

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

VI Seismic Academy - HILTI

Ing. Carlo Beltrami

[carlo.beltrami@lombardi.group](mailto:carlo.beltrami@lombardi.group)

Roma, 03.10.2018

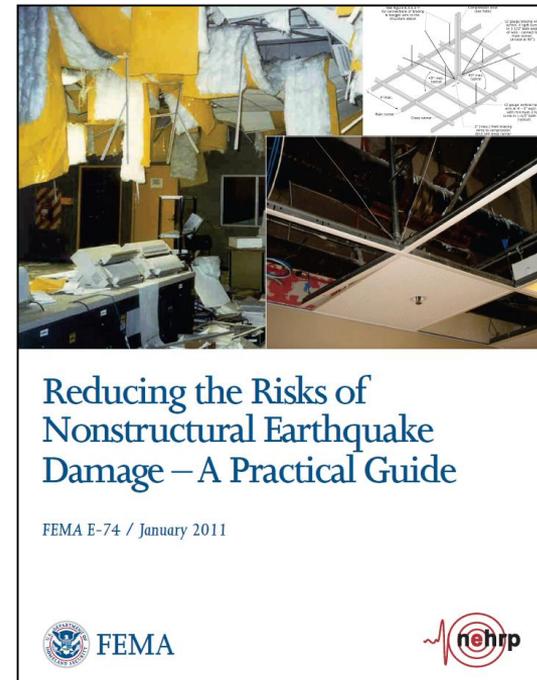
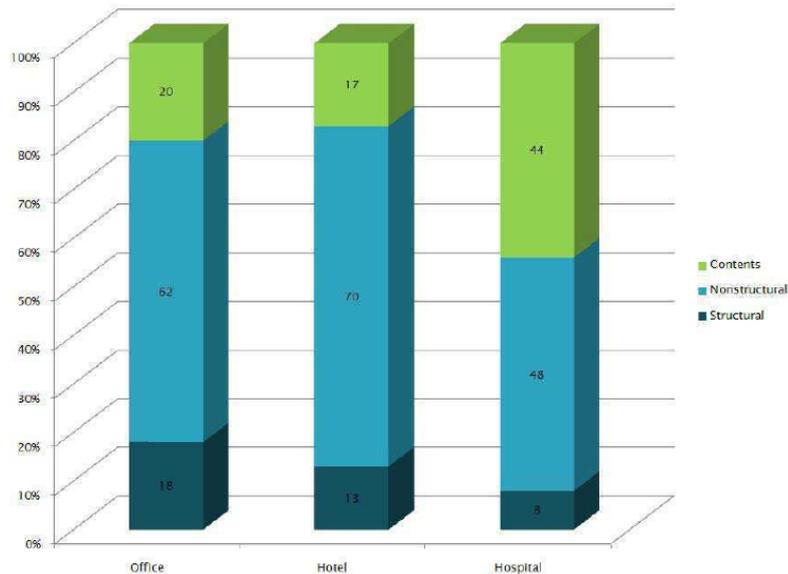
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## INDICE

- Introduzione: normativa / approccio prestazionale / applicazione
- Modello di calcolo ingegneristico proposto
- Metodo di analisi della vulnerabilità
- Metodo di verifica del rischio sismico
- Applicazione ad un caso reale:
  - Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE
  - Verifica sismica: CONTROSOFFITTI
  - Verifica sismica: PAVIMENTI
  - Verifica sismica: FACCIATE
- Conclusioni

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Intro: costo di costruzione



PBEE “Performance Based Earthquake Engineering” metodologia applicata ad elementi non strutturali (dopo Northridge 1994)

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Intro: approccio prestazionale

ASCE/SEI 41-06

NTC 2008

Target Building Performance Level	Expected Postearthquake Damage State	Target Structural Performance Level	Target Nonstructural Performance Level
Operational Level	Backup utility services maintain function; very little structural or nonstructural damage	Immediate Occupancy	Operational
Immediate Occupancy	The building remains safe to occupy; any structural or nonstructural repairs are minor	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy
Intermediate Level		Damage Control	
Life Safety	Structure remains stable and has significant reserve capacity; hazardous nonstructural damage is controlled	Life Safety	Life Safety
Intermediate Level		Limited Safety	Hazards Reduced
Collapse Prevention	The building remains standing, but only barely; the building may have severe structural and nonstructural damage	Collapse Prevention	Not Considered

SL	Descrizione della prestazione	Riferimento Norme	Classe d'uso			
			I	II	III	IV
SLO	Contenimento del danno degli elementi non strutturali	§ 7.3.7.2			x	x
	Funzionalità degli impianti	§ 7.3.7.3			x	x
SLD	Resistenza degli elementi strutturali	§ 7.3.7.1			x	x
	Contenimento del danno degli elementi non strutturali	§ 7.3.7.2	x	x		
	Contenimento delle deformazioni del sistema fondazione-terreno	§ 7.11.5.3	x	x	x	x
	Contenimento degli spostamenti permanenti dei muri di sostegno	§ 7.11.6.2.2	x	x	x	x
SLV	Assenza di martellamento tra strutture contigue	§ 7.2.2	x	x	x	x
	Resistenza delle strutture	§ 7.3.6.1	x	x	x	x
	Duttilità delle strutture	§ 7.3.6.2	x	x	x	x
	Assenza di collasso fragile ed espulsione di elementi non strutturali	§ 7.3.6.3	x	x	x	x
	Resistenza dei sostegni e collegamenti degli impianti	§ 7.3.6.3	x	x	x	x
	Stabilità del sito	§ 7.11.3	x	x	x	x
	Stabilità dei fronti di scavo e dei rilevati	§ 7.11.4	x	x	x	x
	Resistenza del sistema fondazione-terreno	§ 7.11.5.3	x	x	x	x
	Stabilità dei muri di sostegno	§ 7.11.6.2.2	x	x	x	x
	Stabilità delle paratie	§ 7.11.6.3.2	x	x	x	x
Resistenza e stabilità dei sistemi di contrasto e degli ancoraggi	§ 7.11.6.4.2	x	x	x	x	
SLC	Resistenza dei dispositivi di vincolo temporaneo tra costruzioni isolate	§ 7.2.1	x	x	x	x
	Capacità di spostamento degli isolatori	§ 7.10.6.2.2	x	x	x	x

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

**Intro: in particolare si cita NTC 2008**

*“Gli elementi strutturali secondari devono essere in grado di **mantenere la loro portanza nei confronti dei carichi verticali** nella configurazione deformata più sfavorevole tenendo conto, quando necessario, delle non linearità geometriche, nei modi specificati nel §7.3. ....”*

*Per gli elementi costruttivi senza funzione strutturale **debbono essere adottati magisteri atti ad evitare collassi fragili e prematuri** e la possibile espulsione sotto l'azione della Fa (v. § 7.2.3) corrispondente allo SLV. ....*

*Le verifiche nei confronti degli stati limite di esercizio degli elementi strutturali, degli elementi non strutturali e degli impianti si effettuano rispettivamente in termini di **resistenza, di contenimento del danno e di mantenimento della funzionalità**. ....*

*Per le costruzioni ricadenti in classe d'uso III e IV si deve verificare che l'azione sismica di progetto **non produca danni agli elementi costruttivi senza funzione strutturale** tali da rendere temporaneamente non operativa la costruzione. ....*

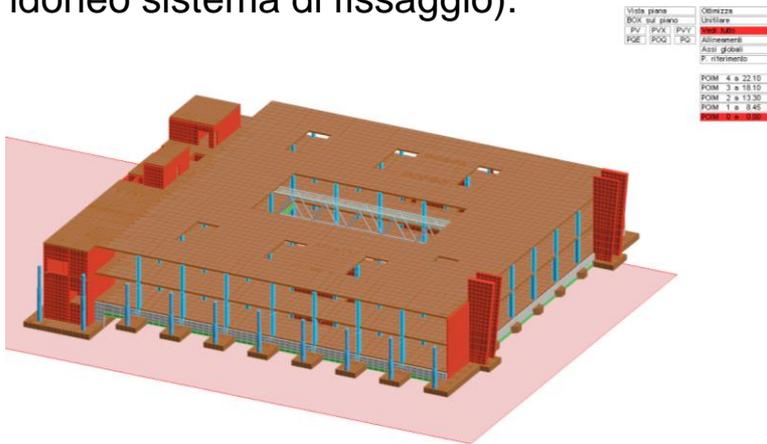
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Intro: come affrontare un progetto di edifici importanti (es. Ospedale) ?



**Approccio basico** = professionista firma un progetto di verifica di un sistema di fissaggio (“anti-sismico”).....non è sufficiente

**Approccio NTC 2008** = professionista sviluppa una verifica prestazionale (domanda vs capacità) per gli elementi secondari di questo edificio (adottando anche un idoneo sistema di fissaggio).





# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Intro: approccio NTC 2008 (prestazionale)...si propone di seguire un classico

- ANALISI DELLA VULNERABILITA'
- ANALISI DELLA DOMANDA SISMICA
- VERIFICA DEL RISCHIO SISMICO

Come applicarlo ad un caso reale ? Ad esempio di un edificio importante ?

- Le sole NTC non sono purtroppo dettagliate per sviluppare un progetto esecutivo, vi sono regole a livello PP/PD per il calcolo.....di controparte ci sono prestazioni attese molto chiare ( → responsabilità del progettista !)
- Necessità quindi di appoggiarsi a norme più sviluppate, es USA (FEMA e ATC)
- Necessità di definire una modalità di verifica che abbia un senso ingegneristico:
  - Impossibilità di creare un modello di calcolo con tutti i gradi di libertà / vincoli delle strutture primarie e secondarie
  - Impossibilità di gestire / verificare tutti i meccanismi concomitanti di danneggiamento e collasso delle strutture primarie e secondarie

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Intro: approccio NTC 2008 (prestazionale)...

$$F_a = (S_a W_a) / q_a \quad (7.2.1)$$

dove

$F_a$  è la forza sismica orizzontale agente al centro di massa dell'elemento non strutturale nella direzione più sfavorevole;

$W_a$  è il peso dell'elemento;

$S_a$  è l'accelerazione massima, adimensionalizzata rispetto a quella di gravità, che l'elemento strutturale subisce durante il sisma e corrisponde allo stato limite in esame (v. § 3.2.1)

$q_a$  è il fattore di struttura dell'elemento.

- Analisi pseudostatica
- Il rispetto delle verifiche SLD/SLO ricade su limiti di deformazione interpiano **dr**

### ...i limiti nei confronti di un approfondimento necessario a livello di progetto esecutivo:

- La verifica è demandata a PP/PD, con dim. controventi struttura primaria sufficientemente rigidi
- Lo stato SLV (collasso fragile ed espulsione elementi) non è chiaramente affrontato
- Gli effetti torcenti possono influenzare sensibilmente la variabilità di  $dr$  nel piano
- Le capacità deformative degli elementi secondari non sono affrontati (ma possono essere critici)
- Non si perviene ad una valutazione prestazionale del rischio (elemento secondario = dettaglio !)
- Assenza valutazione del “rischio concatenato” fra diversi elementi secondari (es: partizioni vs. controsoffitti)

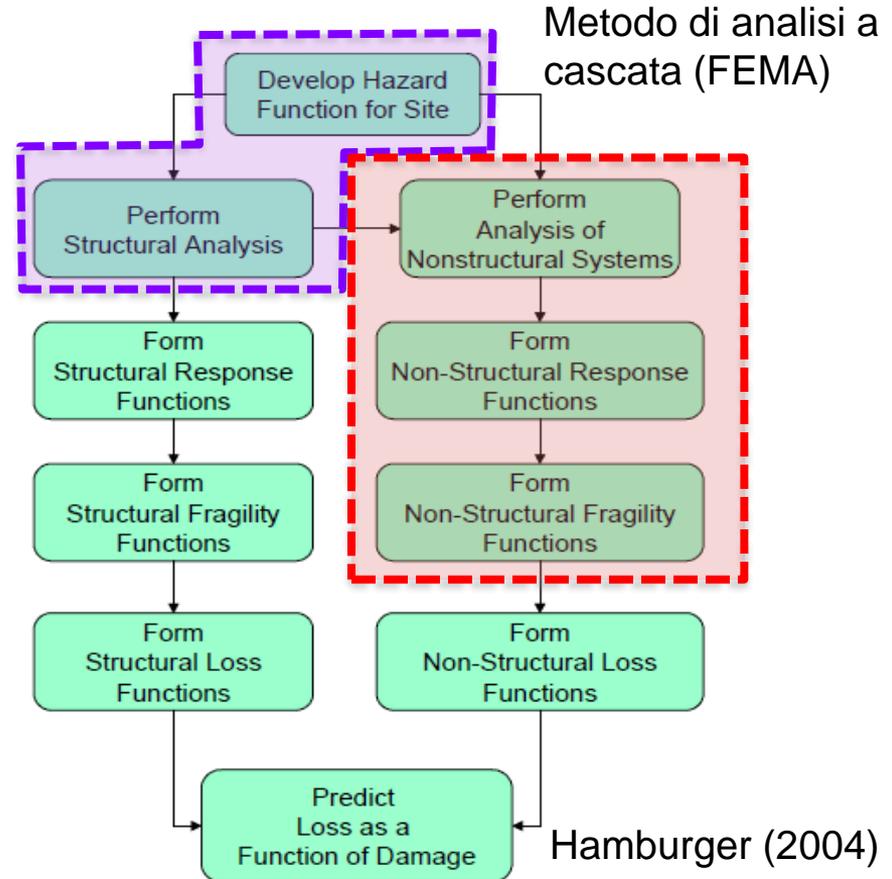
- a) per tamponamenti collegati rigidamente alla struttura che interferiscono con la deformabilità della stessa  
 $d_r < 0,005 h$  (7.3.16)
- b) per tamponamenti progettati in modo da non subire danni a seguito di spostamenti di interpiano  $d_{tp}$ , per effetto della loro deformabilità intrinseca ovvero dei collegamenti alla struttura:  
 $d_r \leq d_{tp} \leq 0,01 h$  (7.3.17)
- c) per costruzioni con struttura portante in muratura ordinaria  
 $d_r < 0,003 h$  (7.3.18)
- d) per costruzioni con struttura portante in muratura armata  
 $d_r < 0,004 h$  (7.3.19)

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Intro: una possibile risposta

Approccio NTC 2008 + USA (prestazionale)

USA Davies et al. (2011)	Italia NTC 2008
DS1 - Superficial damage to the walls	SLO - Limit State of Operation
DS2 - Local damage of gypsum wallboards and/or steel frame components	SLD - Limit State of Damage
DS3 - Severe damage to walls	SLV - Limit State of Preservation of Life



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Intro: esempio di applicazione ad elementi secondari di tipologia architettonica

## Tipologia

Partizioni interne (cartongesso)

Controsoffitti

Pavimenti (flottanti)

Facciate

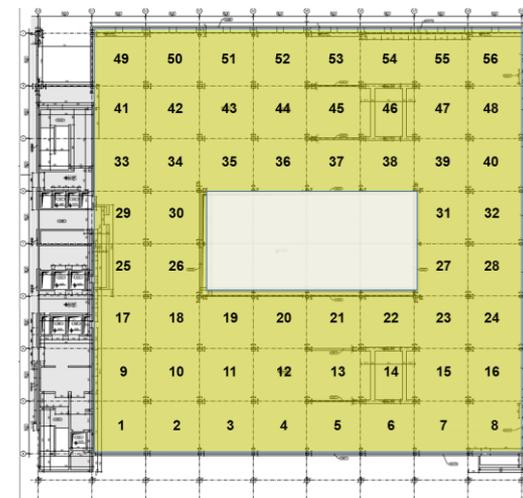


un numero totale di  
27 piani degli edifici  
oggetto della verifica

EDIFICIO	LIVELLI	MQ
A1	0-1-2-3	11.520
A2	0-1-2	8.960
A3	0-1-2	8.576
B1	0-1-2	6.144
B2	0-1-2	12.672
B3	0-1-2-3	7.040
C1	0-1-2-3	8.192
C2	0-1-2-3	11.264
C3	0-1-2-3	8.192
TOTALE	27 livelli	82.560

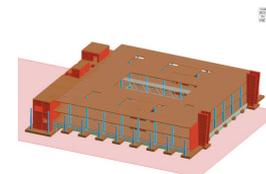
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Modello di calcolo ingegneristico proposto – geometria di calcolo



**Suddivisione in unità elementari: 8mx8m**

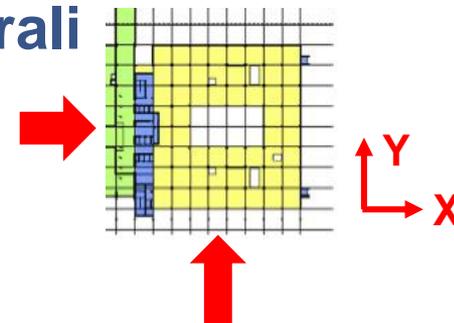
**Edificio in esame**



Ciascun piano è stato diviso in unità di calcolo elementari, di dimensione 8mx8m e corrispondenti alla maglia dei pilastri.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Modello di calcolo ingegneristico proposto – analisi domanda

