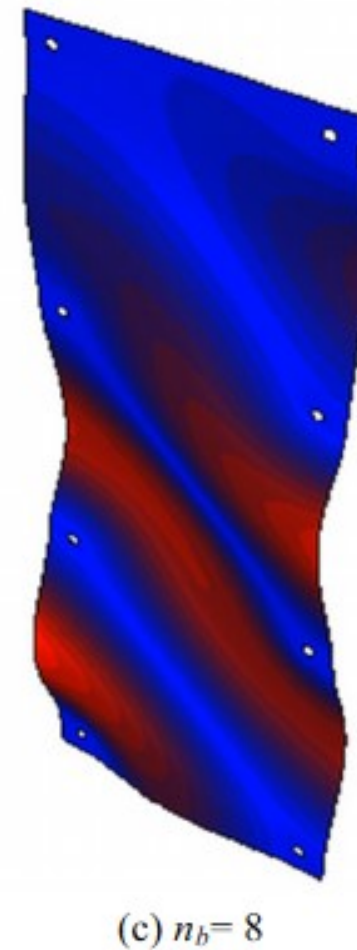
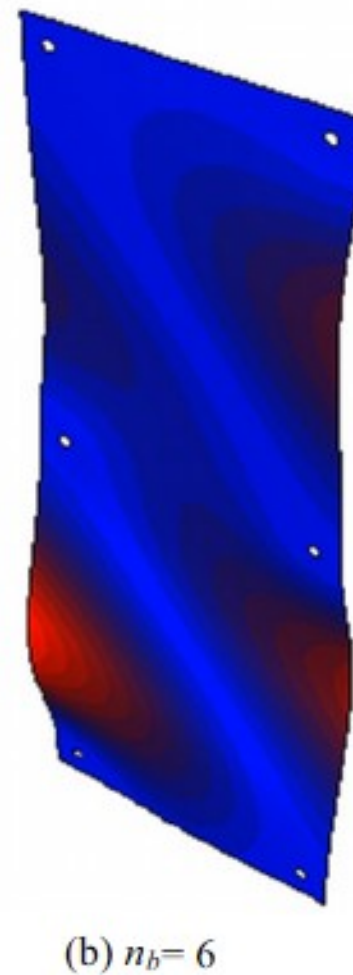
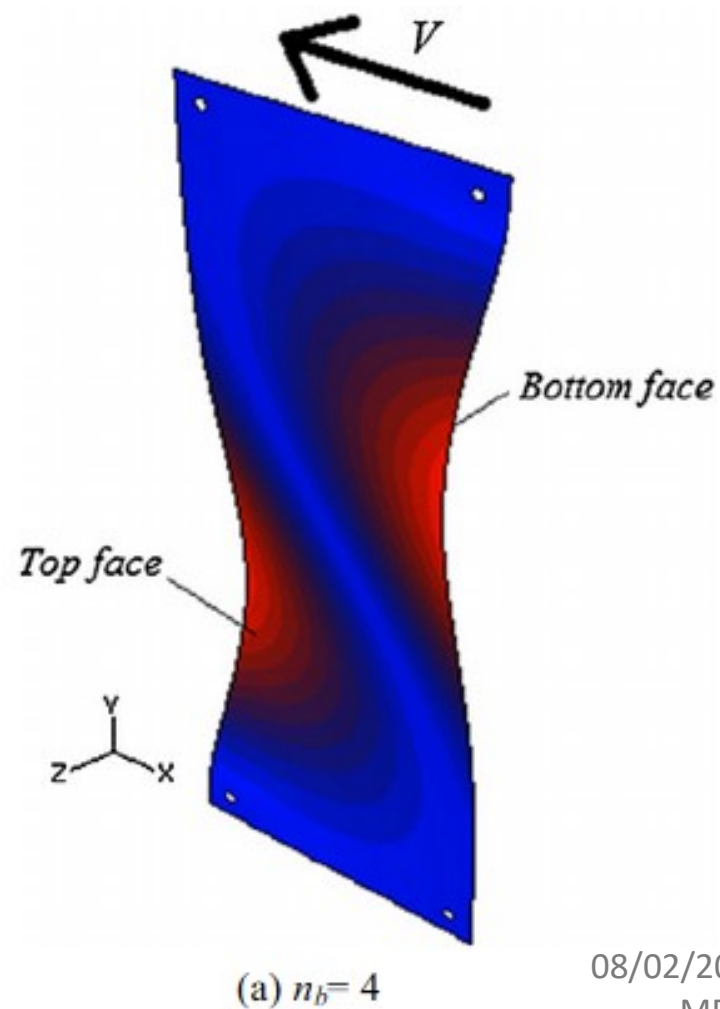
Allo scopo di consentire scorrimenti angolari all'interno dell'intercalare, è necessario disporre almeno 3-4 elementi attraverso lo spessore. Ciò costituisce un forte vincolo per la dimensione della mesh.

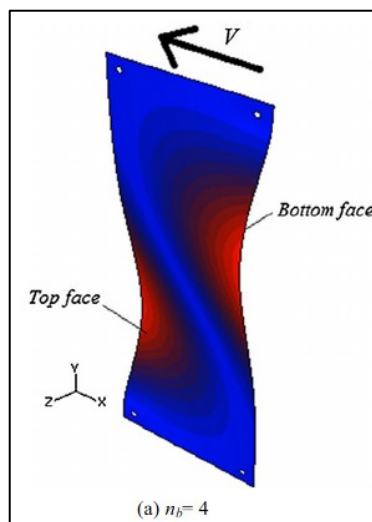
Relativamente al tipo di analisi geometrica vale quanto detto per il vetro monolitico al par. 6.3.2.4

Lastre con vincoli puntuali

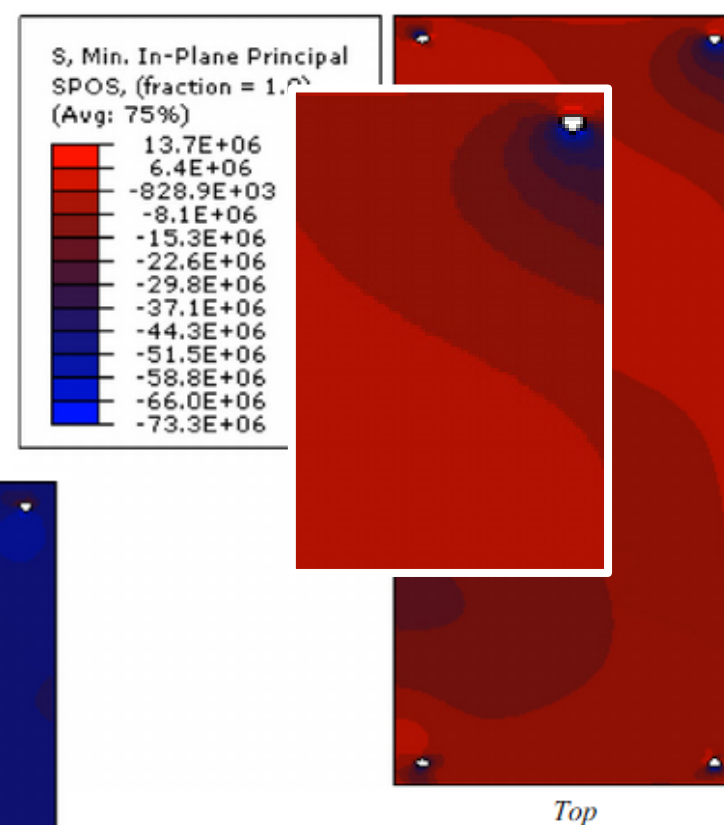
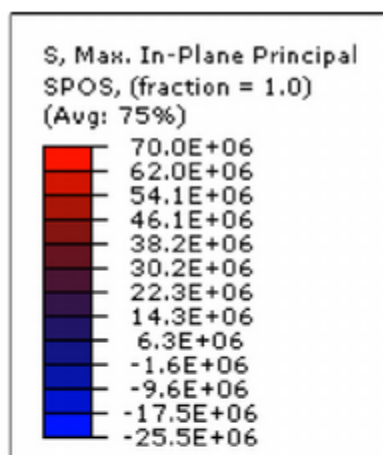


Lastre con vincoli puntuali



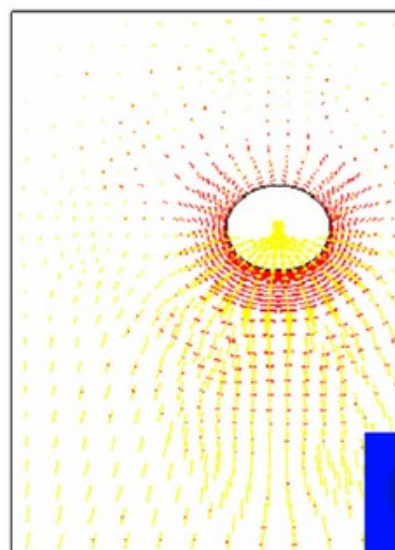
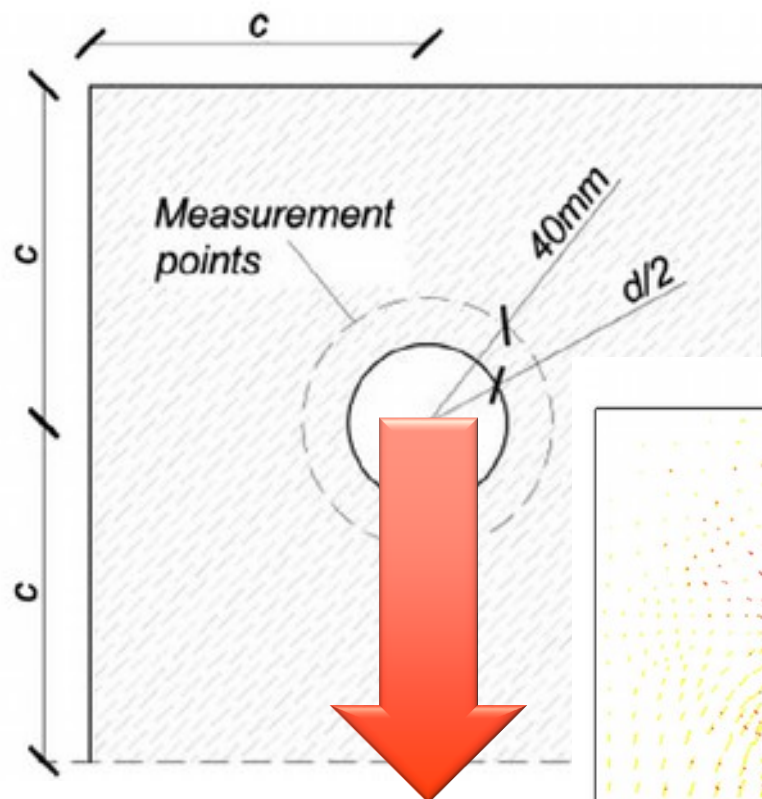


**Concentrazione
di tensioni massime intorno ai fori**

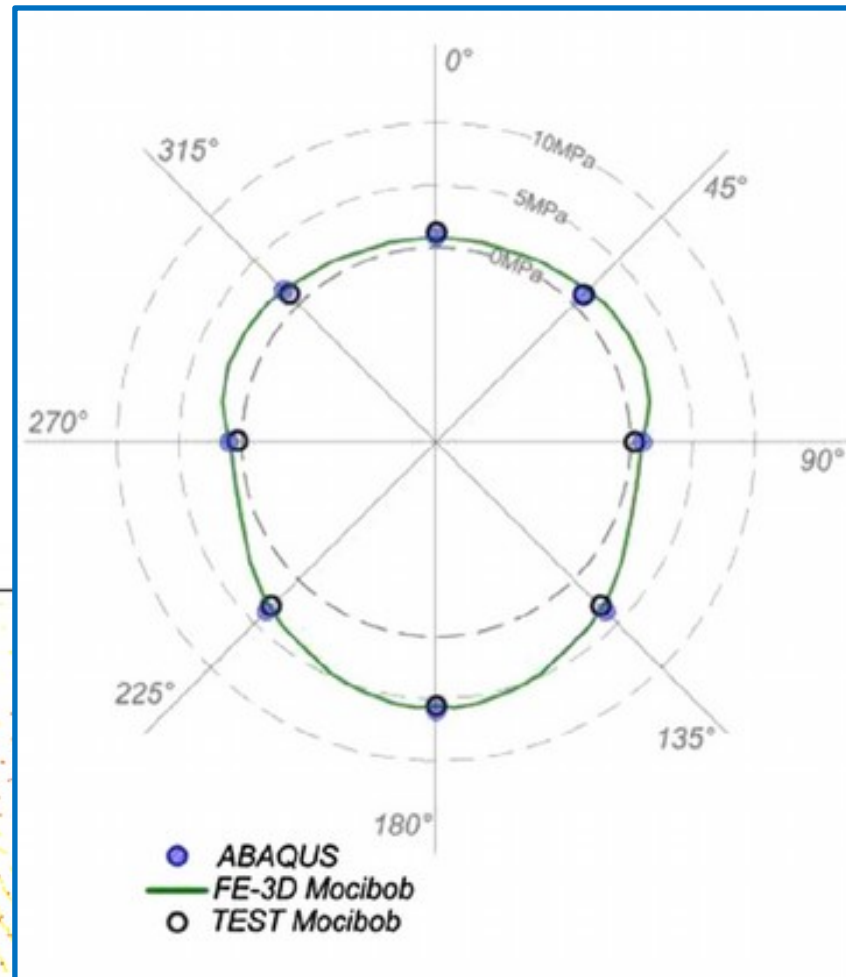


**Lastre
con vincoli puntuali**

Lastre con vincoli puntuali



SNEG, (fraction = -1.0)
■ S, Max. Principal
■ S, Mid. Principal
■ S, Min. Principal



