

IL TAVOLO PERMANENTE PROFESSIONI TECNICHE della Provincia di Trapani  
in collaborazione con la Fondazione Ordine Ingegneri Trapani  
organizza

## ECOSISMABONUS: COME APPLICARLO

### Agenzia delle entrate:

<https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/web/guest/faq1>

<https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/documents/20143/2666450/FAQ++Suberbonus+110.pdf/43d2f72b-4b28-280b-951b-1de9fe9164d1>

<https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/risposte-alle-istanze-d-interpello-relative-al-superbonus>

### ENEA:

<https://www.energiaenergetica.enea.it/detrazioni-fiscali/ecobonus/faq-ecobonus.html>

<https://www.energiaenergetica.enea.it/detrazioni-fiscali/contatti/quesiti-di-natura-tecnico-procedurale.html>

Lavora e organizza riunioni in remoto in tutta sicurezza. [Suggerimenti](#)



SUPPORTO

# Buona riunione



Grazie per aver scelto di lavorare da casa e fare la tua parte  
#WorkFromHere

Problemi con il download di GoToMeeting?

[Riprova](#) | [Reinstalla l'app](#)

16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

## STIMA DEI COSTI

La sostenibilità dell'intervento viene valutata attraverso un sintetico riepilogo dei costi, comprendenti anche le opere connesse al rinforzo (demolizioni e ripristini, opere accessorie).

Utilizzando il prezzario della Regione Abruzzo, l'ordine di grandezza del prezzo unitario degli interventi descritti può rilevarsi facendo riferimento a sezioni tipo di pilastri e travi: l'incamiciatura metallica di un pilastro di sezione 40x60 cm ha un costo stimato pari a 720 €/ml; il rinforzo a taglio di una trave di sezione 50x50 cm ha un costo stimato pari a 1300 €/ml.

L'intervento complessivo, che prevede l'incamiciatura alla testa e al piede di tutti i pilastri al piano terra e di quelli perimetrali agli altri piani, il rinforzo a taglio di circa il 60% delle travi e il rinforzo di tutti i nodi non confinati (1330 €/m<sup>2</sup>), implica un costo totale di circa 260 mila €, pari a 190 € per ogni mq di superficie utile dell'edificio.

In relazione al livello prestazionale conseguibile, si tratta evidentemente di un intervento sostenibile; occorre tuttavia osservare che l'assenza di corpi scala, sbalzi e forti irregolarità, unitamente a un' apprezzabile consistenza iniziale delle strutture ha indubbiamente contribuito significativamente al contenimento della spesa prevista per il miglioramento.

## STIMA DEI COSTI

La sostenibilità dell'intervento viene valutata attraverso un sintetico riepilogo dei costi, comprendenti anche le opere connesse al rinforzo (demolizioni e ripristini, opere accessorie).

Utilizzando il prezzario della Regione Abruzzo, l'ordine di grandezza del prezzo unitario degli interventi descritti può rilevarsi facendo riferimento a sezioni tipo di pilastri e travi: l'incamiciatura metallica di un pilastro di sezione 40x60 cm ha un costo stimato pari a 720 €/ml; il rinforzo a taglio di una trave di sezione 50x50 cm ha un costo stimato pari a 1300 €/ml.

L'intervento complessivo, che prevede l'incamiciatura alla testa e al piede di tutti i pilastri al piano terra e di quelli perimetrali agli altri piani, il rinforzo a taglio di circa il 60% delle travi e il rinforzo di tutti i nodi non confinati (1330 €/m<sup>2</sup>), implica un costo totale di circa 260 mila €, pari a 190 € per ogni mq di superficie utile dell'edificio.

In relazione al livello prestazionale conseguibile, si tratta evidentemente di un intervento sostenibile; occorre tuttavia osservare che l'assenza di corpi scala, sbalzi e forti irregolarità, unitamente a un' apprezzabile consistenza iniziale delle strutture ha indubbiamente contribuito significativamente al contenimento della spesa prevista per il miglioramento.



ORDINE DEGLI  
**INGEGNERI**  
DELLA PROVINCIA DI  
**TRAPANI**

## **ECOSISMABONUS: COME APPLICARLO**



*il Sisma Bonus:  
esempi applicativi*

**Ing. Calogero Cucchiara**  
**Docente di Tecnica delle Costruzioni**  
**Università degli Studi di Palermo**

Il **Rischio** Sismico (**R**) è un indicatore che tende a valutare i danni che un evento sismico può provocare in una determinata area. I danni sono riferiti alla perdita di vite umane, perdite economiche, danni a edifici etc.



$$R = P \times V \times E$$

### PERICOLOSITÀ SISMICA

La **pericolosità** è la probabilità che si verifichi un terremoto di magnitudo (intensità) superiore alla soglia di picco fissata.

### VULNERABILITÀ

La **vulnerabilità** indica la predisposizione di una costruzione a subire danneggiamenti e crolli.

### ESPOSIZIONE

L'**esposizione** indica la possibilità che un'area subisca un danno in termini economici, di vite e di beni culturali.

## **LINEE GUIDA PER LA CLASSIFICAZIONE DEL RISCHIO SISMICO DELLE COSTRUZIONI**

Obiettivo delle LG è quello di fornire gli strumenti operativi per la classificazione del Rischio sismico delle costruzioni, in vista di agevolazioni fiscali concesse dallo Stato a quanti decidano di apportare migliorie alle proprie costruzioni finalizzate alla riduzione del rischio sismico.

Il documento definisce otto Classi di Rischio, con rischio crescente dalla lettera A+ alla lettera G. La determinazione della classe di appartenenza di un edificio può essere condotta secondo due metodi, tra loro alternativi, l'uno convenzionale e l'altro semplificato, quest'ultimo con un ambito applicativo limitato.

Il metodo convenzionale, che si basa su una classificazione macrosismica dell'edificio, può essere applicato a qualsiasi tipo di costruzione ed è basato sull'applicazione dei metodi di analisi previsti dalle NTC2018, consentendo la valutazione della classe di rischio nella fase pre e post intervento.

Il metodo semplificato, che trova applicazione solo per gli edifici in muratura, si basa su una classificazione macrosismica secondo la Scala Macrosismica Europea (EMS), e può essere utilizzato sia per una valutazione preliminare indicativa della classe di rischio in relazione all'adozione di interventi di tipo locale.

Per la determinazione della classe di rischio si fa riferimento a due parametri:

- ❑ **la Perdita Annuale Media attesa (PAM)**, che tiene in considerazione le perdite economiche associate ai danni agli elementi, strutturali e non, e riferite al costo di ricostruzione (CR) dell'edificio privo del suo contenuto;
- ❑ **l'indice di sicurezza (IS-V) o «indice di rischio» della struttura** definito come il rapporto tra l'accelerazione di picco al suolo (PGA, Peak Ground Acceleration) che determina il raggiungimento dello SLV capacità in PGA (**PGAC**), e la PGA che la norma indica, per il progetto degli edifici nuovi (**PGAD**).

$$IS - V = \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV}$$

Laddove si preveda l'esecuzione di interventi volti alla riduzione del rischio, l'attribuzione della Classe di Rischio pre e post intervento deve essere effettuata utilizzando il medesimo metodo e con le stesse modalità di analisi e di verifica, tra quelle consentite dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

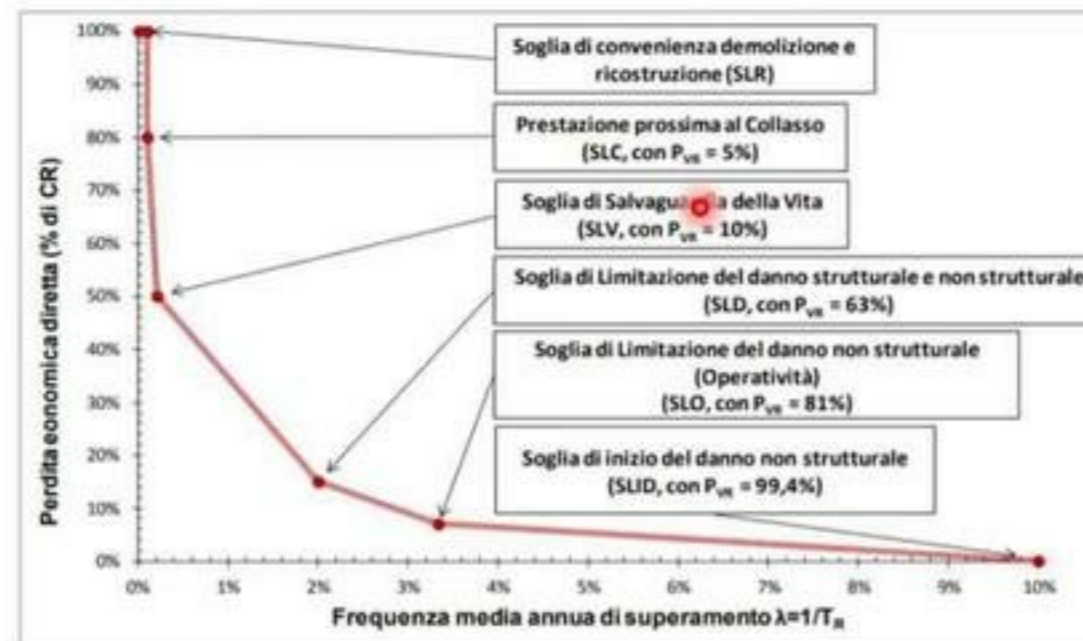
Nel caso di valutazioni finalizzate all'esecuzione di interventi sugli edifici volti alla riduzione del rischio, è consentito l'impiego del metodo semplificato, nei soli casi in cui si adottino interventi di rafforzamento locale; in tal caso è ammesso il passaggio di una sola Classe di Rischio.



## ATTRIBUZIONE DELLA CLASSE DI RISCHIO

In entrambi i metodi, convenzionale o semplificato è fatto utile riferimento al parametro PAM, che può essere assimilato al costo di riparazione dei danni prodotti dagli eventi sismici che si manifesteranno nel corso della vita della costruzione, ripartito annualmente ed espresso come percentuale del costo di ricostruzione.

Il PAM può essere valutato, come l'area sottesa alla curva rappresentante le perdite economiche dirette, in funzione della frequenza media annua di superamento (pari all'inverso del periodo medio di ritorno) degli eventi che provocano il raggiungimento di uno stato limite per la struttura. Tale curva, in assenza di dati più precisi, può essere discretizzata mediante una spezzata. Minore sarà l'area sottesa da tale curva, minore sarà la perdita media annua attesa (PAM).











## METODO CONVENZIONALE

Il metodo assegna alla costruzione in esame una Classe di Rischio in funzione del parametro economico PAM e dell'indice di sicurezza della struttura IS-V.








Per il calcolo di tali parametri (entrambi sono grandezze adimensionali, nel seguito espresse in %) è necessario calcolare, con riferimento al sito in cui sorge la costruzione, le accelerazioni di picco al suolo per le quali si raggiungono gli stati limite SLO, SLD, SLV ed SLC, utilizzando le usuali verifiche di sicurezza agli stati limite previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni. Esso è dunque applicabile a tutti i tipi di costruzione previsti dalle suddette Norme Tecniche.

Al fine della assegnazione della Classe di Rischio, è necessario valutare preliminarmente la Classe PAM e la Classe IS-V in cui ricade la costruzione in esame.

I valori di riferimento per la definizione delle Classi PAM sono riportati in tabella 1.

Perdita Media Annua attesa (PAM)	Classe PAM	
$PAM \leq 0,50\%$	$A^{+}_{PAM}$	
$0,50\% < PAM \leq 1,0\%$	$A_{PAM}$	
$1,0\% < PAM \leq 1,5\%$	$B_{PAM}$	
$1,5\% < PAM \leq 2,5\%$	$C_{PAM}$	
$2,5\% < PAM \leq 3,5\%$	$D_{PAM}$	
$3,5\% < PAM \leq 4,5\%$	$E_{PAM}$	
$4,5\% < PAM \leq 7,5\%$	$F_{PAM}$	
$7,5\% \leq PAM$	$G_{PAM}$	

Analogamente, i valori di riferimento dell'indice di sicurezza da cui derivare la Classe IS-V, legata alla salvaguardia della vita umana, sono riportati nella seguente tabella.

Indice di Sicurezza	Classe IS-V	
$100\% < IS-V$	$A_{+IS-V}$	
$80\% \leq IS-V < 100\%$	$A_{IS-V}$	
$60\% \leq IS-V < 80\%$	$B_{IS-V}$	
$45\% \leq IS-V < 60\%$	$C_{IS-V}$	
$30\% \leq IS-V < 45\%$	$D_{IS-V}$	
$15\% \leq IS-V < 30\%$	$E_{IS-V}$	
$IS-V \leq 15\%$	$F_{IS-V}$	

$$IS - V = \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV}$$

Per la valutazione della Classe PAM e della Classe IS-V della costruzione in esame, necessarie per l'individuazione della Classe di Rischio, è sufficiente fare uso dei metodi indicati dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, procedendo con i seguenti passi:

- 1) Si effettua l'analisi della struttura e si determinano i valori delle accelerazioni al suolo di capacità,  $PGAC(SLi)$ , che inducono il raggiungimento degli stati limite indicati dalla norma (SLC, SLV, SLD, SLO). E' possibile, in via semplificata, effettuare le verifiche limitatamente allo SLV ed allo SLD.

Laddove si valuti il PAM ricorrendo alla determinazione dei punti corrispondenti a soli due stati limite, ai  $\lambda$  degli altri due stati limite potranno essere attribuiti i valori:

$$\lambda_{SLO} = 1,67\lambda_{SLD}, \quad \lambda_{SLC} = 0,49\lambda_{SLV}$$

2) Note le accelerazioni al suolo, PGAC, che producono il raggiungimento degli stati limite sopra detti, si determinano i corrispondenti periodi di ritorno,  $T_{rC}$ , associati ai terremoti che generano tali accelerazioni. In assenza di più specifiche valutazioni, il passaggio dalle PGAC ai valori del periodo di ritorno possono essere eseguiti utilizzando la seguente relazione:

$$T_{rC} = T_{rD} \cdot \left( \frac{PGA_C}{PGA_D} \right)^\eta$$

$$\eta = 1/0.41 \quad \text{per } a_g \geq 0.25g$$

$$\eta = 1/0.43 \quad \text{per } 0.25g \geq a_g \geq 0.15g$$

$$\eta = 1/0.356 \quad \text{per } 0.15g \geq a_g \geq 0.05g$$

$$\eta = 1/0.34 \quad \text{per } 0.05g \geq a_g$$

3) Per ciascuno dei periodi sopra individuati, si determina il valore della frequenza media annua di superamento  $\lambda = 1/T_{rC}$ .