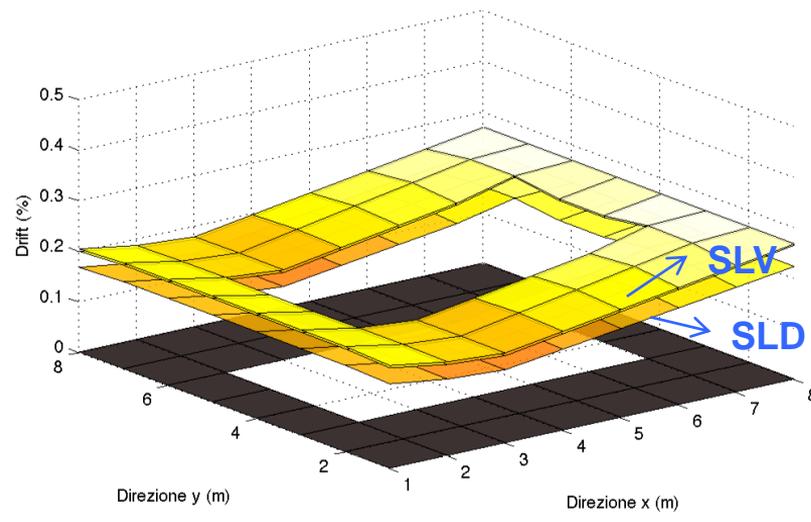
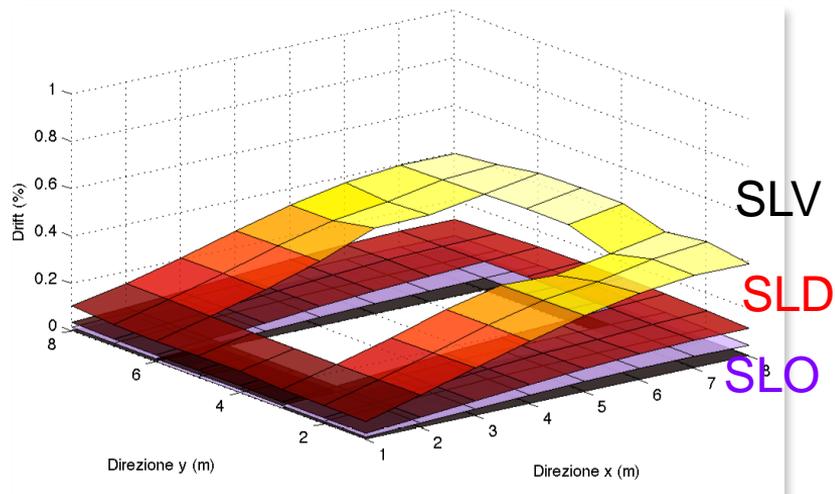


Displacements (and drift)  $s_x$  and  $s_y$

Acceleration  $a_x$  and  $a_y$

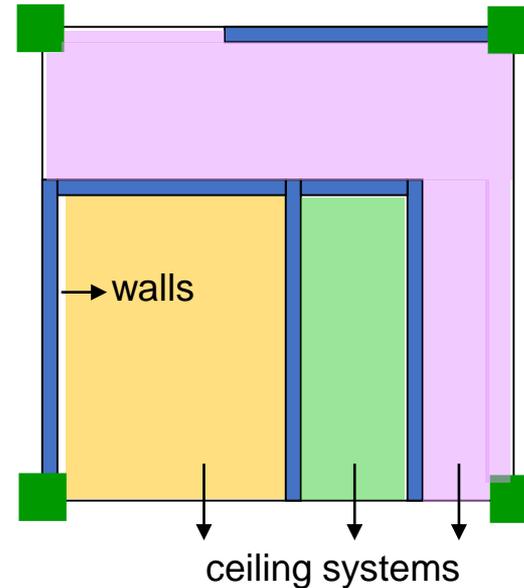
Ground floor – DRIFT – Actions in direction y

Ground floor – ACCELERATION – Actions in y



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

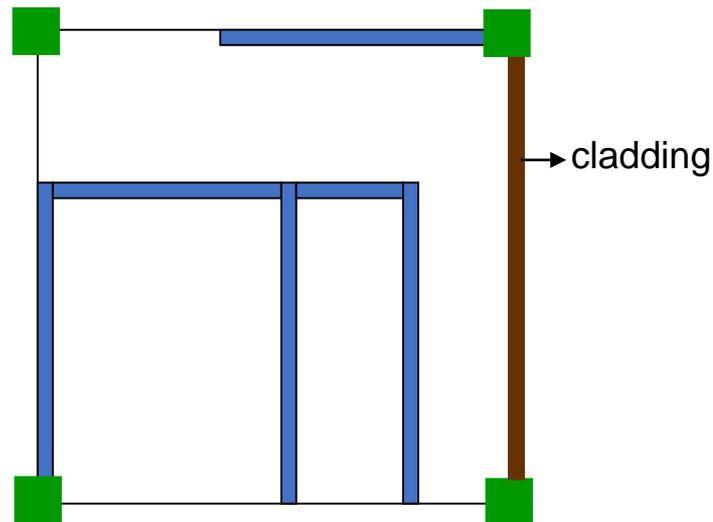
## Modello di calcolo ingegneristico proposto – analisi capacità



Valutazione, condensata per ciascuna cella, di tipologia / disposizione di partizioni interne e controsoffitti.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Modello di calcolo ingegneristico proposto – analisi capacità



Valutazione, condensata per ciascuna cella, di tipologia / disposizione di facciata.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Modello di calcolo ingegneristico proposto – verifica rischio

## INDICE DI SICUREZZA

PER OGNI UNITA' ELEMENTARE E PER OGNI TIPOLOGIA DI ELEMENTO SECONDARIO

Nel piano = “domanda” drift / “capacità” drift

Fuori dal piano = “domanda” accelerazione / “capacità” accelerazione



## CONDIZIONE CRITICA

$$SNS \leq 1$$

L'indice di sicurezza combina i risultati in termini di capacità dell'elemento non strutturale e in termini di domanda sismica per ciascuna unità 8mx8m

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di analisi della vulnerabilità

Per ciascuno degli elementi non-strutturali si valutano i meccanismi locali e/o globali che portano a (rif. NTC 2008):

- un livello di danno nell'elemento per sismi frequenti e di bassa intensità (SLO),
- limiti di collasso fragile ed espulsione degli elementi per sismi rari e di alta intensità (SLV).

In aggiunta a quanto previsto NTC 2008 per gli edifici in classe IV, si sono valutati anche i meccanismi locali e/o globali che causano il danneggiamento degli elementi non-strutturali soggetti ad un sisma intermedio, per frequenza ed intensità (SLD).

Il raggiungimento dei suddetti limiti è stabilito in base al comportamento dei materiali e del “sistema” non-strutturale, valutando pertanto curve carico-spostamento adeguate a caratterizzare ogni sistema.

Per la valutazione delle capacità degli elementi non-strutturali si farà riferimento ai test/certificazioni prodotte dai fornitori.

Ai fini della corretta valutazione di questo step è stata necessaria la compilazione da parte dei fornitori di specifiche check-list.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di analisi della vulnerabilità

Esempio check-list.

MURATURE (PARTIZIONI INTERNE ED ESTERNE)		
Informazioni richieste		Risposta del fornitore
Geometria	Dimensioni pannelli in cartongesso (altezza, larghezza, spessore)	
	Dimensioni della guida orizzontale superiore (lunghezza e dimensioni della sezione)	
	Dimensioni della guida orizzontale inferiore (lunghezza e dimensioni della sezione)	
	Lunghezza dei profili metallici verticali	
Particolari costruttivi	Collegamento guida superiore-solaio	
	Collegamento guida inferiore-solaio	
	Collegamento pannelli di cartongesso-pavimenti	
	Collegamento pannelli di cartongesso-controsoffitti	
	Posizione delle viti che collegano i pannelli in cartongesso ai profili metallici verticali	
	Posizione/passaggio delle viti che collegano i pannelli in cartongesso alle guide superiori ed inferiori	
	Dettagli sul collegamento tra le guide (superiore ed inferiore) e i solai (superiore ed inferiore)	
Caratteristiche	Peso dei pannelli in cartongesso al mq	
	Peso dei profili al m	

CONTROSOFFITTI		
Informazioni richieste		Risposta del fornitore
Per ogni tipologia XY	Disegni con sezioni che mostrino la tecnologia per questo particolare controsoffitto	
	Peso del sistema-controsoffitto al mq	
	Dimensioni, peso e caratteristiche meccaniche della struttura metallica	
	Dimensioni, peso e caratteristiche meccaniche degli elementi di fissaggio	
	Dimensioni, peso e caratteristiche meccaniche dei supporti per carichi sospesi	
	Dimensioni, peso e caratteristiche meccaniche dei pannelli	
	Descrivere quali gli scenari di danno che non implicano un'interruzione d'uso del sistema (per esempio la fessurazione dei pannelli) e quando questi possono verificarsi	
	Descrivere gli scenari di danno che implicano un'interruzione d'uso del sistema e/o che possono causare danni a cose e persone (per esempio il distacco dei pannelli, il distacco dei profili, lo sfilamento delle viti) e quando questi possono verificarsi	
	Descrivere quindi quali possono essere i punti critici del sistema	
	Comportamento meccanico (curve forza-spostamento) del sistema nel suo complesso a sollecitazioni ortogonali al piano di posa dei controsoffitti (sollecitazioni verticali), meccanismi che si attivano e comportamento dei singoli elementi (struttura metallica, elementi di fissaggio, pannelli).	

PAVIMENTI		
Informazioni richieste		Risposta del fornitore
Per ogni pavimento tipo XY	Disegni con sezioni che mostrino la tecnologia per questa particolare tipologia di pavimento	
	Peso del sistema-pavimento al mq	
	Dimensioni, peso e caratteristiche meccaniche della struttura metallica	
	Dimensioni, peso e caratteristiche meccaniche dei pannelli	
	Descrivere quali gli scenari di danno che non implicano un'interruzione d'uso del sistema e quando questi possono verificarsi	
	Descrivere gli scenari di danno che implicano un'interruzione d'uso del sistema e/o che possono causare danni a cose e persone e quando questi possono verificarsi	
	Descrivere quindi quali possono essere i punti critici del sistema	
	Comportamento meccanico (curve forza-spostamento) del sistema nel suo complesso a sollecitazioni ortogonali al piano di posa del pavimento (sollecitazioni verticali), meccanismi che si attivano e comportamento dei singoli elementi (struttura metallica, elementi di fissaggio e pannelli).	
	Comportamento meccanico (curve forza-spostamento) del sistema nel suo complesso a sollecitazioni nel piano di posa del pavimento (sollecitazioni orizzontali), meccanismi che si attivano e comportamento dei singoli elementi (struttura metallica, elementi di fissaggio, pannelli).	

ecc...ecc...

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di analisi della vulnerabilità

Seguendo le indicazioni della normativa USA per la valutazione delle prestazioni degli elementi non strutturali (FEMA e ATC) e avendo a disposizione i risultati di prove sperimentali sui sistemi non-strutturali rilasciati dai fornitori, è possibile individuare per ogni sistema non-strutturale i livelli di danneggiamento – che possono essere contemporanei o successivi – che descrivono la risposta meccanica del sistema alle sollecitazioni esterne.

E' inoltre possibile identificare il parametro di domanda sismica cui l'elemento non strutturale in esame è più sensibile (e.g. il “drift” d'interpiano, l'accelerazione di piano, ecc.).

Con queste informazioni è possibile quindi costruire una relazione matematica che indica la probabilità che un componente o un sistema raggiunga o superi un certo livello di danneggiamento, nel caso sia soggetto ad uno specifico livello di domanda sismica, denominato **DP** (*Demand Parameter – FEMA 461*).

Questa funzione fragilità del sistema può essere scritta nella forma:

$$f(DP) = P[D \geq DS_i | DP = z]$$

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di analisi della vulnerabilità

$$f(DP) = P[D \geq DS_i | DP = z]$$

Dove:

- **D** è il danno raggiunto dall'elemento non-strutturale,
- **DS** è uno specifico livello di danno, atteso nell'elemento in esame sulla base delle informazioni sperimentali,
- **DP** è il parametro usato per quantificare la domanda sismica sull'elemento in esame.

Le funzioni di fragilità sono espresse nella forma di distribuzioni probabilistiche, e non come relazioni deterministiche, tenendo conto delle incertezze insite nella predizione del danneggiamento come funzione della domanda sismica.

Queste incertezze includono fattori come la natura casuale della registrazione dei moti del suolo e della risposta strutturale che ne consegue, e l'inadeguatezza di semplici parametri di domanda ingegneristici (come lo spostamento e l'accelerazione) a mettere in relazione la variazione nella risposta strutturale e il danno che ne consegue.

Ad esempio due differenti terremoti possono produrre su un edificio lo stesso spostamento d'interpiano, ma gli effetti saranno diversi a seconda che durante l'evento sismico quel valore di spostamento sia raggiunto una sola volta oppure numerose volte.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

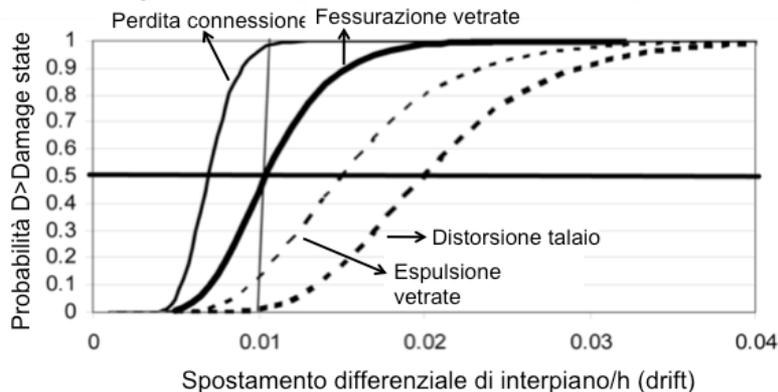
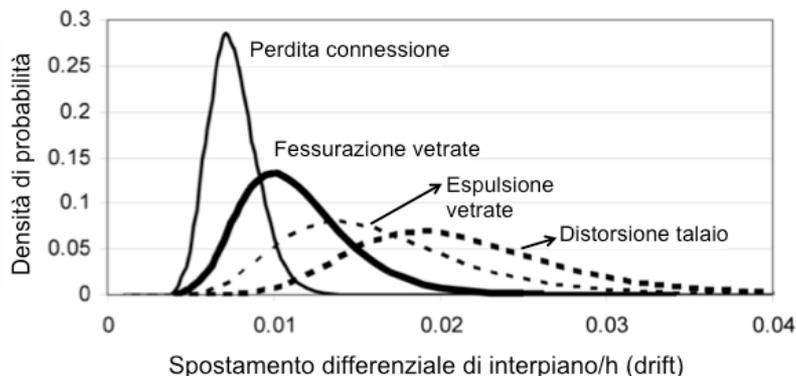
## Metodo di analisi della vulnerabilità

$$f(DP) = P[D \geq DS_i | DP = z]$$

Le norme USA suggeriscono, sulla base di numerosi dati sperimentali raccolti, una densità di probabilità lognormale per le funzioni di fragilità.

Da un punto di vista pratico risulta comodo visualizzare tali curve nella forma di funzioni di probabilità cumulata, in quanto, per un certo valore della domanda indicato sull'asse delle ascisse, è possibile leggere direttamente sull'asse delle ordinate la probabilità che il danno nel sistema raggiunga o superi un certo livello di danneggiamento.

La figura (sx) seguente mostra un'ipotetica densità di probabilità per la funzione di capacità di una vetrata, la figura (dx) mostra la corrispondente curva di capacità cumulata [FEMA 461].



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di analisi della vulnerabilità

$$f(DP) = P[D \geq DS_i | DP = z]$$

Al fine di valutare la sicurezza degli elementi non-strutturali, è necessario introdurre soglie di accettabilità delle prestazioni fornite dal sistema.

Questo può essere fatto a partire dalle funzioni di fragilità del sistema, definendo, in analogia con quanto fatto per gli elementi strutturali, per ogni elemento in esame e per ogni parametro di domanda l'“ente resistente caratteristico”, individuato dal quantile di ordine k della distribuzione, cioè quel valore che è superato con probabilità (1-k).

Se la domanda sismica supera l'ente resistente caratteristico, la risposta del sistema non può essere considerata soddisfacente in termini di sicurezza.

Per esempio, correntemente si adotta per k il valore 0.05 per definire la resistenza caratteristica del calcestruzzo e 0.50 per la muratura.

Gli elementi non strutturali sono sistemi eterogenei, per i quali il valore di k può essere collocato in mezzo a questi due estremi.

Seguendo le linee guida USA FEMA P695, incentrate sulla quantificazione dei fattori di prestazione sismica degli edifici, k è stato assunto pari a 0.20.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di verifica del rischio sismico

La procedura di calcolo per la misura della sicurezza sismica degli elementi non-strutturali, interseca i risultati delle analisi della vulnerabilità e della domanda sismica.

La procedura di calcolo tiene conto della effettiva distribuzione degli elementi non-strutturali all'interno di ogni unità di calcolo elementare 8m×8m, permettendo di valutare il comportamento dei sistemi non-strutturali in diverse situazioni.

Per ogni unità di calcolo l'indice di fragilità considerato nella procedura di calcolo è definito come:

$$\mathbf{SNS = "ente agente" / "ente resistente"}$$

L'indice così definito è adimensionale e risulta sempre

$$\mathbf{0 \leq SNS \leq 1}$$

La condizione critica, il raggiungimento della quale evidenzia che la verifica sismica ha avuto esito negativo, è data da:

$$\mathbf{SNS = 1}$$

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di verifica del rischio sismico

Poiché la resistenza caratteristica dell'elemento non strutturale è stata definita sulla base delle curve di fragilità considerando un quantile  $k$  di ordine 0.20, un valore unitario dell'indice di sicurezza ( $SNS=1$ ) corrisponde ad una probabilità di superamento dello stato di danno considerato pari al 20%.

L'indice di fragilità è stato calcolato per tutti gli elementi 8mx8m in cui è diviso ogni piano ai fini della verifica sismica degli elementi non-strutturali.

Il risultato della verifica è stato illustrato in forma grafica di mappa schematica per ogni piano dell'edificio e per ogni tipologia di elemento non-strutturale, evidenziando l'estensione e la posizione delle aree più critiche e più virtuose ai fini della sicurezza sismica.

Sono state riportate anche mappe sintetiche di piano, che evidenziano l'involuppo delle prestazioni delle diverse tipologie non-strutturali, considerando per ogni elemento 8mx8m i risultati ottenuti per l'elemento non-strutturale risultato più critico durante la verifica sismica.