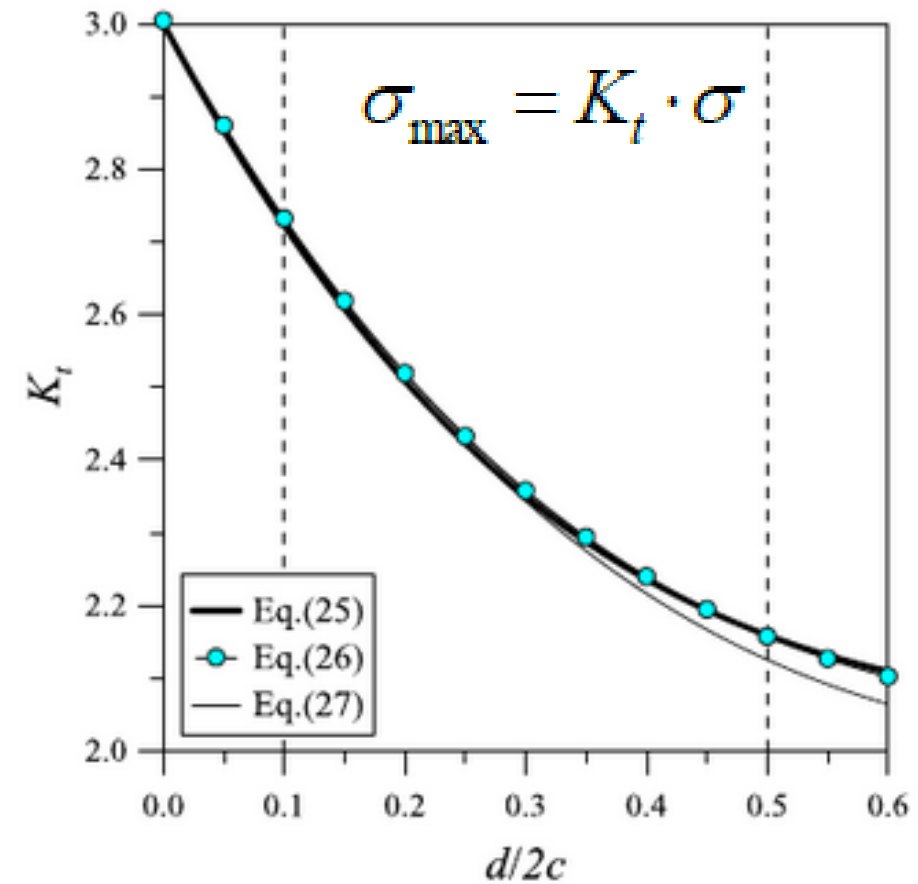
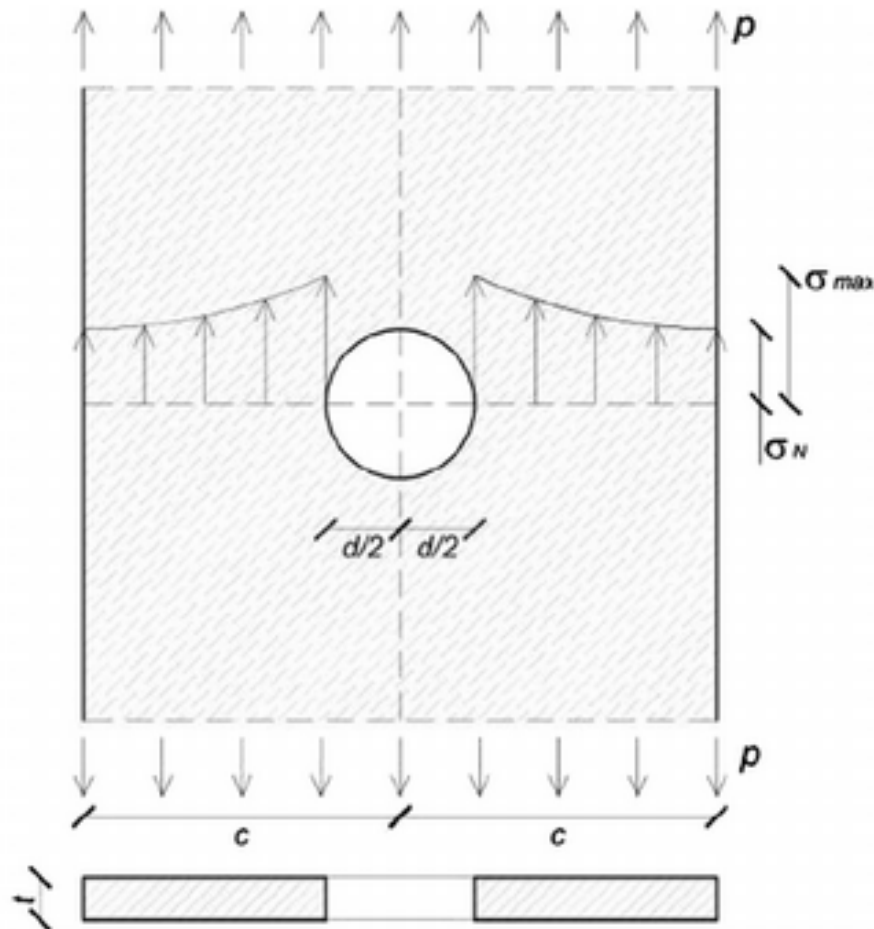
**Validazione
del modello di connettore
su dati sperimentali**

In alternativa:

Metodo semplificato



«stress concentration factor»

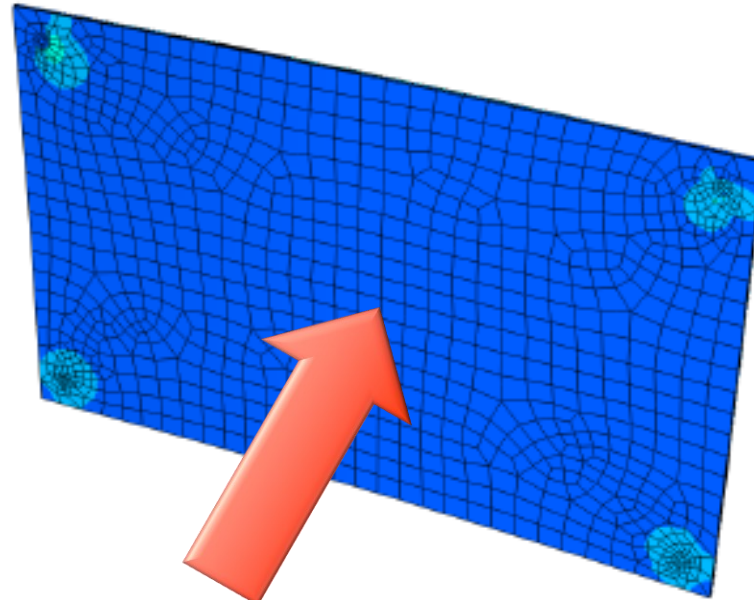
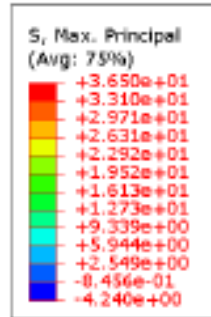


Metodo semplificato

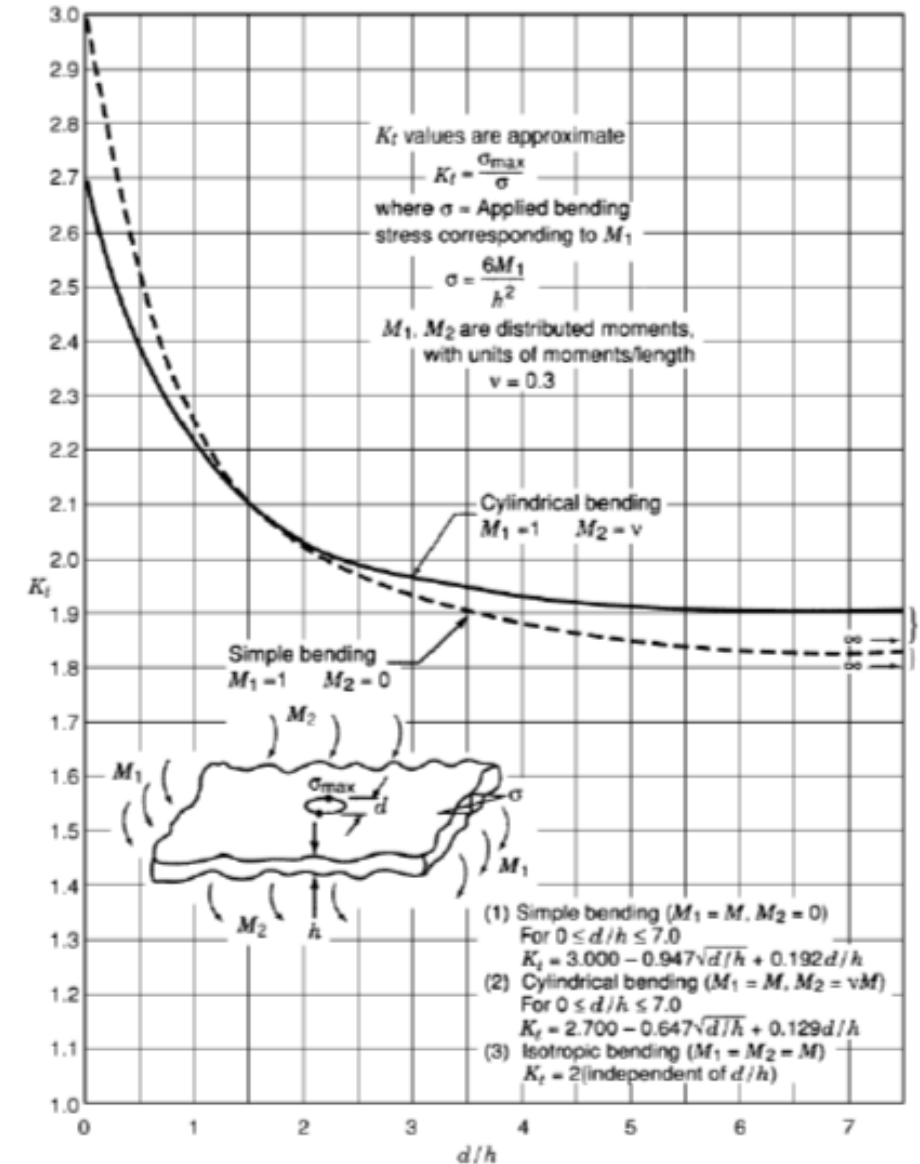


«stress concentration factor»

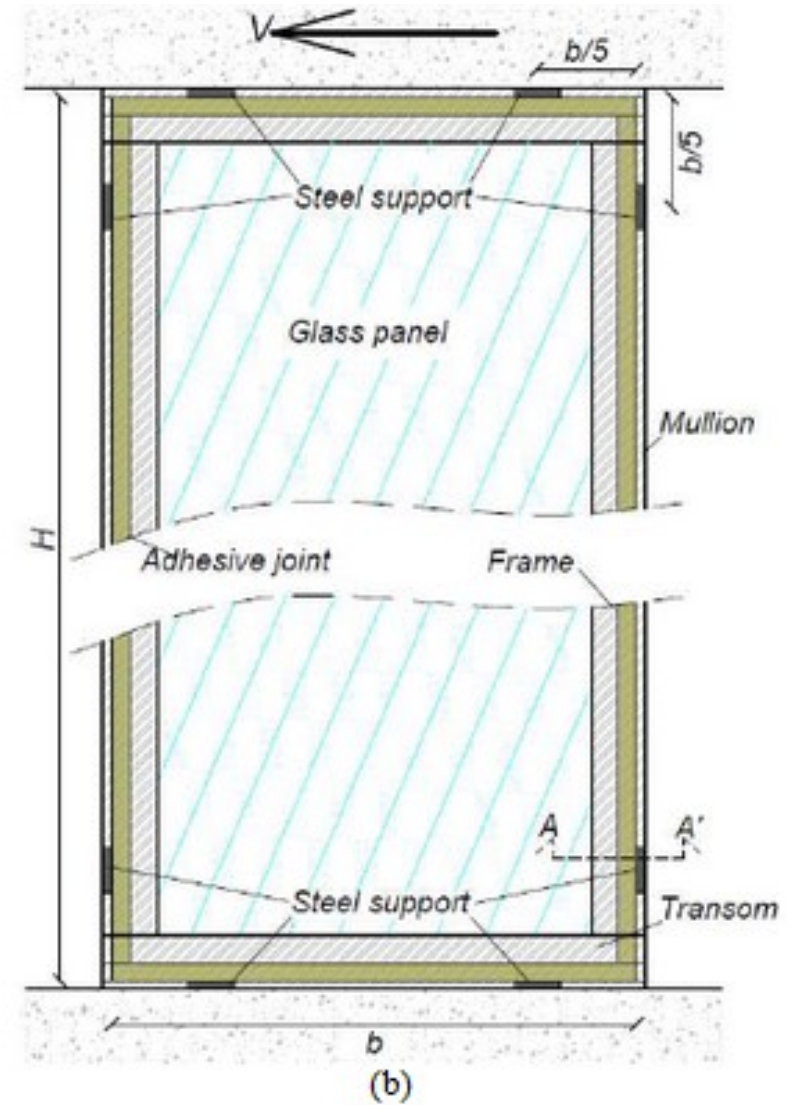
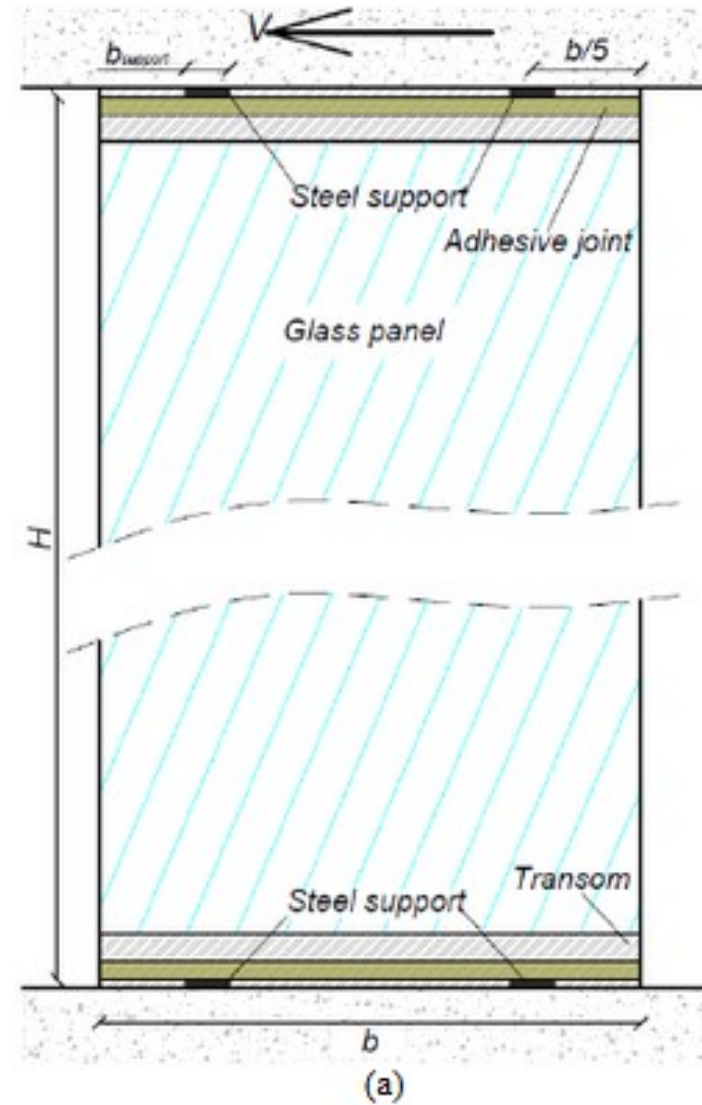
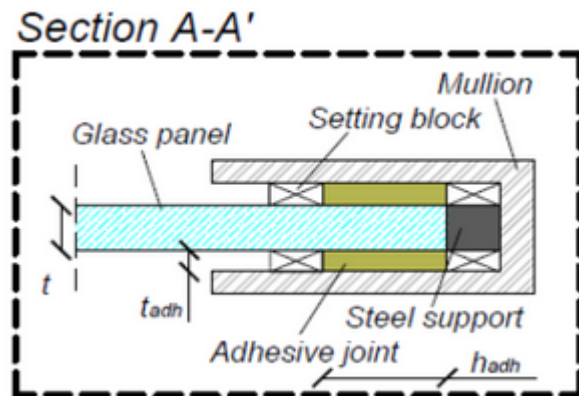
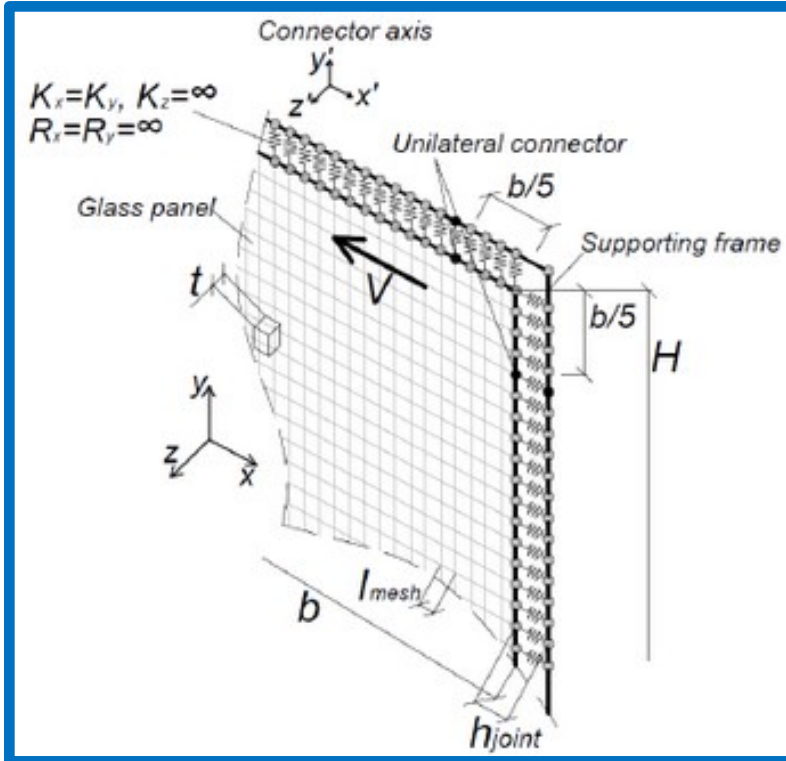
FLESSIONE