4) Si definisce Stato Limite di Inizio Danno (SLID), quello a cui è comunque associabile una perdita economica nulla in corrispondenza di un evento sismico e il cui periodo di ritorno è assunto, convenzionalmente, pari a 10 anni, ossia  $\lambda = 0,1$ .

5) Si definisce Stato Limite di Ricostruzione (SLR) quello a cui, stante la criticità generale che presenta la costruzione al punto da rendere pressoché impossibile l'esecuzione di un intervento diverso dalla demolizione e ricostruzione, è comunque associabile una perdita economica pari al 100%. Convenzionalmente si assume che tale stato limite si manifesti in corrispondenza di un evento sismico il cui periodo di ritorno è pari a quello dello Stato Limite dei Collasso (SLC).

6) Per ciascuno degli stati limite considerati si associa al corrispondente valore di  $\lambda$  il valore della percentuale di costo di ricostruzione secondo la seguente tabella:

Stato Limite	CR(%)
SLR	100%
SLC	80%
SLV	50%
SLD	15%
SLO	7%
SLID	0%

$$\lambda_{SLR} = 0$$

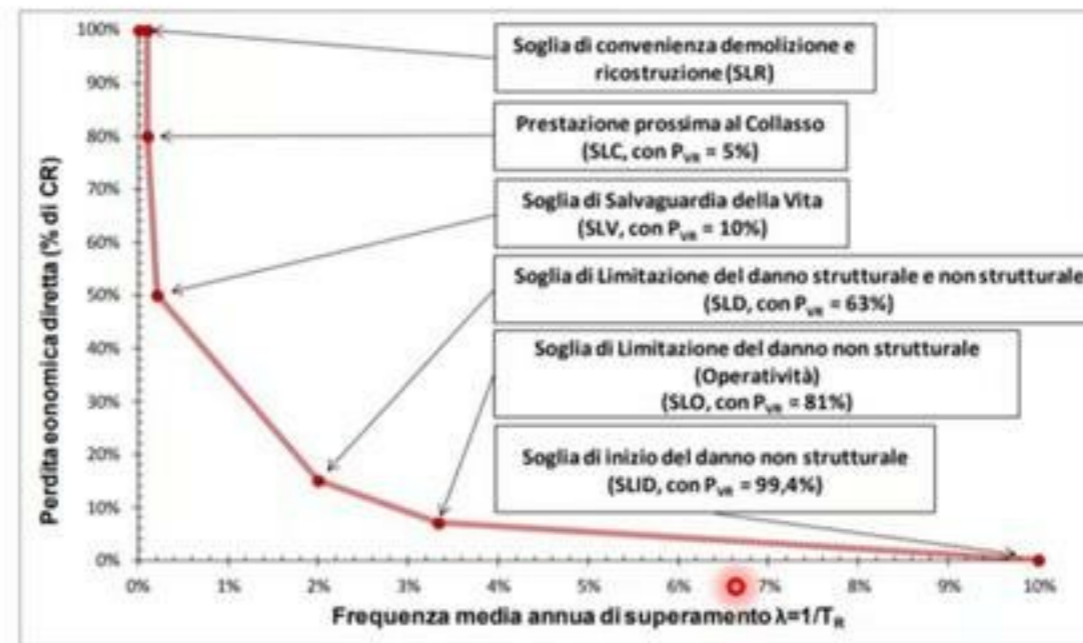
$$\lambda_{SLC} =$$

$$\lambda_{SLV} =$$

$$\lambda_{SLD} =$$

$$\lambda_{SLO} =$$

$$\lambda_{SLID} = 0.1$$











7) Si valuta il PAM (in valore percentuale), ovvero l'area sottesa alla spezzata individuata dalle coppie di punti ( $\lambda$ , CR) per ciascuno dei sopra indicati stati limite, a cui si aggiunge il punto ( $\lambda=0$ , CR=100%), mediante la seguente espressione:

$$PAM = \sum_{i=2}^5 [\lambda(SL_i) - \lambda(SL_{i-1})] \cdot [CR(SL_i) - CR(SL_{i-1})] / 2 + \lambda(SLC) \cdot CR(SLR)$$

dove l'indice "i" rappresenta il generico stato limite (i=5 per lo SLC e i=1 per lo SLID)








8) Si individua la Classe PAM, mediante la tabella 1 che associa la classe all' intervallo di valori assunto dal PAM.

Perdita Media Annuata attesa (PAM)	Classe PAM	
$PAM \leq 0,50\%$	A <sup>PAM</sup>	
$0,50\% < PAM \leq 1,0\%$	A <sub>PAM</sub>	
$1,0\% < PAM \leq 1,5\%$	B <sub>PAM</sub>	
$1,5\% < PAM \leq 2,5\%$	C <sub>PAM</sub>	
$2,5\% < PAM \leq 3,5\%$	D <sub>PAM</sub>	
$3,5\% < PAM \leq 4,5\%$	E <sub>PAM</sub>	
$4,5\% < PAM \leq 7,5\%$	F <sub>PAM</sub>	
$7,5\% \leq PAM$	G <sub>PAM</sub>	

9) Si determina l'indice di sicurezza per la vita IS-V, ovvero il rapporto tra la  $PGA_C$  (di capacità) che ha fatto raggiungere al fabbricato lo stato limite di salvaguardia della vita umana e la  $PGA_D$  (di domanda) del sito in cui è posizionato la costruzione, con riferimento al medesimo stato limite.

$$IS - V = \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV}$$

10) Si individua la Classe IS-V, mediante la tabella 2 che associa la classe all'intervallo di valori assunto dall'Indice di sicurezza per la vita IS-V, valutato come rapporto tra la  $PGA_C$  (SLV) e  $PGA_D$ (SLV).

Indice di Sicurezza	Classe IS-V	
$100\% < IS-V$	A <sub>IS-V</sub>	
$80\% \leq IS-V < 100\%$	A <sub>IS-V</sub>	
$60\% < IS-V < 80\%$	B <sub>IS-V</sub>	
$45\% < IS-V < 60\%$	C <sub>IS-V</sub>	
$30\% < IS-V < 45\%$	D <sub>IS-V</sub>	
$15\% \leq IS-V < 30\%$	E <sub>IS-V</sub>	
$IS-V \leq 15\%$	F <sub>IS-V</sub>	

11) Si individua la Classe di Rischio(7) della costruzione come la peggiore tra la Classe PAM e la Classe IS-V.

Il valore della Classe di Rischio attribuita a ciascuna costruzione, come detto, può essere migliorato a seguito di interventi che riducono il rischio della costruzione e, quindi, che incidono sul valore PAM e/o sulla capacità che la struttura possiede rispetto allo stato limite della salvaguardia della vita, valutato come rapporto tra la  $PGA_C$  (SLV) e  $PGA_D$ (SLV).

## **Definizione dei due indici di rischio**

Per la definizione di uno o più indici di rischio di un edificio, gli elementi che dovrebbero essere presi in considerazione sono: l'edificio stesso; le persone che vivono al suo interno; i beni in esso contenuti e le attività svolte all'interno.

In genere i danni sono classificati in:

- diretti (riferiti alla costruzione)
- indiretti (riferiti ai beni contenuti e alle attività svolte).

Le perdite delle Vite Umane sono considerate separatamente.

Per avere un unico indice di rischio le diverse perdite dovrebbero essere quantificate attraverso un unico parametro, per esempio un parametro economico.

Questa operazione presenta delle difficoltà connesse alla conoscenza dell'esposizione in termini sia dei beni contenuti nella costruzione, sia il numero delle persone presenti, estremamente variabile nel tempo, e le attività economiche esercitate all'interno.

A causa di queste difficoltà le Linee Guida hanno escluso dalla valutazione economica i beni contenuti nella costruzione e le attività economiche esercitate, considerando soltanto le perdite dovute ai danni sulla parte strutturale e non della costruzione stessa.

Per quanto riguarda le persone, si richiederebbe, oltre che la conoscenza delle presenze, anche l'assegnazione di un valore alla vita umana, operazione che implica difficoltà di carattere etico. Data la complessità della materia, si è ritenuto opportuno operare trattando in maniera separata il tema delle perdite umane.

Tutto questo giustifica l'adozione, da parte delle Linee Guida per il Sisma-bonus, di due indici di rischio, di cui il primo di natura prettamente economica e riferito alle perdite dirette, che è l'Indice PAM (Perdita Annuale Medi attesa) e l'altro legato alla Salvaguardia della Vita Umana che è l'indice IS-V (Indice di Sicurezza della Vita).

Relativamente ai diversi intervalli che possono assumere i due indici viene assegnata una classe di rischio. Ai fini della definizione di una unica classe di rischio per una determinata costruzione, si assume, tra le classi corrispondenti ai due diversi indici, la peggiore tra le due.

Qualche considerazione merita l'assunzione dell'IS-V come parametro assunto per definire le perdite umane, in quanto non esprime una diretta correlazione con la perdita attesa di vite umane, ma solo la risposta della struttura ai terremoti.

In effetti le strade per la definizione di un indice di perdite delle vite umane sono due: la prima ricalca la stessa procedura del PAM, considerando il numero di perdite attese di vite umane corrispondente a ciascun livello di danno; la seconda si basa sulla capacità resistente dell'edificio rispetto ai livelli di danno tali da potere comportare conseguenze per le persone presenti.

Le linee guida hanno preferito a favore della semplicità la seconda strada basata su una verifica sismica della costruzione esistente rispetto alla Stato Limite di Salvaguardia della Vita.



## Correlazione tra indice PAM e IS-V

Le linee guida, definiscono due indici IS-V e PAM. Al fine di giustificare l'adozione dei due indici occorre verificare che essi siano sufficientemente indipendenti tra di loro, affinché la determinazione del valore di uno di essi renda superflua la determinazione dell'altro.

Questo studio è stato affrontato da Dolce e Moroni determinando per fissato indice di Salvaguardia della Vita i valori massimi e minimi che possono essere assunte dall'indice PAM.

Tabella 2 – Compatibilità delle classi PAM e IS-V

Indice di Sicurezza	Classe IS-V	A <sup>*</sup> PAM	APAM	BPAM	CPAM	DPAM	EPAM	FPAM	GPAM
100% < IS-V	A <sup>*</sup> <sub>IS-V</sub>					●			
80% ≤ IS-V < 100%	A <sub>IS-V</sub>								
60% ≤ IS-V < 80%	B <sub>IS-V</sub>								
45% ≤ IS-V < 60%	C <sub>IS-V</sub>								
30% ≤ IS-V < 45%	D <sub>IS-V</sub>								
15% ≤ IS-V < 30%	E <sub>IS-V</sub>								
IS-V ≤ 15%	F <sub>IS-V</sub>								

La Tabella 2 evidenzia come i due indici sono debolmente correlati.

Come si può notare, migliorando la classe IS-V, si accresce l'ampiezza delle classi di PAM potenzialmente compatibili con tale configurazione. Solo per la classe F di IS-V è possibile un solo valore di PAM, mentre per le classi migliori E o D di IS-V sono possibili 4 e anche 5 classi di PAM.

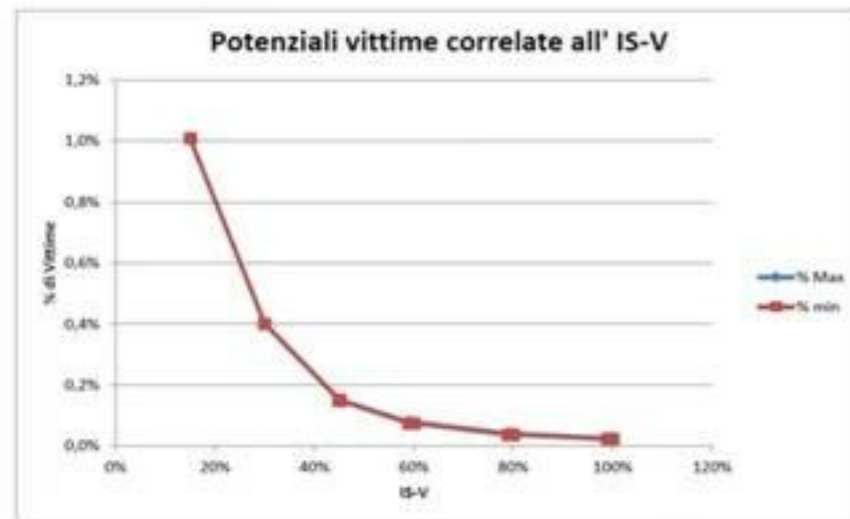


Figura 3: Percentuali massime e minime di vittime al variare dell'IS-V.