L'estensione delle zone critiche rispetto alla superficie di piano e l'importanza di queste aree ai fini funzionali dell'edificio costituiranno criteri per il soddisfacimento della verifica.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di verifica del rischio sismico

Inoltre la procedura sviluppata permette di associare al valore dell'indice di fragilità la probabilità di raggiungimento e superamento dello stato di danneggiamento dell'elemento non-strutturale per effetto dell'azione sismica corrispondente allo stato limite in esame.

Facendo riferimento alle linee guida USA FEMA P695, incentrate sulla quantificazione dei fattori di prestazione sismica degli edifici, si impone una limitazione non solo all'indice di fragilità SNS all'interno di ogni elemento ( $SNS \leq 1$ ), ma anche al suo valore medio sul piano.

Tale limitazione può variare a seconda dell'elemento non-strutturale in esame, poiché dipende dalla pendenza della curva di fragilità dell'elemento. Inoltre si richiede che la probabilità di superamento dello stato di danno in esame, il cui limite è imposto pari al 20% all'interno di ogni elemento 8mx8m, sia in media (sul piano)  $\leq 10\%$ , come suggerito dalle linee guida FEMA P695.

I valori degli indici di sicurezza sono visualizzati sotto forma di mappe tridimensionali per tutte le unità di calcolo elementari, permettendo lo studio del comportamento di ogni piano nel suo complesso.

Inoltre, la realizzazione di mappe sintetiche di piano aiuterà la valutazione dell'estensione e della collocazione delle aree critiche, permettendo di tenere conto della loro funzione all'interno dell'ospedale.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Metodo di verifica del rischio sismico

I risultati della procedura di cui sopra è stata analizzata in modo complessivo, fornendo un indice di sicurezza di piano.

Una volta calcolato l'indice di sicurezza non-strutturale (SNS) per ogni unità elementare, l'indice di sicurezza di piano può essere definito come il volume sotteso alla superficie di sicurezza costituita dall'involuppo degli indici di sicurezza di tutti gli elementi diviso il numero degli elementi del piano.

Inoltre, i risultati ottenuti per le differenti tipologie di elementi non-strutturali saranno analizzati in modo complessivo, al fine di determinare un valore di rischio sismico complessivo dell'insieme delle finiture.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Applicazione ad un caso reale

### (1) Caratterizzazione del sistema

#### Dati sperimentali

- *Partizioni interne (cartongesso)*
- *Pavimenti (flottanti)*

DS1 Superficial damage

DS2 Local damage

DS3 Severe damage

#### Simulazioni Monte Carlo

- *Facciate*
- *Controsoffitti*

### (2) Sviluppo curve di fragilità

### (3) Definizione della «resistenza caratteristica» degli elementi non strutturali

### (4) Analisi domanda sismica

### (5) Analisi del rischio sismico

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

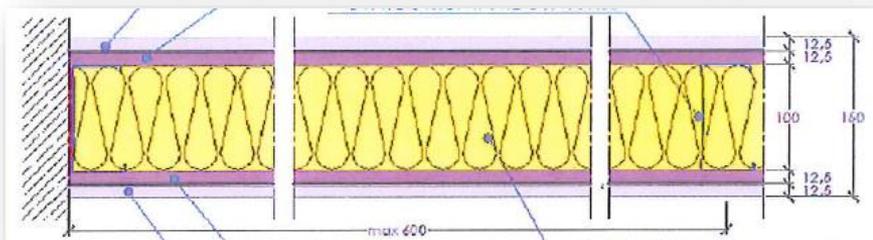
## Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

Tipologia	Dettaglio
Partizioni interne (cartongesso)	<p>Pareti in cartongesso in doppia (sp. 10cm, 15cm e 21.5cm) lastra. Divise nelle sotto-tipologie:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>A1 parete divisoria semplice</li><li>A2 parete tra corridoio e stanza</li><li>A3 parete tra corridoio e bagno</li><li>A4 parete tra stanza e bagno</li><li>A5 parete tra bagno e bagno</li><li>A6 parete divisoria REI 120</li><li>A7 parete tra corridoio e stanza compartimentata REI 120</li><li>A8 parete REI 120 tra corridoio e bagno</li><li>A9 parete tra stanza compartimentata REI 120 e bagno</li><li>A10 parete tra corridoio e stanza</li><li>A11 parete tra corridoio e bagno</li><li>A12 parete REI 120 tra corridoio e stanza</li><li>A13 parete REI 120 tra corridoio e bagno</li><li>B1 parete di separazione tra nuclei abitativi</li><li>B2 parete di separazione tra nuclei abitativi con bagno adiacente REI 120</li><li>B3 parete di separazione tra nuclei abitativi con bagno e corridoio adiacente REI 120</li><li>B4 parete di separazione tra nuclei abitativi con corridoio adiacente REI 120</li></ul>

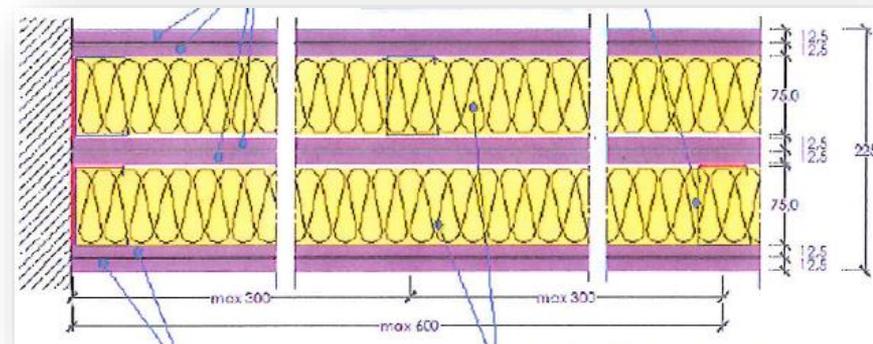
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

### STRUTTURA METALLICA SINGOLA



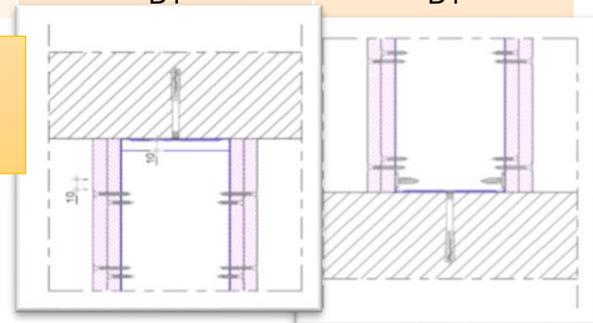
### STRUTTURA METALLICA DOPPIA



Comp. nel piano	Comp. fuori piano	Pareti in ogni classe
A	A1	A1- A6
	A2	A2-A7-A10-A12
	A3	A3-A8-A11-A13
	A4	A4-A9
	A5	A5
B	B1	B1
	B2	B2
	B3	B3
	B4	B4

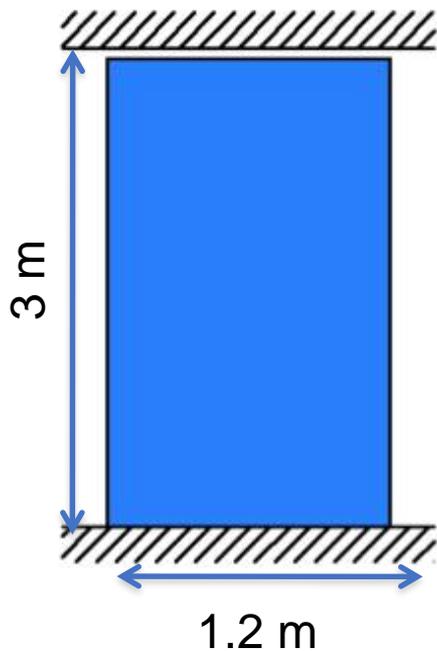
Dettagli connessione al solaio superiore ed inferiore

Guida scorrevole  
FEMA E-74



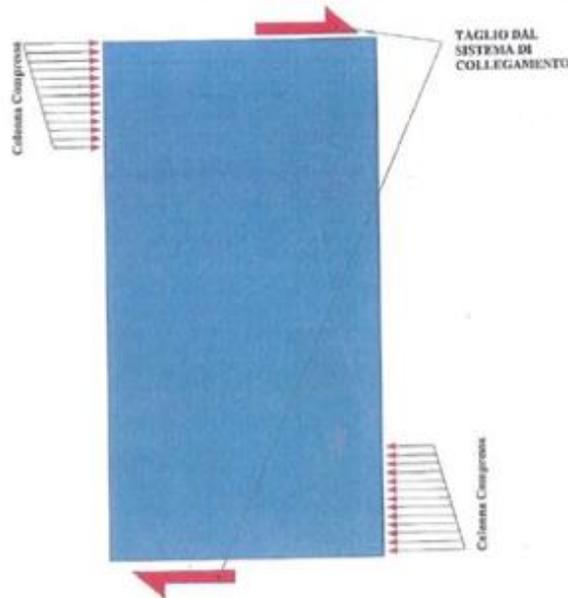
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

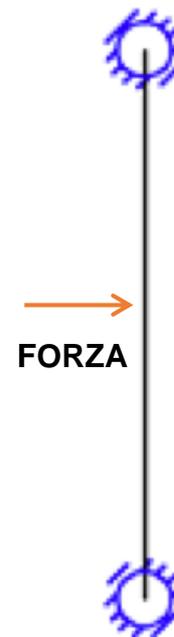


**STATI DI DANNEGGIAMENTO**  
[Davies et al. (2011)]

### COMPORAMENTO NEL PIANO



### COMPORAMENTO FUORI PIANO

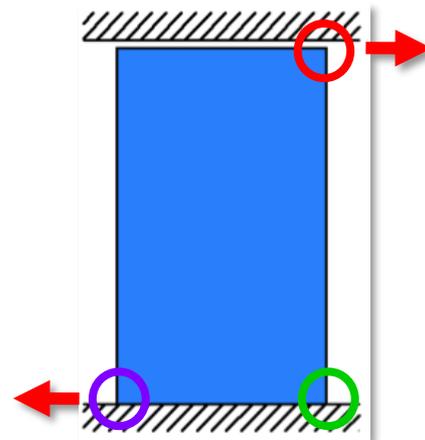
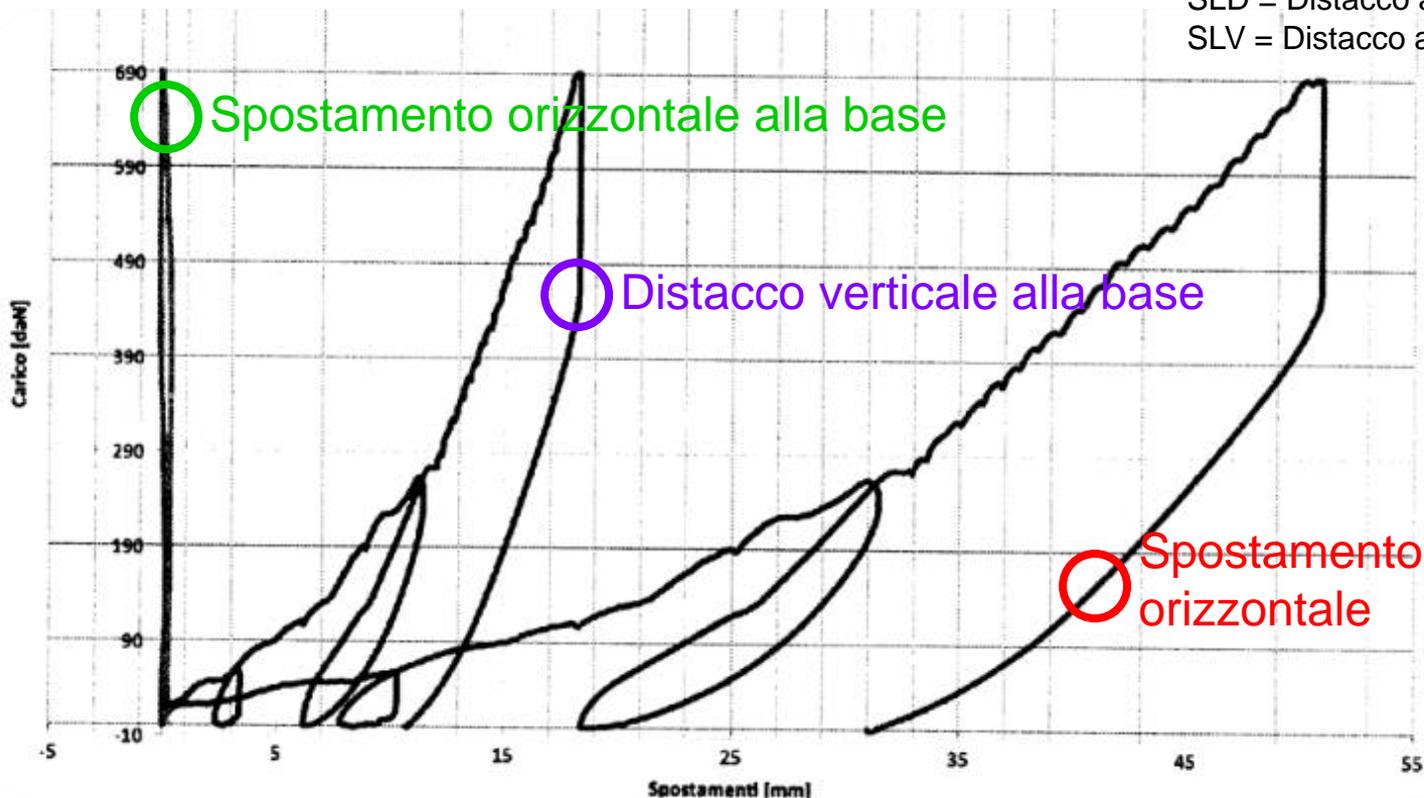


- DS1 Danno superficiale alle pareti
- DS2 Danno locale pareti in cartongesso e/o componenti metalliche
- DS3 Danno severo alle pareti

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

SLO = Distacco alla base 5 mm  
SLD = Distacco alla base 10 mm  
SLV = Distacco alla base 20 mm → collasso

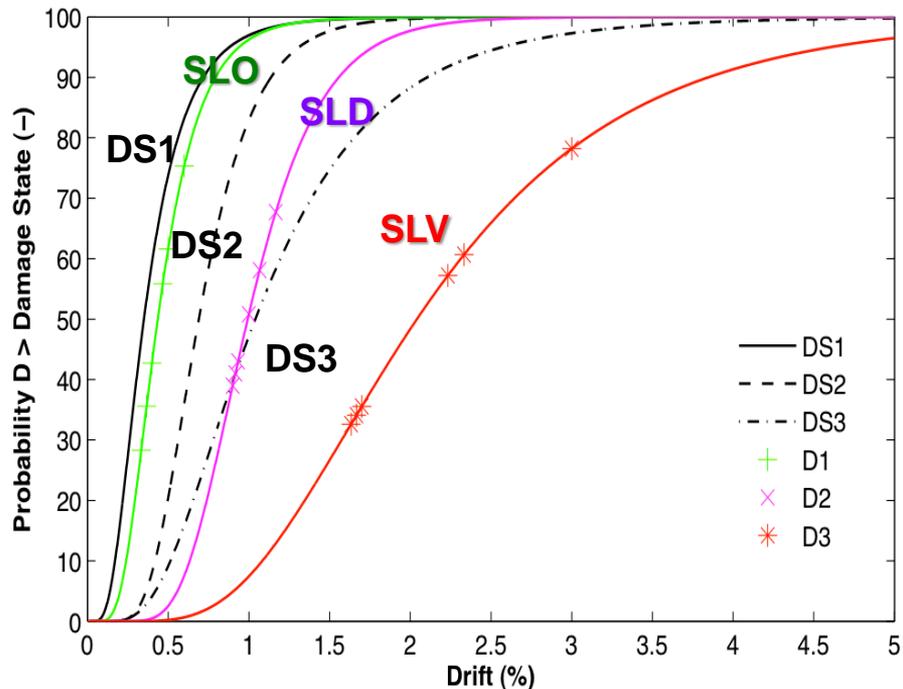


# Comportamento sismico di elementi non strutturali

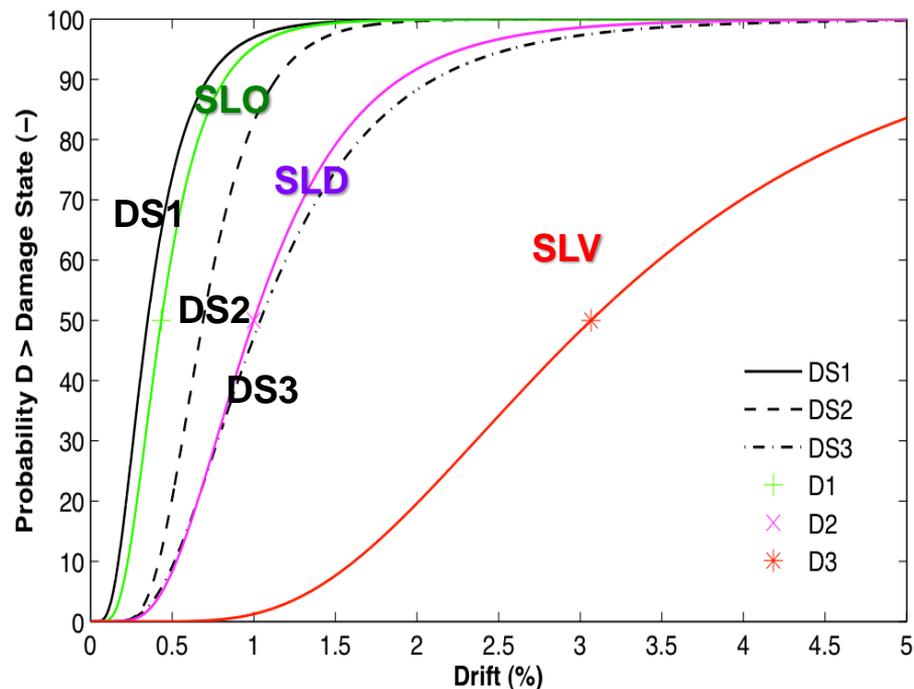
Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