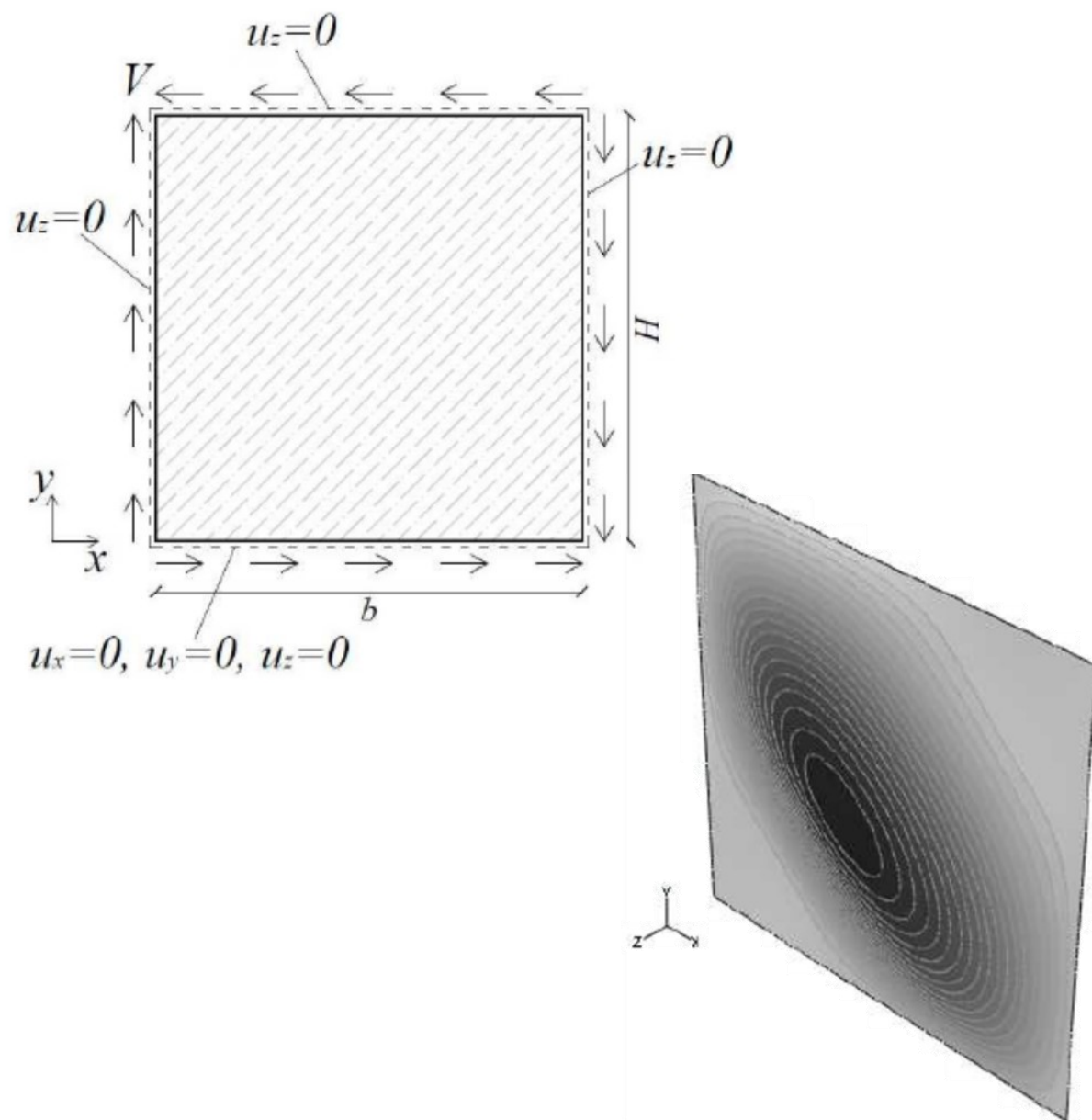
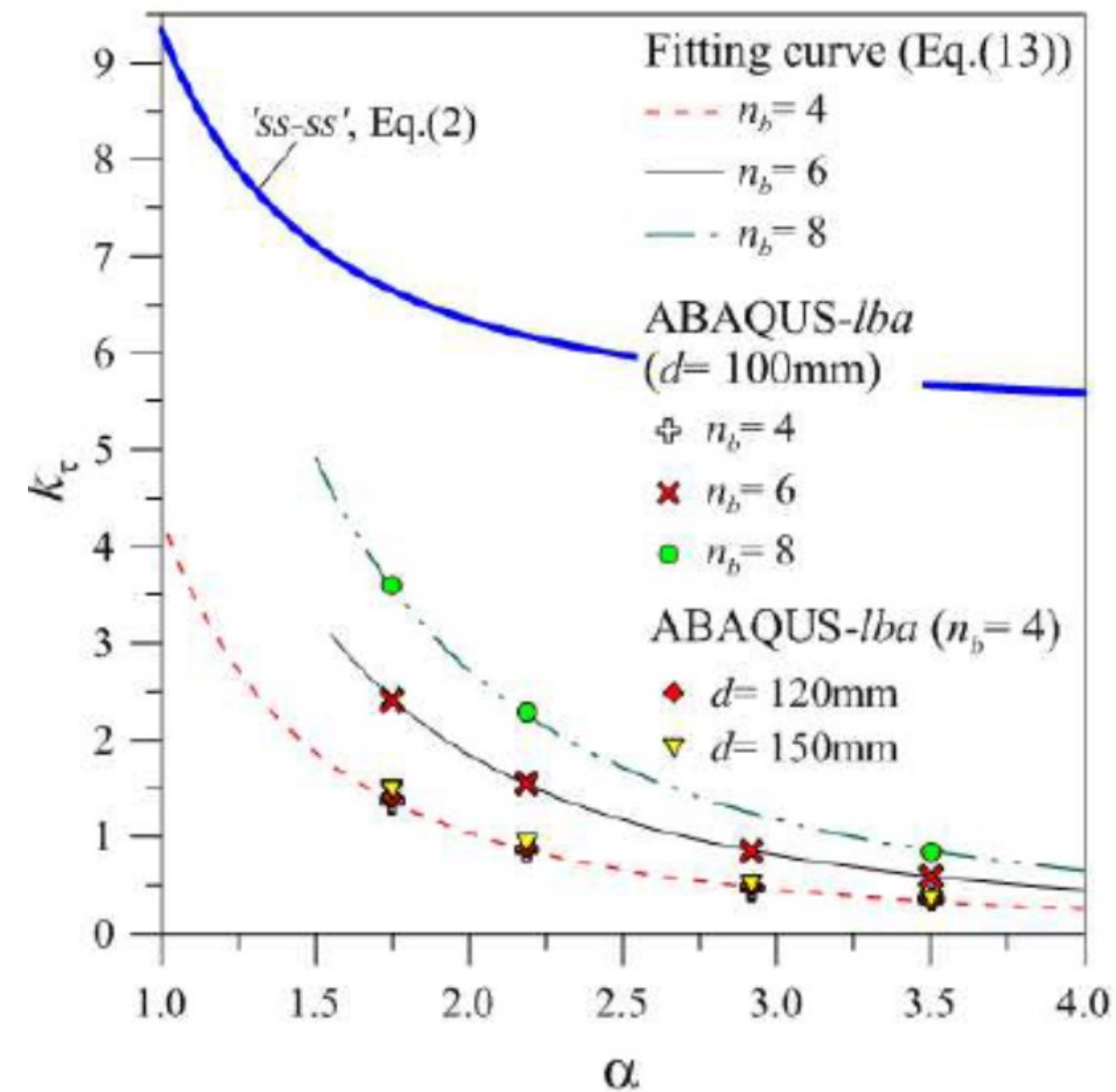
$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma$$