L'indice di sicurezza allo SLV è fortemente correlato con la percentuale di vittime attese, indipendentemente dal valore assunto dall'indice PAM

- ✓ Nell'attribuzione della Classe di Rischio pre e post intervento deve essere effettuata utilizzando il medesimo metodo e con le stesse modalità di analisi e di verifica, tra quelle consentite dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

NTC 2018

### 7.3 METODI DI ANALISI E CRITERI DI VERIFICA

Si distinguono i metodi di analisi lineare e non lineare

Analisi lineare

1. Statica lineare
2. Dinamica (modale con spettro di risposta o attraverso integrazione al passo)

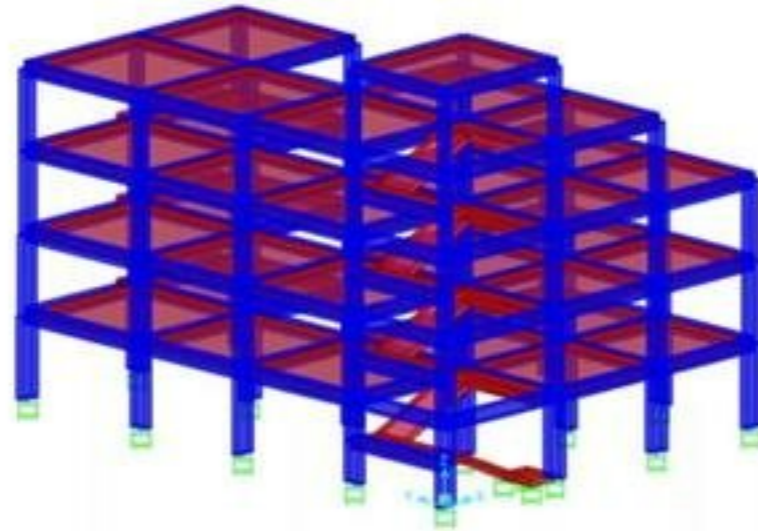
Analisi non lineare

1. Statica non lineare
2. Dinamica non lineare (attraverso integrazione al passo)

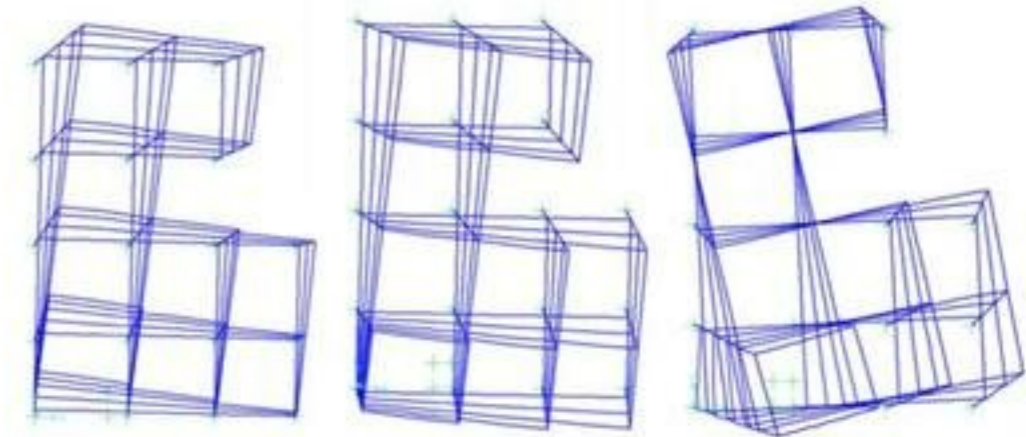
- ✓ È consentito l'impiego del metodo semplificato, nei soli casi in cui si adottino interventi di rafforzamento locale; in tal caso è ammesso il passaggio di una sola Classe di Rischio.

## Analisi lineare

1. Statica lineare
2. Dinamica modale con spettro di risposta



## 2. Dinamica modale con spettro di risposta



Modo 1  $T_1=0,47$  s

Modo 2  $T_1=0,46$  s

Modo 3  $T_1=0,34$  s

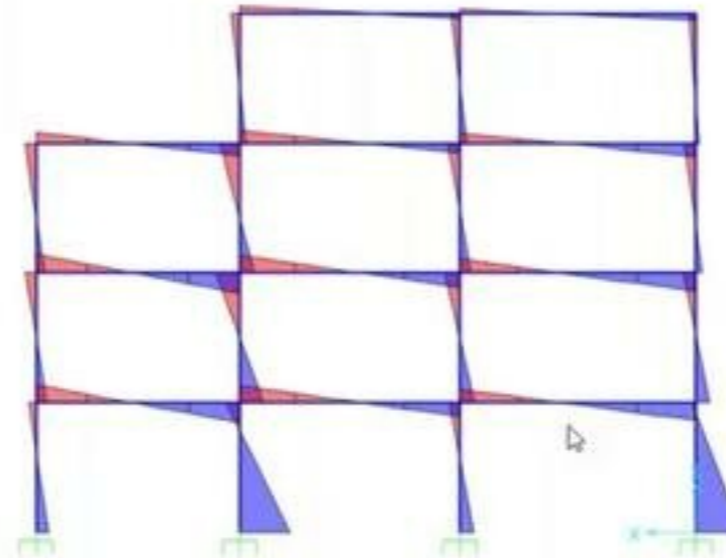
## CALCOLO FORZA SISMICA :

$$F_h = S_d \frac{W}{g} \lambda$$

$$0 \leq T \leq T_B \quad S_d(T) = \frac{a_g S F_0}{q} \left( \frac{T}{T_B} + \frac{q}{F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right)$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_d(T) = a_g S \frac{F_0}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad S_d(T) = a_g S \frac{F_0}{q} \left( \frac{T_C}{T} \right)$$



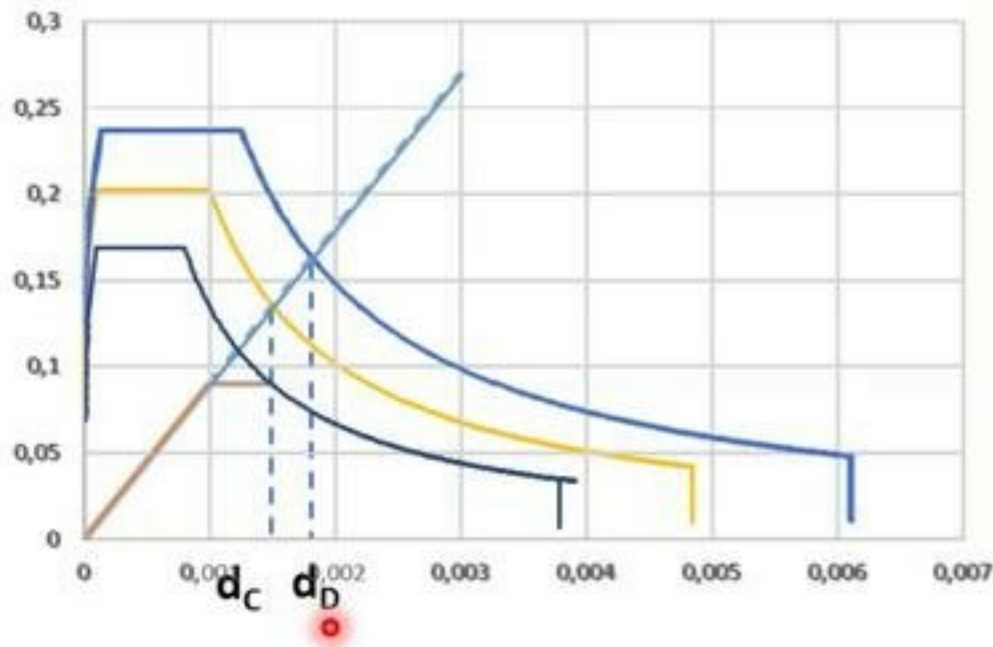
## Verifiche:

1. SLU : verifica resistenza elementi strutturali
2. SLD: spostamenti di interpiano inferiori a prefissati limiti ( $h/500$ )

$$\left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLV} = \left( \frac{M_{Rd} - M_{Sd,CV}}{M_{Sd,sisma}} \right)$$

$$\left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLD} = \left( \frac{h/5000}{U_{design}} \right)$$

## Procedura per la determinazione dell'IS-V nel caso di analisi statica non lineare



Effettuata l'analisi pushover e riportata nel piano ADSR la curva di capacità del sistema equivalente ad un grado di libertà si determina la domanda di spostamento  $d_D$  che nel caso particolare è maggiore di  $d_C$  (capacità di spostamento).

Al fine di trovare il  $PGA_C$  occorre determinare lo spettro ADSR in corrispondenza del quale  $d_C = d_D$  si procede in modo iterativo:

- 1) Si ipotizza un valore del Tempo di Ritorno  $T_R$
- 2) Attraverso la seguente espressione, interpolando tra i valori dei tre parametri ( $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$ ) compresi nell'intervallo  $T_{Ri}$  -  $T_{Ri+1}$  che comprende il  $T_R$  scelto si trova il valore dei tre parametri

$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_C^*$ [s]
30	0,053	2,407	0,262
50	0,067	2,410	0,281
72	0,078	2,409	0,291
101	0,090	2,403	0,300
140	0,102	2,421	0,309
201	0,117	2,440	0,316
475	0,158	2,495	0,333
975	0,199	2,558	0,342
2475	0,265	2,621	0,355

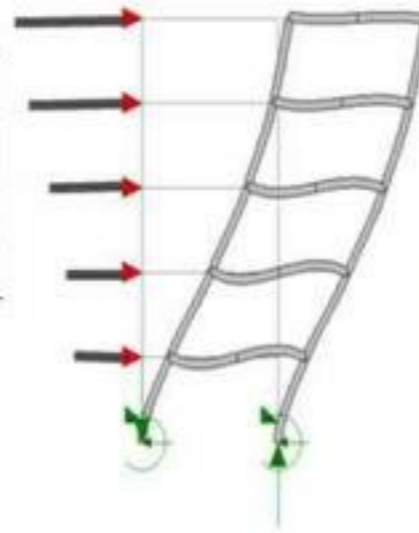
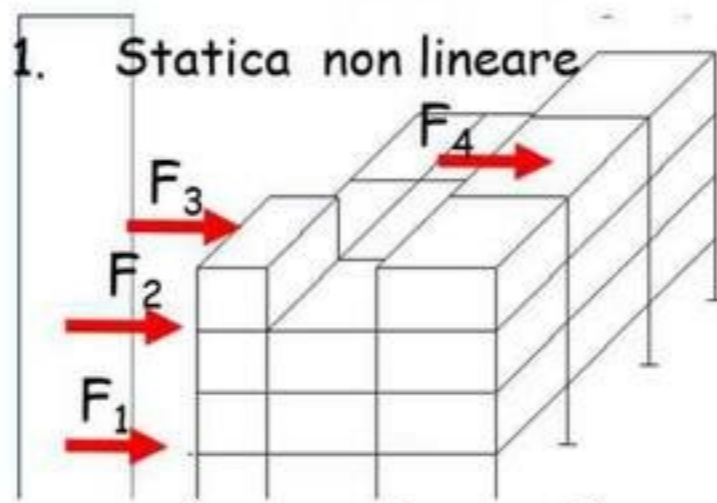
$$\ell_g(p) = \ell_g(p_1) + \frac{\ell_g\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \ell_g\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right)}{\ell_g\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)}$$

- 3) Si trovano i rimanenti parametri dello spettro e si costruisce il nuovo spettro ADSR

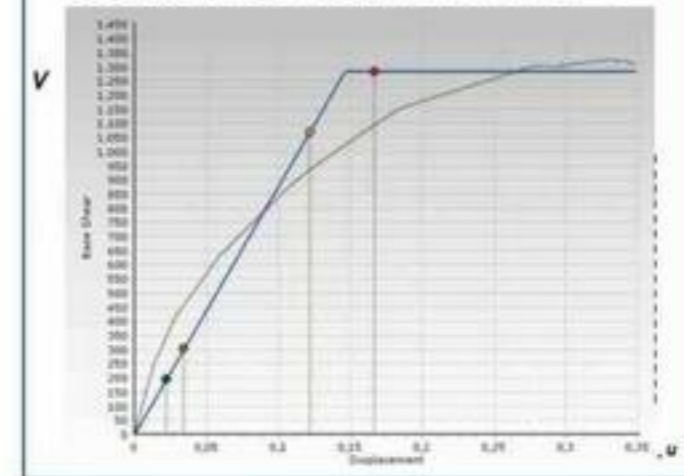
$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad T_B = \frac{T_C}{3} \quad T_D = 4 \frac{a_g}{g} + 1.6$$

- 3) Si itera la procedura fino a quando si trova uno spettro ADSR per cui risulta  $d_C = d_D$

Analisi non lineare  
1. Analisi Statica non lineare (Pushover)



**COSTRUZIONE DELLA CURVA DI CAPACITÀ :**



$$0 \leq T \leq T_B \quad S_e(T) = a_g S F_0 \eta \left( \frac{T}{T_B} + \frac{q}{F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right)$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_e(T) = a_g S F_0 \eta$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad S_e(T) = a_g S F_0 \eta \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

Verifiche:

1. SLU : verifica duttilità meccanismi duttili e resistenza meccanismi fragili
2. SLD: spostamenti di interpiano inferiori a prefissati limiti ( $h/500$ )

**RISPOSTA MASSIMA IN SPOSTAMENTO**

$T^* \geq T_c$  (sistema deformabile). La risposta del sistema anelastico è assunta uguale a quella del sistema elastico di medesimo periodo

$$d_{max} = \Gamma_1 d_{max}^* = \Gamma_1 d_{e,max}^* = \Gamma_1 S_{a,e}(T^*) T^{*2} / (4\pi^2)$$