**CURVE DI FRAGILITA'**

**PARETI STRUTTURA METALLICA SINGOLA (A)**

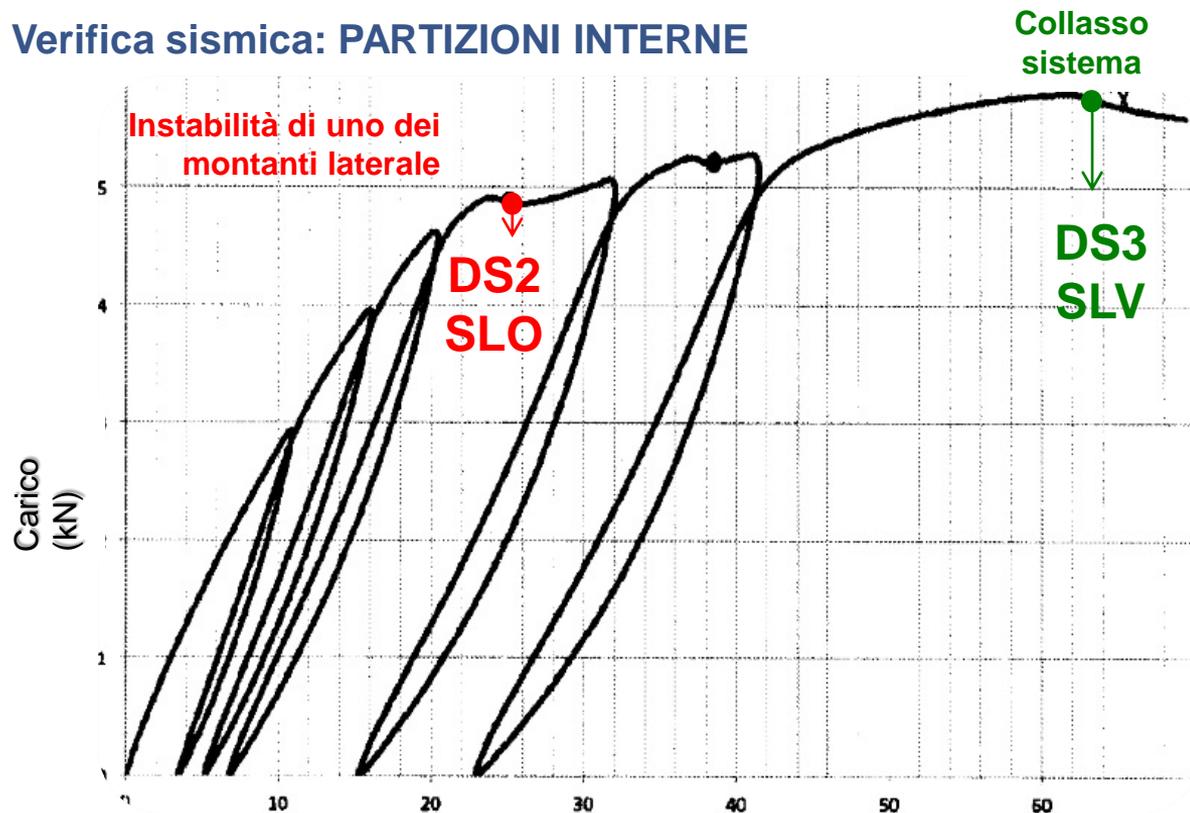


**PARETI STRUTTURA METALLICA DOPPIA (B)**



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE



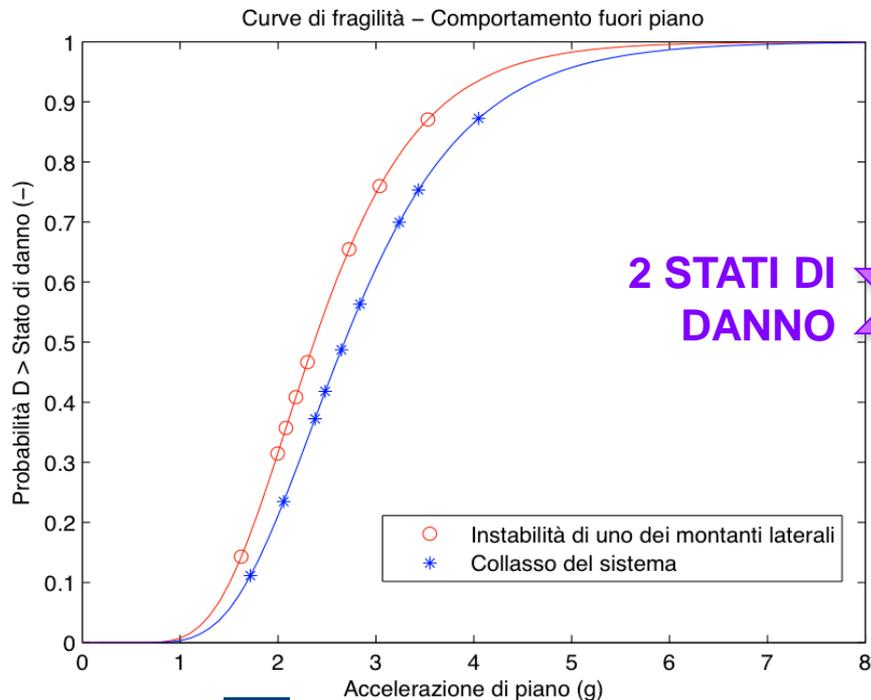
Curve statiche forza-spostamento interpretate come risultati pseudo-statici.

Partendo dal peso della parete, funzioni di fragilità in termini di accelerazioni.

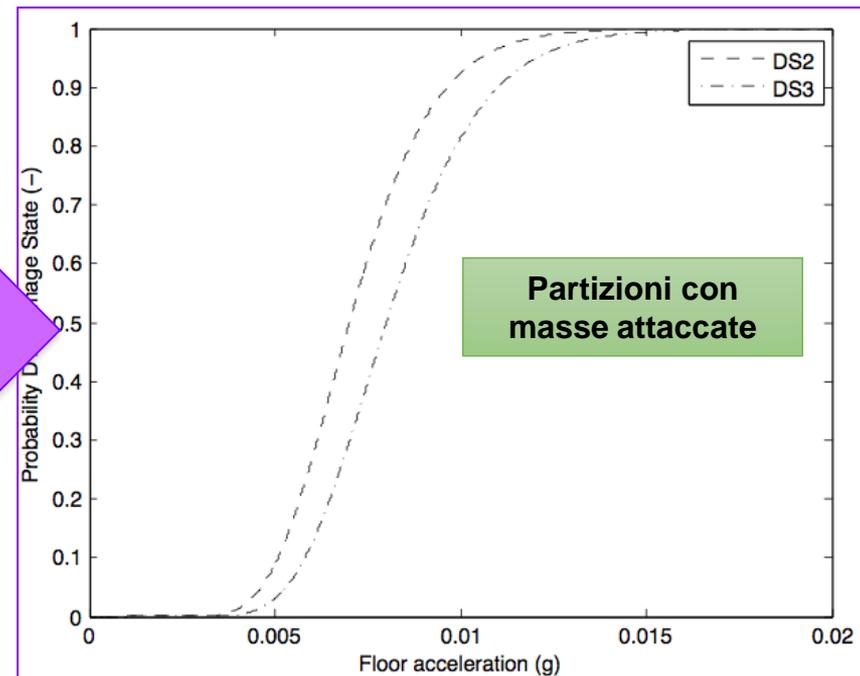
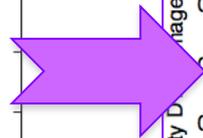
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

Davies et al. (2011)



**2 STATI DI DANNO**



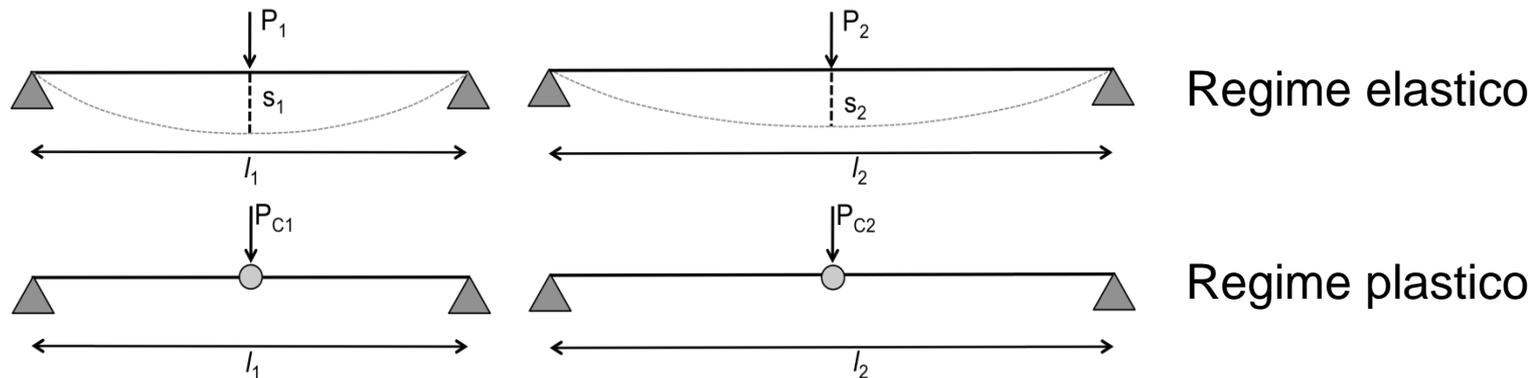
**PASSAGGIO INTERMEDIO PER ADEGUARE I RISULTATI ALLE  
NOSTRE DIMENSIONI**



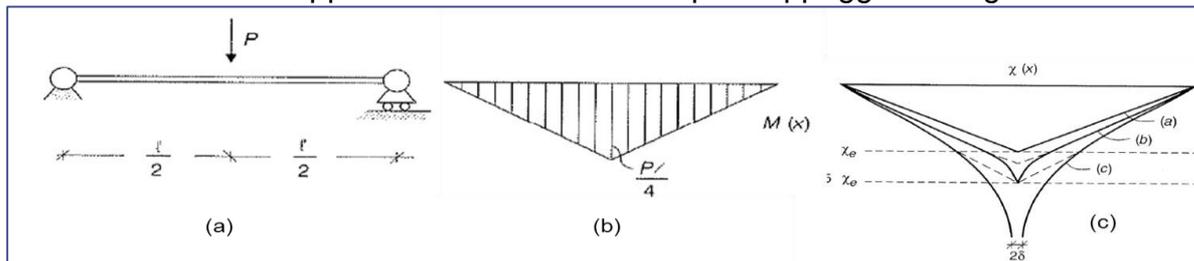
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

### ADEGUAMENTO RISULTATI TRA SISTEMI DI DIVERSE DIMENSIONI



Schema del carico applicato a due travi su semplice appoggio di lunghezza diversa



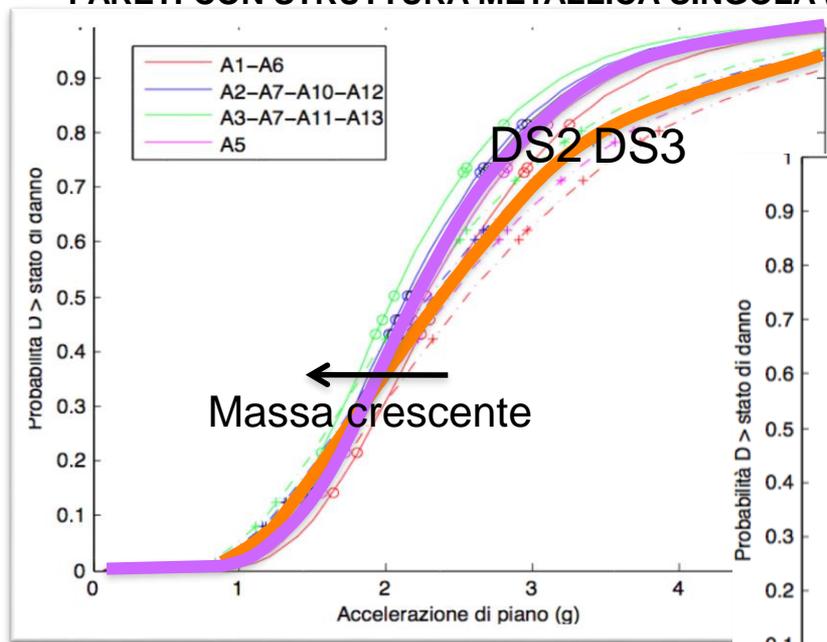
Schema di trave in semplice appoggio con carico crescente fino al collasso

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

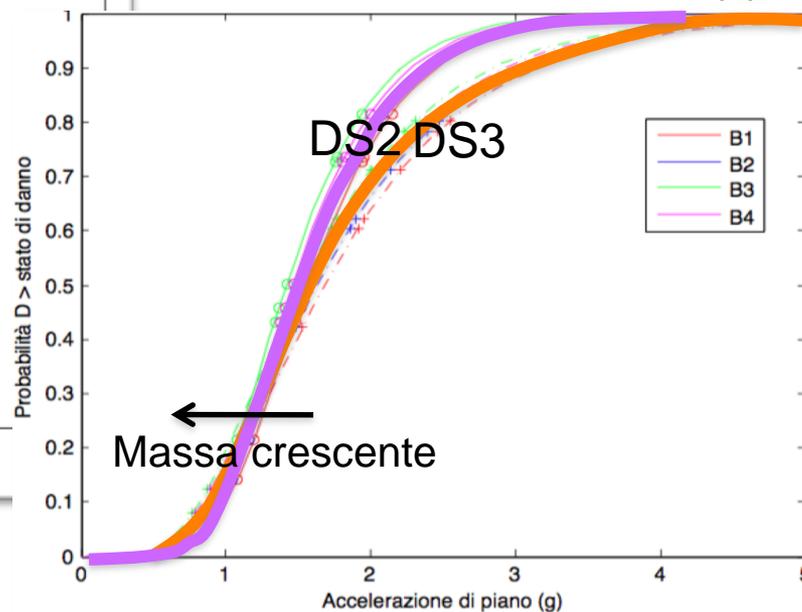
Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

**CURVE DI FRAGILITA'**

**PARETI CON STRUTTURA METALLICA SINGOLA (A)**



**STRUTTURA METALLICA DOPPIA (B)**



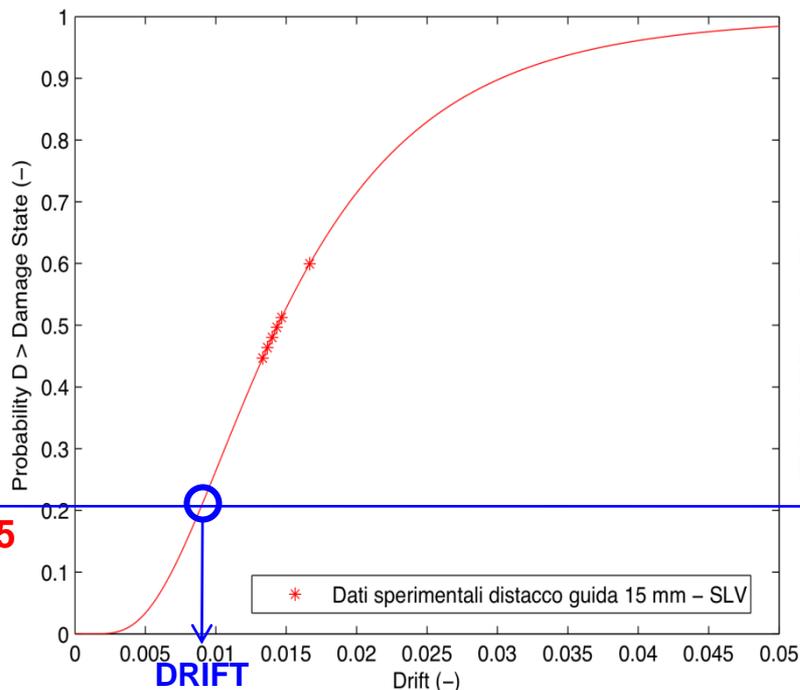
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

**DRIFT/ACCELERAZIONE RESISTENTE CARATTERISTICA**

Quantile di ordine  $k$ , i.e. il valore con probabilità  $(1-k)$  di essere superato