Lastre con vincoli continui adesivi



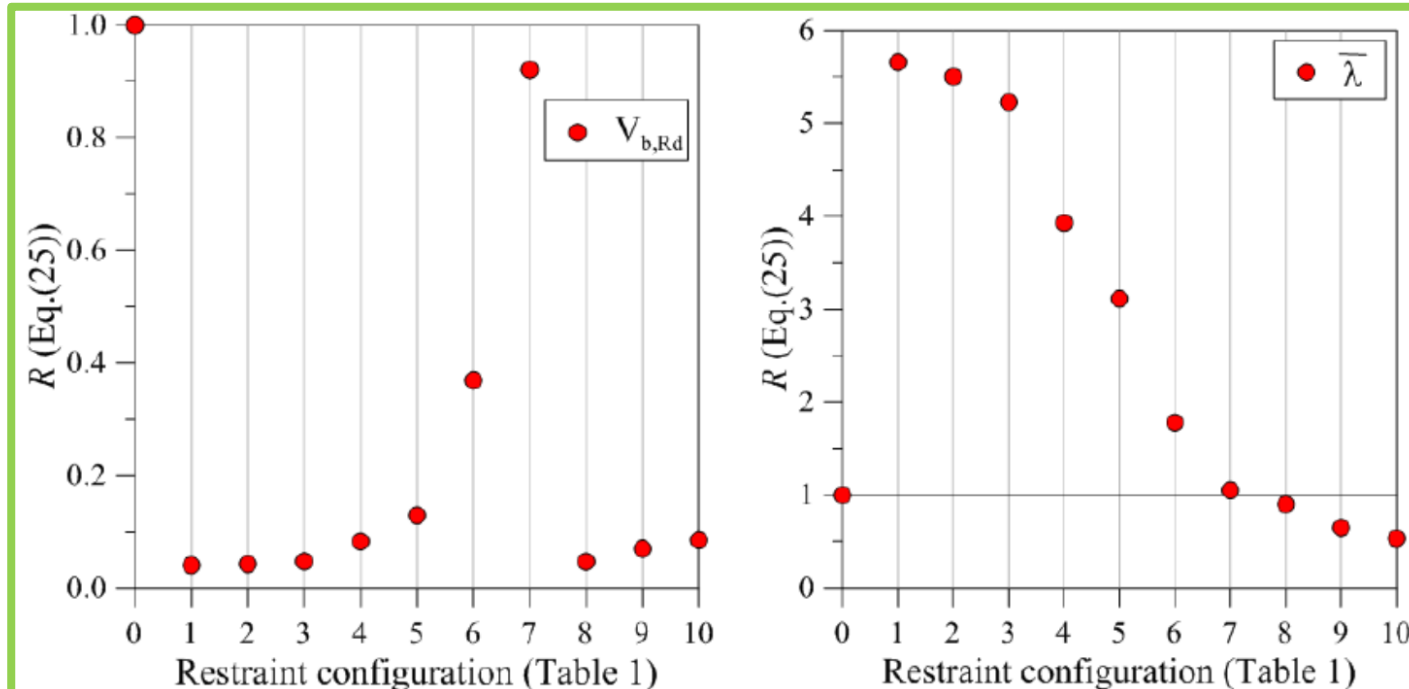
Lastre con vincoli non-ideali



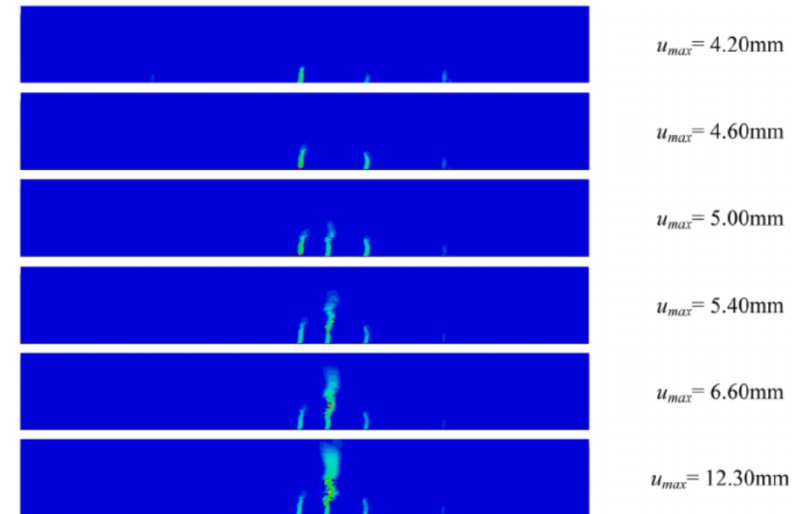
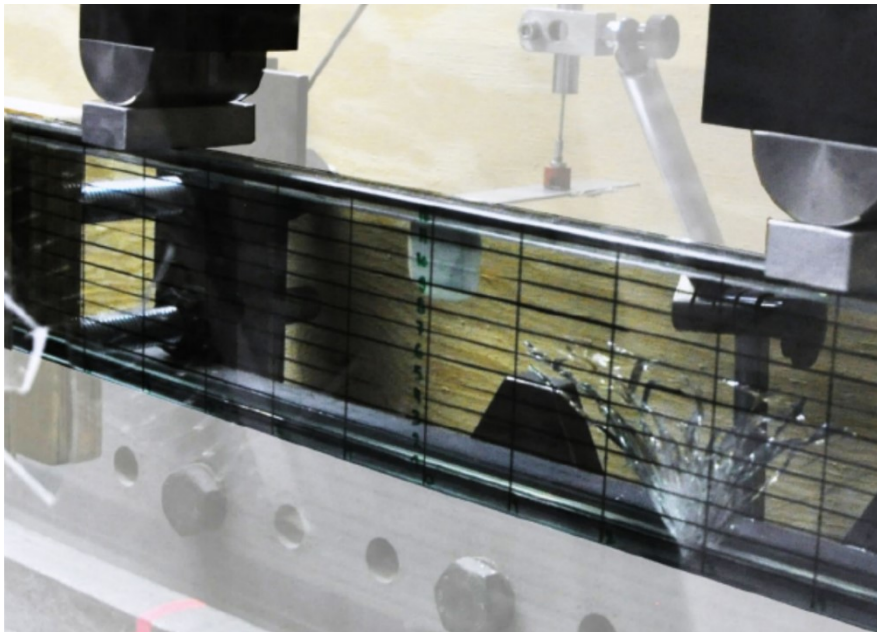
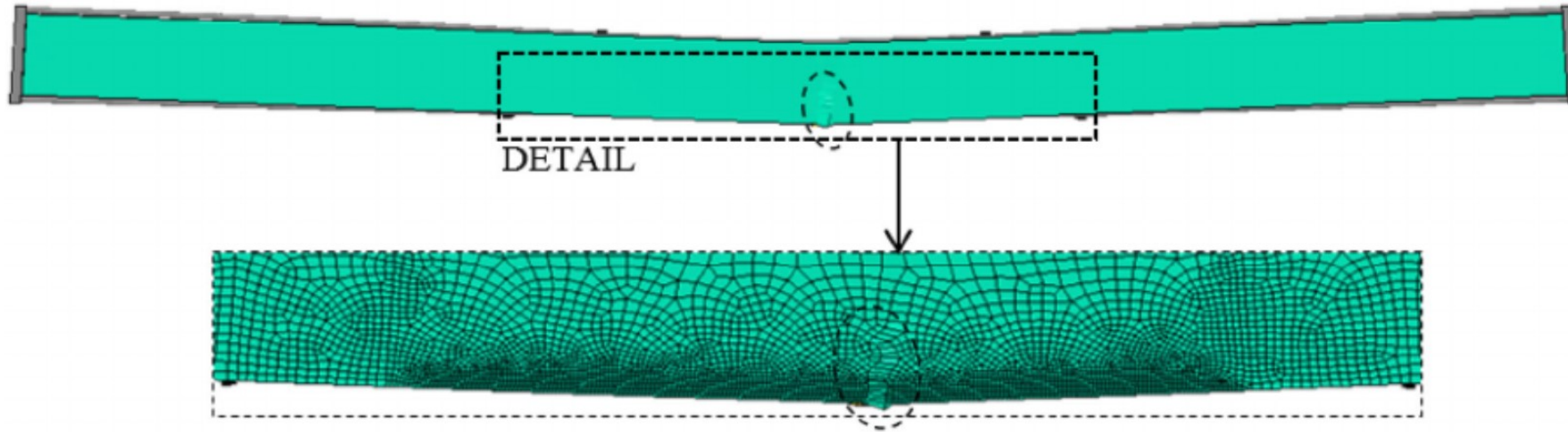
Lastre con vincoli non-ideali

Table 1. Reference restraint properties for the practical examples collected in Fig. 11

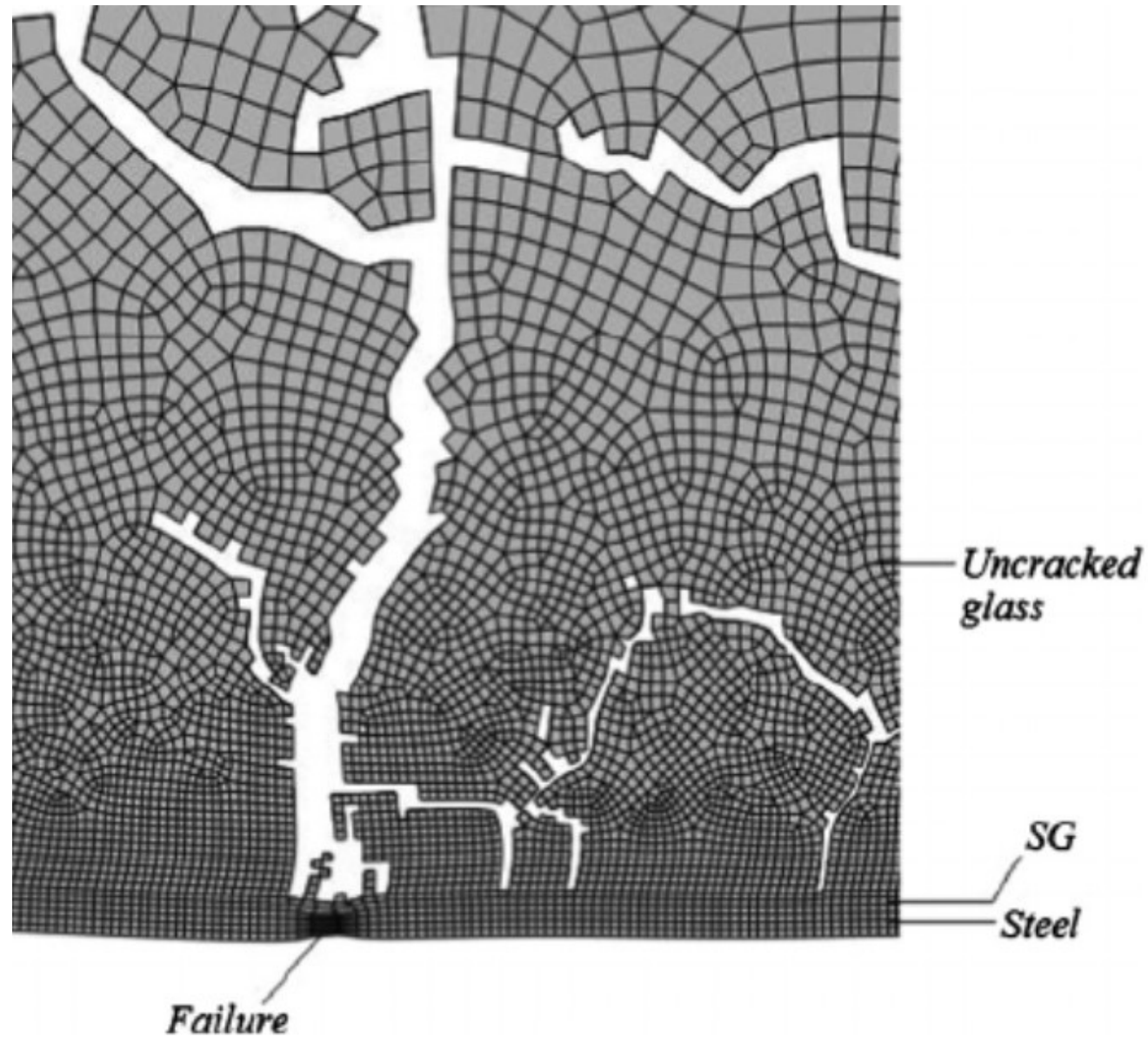
| Ref # | Restraint typology | Main features |
|-------|-----------------------|--|
| 0 | <i>ss-ss</i> | Idealized, continuous simply supports along the four edges (Fig. 1) |
| 1 | Adhesive (i) | Adhesive joints along the top/bottom edges only (Fig. 2a), with $t_{adh} = 9.5$ mm, $h_{adh} = 40$ mm, $n_{adh} = 2$ and $E_{adh} = 1.2$ MPa, while $b/5$ is the distance of small steel supports from the corners |
| 2 | Adhesive (i) | The same of #1, but $E_{adh} = 2.4$ MPa |
| 3 | Adhesive (i) | The same of #1, but $h_{adh} = 80$ mm |
| 4 | Frame + adhesive (ii) | Metal frame + adhesive joints (Fig. 2b), with $R_{EI} = 0.5$ and adhesive joints characterized as in #1 |
| 5 | Frame + adhesive (ii) | The same of #4, but $R_{EI} = 2$ |
| 6 | Frame + adhesive (ii) | The same of #4, but $R_{EI} = 10$ |
| 7 | Frame + adhesive (ii) | The same of #4, but $R_{EI} = 50$ (fully rigid frame) |
| 8 | Point-fixing (iii) | Mechanical point-fixing connectors (Fig. 3a) with $d = 100$ mm, $\phi = 42$ mm, $n_b = 4$ |
| 9 | Point-fixing (iii) | The same of #8, but $n_b = 6$ |
| 10 | Point-fixing (iii) | The same of #8; but $n_b = 8$ |