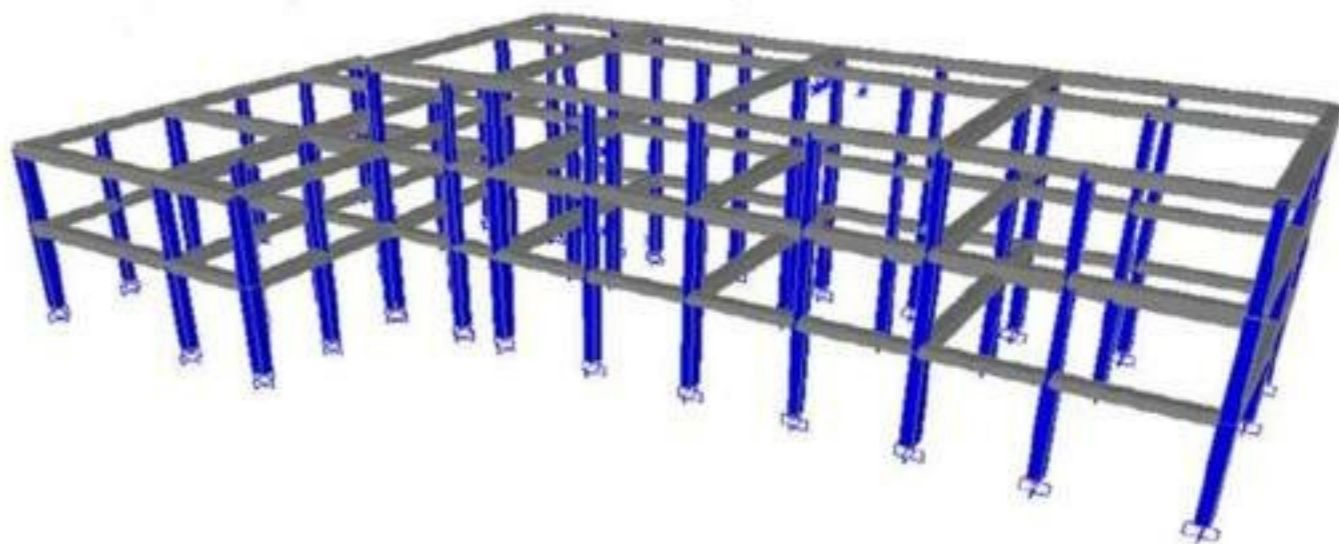
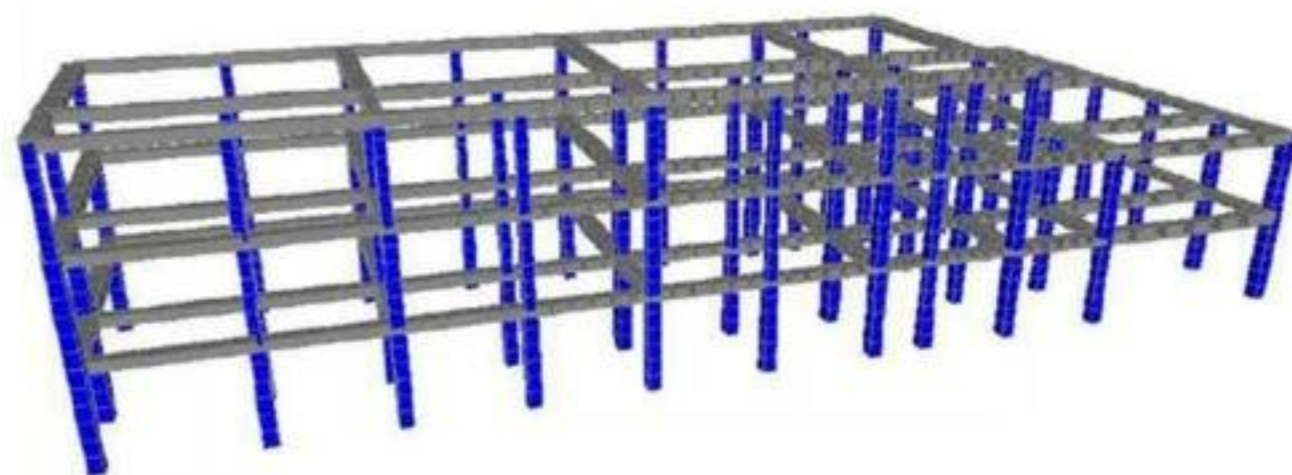
$T^* < T_c$  (sistema rigido). La risposta del sistema anelastico è maggiore di quella del sistema elastico di medesimo periodo

$$d_{max} = \Gamma_1 d_{max}^* = \Gamma_1 \frac{d_{e,max}^*}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T^*} \right] \geq d_{e,max}^*$$

L'edificio in studio è uno dei quattro corpi di fabbrica di cui si compone una scuola sita nel comune di Avezzano in provincia dell'Aquila. L'esempio che riporto riguarda un reale intervento di miglioramento sismico frutto di una convenzione tra il Consorzio Universitario **ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica)** e il DICAM e svolto dai Prof. M. Papia P. Colajanni con la collaborazione del sottoscritto.

### **Superficie 540 mq; N° di piani 3**

La costruzione risale agli anni '50;  
Normativa vigente all'epoca della  
realizzazione: Regio Decreto 16/11/1939;  
Regio Decreto Legge 22/11/1937 "*Norme  
tecniche per l'edilizia, con speciali prescrizioni  
per le località colpite dai terremoti*".



## FASE DELLA CONOSCENZA

Dimensioni pilastri: 50x70 cm e i 50x50 cm al primo livello; 50x60 cm e 40x50 cm al secondo livello; e 40x50 cm e i 40x40 cm al terzo livello.

### Prove sui materiali.

Sono disponibili gli elaborati di calcolo i disegni esecutivi che insieme alla fase di rilievo e alle prove meccaniche sui materiali hanno consentito di raggiungere il Livello di Conoscenza LC2.

FC=1.2 (LC2)

$f_c = 12.47 \text{ N/mm}^2$ ,  $\epsilon_{co} = 0.002$ ;  $\epsilon_{cu} = \epsilon_{c85} = 0.0038$

$f_y = 250 \text{ N/mm}^2$ ,  $\epsilon_{fu} = 0,08$  (pari al 50% della deformazione ultima)

## MODELLO DI CALCOLO

- Analisi Statica Non Lineare (Analisi Pushover), tramite un modello di calcolo spaziale a plasticità concentrata;
- Vantaggi: evidenzia sia le carenze dei singoli elementi strutturali; valuta le capacità dissipative della struttura; localizzazione dei danni subiti dalla struttura.

I risultati così ottenuti forniscono utili indicazioni per la realizzazione di un progetto di intervento mirato che non va ad alterare il meccanismo resistente originario della struttura.

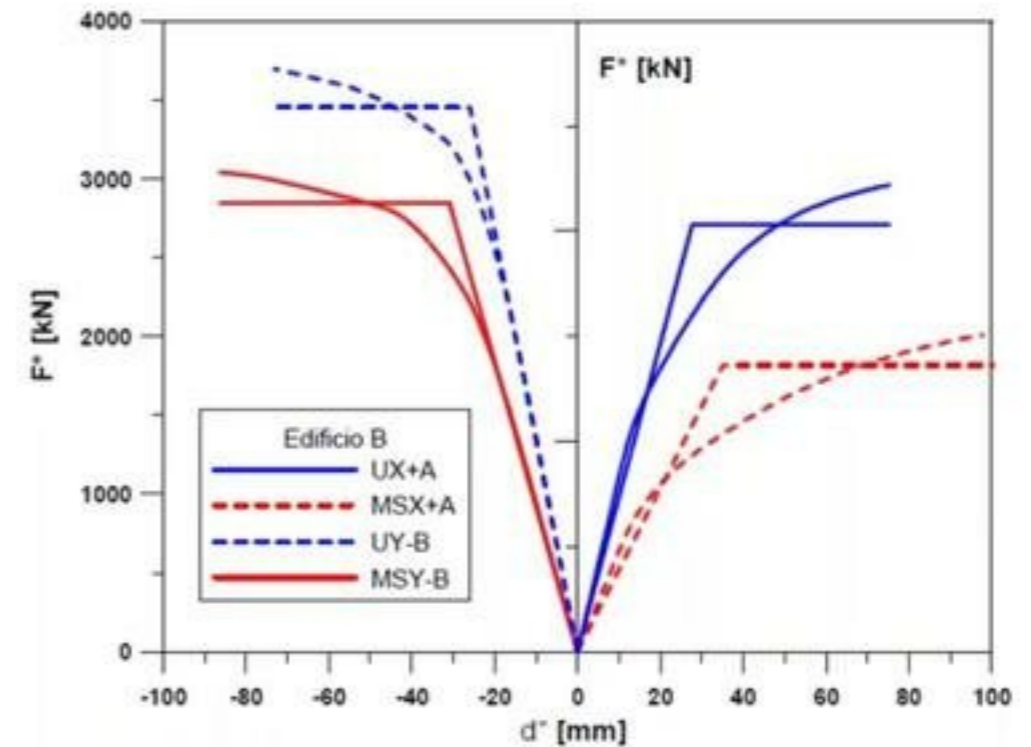
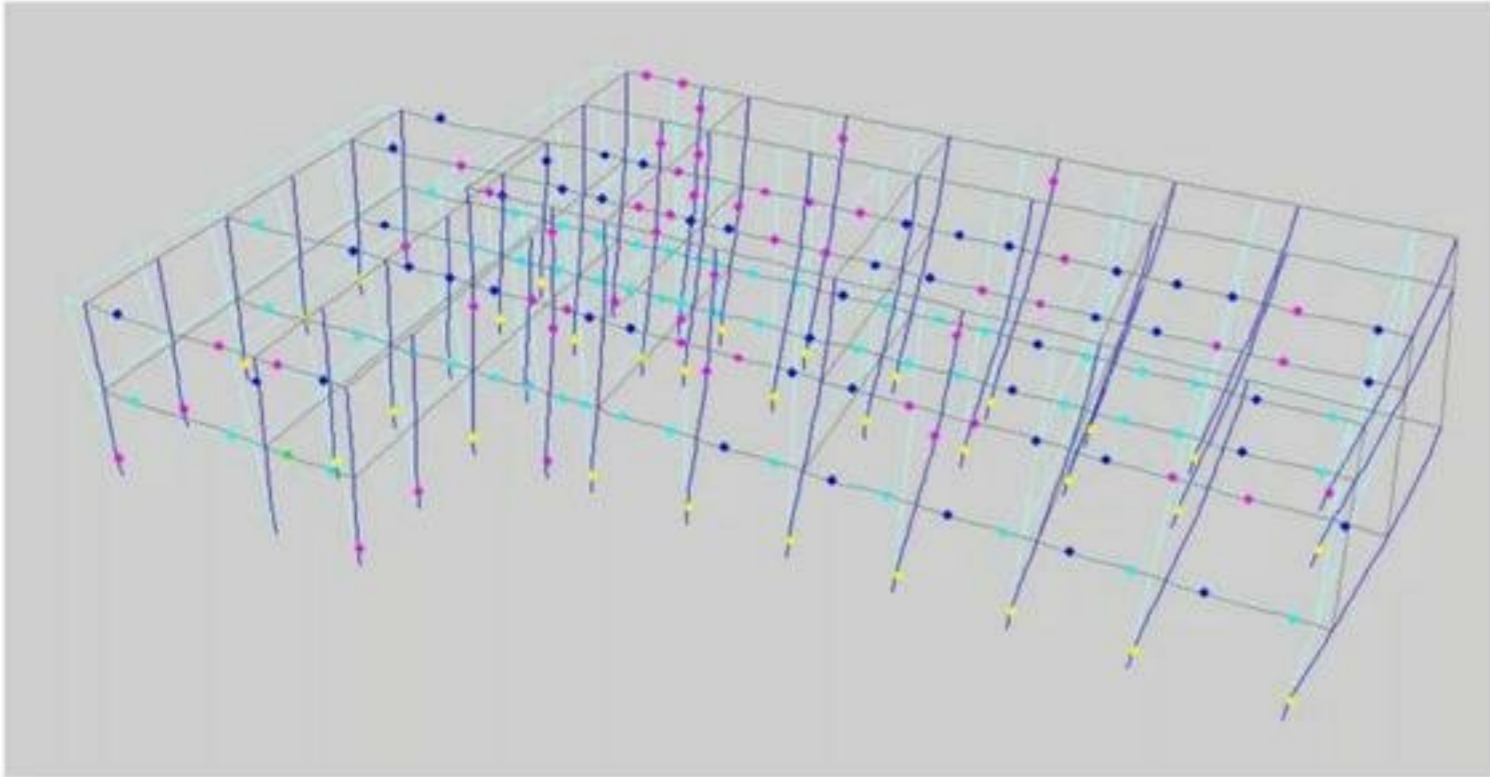
Distribuzione di forze considerate nell'analisi:

distribuzione dei tagli di piano calcolati mediante analisi dinamica lineare con spettro di risposta (MS);

distribuzione "uniforme" (U) con forze proporzionali alle masse sismiche di piano dell'edificio.

Sono state eseguite 16 analisi non lineari per ciascuna distribuzione di forze.

## RISULTATI DELL'ANALISI



L'analisi Pushover ha consentito la determinazione i valori minimi dei moltiplicatori dell'azione sismica di progetto:

$$\left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV, \sigma} = 0.66 \quad \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV, \tau} = 0.14$$

corrispondenti rispettivamente alla prima crisi per carenza di capacità rotazionale in pressoflessione in una delle colonne di primo piano e alla prima crisi per taglio in una trave, anch'essa di primo piano.



Assumendo come moltiplicatore dell'azione sismica di progetto il minimo valore, che corrisponde alla crisi per taglio di una trave  $\alpha_{SLV,\tau} = 0.14$ , si ha che l'indice di rischio per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita risulta pari a:

$$IS - V = \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV} = 0.14$$

## VERIFICHE ALLO STATO LIMITE DI DANNO

Requisito di verifica nei confronti dello SLD: assenza di danni che comportino la fuoriuscita di servizio della struttura.  
Modalità di verifica: in presenza di tamponamenti collegati rigidamente alla struttura, che interferiscono con la deformabilità della struttura stessa, gli spostamenti di interpiano soddisfino la seguente limitazione:

$$d_r \leq 0.005 \cdot h$$

Per le verifiche allo SLD si utilizzano gli spostamenti calcolati con lo spettro di risposta elastico ( $q = 1$ ), la verifica viene condotta attraverso un'analisi dinamica lineare con riferimento a tale spettro.

Gli spostamenti di interpiano vengono calcolati per ogni punto dell'impalcato, impiegando la regola di combinazione quadratica completa, così particolarizzata per il generico piano  $s$ :

$$d_r^s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} d_{r,i}^s d_{r,j}^s} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} (u_{r,i}^s - u_{r,i}^{s-1}) (u_{r,j}^s - u_{r,j}^{s-1})}$$

In base alla linearità fra accelerazione sismica di ancoraggio dello spettro e valori di spostamento massimi di calcolo fra tutti i punti di ogni piano ottenuti come sopra descritto, per ciascuna delle due direzioni principali  $x$  e  $y$  è stato poi valutato il moltiplicatore della azione sismica allo SLD secondo la relazione

$$\left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLD} = \frac{0.005 \cdot h}{d_r}$$

I risultati, ottenuti con i valori dei moduli elastici di travi e pilastri ridotti del 50% e del 40% rispettivamente e trascurando la rigidità dei pannelli di tamponamento, come precedentemente segnalato, sono riportati nella seguente Tabella.

EDIFICIO B				
	h (m)	$d_{r,limite}$ (mm)	$d_r$ (mm)	$\alpha_{SLD}$
<b>Piano primo (z=4 m)</b>				
direzione x	4	20	42.7	0.47
direzione y	4	20	33.4	0.60
<b>Piano secondo (z =7.8 m)</b>				
direzione x	3.8	18.0	37.3	0.48
direzione y	3.8	18.	25.5	0.70
<b>Piano terzo (z=11.6 m)</b>				
direzione x	3.8	18.00	61.1	0.29
direzione y	3.8	18.00	43.2	0.41

L'Edificio presenta una maggiore deformabilità laterale: i valori di  $\alpha_{SLD}$  sono, per i primi due piani, pari circa a 0.47 per la direzione x parallela al lato più corto della zona a tre piani, e pari a 0.6 e 0.7 per il primo e secondo piano nella direzione ortogonale y; valori più piccoli di  $\alpha_{SLD}$  sono ottenuti per il terzo piano.