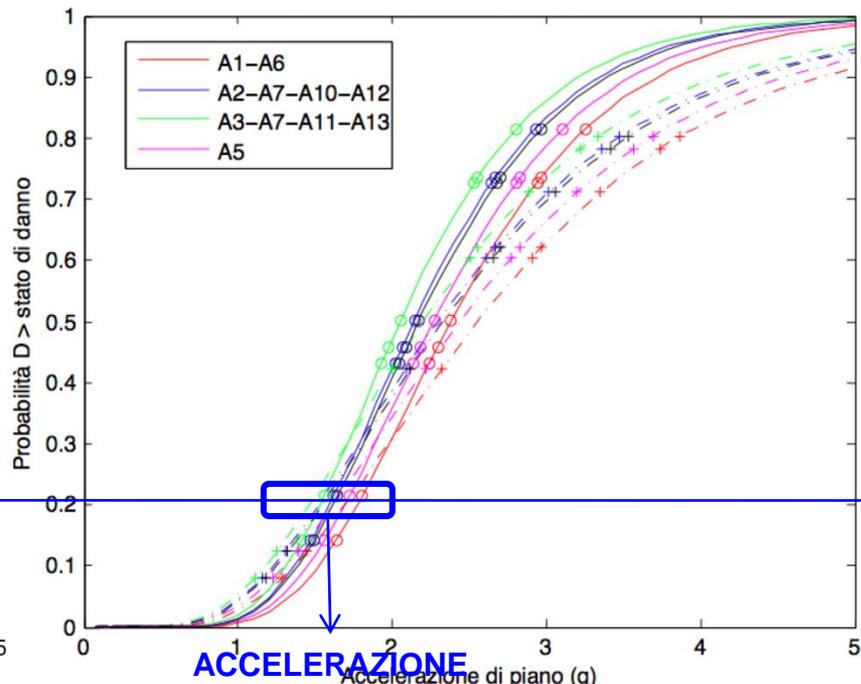
Comportamento nel piano



**$k=0.20$**   
**FEMA P695**

**DRIFT  
RESISTENTE**

Comportamento fuori piano



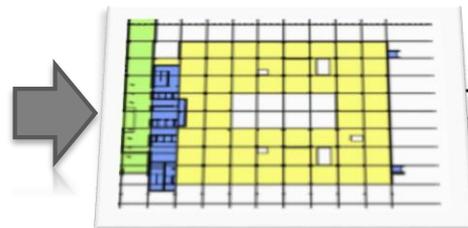
**ACCELERAZIONE  
RESISTENTE**

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

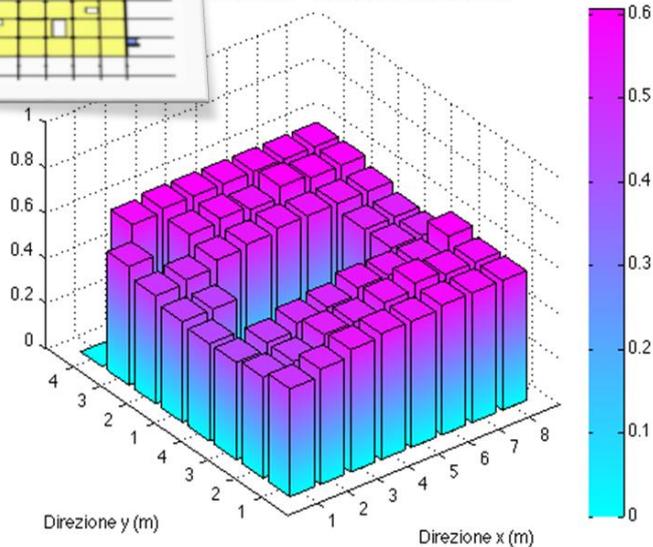
Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

INVILUPPO INDICI DI SICUREZZA PER  
TUTTE LE TIPOLOGIE DI PARETE

SLV – PIANO 1

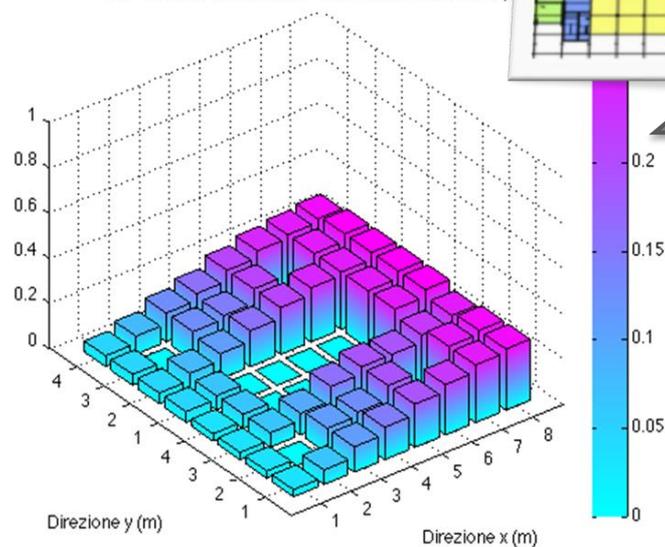


di sicurezza - Sollecitazione direzione x

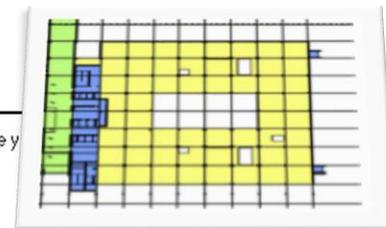


(a)

SLV - Volume di sicurezza - Sollecitazione direzione y



(b)

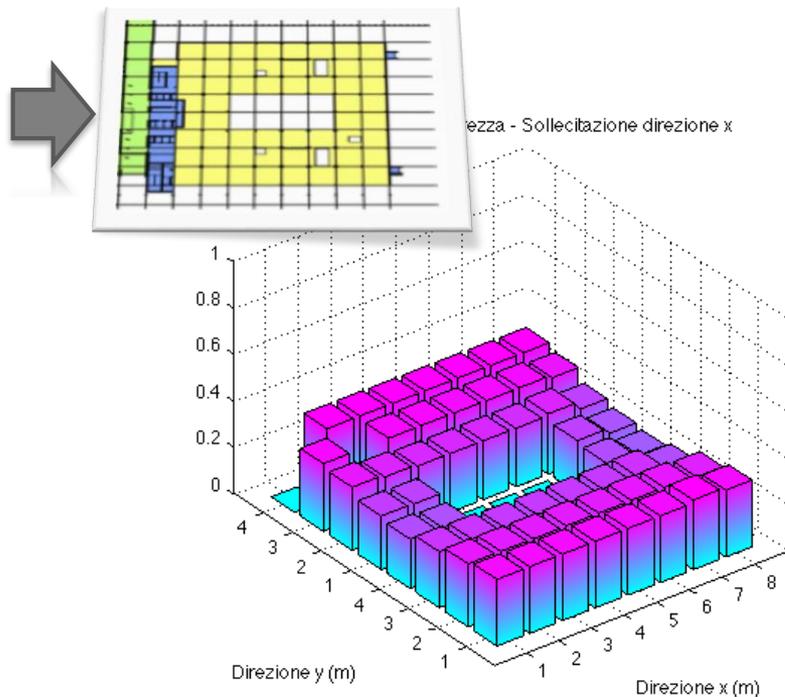


COMPORAMENTO NEL PIANO

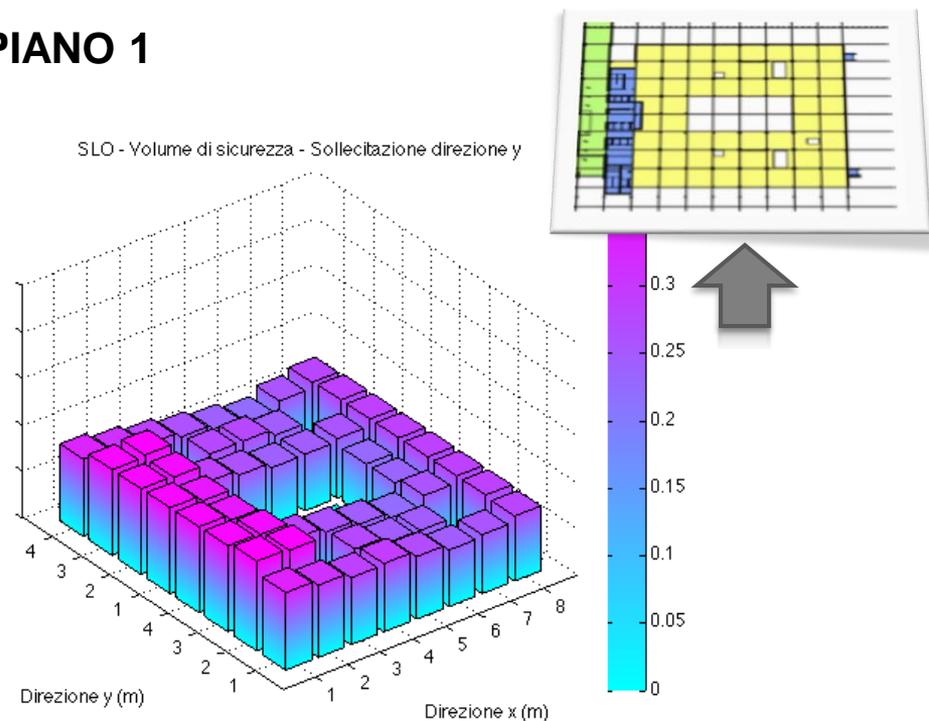
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

INVILUPPO INDICI DI SICUREZZA PER  
TUTTE LE TIPOLOGIE DI PARETE



SLV – PIANO 1



COMPORAMENTO FUORI PIANO

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

VALORI MEDI DELL'INDICE DI SICUREZZA SU OGNI PIANO

Indice sicurezza di piano (-)	Comportamento nel piano					
	SLO		SLD		SLV	
	Piano 0	Piano 1	Piano 0	Piano 1	Piano 0	Piano 1
Direzione x	0,09	0,09	0,13	0,12	0,55	0,53
Direzione y	0,11	0,12	0,10	0,09	0,19	0,17

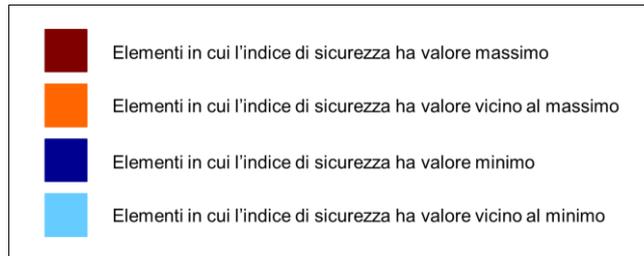
(a)

Indice sicurezza di piano (-)	Comportamento fuori piano					
	SLO		SLD		SLV	
	Piano 0	Piano 1	Piano 0	Piano 1	Piano 0	Piano 1
Direzione x	0,15	0,27	0,15	0,26	0,11	0,19
Direzione y	0,16	0,29	0,17	0,30	0,17	0,30

(b)

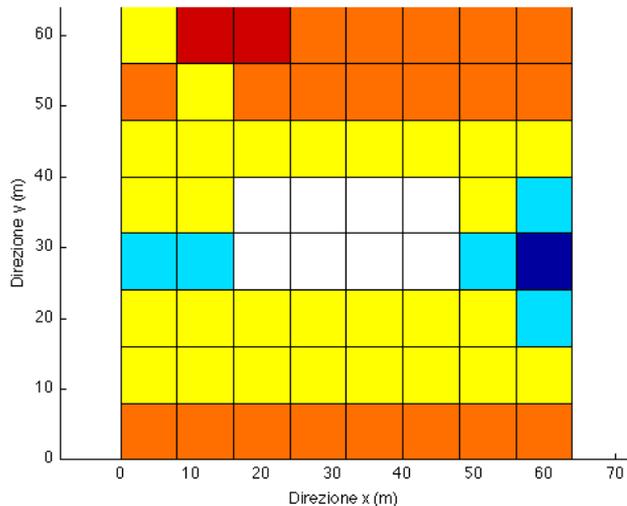
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PARTIZIONI INTERNE

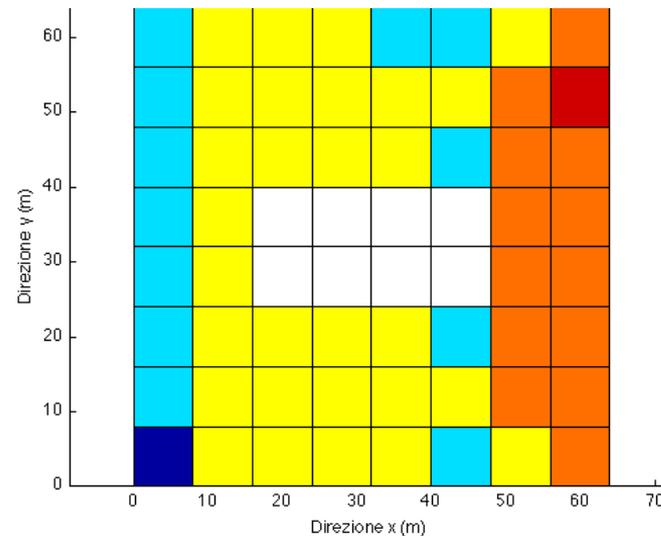


## MAPPE INDICE DI SICUREZZA

### Piano 1- SLO – azioni lungo x



### Piano 1 - SLO – azioni lungo y



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

Tipologia	Dettaglio
Controsoffitti	Pannelli radianti in metallo Pannelli di gesso alleggerito Pannelli in fibraminerali Pannelli metallici Controsoffitto in cartongesso Controsoffitto in cartongesso idrofugo



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

I dati collezionati sulla base di eventi sismici avvenuti nel passato mostrano la difficoltà di individuare stati di danneggiamento lieve (SLO) e/o locale (SLD) del sistema controsoffitto, poiché i danni tipicamente riscontrati innescano in questo sistema un meccanismo “a catena” che porta rapidamente al collasso (danno grave, stato limite SLV).

I meccanismi di rottura descritti dalla letteratura sono i seguenti:

- Instabilità dei profili metallici compressi a cui segue la caduta dei pannelli. Nel caso in cui il vincolo tra il controsoffitto e le pareti perimetrali sia costituito da un semplice appoggio (cioè senza viti) su un profilo metallico ad L, questa instabilità per compressione è favorita dal martellamento dei profili metallici sulle pareti laterali.
- Il danneggiamento o rottura per trazione delle connessioni tra i profili metallici con conseguente deformazione della maglia metallica ed espulsione dei pannelli.
- La deformazione fuori dal piano del controsoffitto che può provocare l'espulsione dei pannelli.

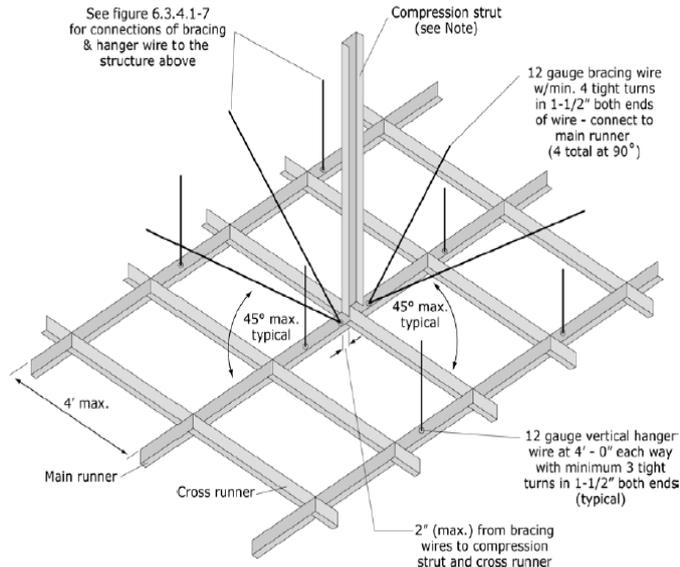
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

Alcuni suggerimenti sulla realizzazione dei controsoffitti provengono dallo studio dalle norme di buona progettazione antisismica, come quelle riportate nelle FEMA E-74 e nella guida tecnica del USG (Seismic Ceiling Resource Centre).

Le indicazioni per la realizzazione di sistemi efficienti in presenza di sisma sono:

- Introduzione di una barra compressa che impedisca lo spostamento fuori piano del controsoffitto;
- Introduzione di tiranti inclinati con funzione di controventamento;
- Impiego di moderni sistemi di aggancio tra i profili metallici che impediscano lo sfilamento in caso di sollecitazioni cicliche.



Esempio di applicazione della barra verticale compressa e dei tiranti inclinati (FEMA E-74)

Esempio  
aggancio anti  
sfilamento



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

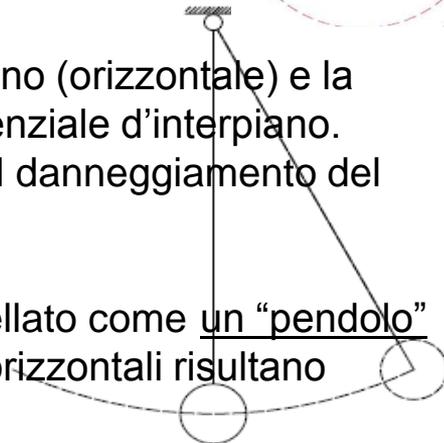
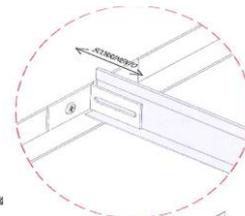
## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

E' rilevante l'interazione tra gli spostamenti del controsoffitto nel proprio piano (orizzontale) e la deformazione delle pareti in cartongesso causata dallo spostamento differenziale d'interpiano. Infatti il martellamento del controsoffitto contro le pareti può provocare sia il danneggiamento del controsoffitto, sia il danneggiamento delle partizioni interne.

In assenza di elementi di controventatura, il controsoffitto può essere modellato come un “pendolo” soggetto ad una forza impulsiva pari a quella d'inerzia..... gli spostamenti orizzontali risultano incompatibili con quelli delle pareti a cui i controsoffitti sono collegati.

Questo risultato suggerisce la necessità di garantire in ogni caso almeno 10 mm di movimento libero relativo fra profilo a L, fissato alle pareti di cartongesso, e l'appoggio del profilo portante secondario / primario del controsoffitto.

Inoltre evidenzia la priorità individuare in quali casi l'impatto del controsoffitto sulla parete è assorbibile da quest'ultima senza problemi e quindi in quali situazioni non è necessario prevedere un sistema di controventamento e in quali questo è al contrario indispensabile.



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

Questa decisione è basata sulla definizione della capacità delle pareti di assorbire la spinta orizzontale derivante dall'oscillazione del controvento, facendo ricorso alle riserve di capacità sismica evidenziate nella sezione dedicata all'analisi sismica delle partizioni interne.

Il primo obiettivo: è quindi definire, per un certo valore dell'accelerazione  $a_g$  prevista in caso di sisma in una certa zona dell'ospedale, la massima estensione di controsoffitto per cui non sono necessari sistemi di controvento.