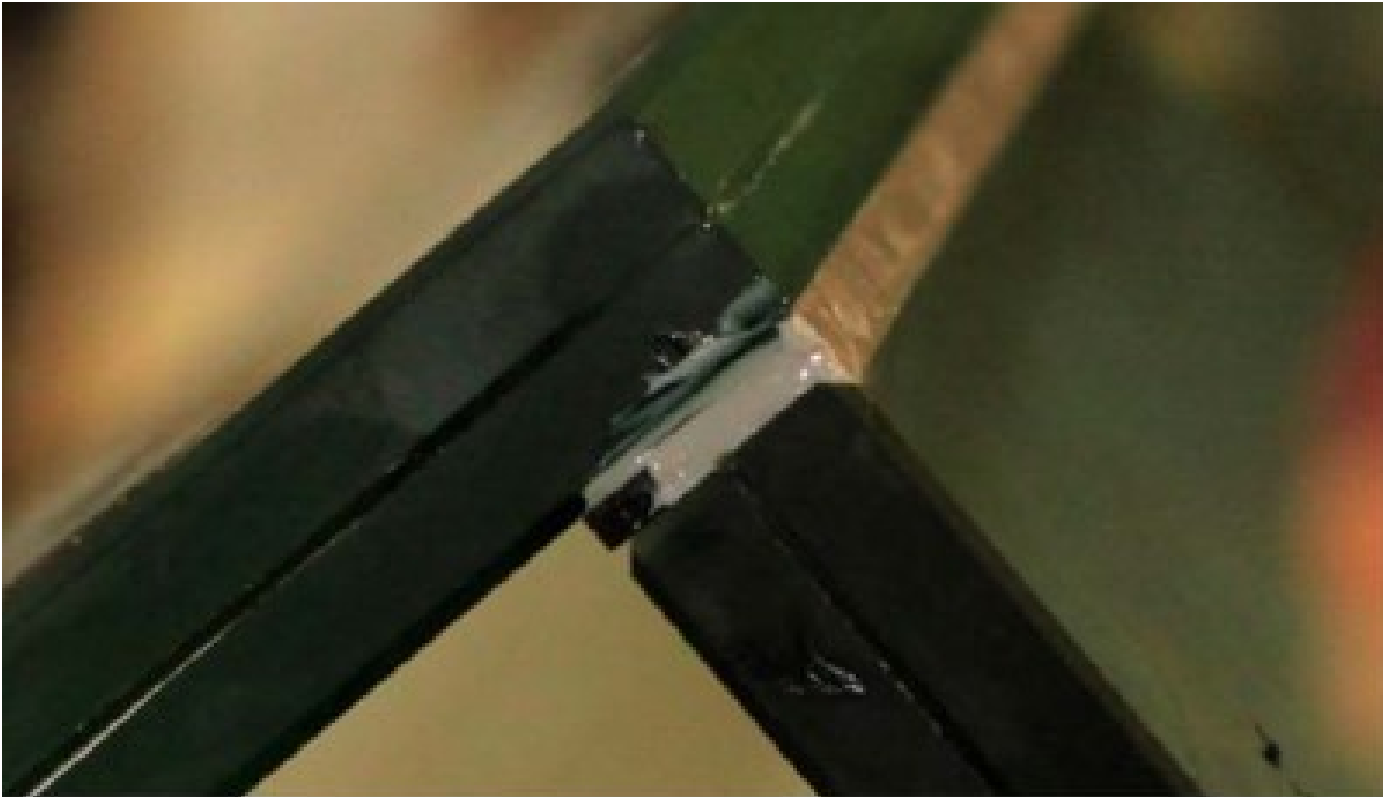
Comportamento post-rottura



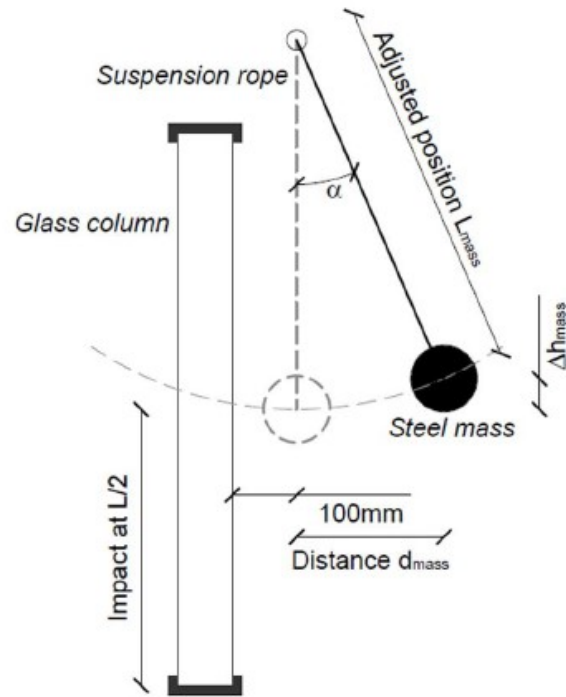
Comportamento post-rottura



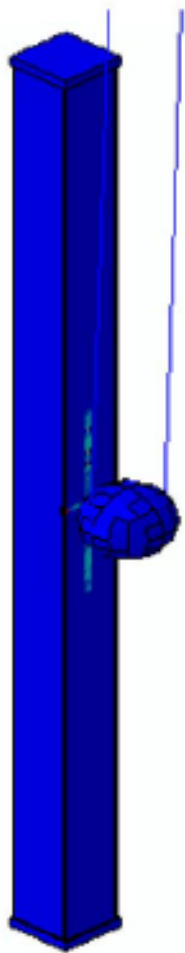
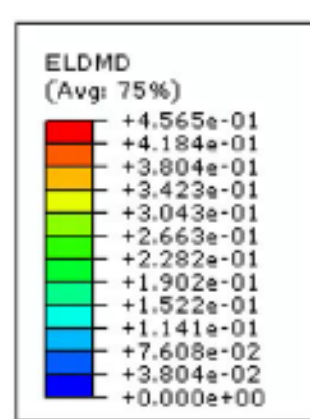
Impatto



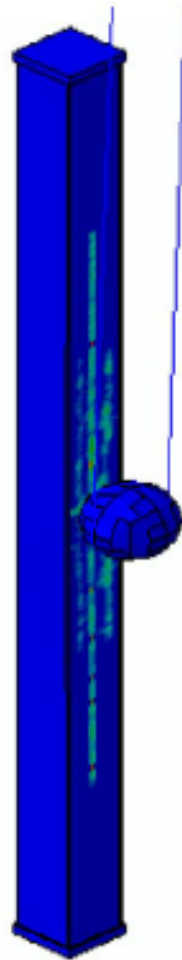
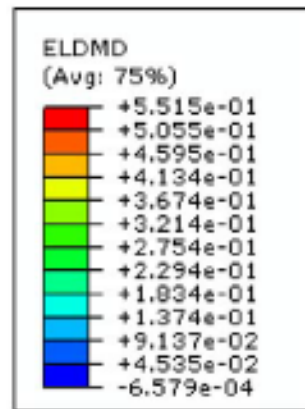
Impatto



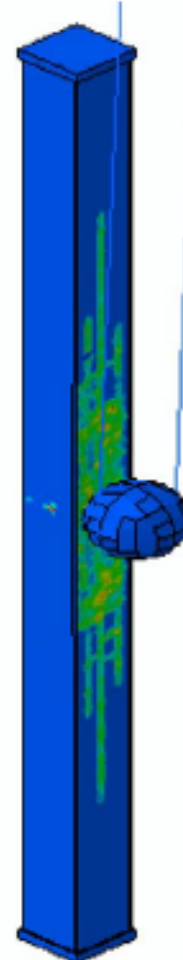
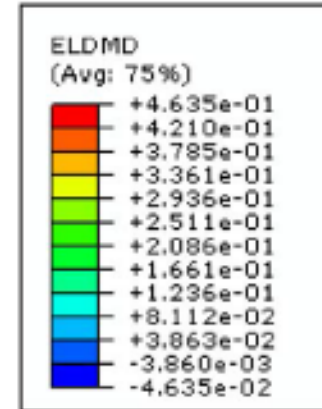
Impatto



(a) t_{impact}



(b) $t_{\text{impact}} + 0.02\text{s}$

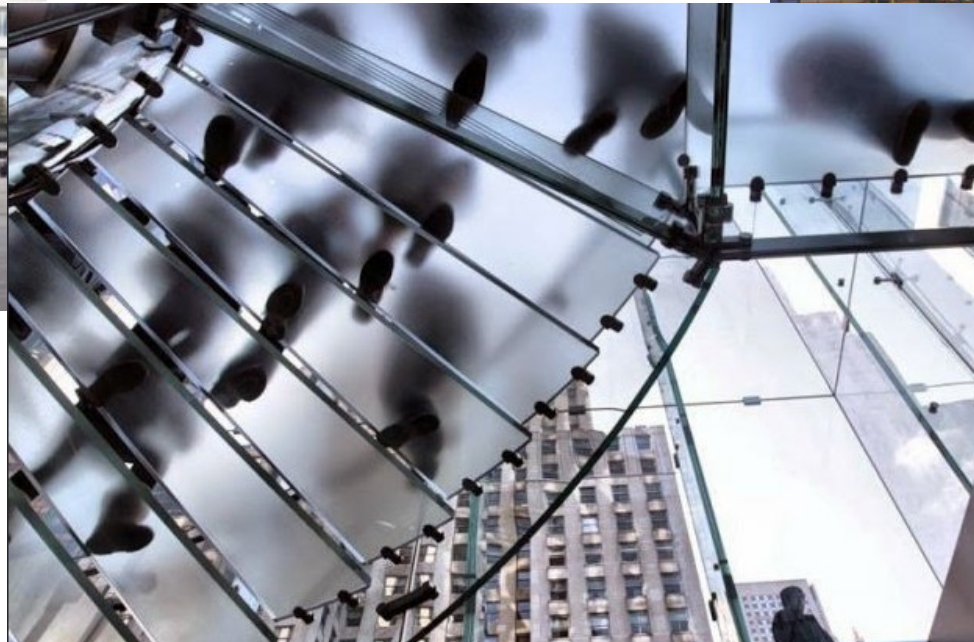


(c) $t_{\text{impact}} + 0.034\text{s}$



Seismic design of secondary frameless glass structures

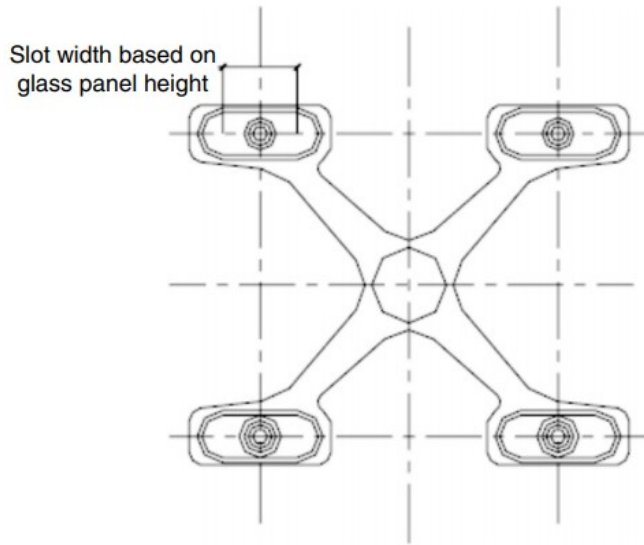
Requirements and practice



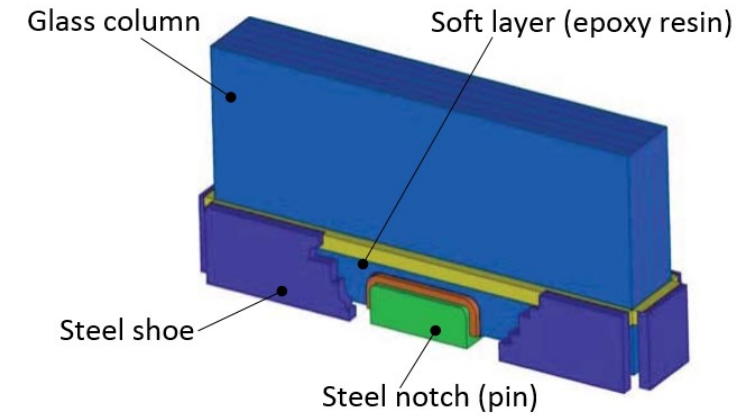


Design goals for glass structures

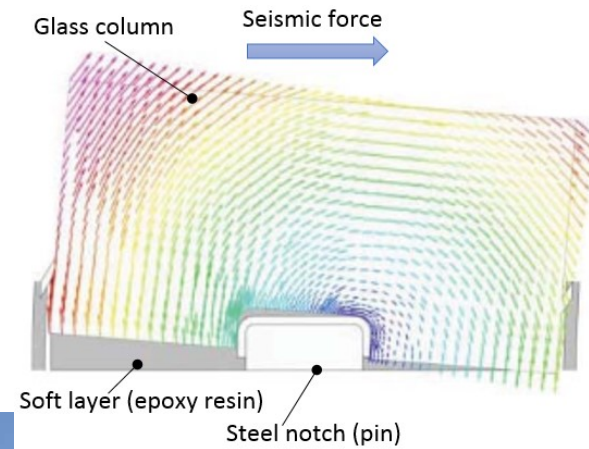
- Prevent stress peaks in glass
- Avoid large deformations
- Control vibrations (for pedestrian systems)
- Accommodate the displacement demands



Seismic spider connectors with slotted holes
Desai, Golmohammadi, Garlipp, Gowda (2005)



Pivot base joint
March (2014)





“Secondary” glass structures ?



Design recommendations – CNR DT210/2013

- Consequence class for pre- and post-failure verifications of glass
- Connectors and restraints must be also verified
- Clearance (gaps)

| Element | CC _n (pre-F) | CC _n (post-F) |
|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Vertical (linear restraints) | 1 | 1/n.a. |
| Vertical (point fixings) | 2/1 | 1/n.a. |
| Roofs | 2 | 2/1 |
| Fins | 2 | 2/1 |
| Railings (fall danger) | 2 | 2/1 |
| Floors, beams | 2 | 2 |
| Pillars | 3 | 2 (pre-F loads) |

Seismic design

- the distinction is between (a) **“secondary” structural elements** or (b) **glass elements that have a relevant structural role under seismic events**
- **(a)**= disregarded in the global analysis of the primary system. However, they are required to accommodate the main deformation and seismic performance of the primary
- **(b)**= glass systems and components that have a relevant stiffness / resistance contribution, or consist of stand-alone / special glass structures. They all fall in **CC3**, and damage /cracking must be avoided. Dedicated experiments can be also required, in support of design (for glass and /or joints and restraints)

| V_N (years) | Examples |
|---------------|--------------------------------------|
| 10 | Temporary structures ² |
| 10-25 | Replaceable parts |
| 15-30 | Agricultural structures |
| 50 | Buildings, common structures |
| 100 | Monumental buildings, bridges, other |

¹ Post-F V_N = 10 for CC1 and CC2; from specific studies for CC3

² Excluded structures / parts that can be dismantled / reused

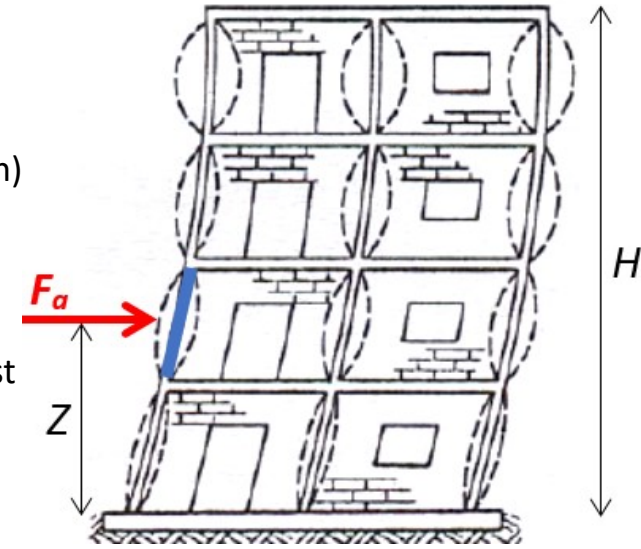
| | Importance class | | | |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Limit State | I | II | III | IV |
| SLO | - | - | ND ₄₅ | ND ₆₀ |
| SLD | SD ₃₅ | SD ₅₀ | SD ₇₅ | SD ₁₀₀ |
| SLV | HD ₃₃₃ | HD ₄₇₅ | HD ₇₁₃ | HD ₉₅₀ |
| SLC | - | - | F ₁₄₆₃ | F ₁₉₅₀ |

| Performance level | Description |
|-------------------|---|
| ND | No damage in glass; no replacement; watertightness preserved |
| SD | Partial loss of functionality; usable building; no risk for users |
| HD | High degree (and cost) of functionality loss; still no risk for users |
| F | Severe damage; evidence of failure; risk for users |