## DETERMINAZIONE DELLA CLASSE DI RISCHIO

Svolta l'analisi strutturale, con riferimento allo Stato Limite di Danno e allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita si passa alla determinazione della **Classe di Rischio**.

Dall'analisi strutturale sono stati trovati i valori dell'Indice di Sicurezza per i due Stati Limite considerati:

$$\left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLD} = 0.29 \qquad \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV} = 0.14$$

Note le accelerazioni al suolo,  $PGA, C$ , che producono il raggiungimento degli stati limite sopra detti, si determinano i corrispondenti periodi di ritorno,  $TrC$ , associati ai terremoti che generano tali accelerazioni. In assenza di più specifiche valutazioni, il passaggio dalle  $PGA, C$  ai valori del periodo di ritorno possono essere eseguiti utilizzando la seguente relazione:

$$T_{rC} = T_{rD} \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)^\eta \quad \text{con } \eta = 1/0.41$$

$T_{rD}$  = il periodo di ritorno dell'azione sismica di progetto

<sup>1</sup> La relazione fornita è media sull'intero territorio nazionale; per riferirsi più puntualmente all'intensità sismica di appartenenza si possono utilizzare le formule appresso riportate, con riferimento all'accelerazione massima su roccia  $a_g$ . I valori sono:  $\eta = 1/0,49$  per  $a_g \geq 0,25g$ ;  $\eta = 1/0,43$  per  $0,25g \geq a_g \geq 0,15g$ ;  $\eta = 1/0,356$  per  $0,15g \geq a_g \geq 0,05g$ ;  $\eta = 1/0,34$  per  $0,05g \geq a_g$

Si ottiene:

$$T_{rC,SLD} = T_{rD,SLD} \left( \left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLD} \right)^\eta = 75 \cdot (0.29)^{1/0.41} = 4 \text{ anni}$$

$$T_{rC,SLV} = T_{rD,SLV} \left( \left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLV} \right)^\eta = 712 \cdot (0.14)^{1/0.41} = 6 \text{ anni}$$

Da cui si determina la frequenza media annua di superamento:

$$\lambda_{SLD} = \frac{1}{T_{rC,SLD}} = \frac{1}{4} = 0.25$$

$$\lambda_{SLV} = \frac{1}{T_{rC,SLV}} = \frac{1}{6} = 0.167$$

Se si valuta il PAM ricorrendo alla determinazione dei due soli Stati Limite di Danno e salvaguardia della Vita le frequenze medie annue di superamento con riferimento ai due Stati Limite di Operatività e Collasso possono essere valutati attraverso le seguenti espressioni:

$$\lambda_{SLO} = 1.67 \cdot \lambda_{SLD} = 1.67 \cdot 0.273 = 0.456$$

$$\lambda_{SLC} = 0.49 \cdot \lambda_{SLV} = 0.49 \cdot 0.170 = 0.083$$

## DEFINIZIONE DEGLI STATI LIMITI DI INIZIO DANNO E DI RICOSTRUZIONE

Si definisce Stato Limite di Inizio Danno (SLID), quello a cui è comunque associabile una perdita economica nulla in corrispondenza di un evento sismico e il cui periodo di ritorno è assunto, convenzionalmente, pari a 10 anni, ossia  $\lambda = 0,1$ .

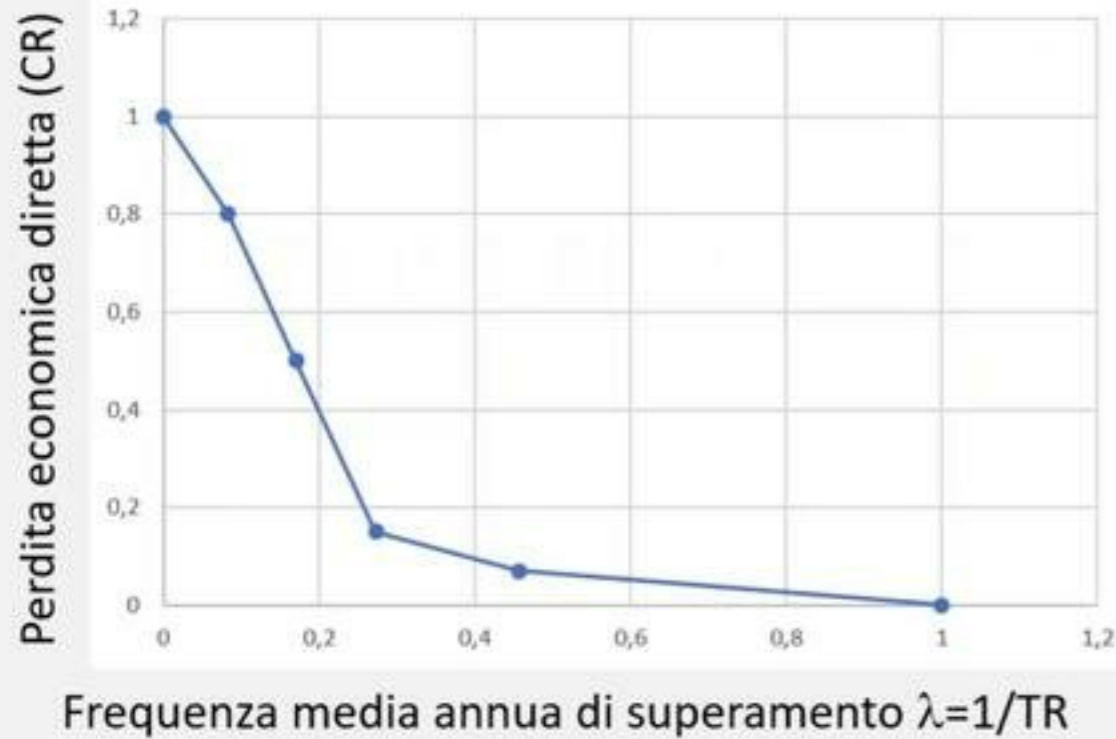
Si definisce Stato Limite di Ricostruzione (SLR) quello a cui, stante la criticità generale che presenta la costruzione al punto da rendere pressoché impossibile l'esecuzione di un intervento diverso dalla demolizione e ricostruzione, è comunque associabile una perdita economica pari al 100%. Convenzionalmente si assume che tale stato limite si manifesti in corrispondenza di un evento sismico il cui periodo di ritorno è pari a quello dello Stato Limite dei Collasso (SLC).  $\lambda = 0$

Per ciascuno degli stati limite considerati si associa al corrispondente valore di  $\lambda$  il valore economico del costo di riparazione espresso in percentuale del costo di ricostruzione secondo la seguente tabella e si traccia il grafico che riporta la perdita economica diretta in funzione della frequenza media annua di superamento:

Stato Limite	CR(%)
SLR	100%
SLC	80%
SLV	50%
SLD	15%
SLO	7%
SLID	0%



## PERDITA ECONOMICA DIRETTA IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA MEDIA ANNUA DI SUPERAMENTO



Perdita Media Annuale attesa (PAM)	Classe PAM
$PAM \leq 0,50\%$	$A^+_{PAM}$
$0,50\% < PAM \leq 1,0\%$	$A_{PAM}$
$1,0\% < PAM \leq 1,5\%$	$B_{PAM}$
$1,5\% < PAM \leq 2,5\%$	$C_{PAM}$
$2,5\% < PAM \leq 3,5\%$	$D_{PAM}$
$3,5\% < PAM \leq 4,5\%$	$E_{PAM}$
$4,5\% < PAM \leq 7,5\%$	$F_{PAM}$
$7,5\% \leq PAM$	$G_{PAM}$

Computando l'area sottesa dalla curva si ottiene la Perdita Annuale Media (PAM) attesa e la relativa classe PAM dalla Tabella sopra riportata.

$$PAM = 0.204 = 20.4\% \quad \Rightarrow \quad \text{Classe PAM } G_{PAM}$$

Indice di Sicurezza	Classe IS-V
$100\% < IS-V$	$A^+_{IS-V}$
$100\% \leq IS-V < 80\%$	$A_{IS-V}$
$80\% \leq IS-V < 60\%$	$B_{IS-V}$
$60\% \leq IS-V < 45\%$	$C_{IS-V}$
$45\% \leq IS-V < 30\%$	$D_{IS-V}$
$30\% \leq IS-V < 15\%$	$E_{IS-V}$
$IS-V \leq 15\%$	$F_{IS-V}$

Dall'indice di Sicurezza relativamente allo SLV si determina la Classe IS-V dalla tabella soprastante

$$IS - V = \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV} = 0.14 = 14\% \Rightarrow F_{IS-V}$$

Si individua la Classe di Rischio della costruzione come la peggiore tra la Classe PAM e la Classe IS-V.

Nel caso particolare le due classi di rischio sono in entrambi i casi le ultime.



## COMMENTO DEI RISULTATI DELL'ANALISI NON LINEARE

Le analisi non lineari hanno messo in evidenza:

- un buon dimensionamento degli elementi strutturali (basso valore di  $n$  nelle colonne, e l'assenza di meccanismi di collasso di piano o locali).
- una insufficiente capacità resistente a taglio delle travi, causata da una troppo rada disposizione delle armature trasversali che, (staffe  $\varnothing 8$  a due bracci, a passo 25 cm. sia nelle travi che nei pilastri).
- Conseguente assenza di confinamento del calcestruzzo nelle zone sedi di possibile formazione delle cerniere plastiche, rendendo modesta la capacità deformativa delle colonne.

L'assenza di staffe nella zona del pannello dei nodi trave-colonna rende i nodi non confinati incapaci di trasmettere le azioni provenienti dalle travi adiacenti anche in presenza di azione sismica di modestissima entità.

### Possibili interventi:

- l'incamiciatura dei pilastri coinvolti nel meccanismo di dissipazione globale richiesto;
- il rinforzo a taglio delle travi;
- il rinforzo dei nodi non confinati.

## CONFINAMENTO DEI PILASTRI

Gli effetti dell'incamiciatura metallica sono stati valutati utilizzando le espressioni fornite dalla Circ. 02.02.2009 n° 617 del C.S.LL.PP. Indicando con  $f_{cc}$  la resistenza del calcestruzzo confinato e con  $\varepsilon_{ccu}$  la massima deformazione conseguibile, si ha

$$f_{cc} = f_c \left[ 1 + 3.7 \left( \frac{0.5 \alpha_n \alpha_s \rho_s f_y}{f_c} \right)^{0.86} \right] = k f_c \quad \varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} + 0.5 \frac{0.5 \alpha_n \alpha_s \rho_s f_y}{f_{cc}}$$

I coefficienti  $\alpha_n$  e  $\alpha_s$  che figurano nelle precedenti equazioni rappresentano i fattori di riduzione del volume teoricamente confinato, valutati secondo le espressioni fornite da Mander *et al.*, 1988; pertanto, in accordo con quanto proposto dallo stesso autore, la deformazione corrispondente alla resistenza  $f_{cc}$  e il rapporto volumetrico di staffatura valgono rispettivamente

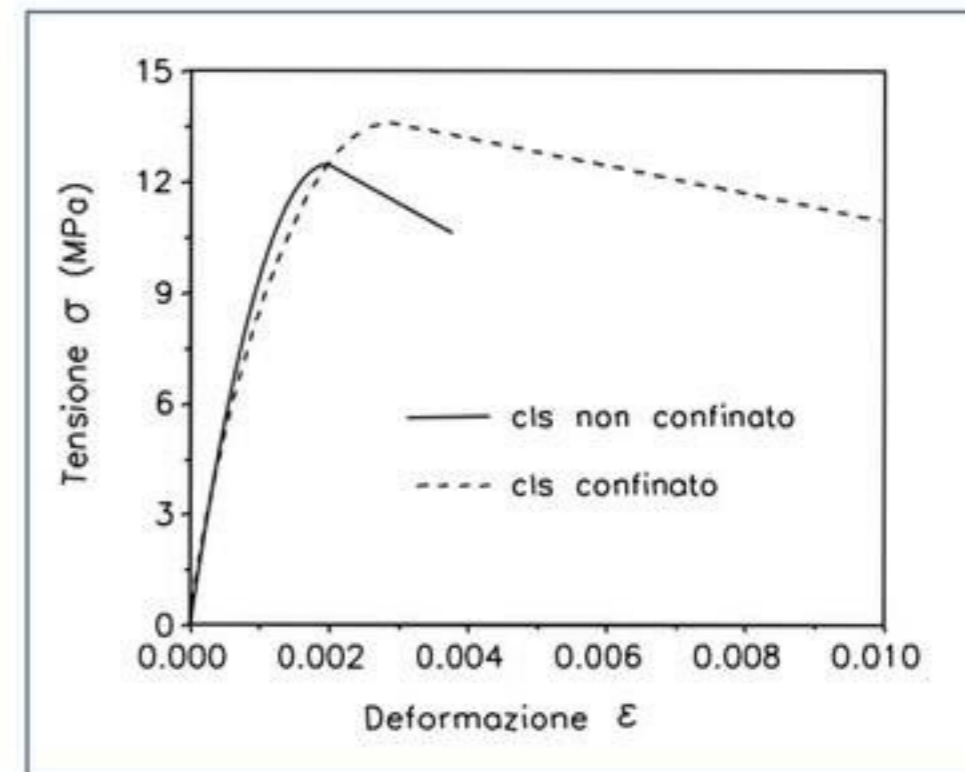
$$\varepsilon_{cco} = \varepsilon_{co} [1 + 5(k - 1)] \quad \rho_s = 2 A_s (b + h) / (s b h)$$

Realizzando l'incamiciatura con profili a L 60x60x6 mm posti agli spigoli e collegati da calastrelli di sezione 60x6 mm ( $A_s = 360 \text{ mm}^2$ ) a passo  $s = 300 \text{ mm}$ , realizzati con acciaio S235  $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ .

Le equazioni forniscono  $f_{cc} = 13.59 \text{ N/mm}^2$ ,  $\varepsilon_{ccu} = 0.00996$ ,  $\varepsilon_{cco} = 0.0029$ .

Utilizzando la modellazione proposta da Saatcioglu et al., 1992, 1995, il legame  $\sigma$ - $\varepsilon$  del calcestruzzo confinato viene quindi definito nel ramo crescente da una legge parabolica elevata ad un esponente  $\beta$ , e nel ramo di softening da una retta di pendenza definita dal valore di deformazione che induce una riduzione di resistenza del 15%. In base ai valori dedotti per la pressione di confinamento, si ottiene rispettivamente

Si prevede di estendere l'intervento a tutti i pilastri al piano terra per un tratto di lunghezza pari a un metro, nelle regioni di testa e piede. Analogo intervento viene effettuato per i pilastri perimetrali degli altri piani, costituendo l'incamiciatura anche un valido rinforzo a taglio, sufficiente a fronteggiare le azioni trasmesse dai tamponamenti.

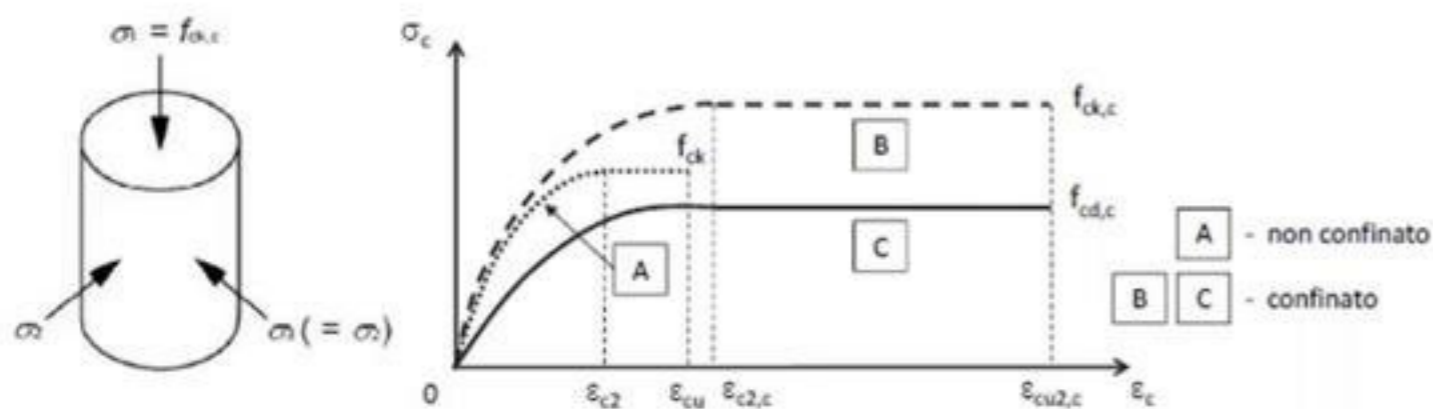


## CALCESTRUZZO CONFINATO

Per il diagramma tensione-deformazione del calcestruzzo confinato è possibile adottare opportuni modelli rappresentativi del reale comportamento del materiale in stato triassiale. Questi modelli possono essere adottati nel calcolo sia della resistenza ultima sia della duttilità delle sezioni e devono essere applicati alle sole zone confinate della sezione.

Il confinamento del calcestruzzo è normalmente generato da staffe chiuse e legature interne, che possono raggiungere la tensione di snervamento a causa della dilatazione laterale del calcestruzzo stesso a cui tendono ad opporsi. Il confinamento consente al calcestruzzo di raggiungere tensioni e deformazioni più elevate di quelle proprie del calcestruzzo non confinato. Le altre caratteristiche meccaniche si possono considerare inalterate.

In assenza di più precise determinazioni basate su modelli analitici di comprovata validità, è possibile utilizzare la relazione tensione-deformazione, in cui la resistenza caratteristica e le deformazioni del calcestruzzo confinato sono valutate secondo le relazioni seguenti:



$$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot (1,0 + 5,0 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{per } \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck}$$

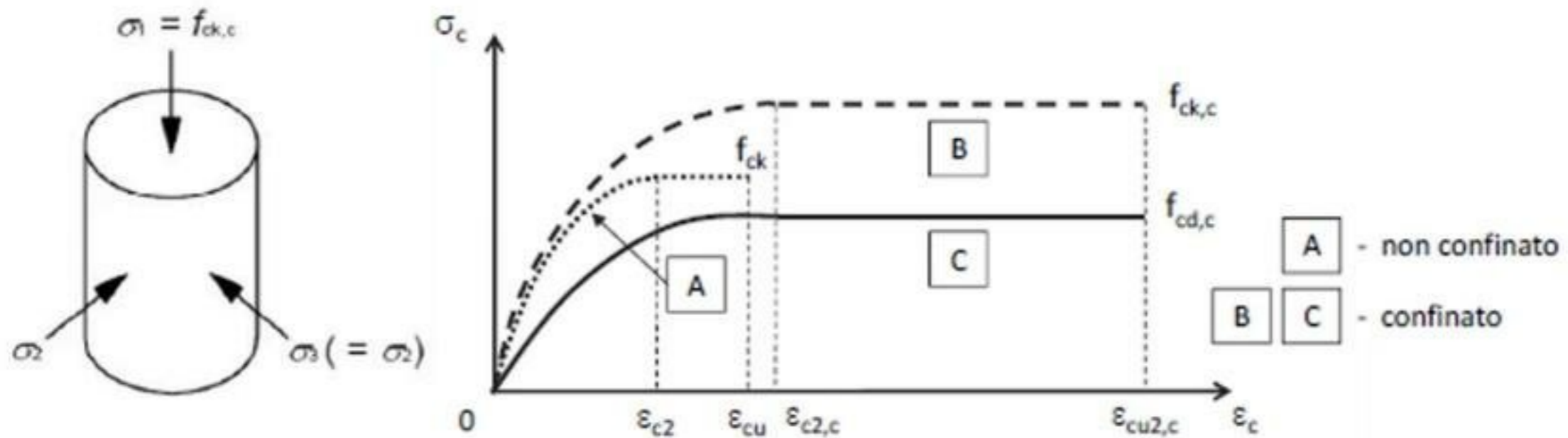
$$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot (1,125 + 2,5 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{per } \sigma_2 > 0,05 f_{ck}$$

$$\epsilon_{c2,c} = \epsilon_{c2} \cdot (f_{ck,c} / f_{ck})^2$$

$$\epsilon_{cu2,c} = \epsilon_{cu} + 0,2 \cdot \sigma_2 / f_{ck}$$

$$f_{cd,c} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck,c} / \gamma_c$$

## CALCESTRUZZO CONFINATO



$$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot (1,0 + 5,0 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{per } \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck}$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot (1,125 + 2,5 \cdot \sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{per } \sigma_2 > 0,05 f_{ck}$$

$$\epsilon_{c2,c} = \epsilon_{c2} \cdot (f_{ck,c} / f_{ck})^2$$

$$\epsilon_{cu2,c} = \epsilon_{cu} + 0,2 \cdot \sigma_2 / f_{ck}$$

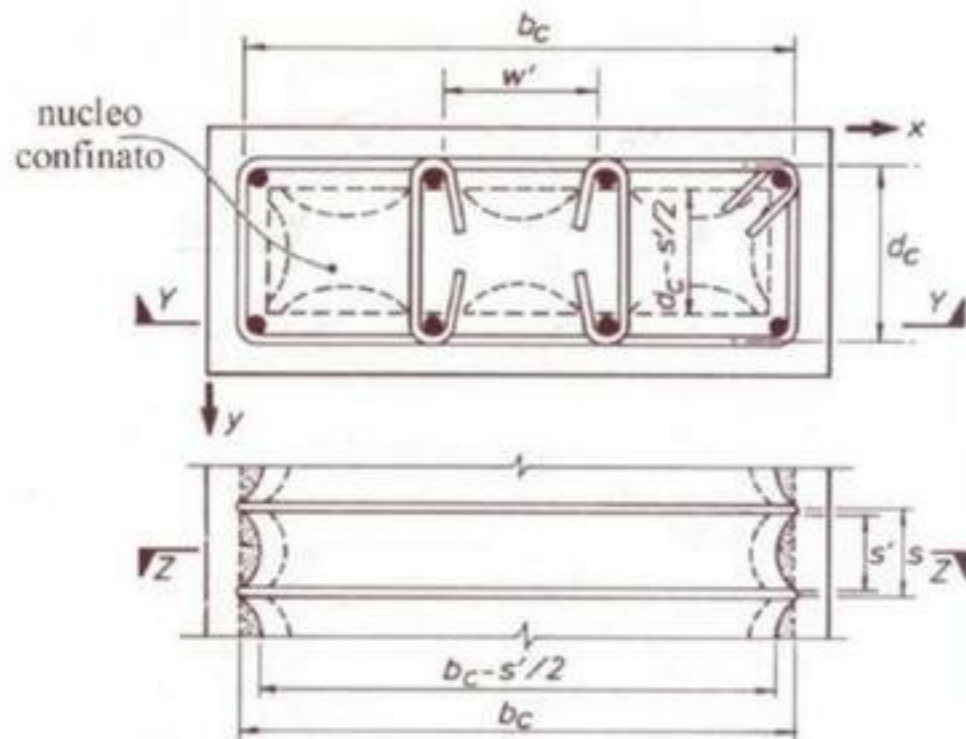
$$f_{cd,c} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck,c} / \gamma_c$$

La pressione efficace di confinamento  $\sigma_2$  può essere determinata attraverso la relazione seguente:

$$\sigma_2 = \alpha \cdot \sigma_1$$

dove  $\alpha$  è un coefficiente di efficienza ( $\leq 1$ ), definito come rapporto fra l'area  $A_e$  di calcestruzzo efficacemente confinato ed l'area  $A_c$  dell'elemento di calcestruzzo, depurato da quello delle armature longitudinali (generalmente trascurabile) e  $\sigma_1$  è la pressione di confinamento esercitata dalle armature trasversali.

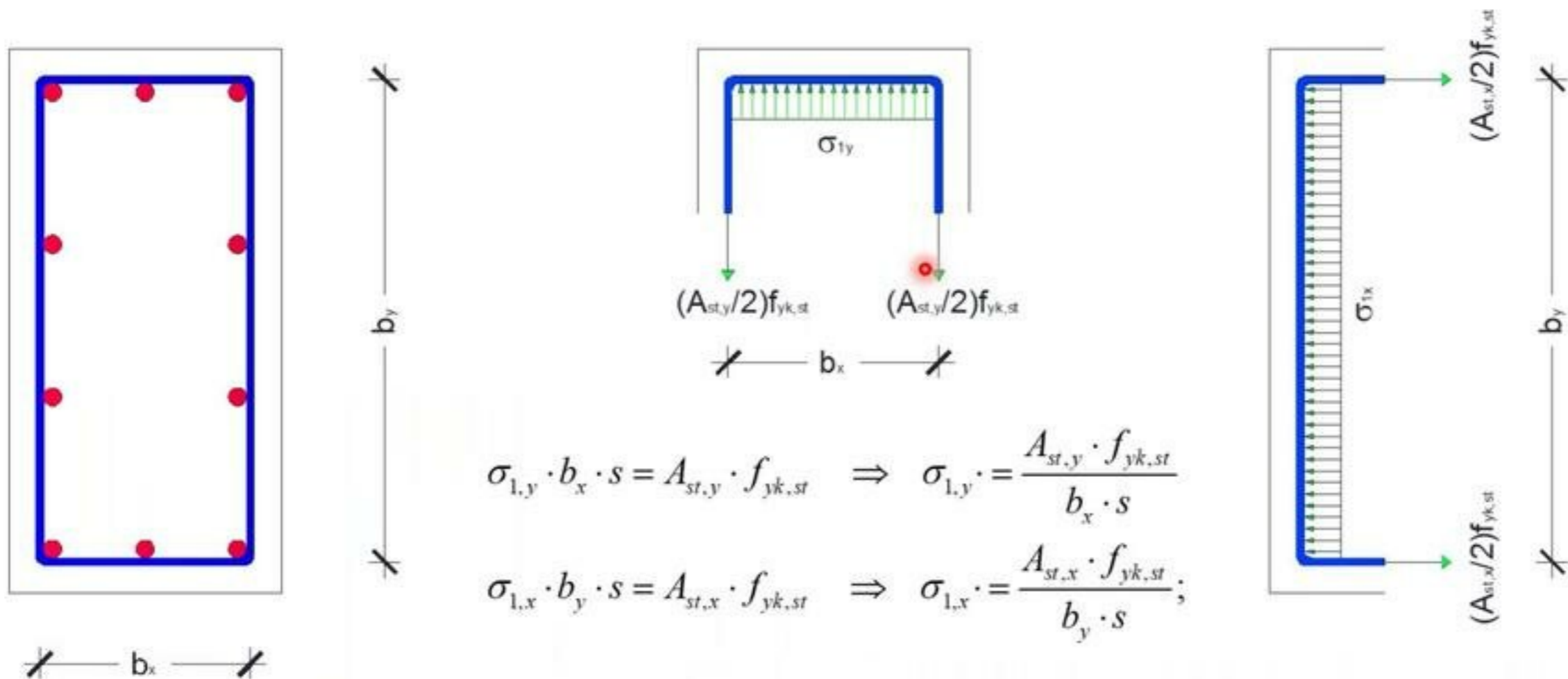
#### Modello di Mander, Priestley e Park (1988)



Il l'area  $A_e$  di calcestruzzo efficacemente confinato può essere valutato come prodotto di un termine relativo alla disposizione delle armature trasversali nel piano della sezione e di un termine relativo al passo delle staffe, attraverso la relazione:

- $A_c = b_c d_c$  area del nucleo della sezione (area racchiusa dalla linea media delle staffe perimetrali);
- $\rho_{cc} = \frac{A_{rl}}{A_c}$  rapporto tra l'area dell'armatura longitudinale e l'area del nucleo della sezione;
- $A_e = \left( b_c d_c - \sum \frac{(w'_i)^2}{6} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right)$  area di calcestruzzo effettivamente confinato;
- $A_{cc} = A_c (1 - \rho_{cc})$  area depurata dall'armatura longitudinale;