Questa interazione tra il sistema controsoffitto e il sistema parete è stata esaminata riprendendo in considerazione le funzioni di fragilità delle partizioni, e studiando come queste si modificano aggiungendo alla forza sismica dovuta al comportamento inerziale della parete fuori piano quella dovuta all'azione sismica legata alla presenza del controsoffitto (a Z eccentrica).

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

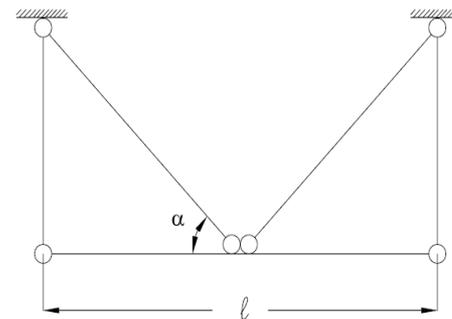
## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

Nei casi in cui la combinazione di accelerazione agente e estensione del controsoffitto è tale da richiedere l'impiego di controventature è stato previsto l'inserimento di tiranti diagonali (con inclinazione tipica di 45°).

Poiché i controventi sono dei “fili” metallici soggetti ad instabilità in caso di azione di compressione, il modello prevede che solo il controvento in trazione collabori alla rigidità laterale.

Definita la sezione (diametro 4 mm) e l'inclinazione dei controventi (45°), la variazione del numero dei controventi permette di governare lo spostamento laterale del controsoffitto e, nel caso di forze inerziali elevate, di evitare lo snervamento dei tiranti (la forza che causa lo snervamento in questo caso è  $F = 40 \text{ daN}$ ).

Per limiti costruttivi, non è possibile prevedere più di 3 tiranti diagonali per i locali.



Applicazione di controventi metallici (FEMA E-74) e modello di telaio con controventi

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

Le il dimensionamento supera i 3 tiranti / locale è stato congegnato un sistema anti-sismico alternativo. Si prevede cioè l'installazione di un tubolare di acciaio a sezione quadrata fissato al solaio del piano superiore mediante 8 tasselli e fissato ai profili in alluminio del controsoffitto mediante opportune piastre ad "L".



Per evitare effetti torcenti dovuti alla rotazione del controsoffitto intorno al vincolo costituito dal tubolare verticale, è sempre necessario disporre due tubolari nei locali in cui risulta necessario l'impiego di questo sistema di rinforzo.

Infatti il vincolo tra il tubolare e i correnti in alluminio non è in grado di assorbire azioni torcenti e inoltre non è attualmente possibile avere informazioni sulla resistenza a taglio dei pannelli del controsoffitto, soggetti ad azioni di taglio imposte dalla deformazione della maglia costituita dalla struttura metallica del controsoffitto nel caso in cui questo ruoti nel proprio piano intorno al vincolo costituito dal tubolare.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

Di conseguenza, all'interno dei vari locali analizzati si possono verificare queste situazioni:

- Non è necessario inserire alcun tirante inclinato;
- È necessario prevedere tiranti inclinati (in numero variabile da 1 a 3);
- È necessario prevedere l'installazione di due tubolari verticali.

Si osservi che quando la superficie del locale in esame supera i 15 mq, anche in concomitanza di valori bassi di accelerazione e pannelli di controsoffittatura leggeri, è stato previsto un minimo di controventatura.

Non essendo in possesso di dati sperimentali su questo particolare sistema non-strutturale, le funzioni di fragilità sono state derivate mediante l'applicazione del metodo Monte Carlo. Questo metodo permette di costruire degli "pseudo" esperimenti, cercando di ricreare la variabilità tipica della sperimentazione fisica a partire dalla predizione teorica che può essere fatta del comportamento di un sistema mediante calcoli di tipo deterministico.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

### APPLICAZIONE IN LOCALI / STANZE

Nel caso dei controsoffitti utilizzati nelle diverse stanze, la domanda sismica è fortemente dipendente dall'estensione del controsoffitto (denominata nel seguito come  $A_c$ ).

Le funzioni di fragilità non sono quindi state riferite ai valori dell'accelerazione agente  $a_g$ , come nel caso delle partizioni interne e delle facciate, ma al rapporto ( $A_c \times a_g$ ).

Infatti può accadere che controsoffitti con grande estensione collocati in aree dove le accelerazioni agenti sono basse diano effetti inerziali sulle pareti più importanti che controsoffitti dalla piccola estensione in zone con accelerazioni agenti molto gravose.

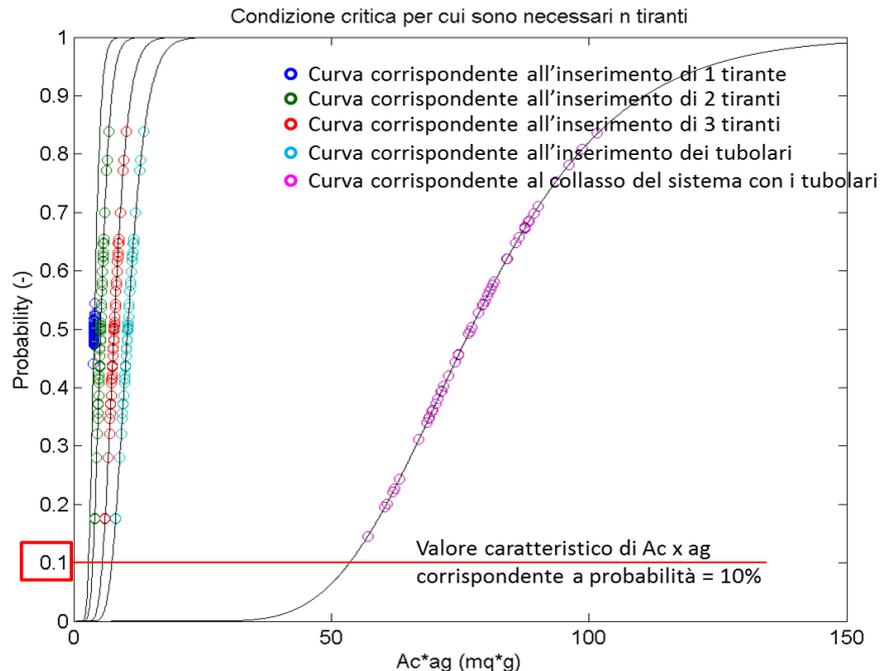
Il parametro sismico da considerare ai fini dell'analisi del rischio è quindi il prodotto ( $A_c \times a_g$ ), cioè la combinazione tra l'estensione  $A_c$  del controsoffitto e l'accelerazione agente  $a_g$ .

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

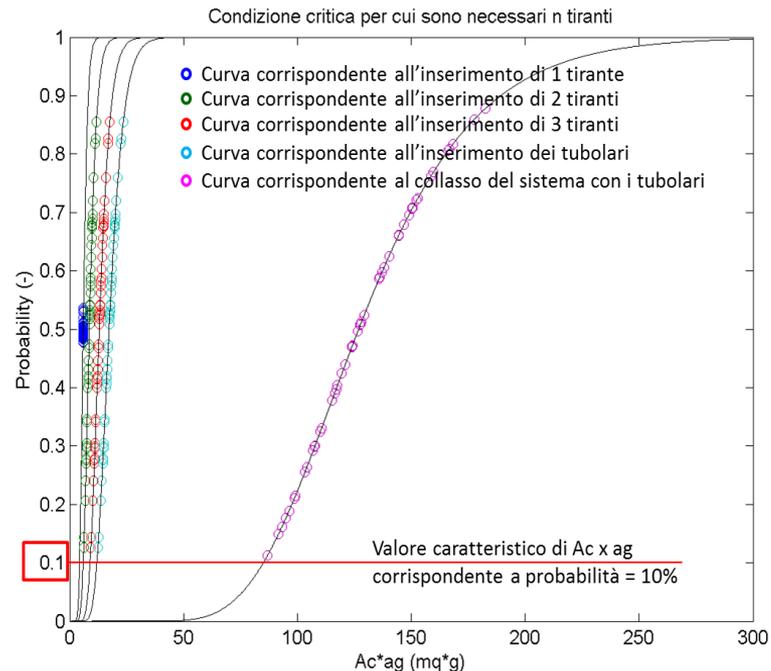
## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

## CURVE DI FRAGILITA'

### CONTROSOFFITTI CON PANNELLI IN CARTONGESSO ALLEGGERITO



### CONTROSOFFITTI CON PANNELLI IN FIBRA MINERALE



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

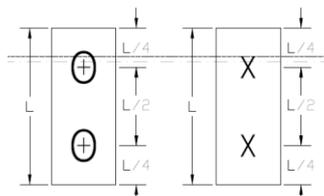
## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

### PROGETTO IN LOCALI / STANZE

Per quanto riguarda i simboli usati questi hanno il seguente significato:

- **0**: zero tiranti, ossia non è necessario installare tiranti diagonali di controventatura;
- **X**: è necessario installare un tirante diagonale;
- **XX**: è necessario installare due tiranti diagonali;
- **XXX**: è necessario installare tre tiranti diagonali;
- **+**: è necessario ricorrere ai tubolari.

SCHEMA TIPICO  
interasse elementi



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: CONTROSOFFITTI

### APPLICAZIONE NEI CORRIDOI:

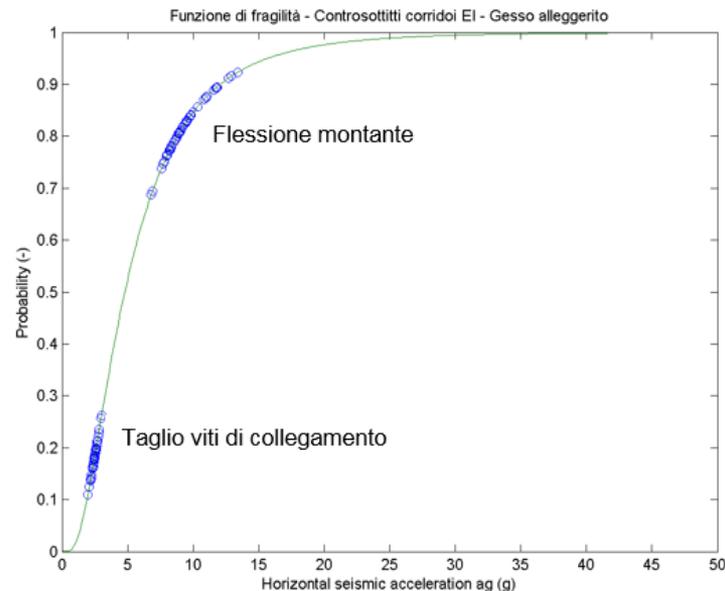
I meccanismi considerati per accelerazione orizzontale in direzione parallela allo sviluppo del corridoio sono:

- resistenza a flessione dei tubolari per azioni inerziali nel piano del controsoffitto;
- resistenza a taglio delle viti che collegano i montanti alla guida e la guida alle partizioni;

In entrambi i casi l'input sismico è rappresentato dall'accelerazione sismica nel piano.

Le funzione di fragilità considerano i meccanismi di collasso per flessione del montante e di rottura a taglio delle viti di collegamento.

## CURVE DI FRAGILITA'



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PAVIMENTI

Tipologia	Dettaglio
Pavimenti (flottanti)	Pavimento flottante (PVC omogeneo ed eterogeneo)

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PAVIMENTI

I pavimenti flottanti previsti per i solai sono costituiti da piedistalli in acciaio alti circa 20 cm opportunamente incollati alla soletta strutturale sottostante e ai pannelli sovrastanti che costituiscono il piano di calpestio.

L'analisi sismica dei pavimenti è finalizzata a controllare che gli effetti inerziali causati dall'accelerazione sismica agente sui pavimenti e sulle masse da essi portati possano essere sopportati dal sistema.

Al fine di studiare il comportamento del pavimento flottante soggetto a forze orizzontali è stata ideata una campagna sperimentale.

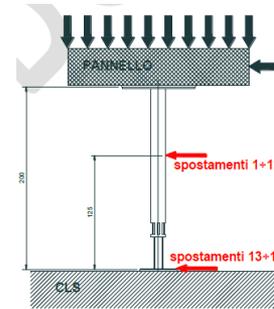


# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PAVIMENTI

La campagna sperimentale svolta ha permesso di determinare i valori di resistenza e i meccanismi di danneggiamento e di collasso del sistema, sotto l'effetto di forze orizzontali applicate in modo pseudo-statico.

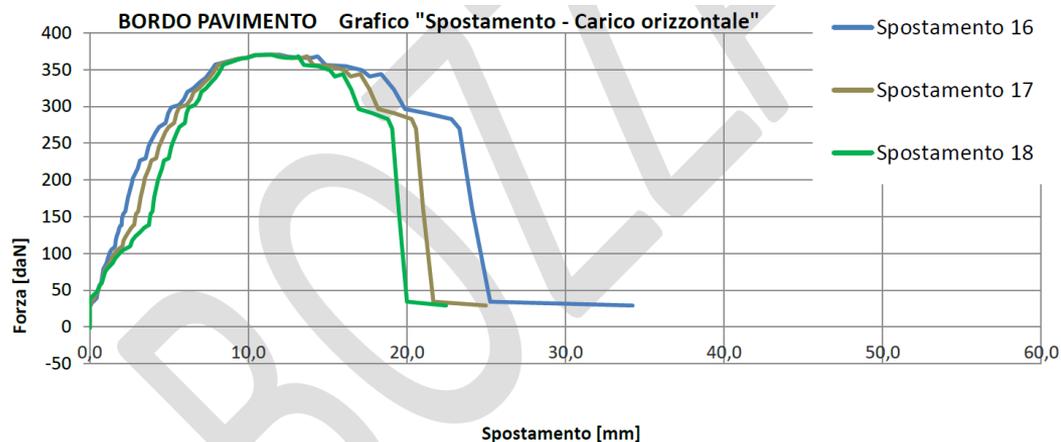
Ai fini dell'analisi sismica del sistema si fa riferimento alle prove effettuate su una porzione di pavimento dell'estensione di 7.2mq caricata verticalmente con sacchi di cemento fino al carico di 535 daN/mq (combinazione quasi-permanente concomitante con il sisma).



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PAVIMENTI

*“Il meccanismo di rottura ha riguardato solamente le giunzioni tra stelo e basi che si sono deformate plasticamente, mentre le basi sono rimaste sostanzialmente ferme. Lo scollamento parziale delle basi dai supporti si è presentato quando lo spostamenti era già di notevole entità”*



La verifica sismica del pavimento è stata sviluppata con riferimento sia allo stato limite ultimo (SLV) sia allo stato limite di operatività (SLO).

Il sistema pavimento presenta un comportamento fortemente non lineare, governato in una prima fase esclusivamente dal comportamento elasto-plastico del piedino in acciaio mentre nella fase finale l'interazione con la colla svolge un ruolo fondamentale, fino al parziale scollamento della stessa. Il comportamento elasto-plastico dell'acciaio può essere colto in modo preciso dai modelli teorici normalmente in uso nella progettazione delle strutture in acciaio, mentre per la caratterizzazione del sistema acciaio-colla è necessario ricorrere ai dati sperimentali.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PAVIMENTI

Ai fini della valutazione del rischio sismico sul sistema pavimento abbiamo considerato le seguenti verifiche:

- Stato limite di operatività SLO, associato alla prima fase del comportamento del sistema, quando questo è governato dall'acciaio prima che entri in gioco la resistenza della colla. Questo anche in considerazione del limitato quantitativo di plasticità del sistema in termini di spostamento (ordine di grandezza 5mm).
- Stato limite di salvaguardia della vita SLV, associato all'interazione acciaio-colla fino al collasso del sistema. Questo anche in considerazione dell'elevato quantitativo di plasticità del sistema in termini di spostamento (ordine di grandezza 10mm).

Sia che si faccia riferimento al comportamento dell'acciaio sia che si consideri il sistema acciaio-colla, il sistema presenta una buona capacità dissipativa che permette di definire un coefficiente di duttilità  $\mu_{SLO} = \mu_{\text{acciaio}}$  per lo stato limite di operatività SLO e un coefficiente di duttilità  $\mu_{SLV} = \mu_{\text{ sistema}}$  per lo stato limite di salvaguardia della vita SLV.