Local analysis

$$F_a = \frac{S_a W_a}{q_a}$$

- Z height of centre of gravity of the glass element to verify (from the foundation)
- H height of the full assembly / building (from the foundation)
- T_a fundamental period of the glass element to verify
- T_1 fundamental period of the full assembly / building, in the direction of interest

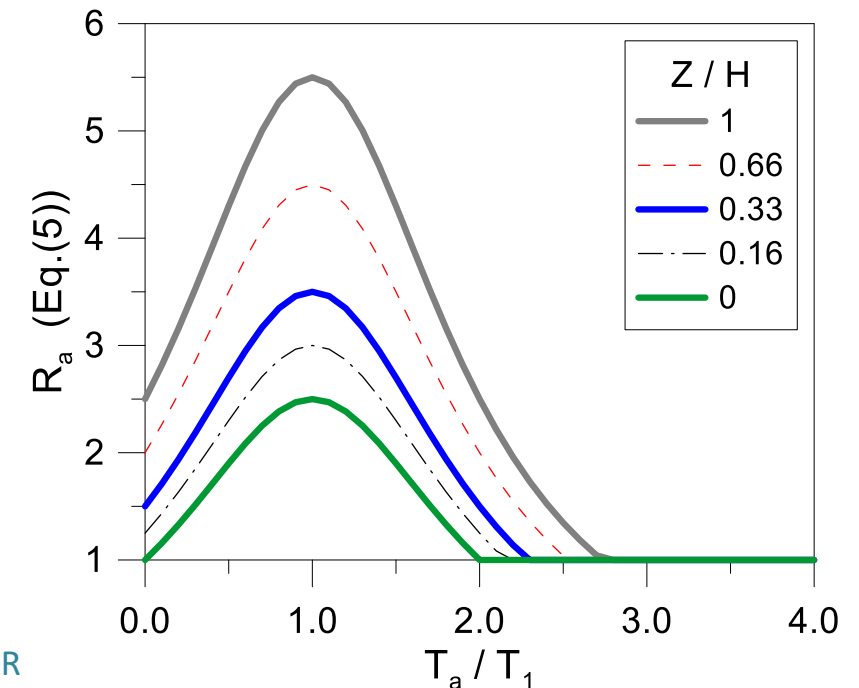


- W_a is the weight of the element,
- q_a is the behaviour factor of the glass element / system to verify
- S_a is the peak acceleration if interest

$$S_a = \frac{a_g}{g} \cdot S \cdot R_a$$

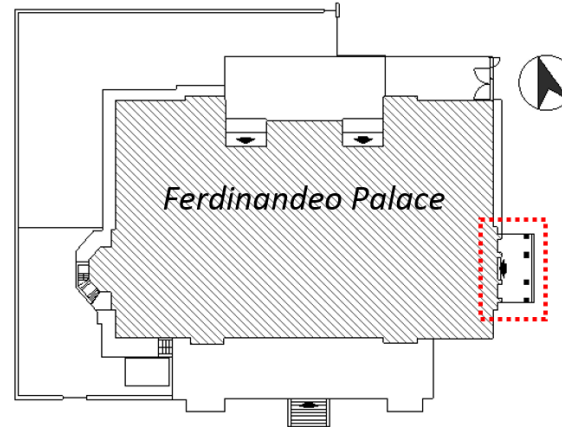
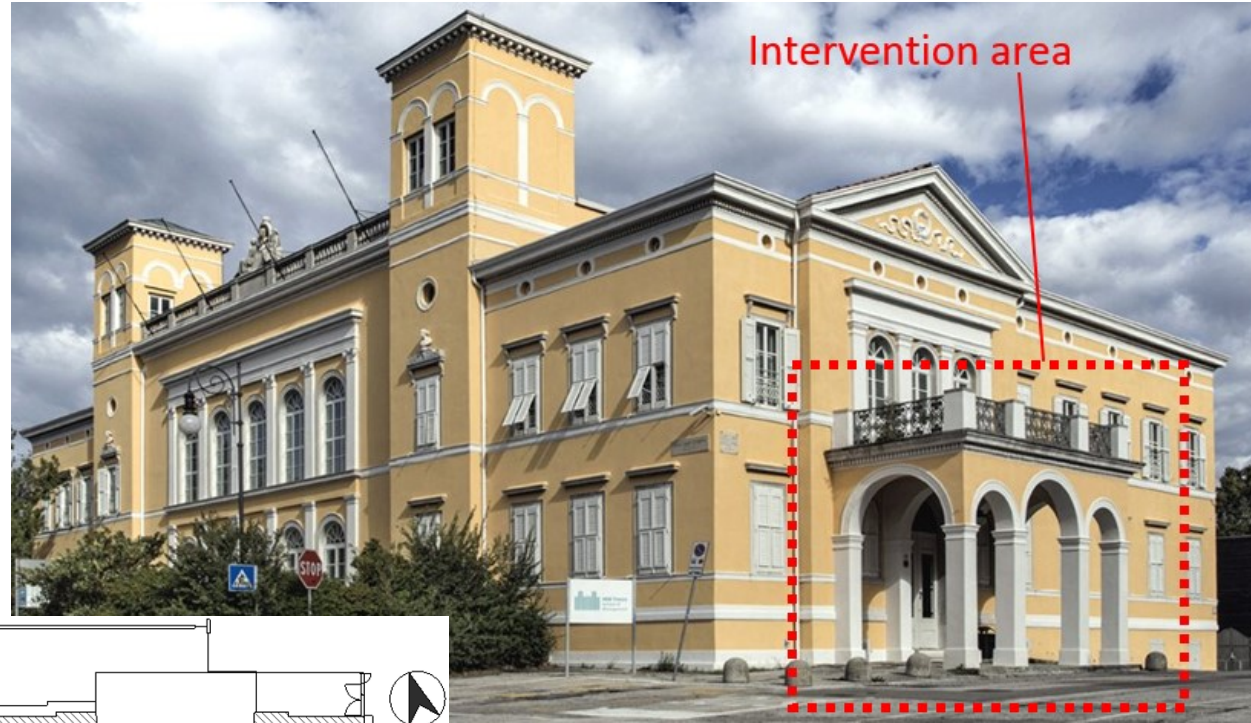
$$R_a = \max \left\{ \frac{3(1 + Z/H)}{1 + (1 - T_a/T_1)^2} - 0.5, 1 \right\}$$

- S accounts for soil category and topographical conditions



Case study system

- Glass partition wall
- Trieste (wind)
- Historical building (Ferdinando Palace)
- Strategic building (offices and private school)
- Emergence exit

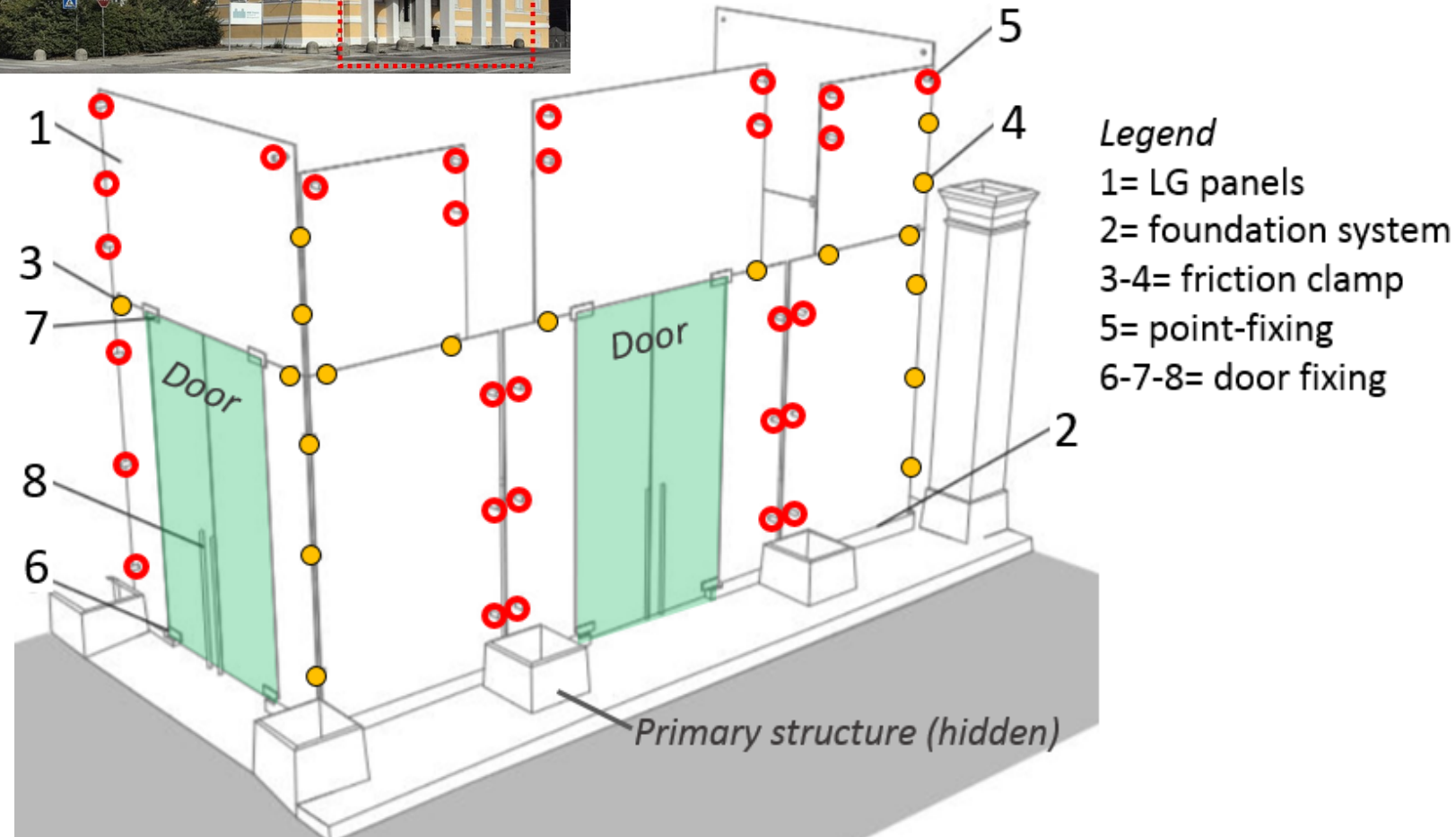
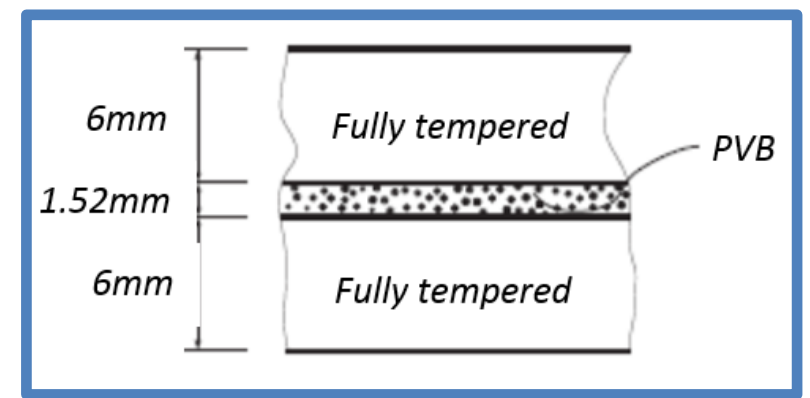
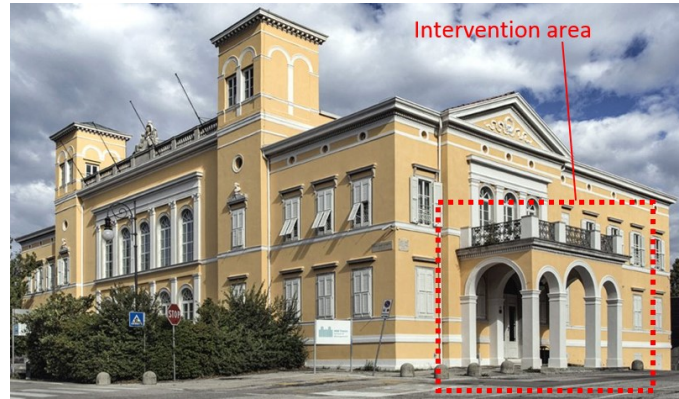


Case study system

- Laminated glass panels
- Point-fixings (with holes)
- Friction clamps
- Reversible intervention
- Bearing members minimized