Da cui il coefficiente di efficienza  $\alpha$ : 
$$\alpha = \frac{A_e}{A_{cc}}$$



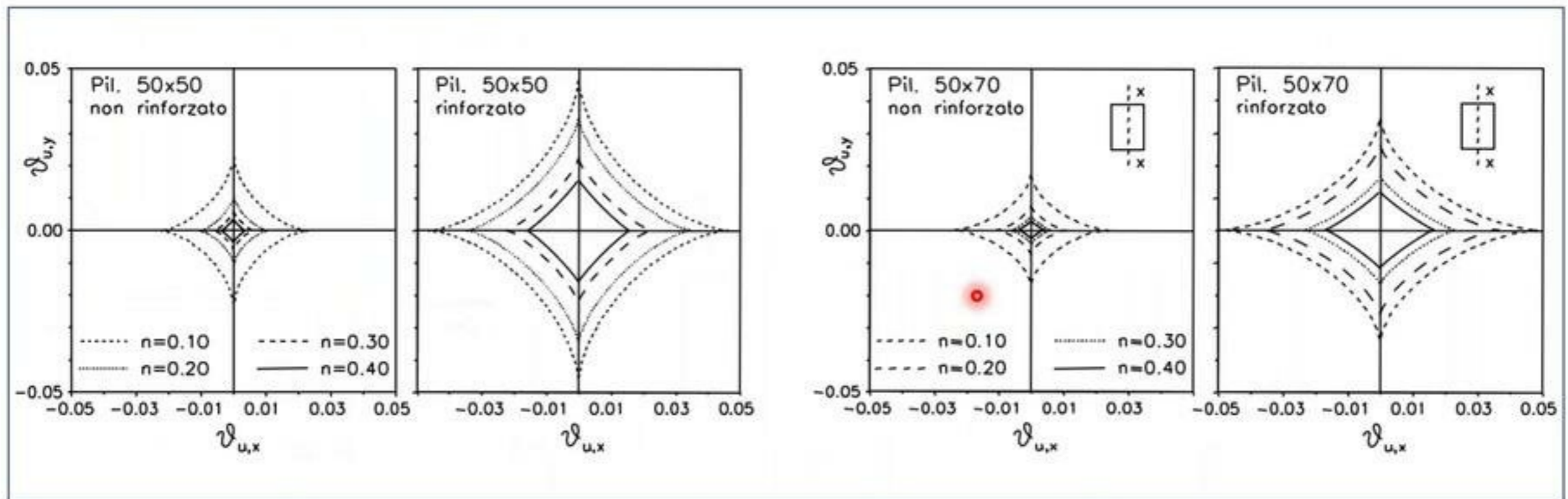
dove  $A_{st,x}$  e  $A_{st,y}$  sono il quantitativo totale (aree delle sezioni) di armatura trasversale in direzione parallela, rispettivamente, alle direzioni principali  $x$  e  $y$ ,  $b_x$  e  $b_y$  sono le dimensioni del nucleo confinato nelle direzioni corrispondenti (con riferimento alla linea media delle staffe),  $s$  è il passo delle staffe,  $f_{yk,st}$  è la tensione caratteristica dell'acciaio delle staffe.

La pressione laterale equivalente  $\sigma_1$  può essere determinata attraverso la relazione:

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{1,x} \cdot \sigma_{1,y}}$$

Gli effetti del confinamento conseguibili con questa tecnica sono mostrati in Figura, dove si confrontano i domini di deformazione plastica, in termini di rotazioni, ottenuti utilizzando i due legami costitutivi del calcestruzzo, confinato e non confinato, al variare del livello di compressione media  $n$ .

$$\left( \frac{\mathcal{G}_{u,x}}{\mathcal{G}_{uo,x}} \right)^\alpha + \left( \frac{\mathcal{G}_{u,y}}{\mathcal{G}_{uo,y}} \right)^\alpha = 1 \quad \alpha = 0.7 + 0.75(n - 0.1) \quad 0.1 \leq n \leq 0.5$$



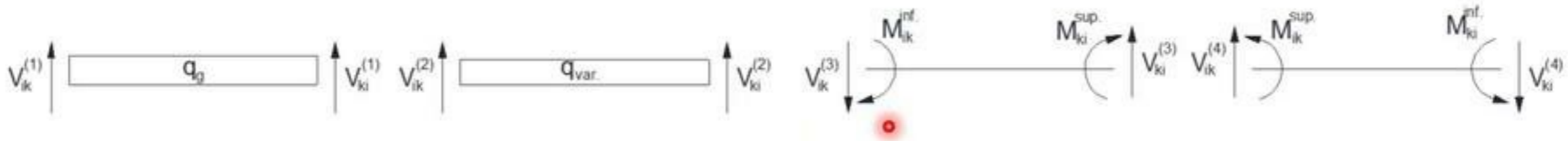


## RINFORZO A TAGLIO DEI PILASTRI

Per i pilastri non si prevede alcun intervento specifico, tenuto conto anche del fatto che l'incamiciatura metallica contribuisce considerevolmente alla resistenza al taglio nelle zone maggiormente fessurate.

## RINFORZO A TAGLIO DI TRAVI

- Il progetto di miglioramento mira ad ottenere la sovreresistenza a taglio delle travi;
- Il taglio di calcolo ( $V_d$ ) può essere dedotto dalle condizioni di trave appoggiata soggetta al carico gravitazionale compresente al sisma e ai momenti ultimi delle sezioni di estremità (equiversi);
- La non verifica a taglio estesa a tutte le travi ( $V_{Re} < V_d$ );
- Il tratto da rinforzare, identico alle due estremità, è calcolato trascurando il contributo delle staffe già presenti, a compensare la mancata assunzione di un coefficiente  $\gamma_{Rd}$  di sovreresistenza.



La modesta armatura trasversale presente, che, distribuita nel passo  $s$ , realizza un'area  $A_{sw} = 4 \text{ cm}^2/\text{m}$ , comporta che il meccanismo resistente, qualunque sia l'approccio seguito, conduce al limite della resistenza a taglio per difetto di capacità di assorbire sforzi di trazione. Tenendo conto di questa considerazione, il taglio massimo assorbibile  $V_R$ , è stato calcolato secondo tre differenti modelli.

Il primo è conseguente alla indicazione presente nella Circolare contenente le Istruzioni per l'applicazione delle NTC secondo la quale *"la resistenza a taglio si valuta come per il caso di nuove costruzioni per situazioni non sismiche, considerando comunque un contributo del conglomerato al massimo pari a quello relativo agli elementi senza armature trasversali resistenti a taglio"*. Con ovvio significato dei simboli, si ottiene pertanto

$$V_{R1} = V_{Rsd} + \left[ 0.18 k \frac{(100 \rho_t f_{ck})^{1/3}}{\gamma_c} + 0.15 \sigma_{cp} \right] b d \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$$

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot f_{yd} \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot \cot g \vartheta \quad 2.5 \geq \cot g \vartheta \geq 1$$

Tenuto conto della ciclicità delle azioni ed evitando rapporti eccessivamente elevati tra il secondo contributo ( $V_{Rc}$ ) e il primo,  $V_{Rc}$  è stato assunto pari al 75% del suo massimo valore, mentre nel calcolo di  $V_{Rsd}$  si è assunto  $\cot g \vartheta = 1$ .

Il secondo modello di calcolo prevede il contributo esclusivo a trazione dell'armatura trasversale, secondo quanto previsto dalle NTC 2008 per gli edifici di nuova costruzione.

In questa ipotesi  $V_{R2} = V_{Rsd}$  è stato calcolato assumendo il valore più favorevole per  $\cot g \vartheta = 2,5$

Il terzo modello adotta l'espressione di taglio resistente fornita dall'EC8:

$$V_{R3} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left\{ \frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0.55 A_c f_{cd}) + \left( 1 - 0.05 \min\left(5; \mu_{\Delta}^{pl}\right) \right) \left[ (0.16 \max(0.5; 100 \rho_t)) \left( 1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right) \right) A_c \sqrt{f_{cd}} + V_w \right] \right\}$$

$L_v$  = luce di taglio,

$N$  = sforzo normale sull'elemento (nullo per le travi),

$x$  = altezza di sezione compressa a rottura,

$A_c$  = area della sezione del nucleo confinato di calcestruzzo,

$\mu_{\Delta}^{pl}$  = aliquota plastica della duttilità richiesta in rotazione,

$\gamma_{el}$  = coefficiente (1 oppure 1.15),

$V_w$  = trazione assorbita dalle staffe, calcolabile come per il primo modello  $\cotg \theta = 2,5$

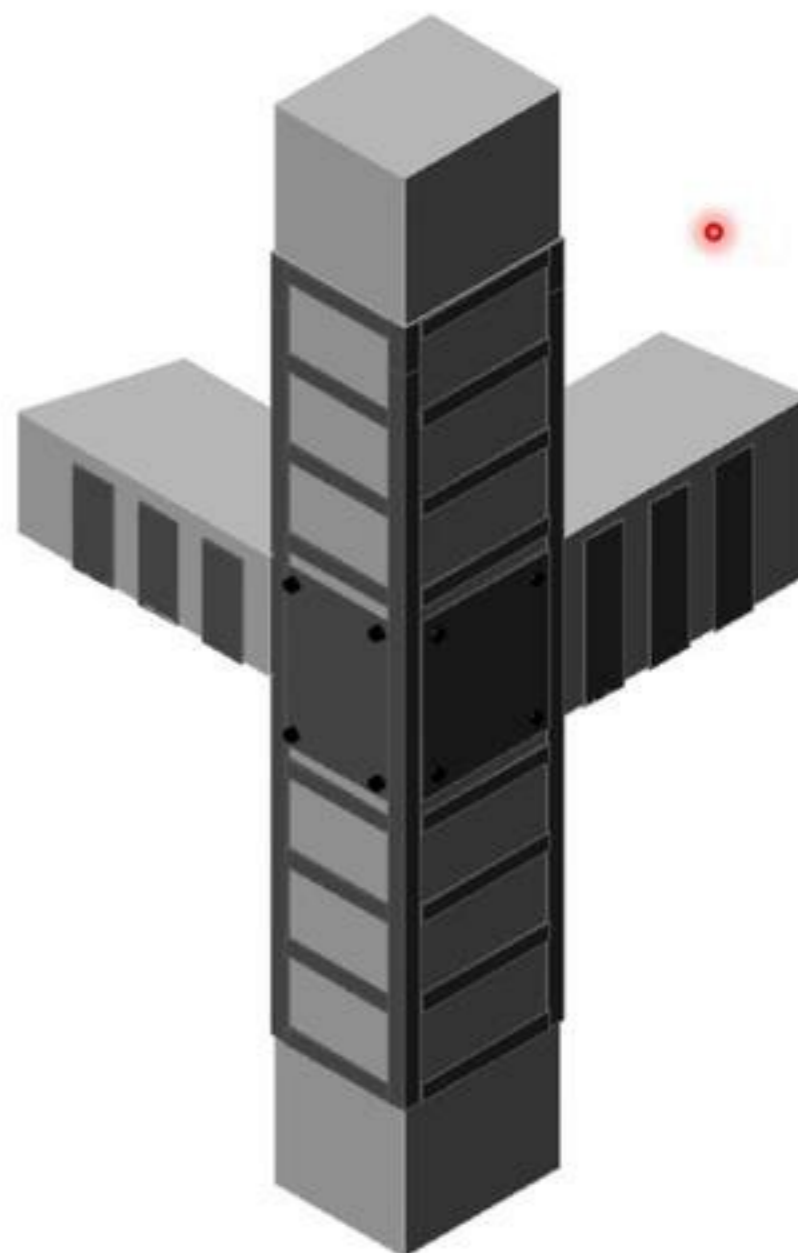
Si è avuto modo di osservare che il primo modello fornisce generalmente valori meno cautelativi, mentre il secondo e il terzo forniscono valori di taglio resistente molto prossimi. In tutti i casi in cui la differenza tra uno dei tre valori di taglio resistente e taglio richiesto è risultata negativa, si è previsto il rinforzo a taglio della trave per un tratto determinato dal valore di taglio resistente più sfavorevole.

## TIPOLOGIA DEL RINFORZO

L'intervento prevede il rinforzo mediante placcaggio delle regioni interessate ( $V_R - V_d < 0$ ) con piatti metallici in acciaio inox, inizialmente tassellati meccanicamente sulla trave a realizzare una U e quindi resi solidali alla trave stessa mediante iniezione di resina.

Lo spessore dei piatti è assunto pari a  $t_p = 5$  mm mentre la larghezza è pari a  $b_p = 150$  mm. Per evitare un indesiderato rinforzo a flessione, i piatti saranno intervallati, lasciando tra due rinforzi consecutivi una lunghezza di trave pari a 100 mm, cosicché il passo delle placche, ovvero la distanza tra l'asse verticale di due placche consecutive risulti pari a 25 cm (4 rinforzi per metro lineare).

Considerando che l'efficacia di questo tipo di rinforzo può considerarsi solo se la tensione di lavoro nell'acciaio utilizzato è pari al 50% di quella massima di calcolo, per acciaio con  $f_y = 235$  N/mm<sup>2</sup> il taglio resistente offerto da questo tipo di rinforzo, espresso in kN, vale  $V_{R,s} = 0.55 d$ , con  $d$  in mm. Tale valore risulta adeguato a sopperire alle carenze di resistenza di tutte le travi che necessitano di rinforzo.