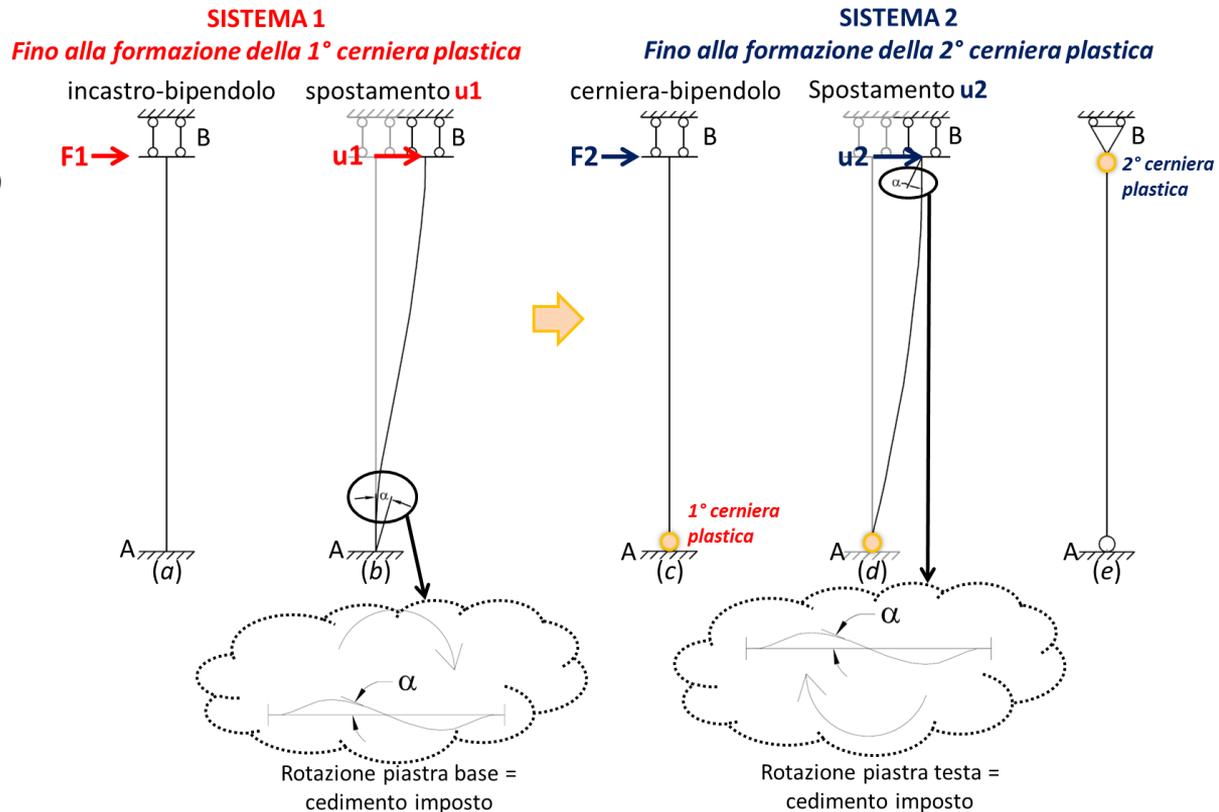
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PAVIMENTI

Come spiegato nel rapporto di prova, l'evoluzione del sistema fino al collasso del sistema vede la plasticizzazione delle piastre in acciaio e, solo in ultima fase, lo scollamento delle piastre.

La prima cerniera plastica si forma nella piastra di base, la seconda cerniera plastica nella piastra in alto.

Lo scollamento delle basi dai supporti è solo parziale e si presenta quando lo spostamento è già di notevole entità.



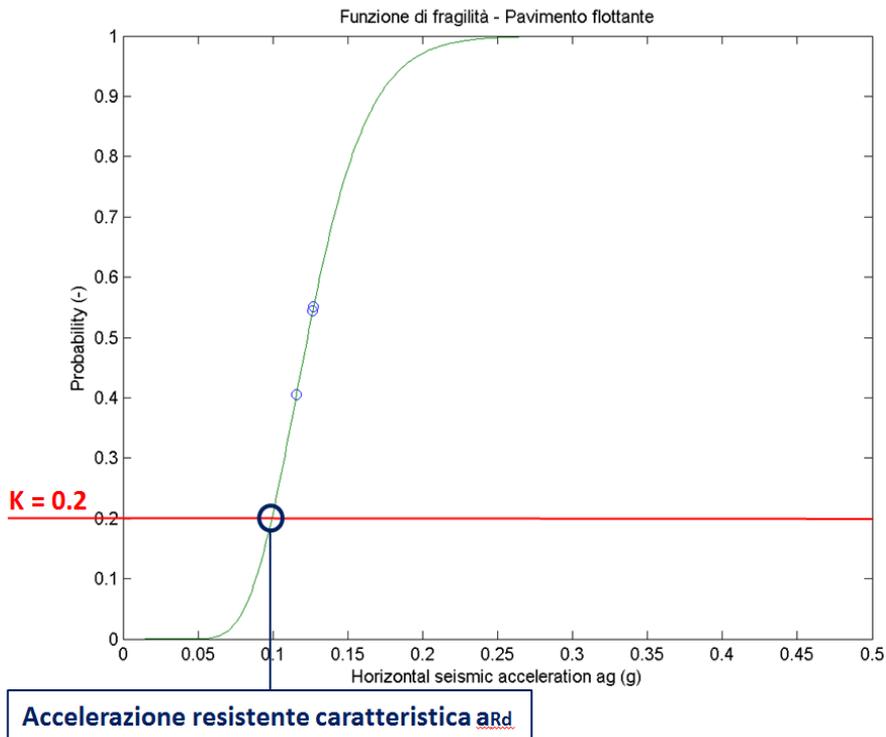
# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PAVIMENTI

Verifica sismica allo stato limite di salvaguardia della vita SLV  
Le capacità dissipative del sistema sono state quantificate con la definizione del coefficiente di duttilità  $\mu_{\text{sistema}}$

Verifica sismica allo stato limite di operatività SLO  
Le capacità dissipative del piedino in acciaio sono state quantificate con la definizione del coefficiente di duttilità  $\mu_{\text{acciaio}}$

## CURVE DI FRAGILITA'



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: PAVIMENTI

	La verifica è soddisfatta.
	La verifica non è soddisfatta nel «quadrotto» ma a livello di piano la verifica sul valore medio è soddisfatta.
	La verifica non è soddisfatta nel «quadrotto» e anche a livello di piano la verifica sul valore medio non è soddisfatta.

**SLV-X-1**  
Indici sicurezza

0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
0.58	0.57	0.58	0.58	0.57	0.57	0.57	0.54
0.49	0.50	0.47	0.47	0.47	0.47	0.49	0.47
0.41	0.40					0.40	0.40
0.36	0.35					0.36	0.36
0.44	0.44	0.42	0.43	0.43	0.43	0.44	0.43
0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.50
0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56

Valore medio indice di sicurezza 0.51 < 0.89

(a)

**SLO-X-1**  
Indici sicurezza

0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.62
0.58	0.58	0.56	0.56	0.56	0.56	0.58	0.56
0.51	0.50					0.50	0.50
0.47	0.46					0.47	0.47
0.54	0.54	0.52	0.52	0.52	0.52	0.54	0.52
0.61	0.60	0.60	0.60	0.60	0.61	0.61	0.58
0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64

Valore medio indice di sicurezza 0.59 < 0.89

(a)

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: FACCIATE

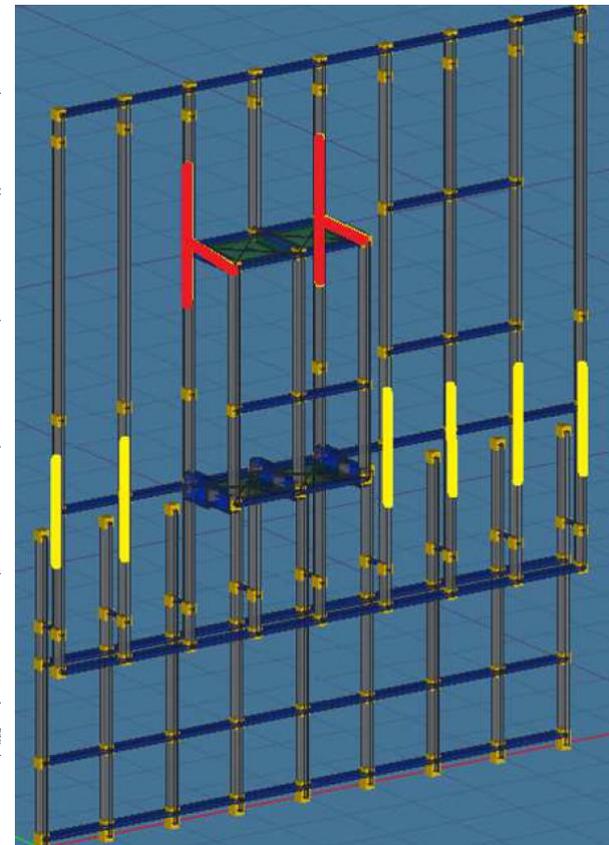
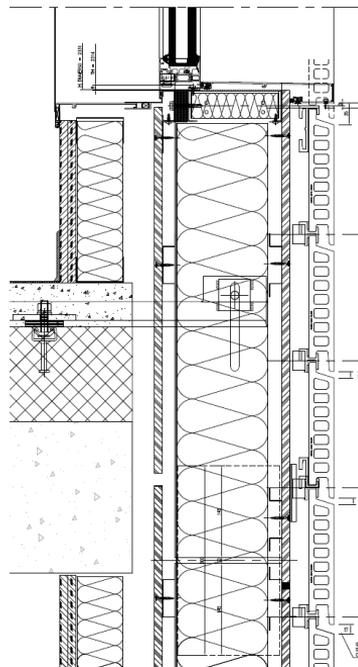
Tipologia	Dettaglio
Facciate	Tipo A (sotto-tipo A1 e A2) Tipo B (sotto-tipo B1, B2, B3, B4) Tipo C (sotto-tipo C1 e C2) Tipo D (sotto-tipo D1 e D2) Tipo E+F Tipo G Tipo P (sotto-tipo P1 e P2) Tipo L (policarbonato) Tipo M Tipo I

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: FACCIATE

Come suggerito dai fornitori le facciate sono state classificate in base alla tecnologia costruttiva e al tipo di rivestimento.

TIPO	Tecnologia costruttiva		RIVESTIMENTO
A	Montanti e traversi in alluminio. Infissi apribili e bow windows.	A1	Vetro e lamiera
		A2	alluminio
B	Montanti e traversi in acciaio. Infissi apribili	B1	Lastre cotto
		B2	Pannelli fibrocemento
		B3	Lamiera alluminio
C	Montanti e traversi in acciaio. Infissi apribili	C1	Lastre cotto
		C2	Lamiera alluminio
D1	Montanti alluminio su pareti in c.a. Infissi apribili.	D1	Lastre cotto
D2		D2	Pannelli fibrocemento
D3		D3	Lamiera alluminio
E-F	Pannelli vetrati su struttura d'acciaio	E-F	Lastre vetro



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: FACCIATE

Nella determinazione della capacità del sistema si è tenuto conto delle prestazioni del sistema nei confronti delle seguenti azioni:

- Effetti inerziali perpendicolari al piano della facciata;
- Effetti cinematici perpendicolari al piano della facciata;
- Effetti inerziali paralleli al piano della facciata;
- Effetti cinematici paralleli al piano della facciata.

La difficoltà principale nella descrizione del comportamento delle facciate continue risiede nel fatto che esse sono un sistema composto da molti componenti (montanti, traversi, rivestimenti, infissi, supporti, bulloni e viti...) e per ogni componente devono essere individuati in modo teorico i principali meccanismi di danneggiamento e di collasso e il corrispondente valori di domanda sismica (spostamento d'interpiano e accelerazione).

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: FACCIATE

Nel tentativo di tenere conto del comportamento del sistema nel suo insieme, abbiamo classificato i diversi meccanismi di danneggiamento di tutti i componenti del sistema secondo tre livelli di danno:

- Danno superficiale (DS1) → Stato Limite di Operatività SLO
- Danno locale (DS2) → Stato Limite di Danno SLD
- Danno severo (DS3) → Stato Limite di salvaguardia della Vita SLV

Questi tre livelli di danno fanno riferimento alla pericolosità crescente di un certo scenario di danneggiamento per l'incolumità delle persone e la sicurezza strutturale.

Ad esempio:

- lo scenario di danno che vede l'espulsione dei rivestimenti in cotto o degli infissi rientra nel danno severo
- la rottura delle viti tra montanti e traversi rientra nel danno superficiale/locale, poiché i traversi sono elementi "secondari" che reggono solamente il peso dei pannelli e sono posizionati all'interno del pacchetto "facciata continua".

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: FACCIATE

La tabella seguente riporta la classificazione dei meccanismi di danno per le facciate di tipo A, B, C e D e la loro associazione con i tre livelli di danneggiamento. Inoltre per le diverse tipologie di facciata sono riportate le verifiche effettuate.

	FACCIATE A1/A2/A3	FACCIATE B1/B2/B3	FACCIATE C1/C2	FACCIATE D1	FACCIATE D2	FACCIATE D3
Descrizione tipologia facciata	Montanti e traversi in alluminio. Rivestimento in vetro o lamiera alluminio. Infissi apribili e bow windows.	Montanti e traversi in acciaio. Rivestimento cotto, pannelli fibrocemento, lamiera alluminio. Infissi apribili.	Montanti e traversi in acciaio. Rivestimento cotto, o lamiera alluminio. Infissi apribili.	Montanti alluminio su setti c.a. Rivestimento cotto. Infissi apribili.	Montanti alluminio su setti c.a. Rivestimento pannelli fibrocemento.	Montanti alluminio su setti c.a. Rivestimento lamiera alluminio.
Peso (kg/m <sup>2</sup> )	100	100	100	60	60	20

MECCANISMO DI DANNO	CALCOLO EFFETTUATO PER LE DIVERSE TIPOLOGIE						
	FACCIATE A1/A2/A3	FACCIATE B1/B2/B3	FACCIATE C1/C2	FACCIATE D1	FACCIATE D2	FACCIATE D3	
COMPORTAM ENTO INTERZIALE FUORI PIANO	Presso-flessione montante acciaio	-	Trave su 2 appoggi distanti 4700 mm e forza concentrata nel baicentro	Trave su 2 appoggi distanti 4700 mm e forza concentrata nel baicentro	Infissi: trave su due appoggi distanti 2700 mm e forza concentrata	Infissi: trave su due appoggi distanti 2700 mm e forza concentrata	
	Presso-flessione montante alluminio	Trave su 2 appoggi distanti 3000 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 450 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 450 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 1000 mm e carico distribuito	
	Verifiche bow windows	Pressoflessione montante, trazione controventi, taglio e trazione bulloni di connessione col solaio	-	-	-	-	-
	Bullone staffa-montante	Taglio (sisma+peso facciata)	Taglio (sisma+peso facciata)	Taglio (sisma+peso facciata)	Taglio (sisma+peso facciata)	Taglio (sisma+peso facciata)	Taglio (sisma+peso facciata)
	Ritollamento montante	Sisma fuori piano+peso facciata	Sisma fuori piano+peso facciata	Sisma fuori piano+peso facciata	-	-	-
	Bullone staffa-setto c.a.	-	-	-	Trazione	Trazione	Trazione
	Viti infisso	Taglio (sisma+peso infisso)	Taglio (sisma+peso infisso)	Taglio (sisma+peso infisso)	Taglio (sisma+peso infisso)	-	Taglio (sisma+peso infisso)
	Viti montante-traverso	-	-	-	-	Trazione	Trazione
	Rivetti pannelli esterni	-	Trazione (B2)	-	-	Trazione	-

DANNO SEVERO (SLV)	COMPORTAM ENTO INTERZIALE NEL PIANO	COMPORTAM ENTO INTERZIALE NEL PIANO					
		FACCIATE A1/A2/A3	FACCIATE B1/B2/B3	FACCIATE C1/C2	FACCIATE D1	FACCIATE D2	FACCIATE D3
COMPORTAM ENTO INTERZIALE NEL PIANO	Presso-flessione montante acciaio	-	Trave su 2 appoggi distanti 4700 mm e forza concentrata nel baicentro	Trave su 2 appoggi distanti 4700 mm e forza concentrata nel baicentro	Infissi: trave su due appoggi distanti 2700 mm e carico concentrato	-	Infissi: trave su due appoggi distanti 2700 mm e carico concentrato
	Presso-flessione montante alluminio	Trave continua con appoggi distanti 600 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 450 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 450 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 3000 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 3000 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 3000 mm e carico distribuito
	Verifiche bow windows	Pressoflessione montante, trazione controvento, taglio e trazione bulloni e flessione staffa di connessione col solaio	-	-	-	-	-
	Halfen staffa-solaio	Taglio	Taglio	Taglio	-	-	-
	Staffa-setto c.a.	-	-	-	Taglio	Taglio	Taglio
	Ritollamento staffa	Taglio	Taglio	Taglio	Taglio	Taglio	Taglio
	Flessione staffa	Mensola lunga 320 mm	Mensola lunga 355 mm	Mensola lunga 355 mm	Mensola lunga 110 mm	Mensola lunga 147mm	Mensola lunga 160mm
	Bullone staffa-montante	-	-	-	Trazione	Trazione	Trazione
	Viti montante-traverso	-	-	-	-	Taglio	Taglio
	COMPORTAM ENTO CINEMATICO FUORI PIANO	Tolleranza guarnizioni gancio cotto (5 mm)	-	Rotazione cotto per spostamenti d'interpiano	Rotazione cotto per spostamenti d'interpiano	Rotazione cotto per spostamenti d'interpiano	-
COMPORTAM ENTO CINEMATICO NEL PIANO	Tolleranza guarnizioni degli infissi	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	-	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: FACCIATE

È importante osservare che, nella direzione perpendicolare a quella della facciata, l'azione sismica risulta sempre minore a quella del vento.

Poiché le facciate continue sono state progettate con particolare attenzione agli effetti dovuti all'azione del vento, queste risultano automaticamente verificate per gli effetti inerziali fuori piano (che sono comunque stati considerati nella procedura di valutazione delle prestazioni sismiche).

Particolare attenzione è quindi stata osservata nei confronti degli effetti inerziali nel piano, e delle deformazioni causate da spostamenti di interpiano sia in direzione ortogonale sia in direzione parallela alla facciata.