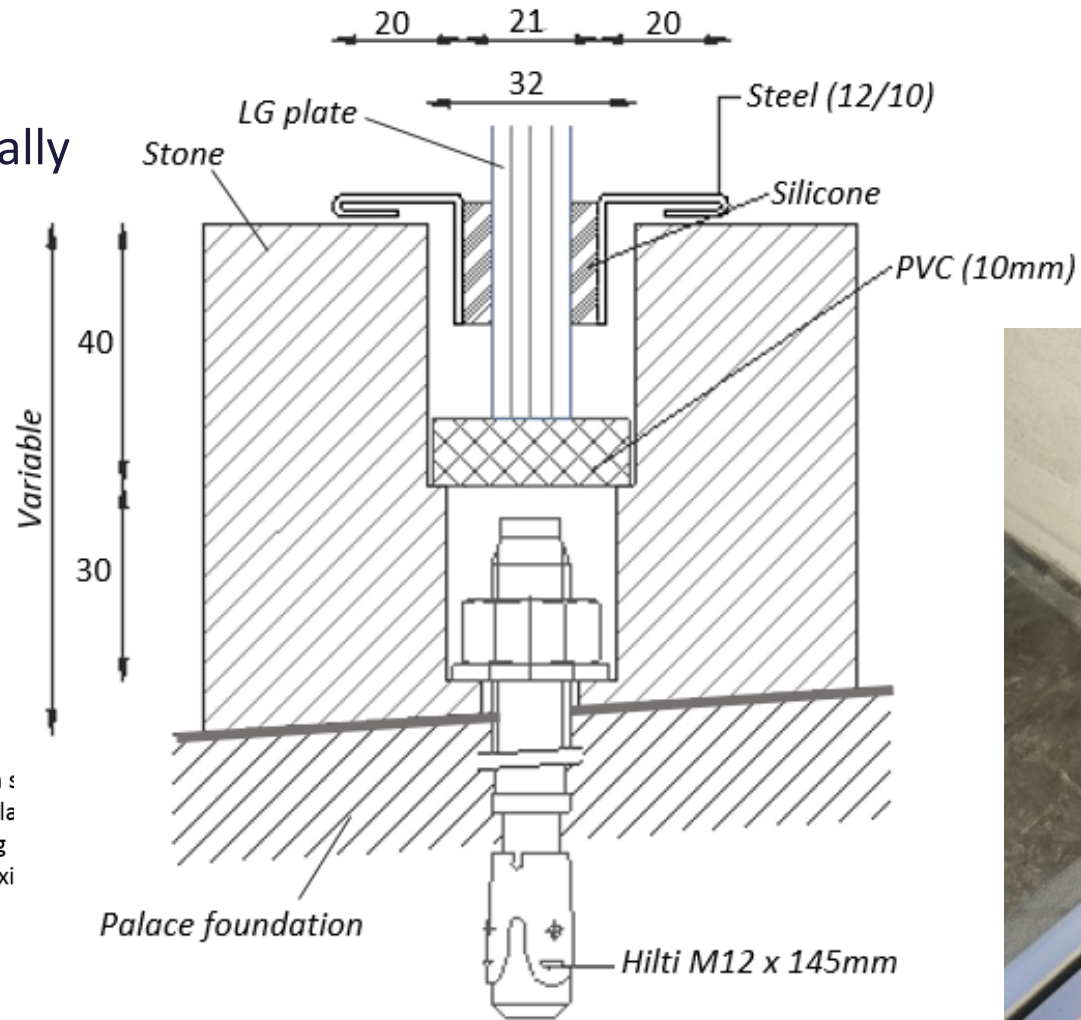
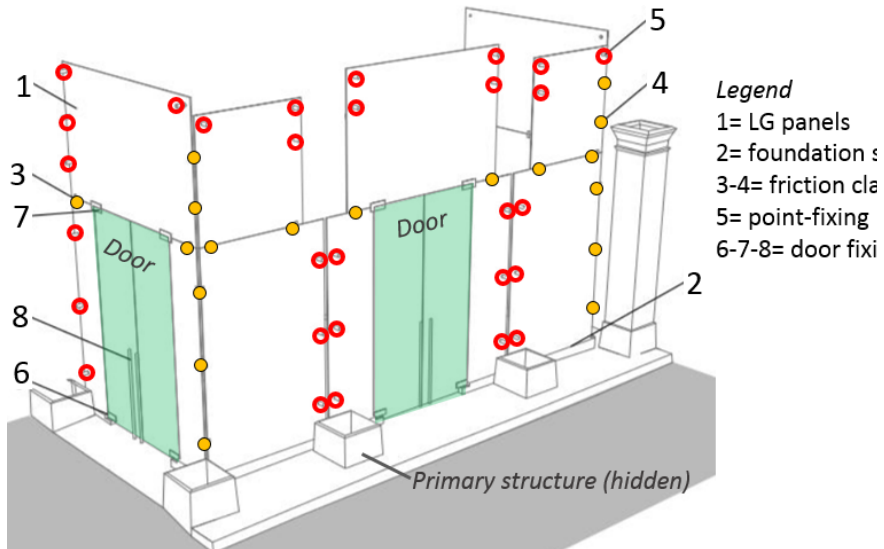
Size

- 50 square meters of glass
- 1.8 – 2.5m wide panels
- Top height= 4.65m



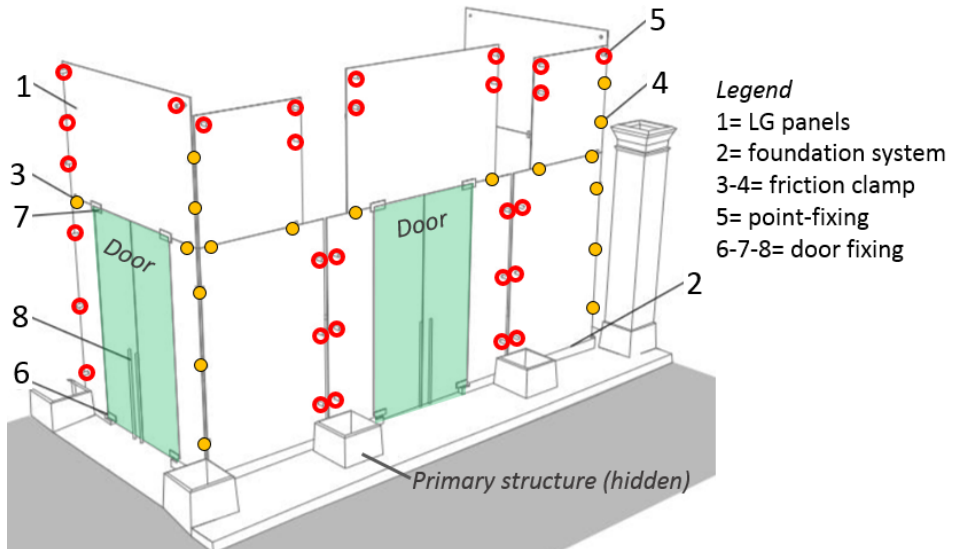
Foundation

- Bespoke stone rails, with geometrically irregular base foundation
- Avoidance of stress peaks in glass
- Relative in-plane displacements allowed



Elevation restraints

- Bespoke steel joints
- Solid section (42mm diameter)
- M12 screw
- Variable body length, to accommodate the primary building (mean 160mm)



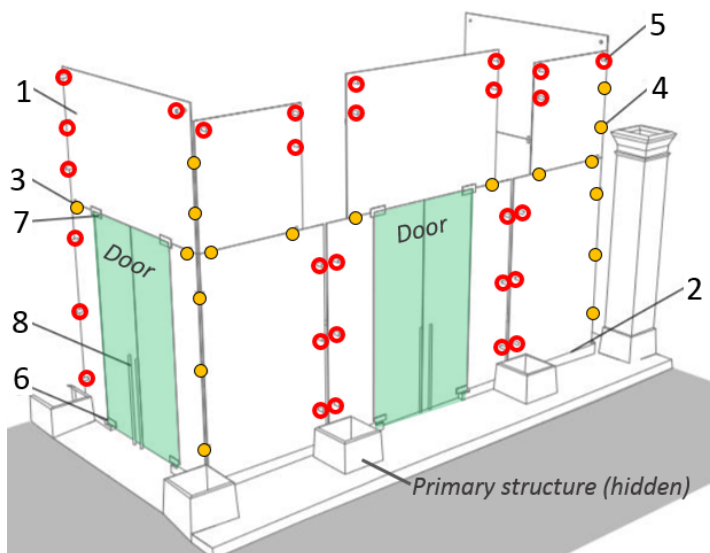
Type A
Point fixings with holes



**Type B
Friction clamps
(corners)**



**Type C
Friction clamps
(overlapping plates)**



- Legend*
- 1= LG panels
 - 2= foundation system
 - 3-4= friction clamp
 - 5= point-fixing
 - 6-7-8= door fixing

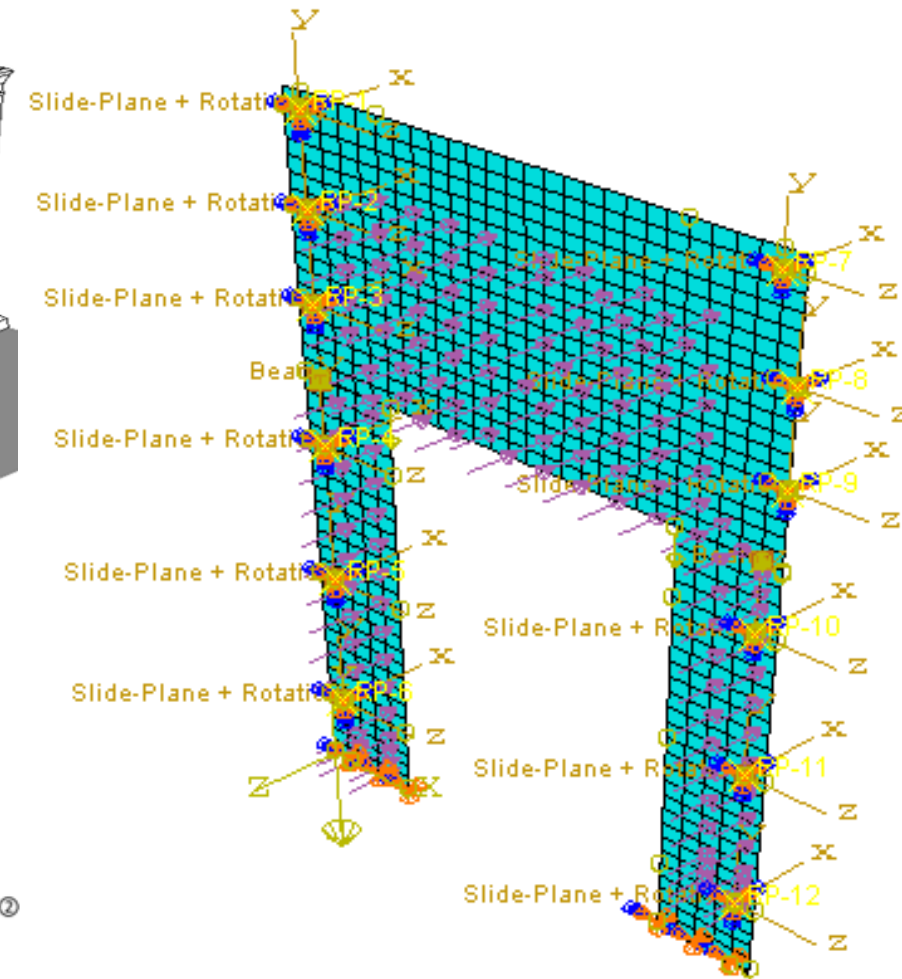
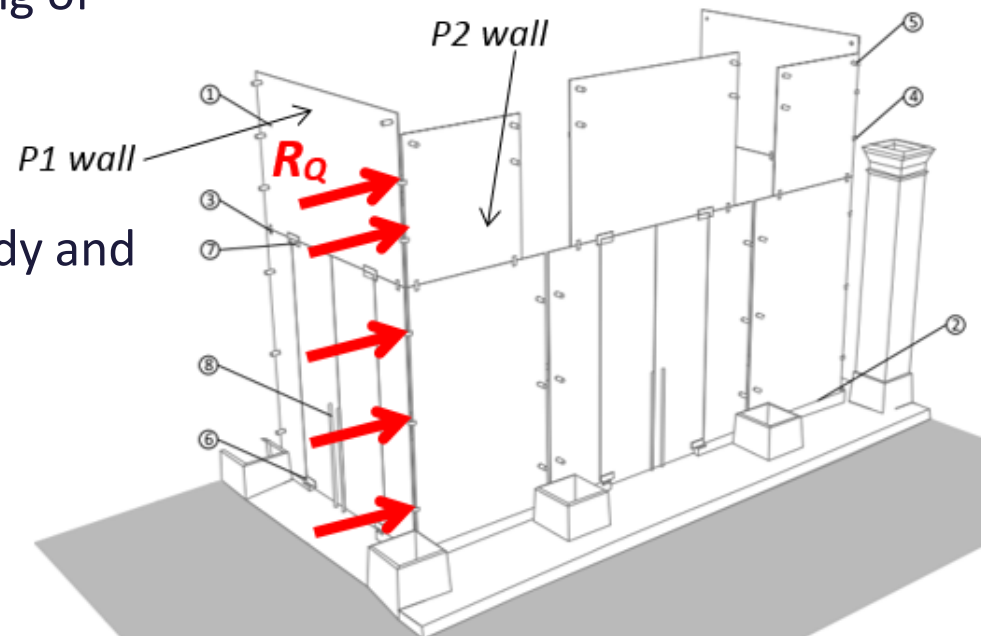
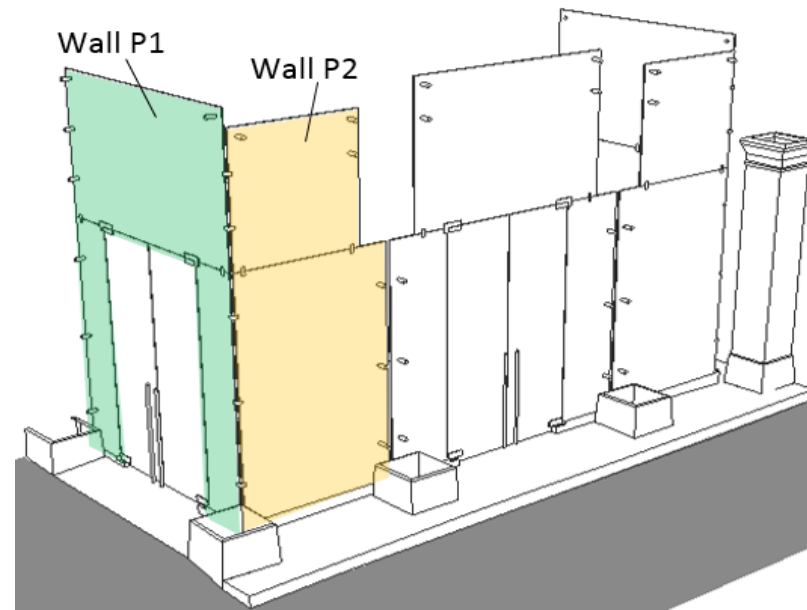
Design and analysis

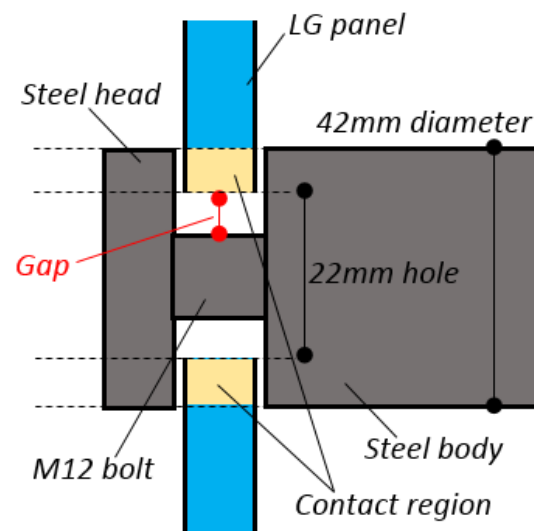
Separate local analysis of:

- Out-of-plane, and
- In-plane seismic loads

Key role of numerical modelling of point fixings:

- out-of-plane
- In-plane
- gaps between the steel body and the glass hole



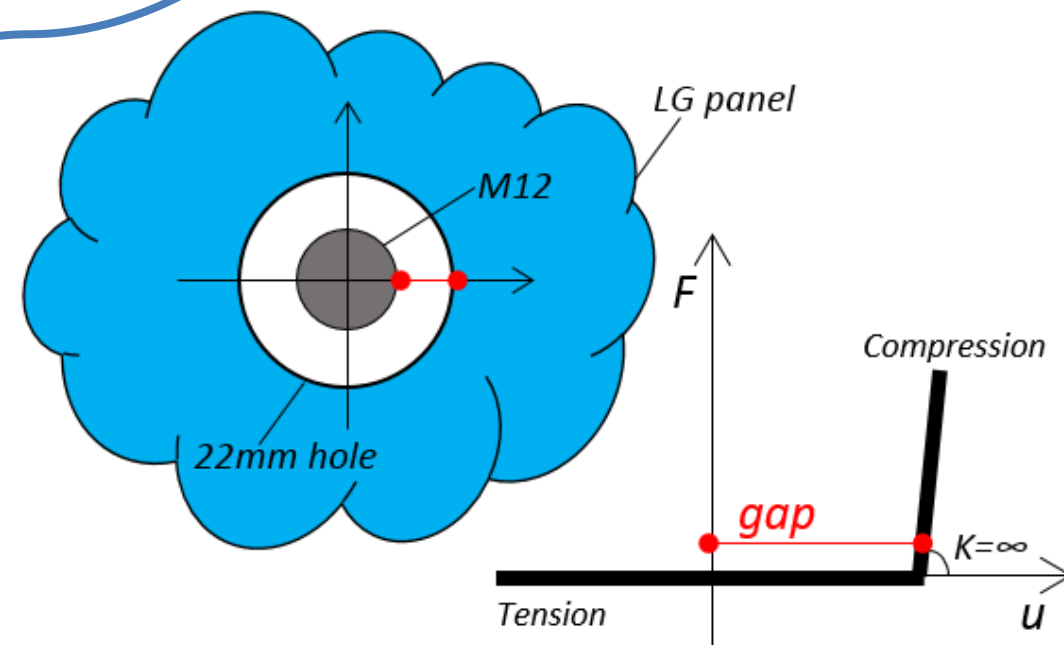
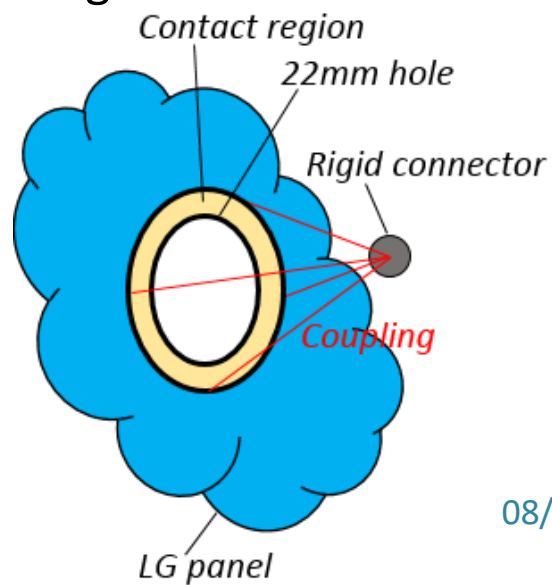


In-plane

- Unilateral restraint
- Contact in compression only

Out-of-plane

- Distributed rotational constraint (contact region)
- Infinite axial / longitudinal stiffness

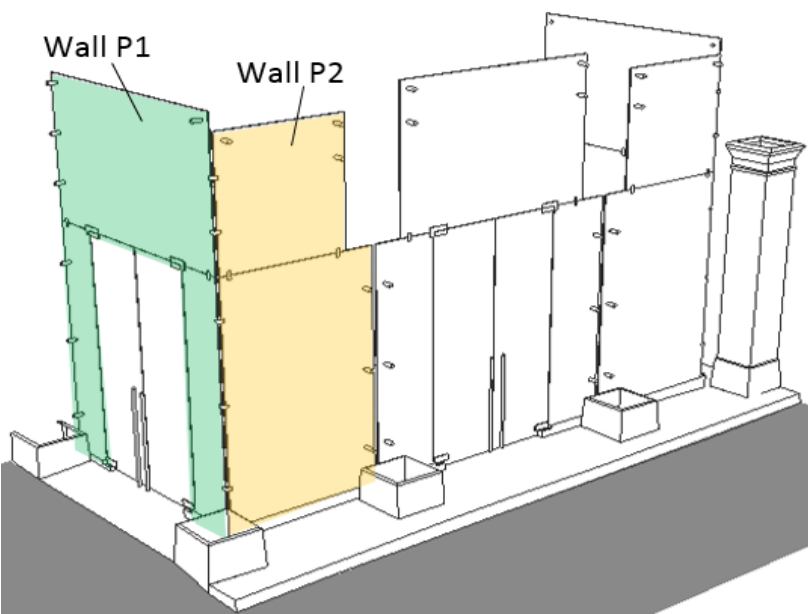


Design and analysis

$$F_a = \frac{S_a W_a}{q_a}$$

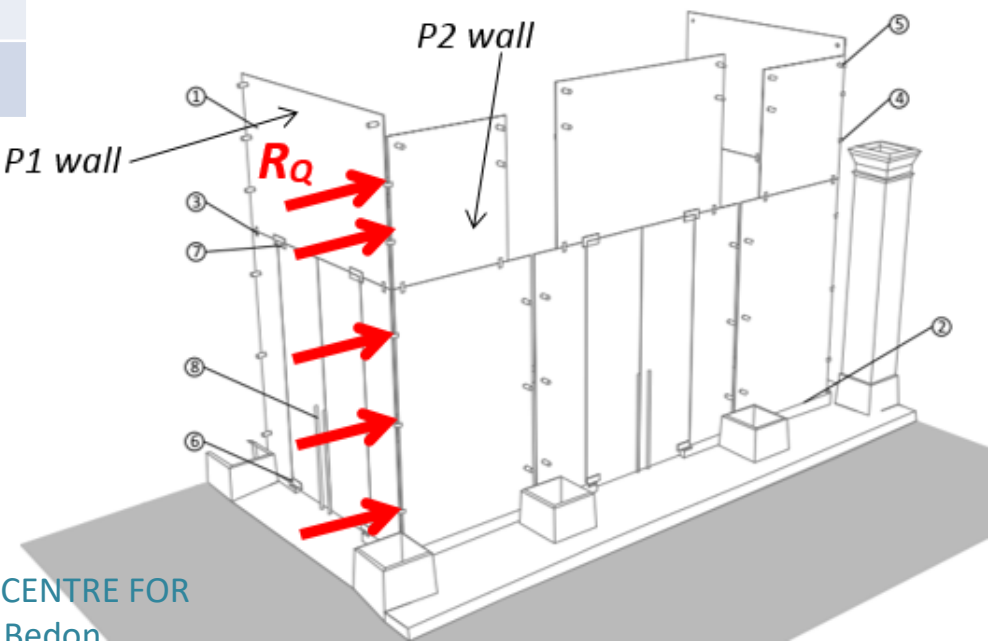
with $q_a = 1$

| R _a = 1 | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| Limit State | a _{g,max} [g] | S _a [g] | F _a [kN] | Q _a [kN/m²] |
| SLO | 0.128 | 0.154 | 0.385 | 0.049 |
| SLD | 0.167 | 0.201 | 0.503 | 0.064 |
| SLV | 0.442 | 0.531 | 1.328 | 0.170 |
| SLC | 0.546 | 0.655 | 1.638 | 0.210 |



Separate local analysis of:

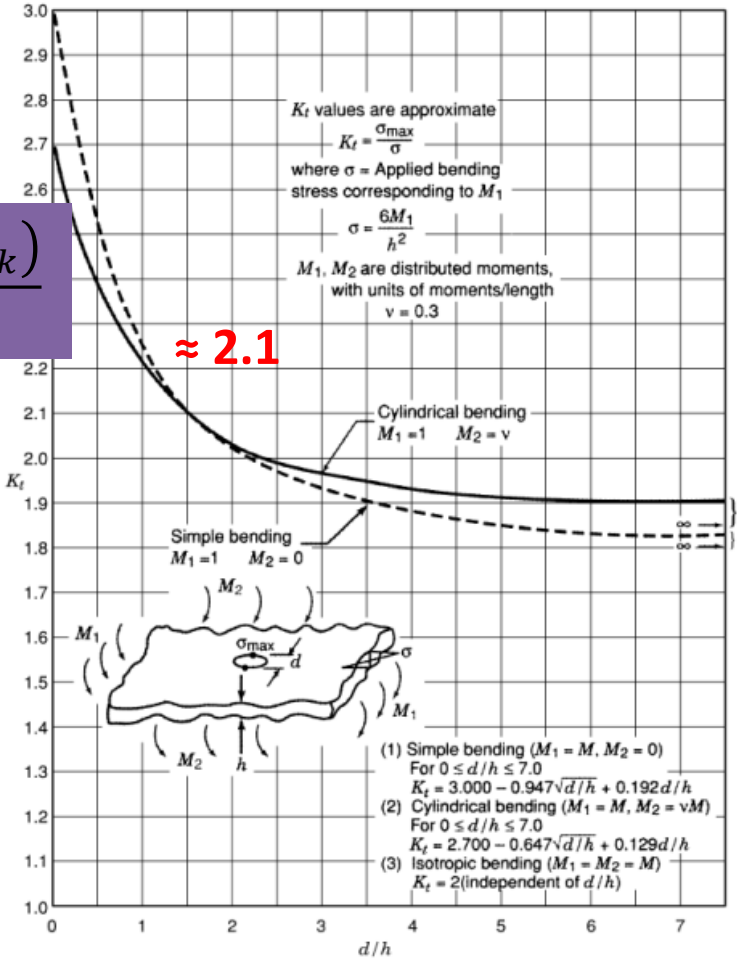
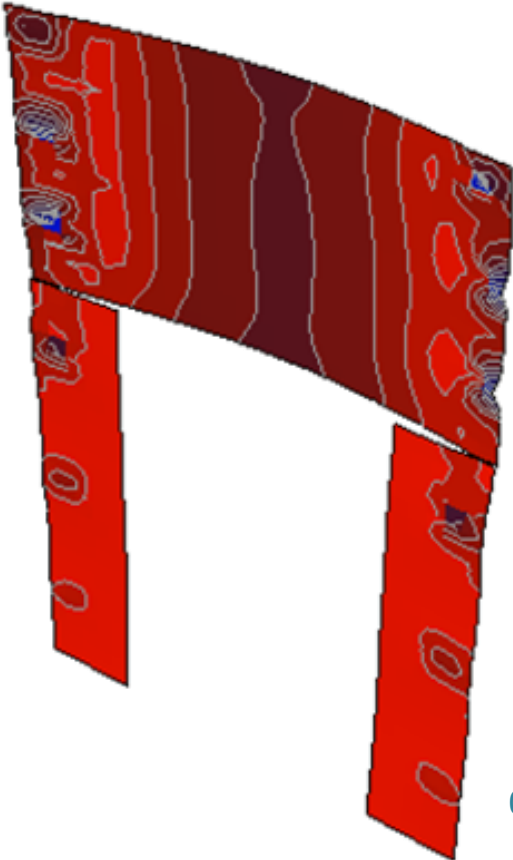
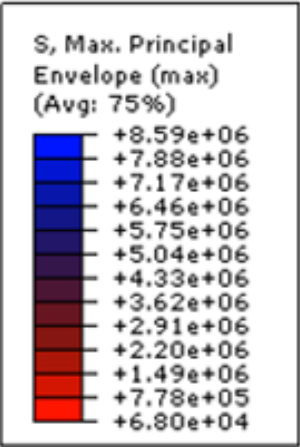
- Direct seismic effects
- Indirect seismic loads (point-fixings)



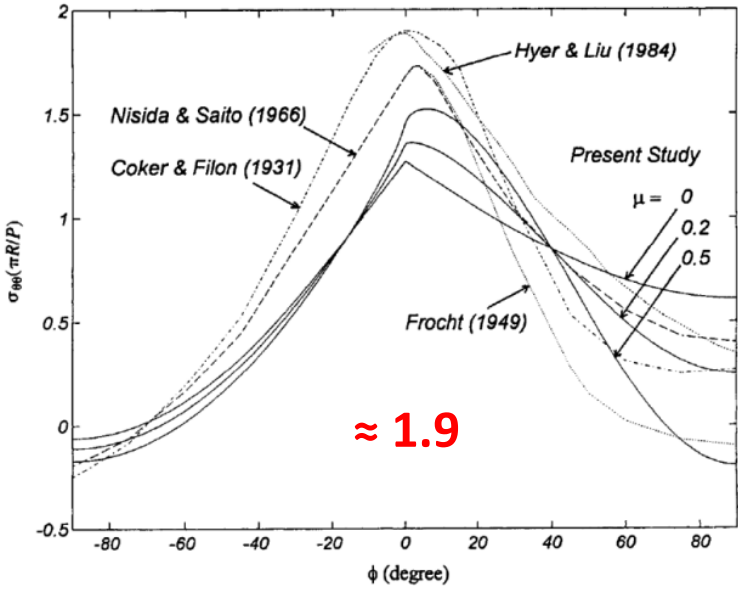
Stress verification

$$\sigma_{max} = \sigma_{FE} K \leq f_{g;d}$$

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



Coefficient for out-of-plane
(bending) loads



Coefficient for in-plane loads

Fully tempered panels, “near holes”, “short term loads”
 $f_{g;d} \approx 65\text{MPa}$

Deformations and reaction forces in the restraints