		MECCANISMO DI DANNO	FACCIATE A1/A2/A3	FACCIATE B1/B2/B3	FACCIATE C1/C2	FACCIATE D1	FACCIATE D2	FACCIATE D3
DANNO SUPERFICIALE (SLO) E LOCALE (SLD)	COMPORTAMENTO INTERZIALE FUORI PIANO		-	Trave su 2 appoggi distanti 4700 mm e forza concentrata nel baricentro	Trave su 2 appoggi distanti 4700 mm e forza concentrata nel baricentro	Infissi: trave su due appoggi distanti 2700 mm e forza concentrata nel baricentro	-	Infissi: trave su due appoggi distanti 2700 mm e forza concentrata nel baricentro
		Freccia montante alluminio (l/200)	Trave su 2 appoggi distanti 600 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 450 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 450 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito
		Freccia montante alluminio bow windows (l/200)	Trave su 2 appoggi distanti 1600 mm e carico distribuito	-	-	-	-	-
		Viti montante alluminio-montante acciaio	-	Trazione	Trazione	-	-	-
	COMPORTAMENTO INTERZIALE NEL PIANO	Viti montante-traverso	Sisma fuori piano	Trazione e taglio	Trazione e taglio	Trazione e taglio	Trazione e taglio	Trazione
		Freccia montante acciaio (l/200)	-	Trave continua con appoggi distanti 400 mm e carico distribuito	Trave continua con appoggi distanti 400 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 2700 mm e forza concentrata nel baricentro	-	Infissi: trave su due appoggi distanti 2700 mm e forza concentrata nel baricentro
		Freccia montante alluminio (l/200)	Trave su 2 appoggi distanti 3000 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 450 mm e carico distribuito	Trave su 2 appoggi distanti 450 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito
		Freccia montante alluminio bow windows (l/200)	Trave su 2 appoggi distanti 3600 mm e forza concentrata nel baricentro	-	-	-	-	-
	COMPORTAMENTO CINEMATICO FUORI PIANO	Viti montante alluminio-montante acciaio	-	Taglio	Taglio	-	-	-
		Viti montante-traverso	Sisma nel piano	Trazione e taglio	Trazione e taglio	Trazione e taglio	Trazione e taglio	Taglio
		Deformazione montante acciaio (tolleranza asola 4mm)	-	Trave 2 appoggi distanti 4700 mm	Trave 2 appoggi distanti 4700 mm	Trave 2 appoggi distanti 2700 mm	-	Trave 2 appoggi distanti 2700 mm
		Deformazione montante alluminio (tolleranza asola 4mm)	Trave 2 appoggi distanti 3000 mm	-	-	-	-	-
COMPORTAMENTO CINEMATICO NEL PIANO	Deformazione montante alluminio bow windows (tolleranza asola 4mm)	Trave 2 appoggi distanti 3600 mm	Trave 2 appoggi distanti 450 mm	Trave 2 appoggi distanti 450 mm	Trave 2 appoggi distanti 3000 mm	Trave 2 appoggi distanti 3000 mm	Trave 2 appoggi distanti 3000 mm	
	Deformazione montante acciaio (tolleranza asola 4mm)	-	Trave 2 appoggi distanti 4700 mm	Trave 2 appoggi distanti 4700 mm	Trave 2 appoggi distanti 2700 mm	-	Trave 2 appoggi distanti 2700 mm	
	Deformazione montante alluminio (tolleranza asola 4mm)	Trave 2 appoggi distanti 3000 mm	Trave 2 appoggi distanti 450 mm	Trave 2 appoggi distanti 450 mm	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito	Trave su 4 appoggi distanti 900 mm e carico distribuito	
	Deformazione montante alluminio bow windows (tolleranza asola 4mm)	Trave 2 appoggi distanti 3600 mm	-	-	-	-	-	
	Tolleranza guarnizioni degli infissi	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	-	Deformazione cornice (tolleranza guarnizioni 22 mm)	

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: FACCIATE

Il comportamento della facciata nel proprio piano è fortemente influenzato dalla differenza tra il proprio periodo di vibrazione e quello della struttura in c.a. alla quale è ancorata.

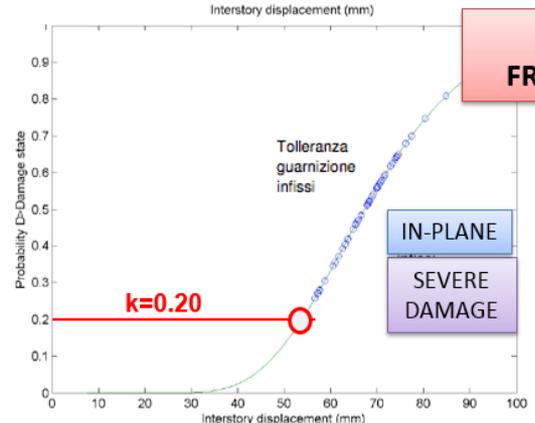
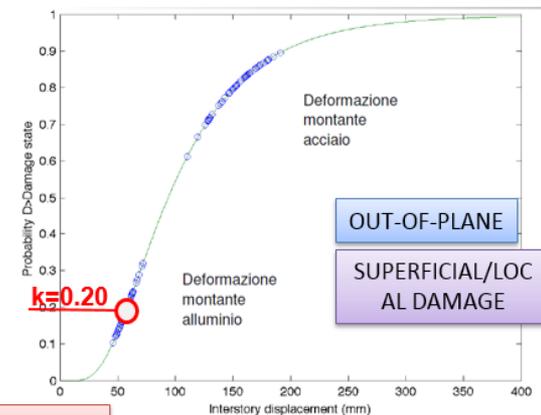
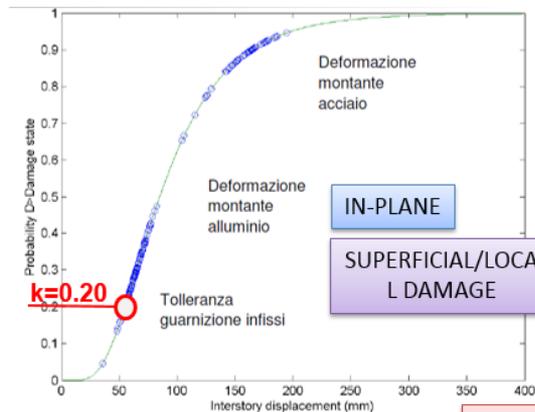
Se, durante il sisma, la facciata e la struttura portante sono in fase i montanti della facciata non sono gravati da sollecitazioni ulteriori rispetto al peso proprio, ma sono soggetti a spostamenti pari a quelli della struttura sottostante e la cui compatibilità col sistema deve essere verificato.

Se la facciata e la struttura in c.a. sono in opposizione di fase, la facciata tende a deformarsi autonomamente per effetto inerziale dovuto alla propria massa e, in questo caso, è necessario tenere conto dell'insorgenza di sollecitazioni aggiuntive.

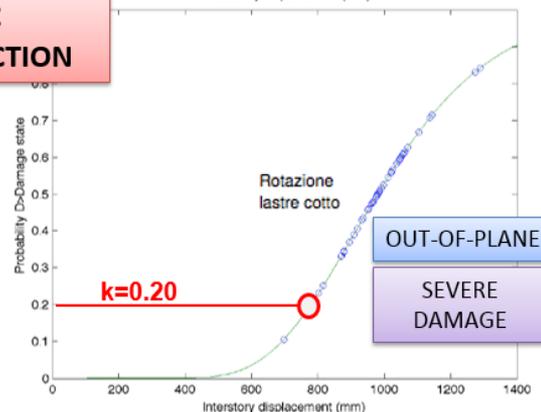
Particolare attenzione deve essere prestata agli effetti degli spostamenti di interpiano (in entrambe le direzioni) sulle lastre in cotto, le cui rotazioni devono essere assorbite dalle guarnizioni incollate ai ganci che le sostengono, in modo da scongiurarne l'espulsione.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Verifica sismica: FACCIATE CURVE DI FRAGILITA'

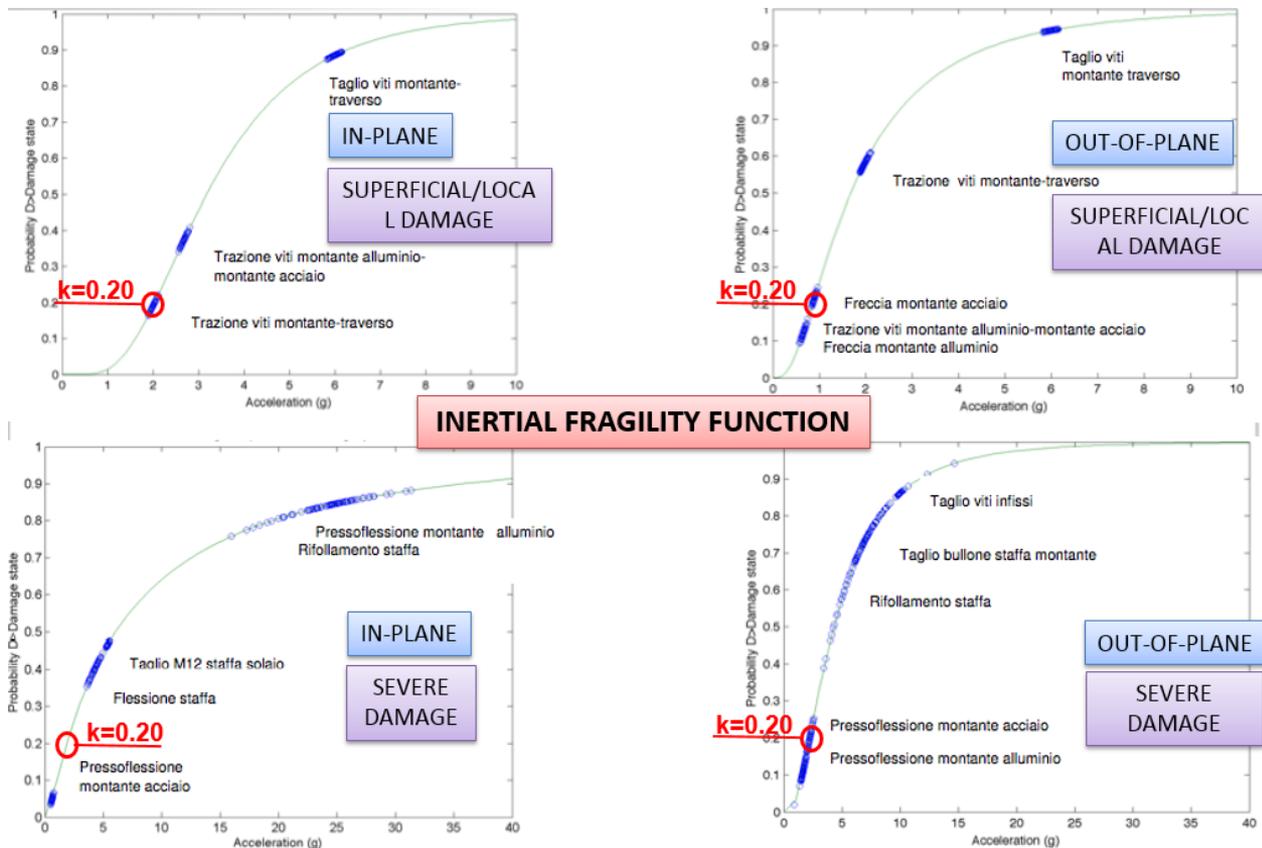


### KINEMATIC FRAGILITY FUNCTION



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

Verifica sismica: FACCIATE  
**CURVE DI FRAGILITA'**



# Comportamento sismico di elementi non strutturali

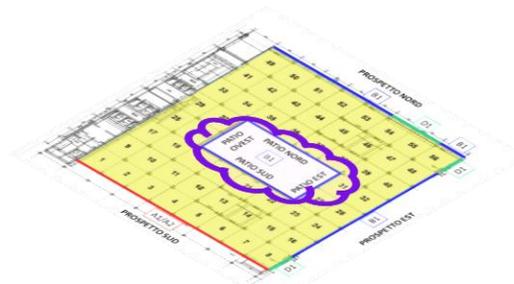
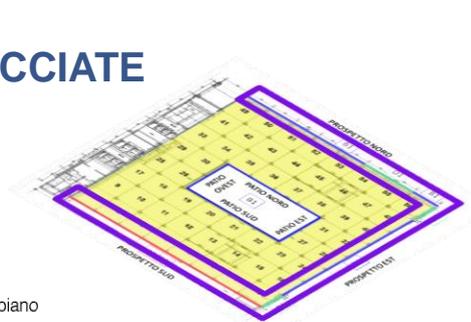
## Verifica sismica: FACCIATE

TIPOLOGIA A1/A2				
MECCANISMI DANNO SUPERFICIALE/LOCALE				
Ordine di attivazione	Comportamento cinematico nel piano	Comportamento cinematico fuori piano	Comportamento inerziale nel piano	Comportamento inerziale fuori piano
1°	Deformabilità guarnizione infissi	Deformazione montante alluminio	Trazione viti montante-traverso	Freccia montante alluminio
2°	Deformazione montante alluminio	Deformazione montante bow window	Freccia montante alluminio bow window	Trazione viti montante - traverso
3°	Deformazione montante alluminio bow window		Taglio viti montante-traverso	Freccia montante alluminio bow window
4°			Freccia montante alluminio	Taglio viti montante-traverso

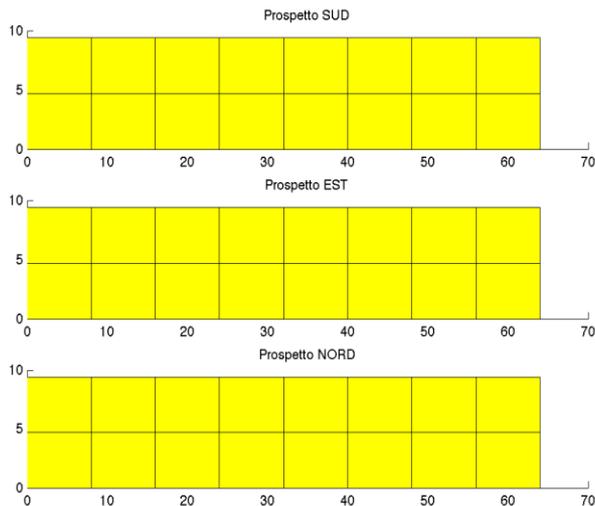
MECCANISMI DANNO SEVERO				
Ordine di attivazione	Comportamento cinematico nel piano	Comportamento cinematico fuori piano	Comportamento inerziale nel piano	Comportamento inerziale fuori piano
1°	Deformabilità guarnizione infissi	-	Pressoflessione montante alluminio	Pressoflessione montante alluminio
2°			Flessione staffa solaio	Taglio M12 staffa-montante
3°			Taglio M12 staffa-solaio	Taglio M12 montante alluminio bow window
4°			Taglio M12 solaio-mensola bow window	Pressoflessione montante alluminio bow window
5°			Pressoflessione montante alluminio bow window	Trazione M12 solaio-bow window
6°			Trazione bullone montante alluminio bow window	Rifollamento staffa montante
7°			Rifollamento staffa solaio	Trazione controvento bow window
8°			Trazione controvento bow window	Taglio viti infissi

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

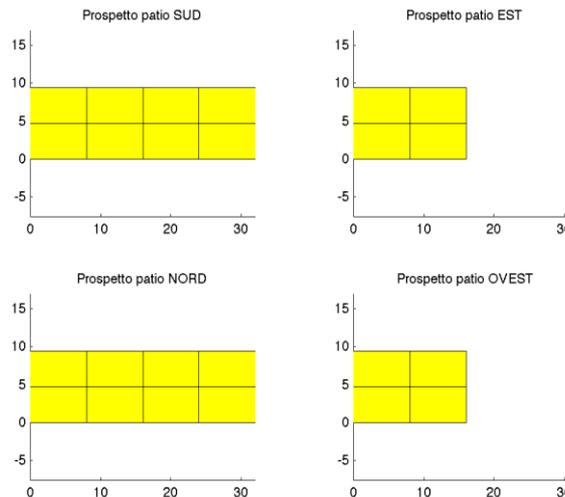
## Verifica sismica: FACCIATE



Accelerazione fuori piano



Accelerazione fuori piano



L'analisi delle facciate viene analizzato in ogni suo prospetto.

Ciascun prospetto viene poi suddiviso in una maglia i cui elementi hanno larghezza 8 metri (corrispondente all'interasse dei pilastri) e altezza pari a quella di interpiano.

Per ogni "rettangolo" i modelli di calcolo sismico dei singoli edifici permettono di ricavare i valori degli spostamenti di interpiano e delle accelerazioni sia in direzione perpendicolare che parallela alla parete.

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## CONCLUSIONI

- Incrementare la qualità e la diffusione dei dati sperimentali dei fornitori;
- Analisi accoppiata dei diversi elementi non-strutturali e la loro interazione;
- Necessità di un quadro di riferimento tecnico italiano/europeo che copra in maggiore dettaglio la fase di progettazione esecutiva;
- Importanza di controlli in fase di costruzione per assicurare la coerenza dei dettagli previsti nel progetto che mitiga il rischio sismico;
- Importanza di sensibilizzare/connettere la filiera professionale dell'ingegneria strutturale/edile: corsi universitari, progettisti, imprese fornitrici, imprese installatrici, direzione lavori, collaudatore, RUP;
- Importanza di certificare prodotti/sistemi e soprattutto installatori;
- Importanza di codificare dettagli e modalità esecutive «best practices» che consentono di garantire minore rischio facilmente e a basso costo.
- Obiettivo di «finanziare» l'adozione di strategie di minore rischio sismico tramite le minori perdite/manutenzioni future durante la vita dell'opera.
- Si rileva scarso/nulla riconoscimento economico (valore aggiunto progettazione / opere). NB: contraddizione con il peso % economico e funzionale rispetto alle strutture primarie (in edifici importanti).

## Osservazioni o suggerimenti

**+ lab + knwl prestazioni**  
**rif. C.A. «trave-colonna»**  
**rif. duttilità / staffe chiuse**

**nuova figura D.O.**

**+ associazioni**

**+ qualità**  
**archivio BIM**

**ciclo di vita / loss ass.**

**solo + responsabilità**  
**assicurazione ?**

# Comportamento sismico di elementi non strutturali

## Ringraziamenti

**Impresa:** C.M.S.A. Società Cooperativa Muratori Sterratori ed Affini

**Fornitori:** Gyproc / Saint-Gobain PPC Italia S.p.A, Giuliani sc, F.I.S. SpA, Edilizia Integrale SpA, Baustoff + Metall Italia srl;

**Sperimentatori:** Metralab srl

**Direzione Lavori:** F&M Ingegneria SpA e Steam srl

**Confronto scientifico:** Prof. Tim Sullivan e Prof. André Filiatrault della Rose School (Pavia)

**GRAZIE !**