## DETERMINAZIONE DELLA CLASSE DI RISCHIO DOPO L'INTERVENTO

Le tecniche di rinforzo adottate hanno consentito di raggiungere una capacità di resistenza della struttura ad un terremoto di intensità pari all'80% del terremoto di progetto.

$$\left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLD} = 0.29 \qquad \left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLV} = 0.8$$

Note le accelerazioni al suolo, PGA,C, che producono il raggiungimento degli stati limite sopra detti, si determinano i corrispondenti periodi di ritorno, TrC, associati ai terremoti che generano tali accelerazioni. In assenza di più specifiche valutazioni, il passaggio dalle PGAC ai valori del periodo di ritorno possono essere eseguiti utilizzando la seguente relazione:

$$T_{rC} = T_{rD} \left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)^\eta \quad \text{con } \eta = 1/0.41$$

*T<sub>rD</sub> = il periodo di ritorno dell'azione sismica di progetto*

Si ottiene:

$$T_{rC,SLD} = T_{rD,SLD} \left( \left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLD} \right)^\eta = 75 \cdot (0.29)^{1/0.41} = 4 \text{ anni}$$

$$T_{rC,SLV} = T_{rD,SLV} \left( \left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLV} \right)^\eta = 712 \cdot (0.80)^{1/0.41} = 413 \text{ anni}$$

Da cui si determina la frequenza media annua di superamento:

$$\lambda_{SLD} = \frac{1}{T_{rC,SLD}} = \frac{1}{4} = 0.25$$

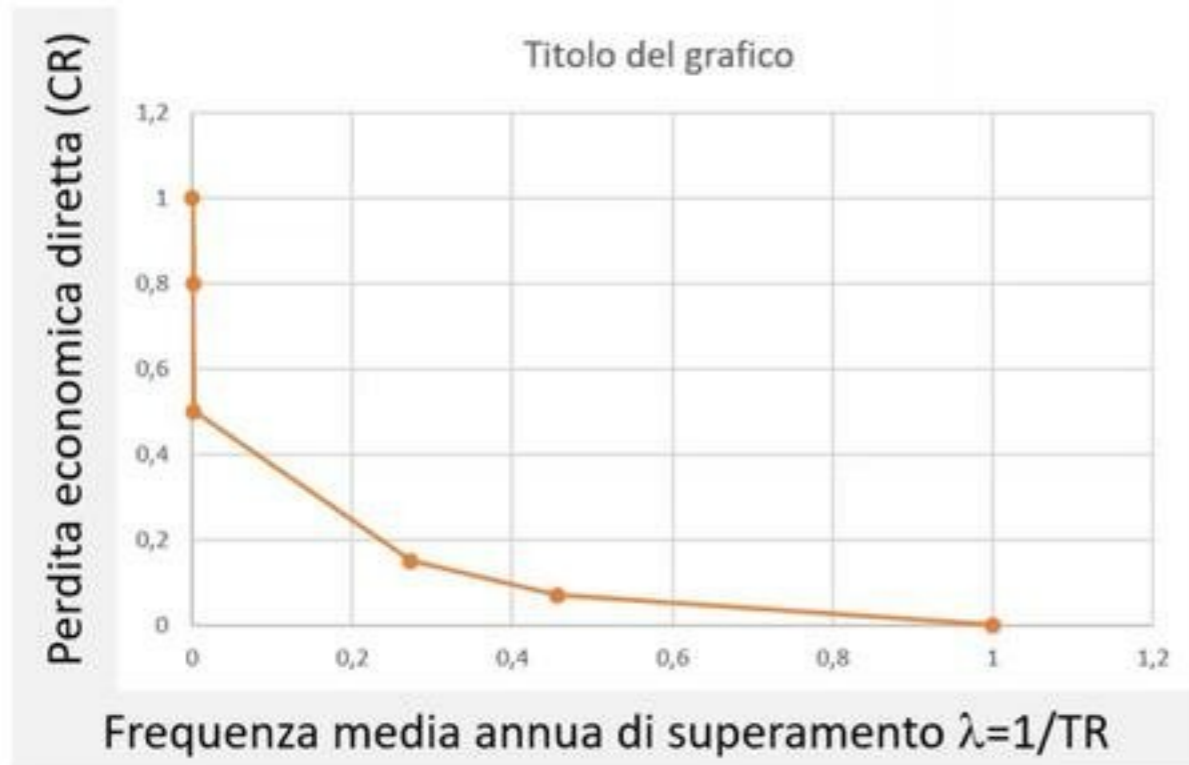
$$\lambda_{SLV} = \frac{1}{T_{rC,SLV}} = \frac{1}{413} = 0.00242$$

Se si valuta il PAM ricorrendo alla determinazione dei due soli Stati Limite di Danno e salvaguardia della Vita le frequenze medie annue di superamento con riferimento ai due Stati Limite di Operatività e Collasso possono essere valutati attraverso le seguenti espressioni:

$$\lambda_{SLO} = 1.67 \cdot \lambda_{SLD} = 1.67 \cdot 0.273 = 0.456$$

$$\lambda_{SLC} = 0.49 \cdot \lambda_{SLV} = 0.49 \cdot 0.00242 = 0.0011$$

## PERDITA ECONOMICA DIRETTA IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA MEDIA ANNUA DI SUPERAMENTO



Perdita Media Annua attesa (PAM)	Classe PAM
$PAM \leq 0,50\%$	$A^+_{PAM}$
$0,50\% < PAM \leq 1,0\%$	$A_{PAM}$
$1,0\% < PAM \leq 1,5\%$	$B_{PAM}$
$1,5\% < PAM \leq 2,5\%$	$C_{PAM}$
$2,5\% < PAM \leq 3,5\%$	$D_{PAM}$
$3,5\% < PAM \leq 4,5\%$	$E_{PAM}$
$4,5\% < PAM \leq 7,5\%$	$F_{PAM}$
$7,5\% \leq PAM$	$G_{PAM}$

Computando l'area sottesa dalla curva si ottiene la Perdita Annuale Media (PAM) attesa e la relativa classe PAM dalla Tabella sopra riportata.

$$PAM = 0.13 = 13\% \Rightarrow \text{Classe PAM } G_{PAM}$$

Indice di Sicurezza	Classe IS-V
$100\% < IS-V$	$A^+_{IS-V}$
$100\% \leq IS-V < 80\%$	$A_{IS-V}$
$80\% \leq IS-V < 60\%$	$B_{IS-V}$
$60\% \leq IS-V < 45\%$	$C_{IS-V}$
$45\% \leq IS-V < 30\%$	$D_{IS-V}$
$30\% \leq IS-V < 15\%$	$E_{IS-V}$
$IS-V \leq 15\%$	$F_{IS-V}$

Dall'indice di Sicurezza relativamente allo SLV si determina la Classe IS-V dalla tabella soprastante

$$IS - V = \left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLV} = 0.8 = 80\% \Rightarrow B_{IS-V}$$

Si individua la Classe di Rischio della costruzione come la peggiore tra la Classe PAM e la Classe IS-V.

Per cui la classe di rischio dell'edificio non è aumentata.



## INTERVENTI SULLE PARETI DI TOMPAGNO

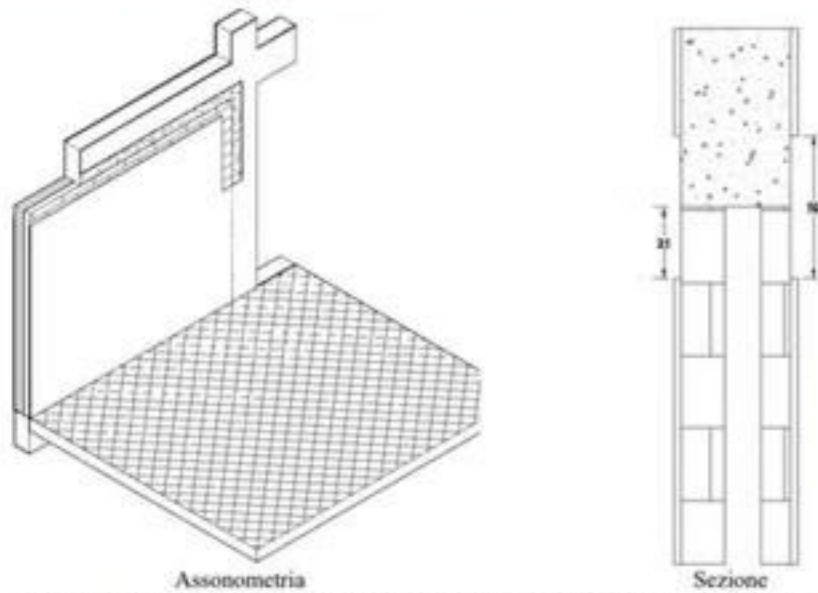


Figura 106. Rimozione dell'intonaco esistente lungo le fasce perimetrali di ancoraggio.

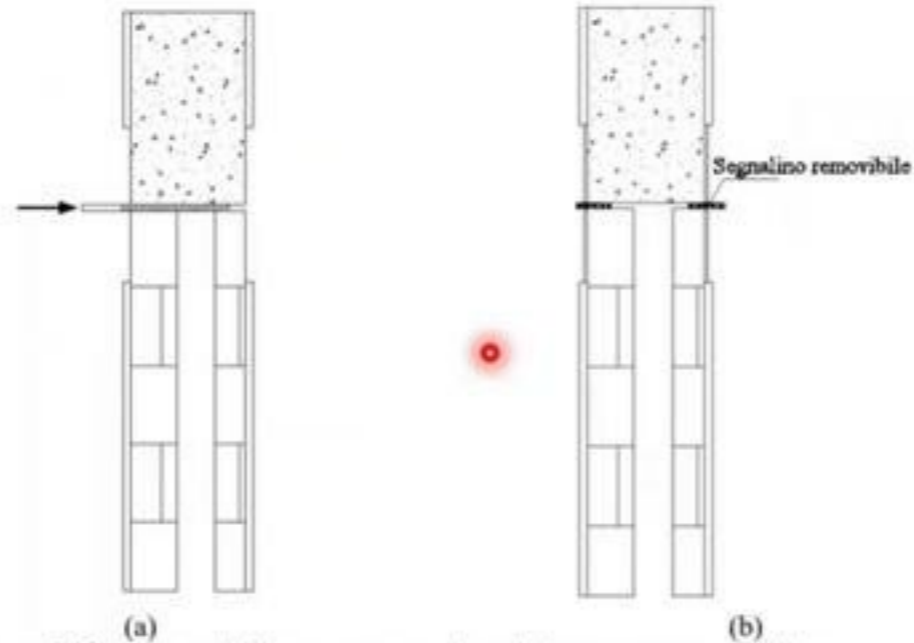


Figura 107. Foratura della tamponatura ed occlusione temporanea del foro

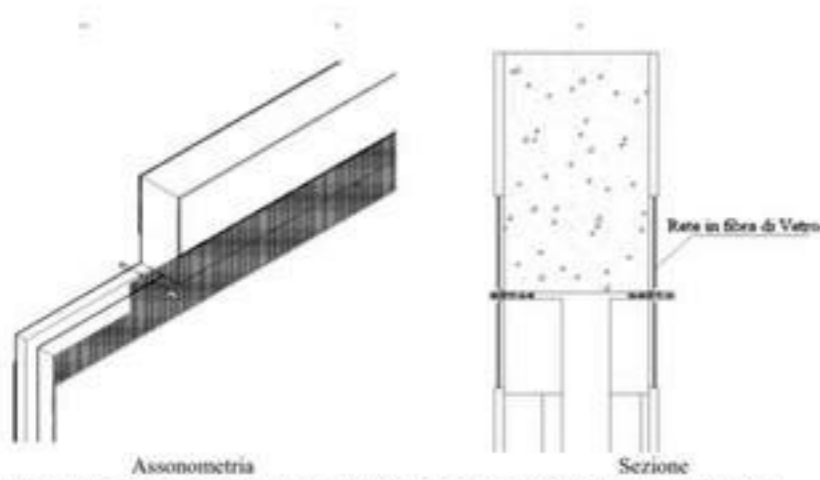


Figura 108. Applicazione di primo strato di malta cementizia bicomponente ad elevata duttilità e di rete a maglie quadrate bilanciata (0°, 90°) in fibra di vetro di qualità alcali-resistente (vetro A.R.), apprettata

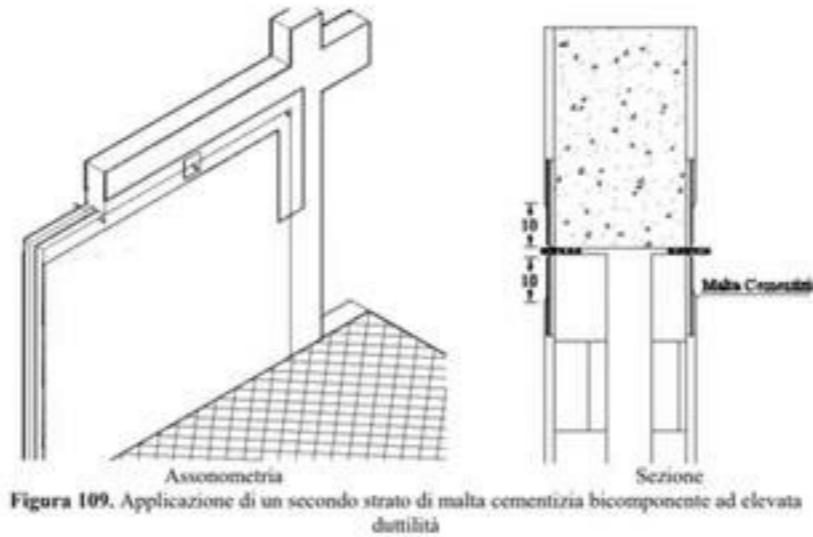


Figura 109. Applicazione di un secondo strato di malta cementizia bicomponente ad elevata duttilità

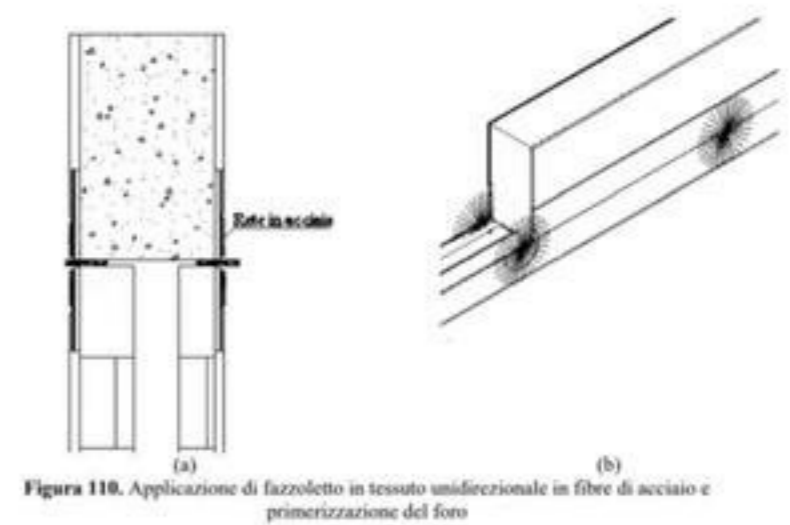
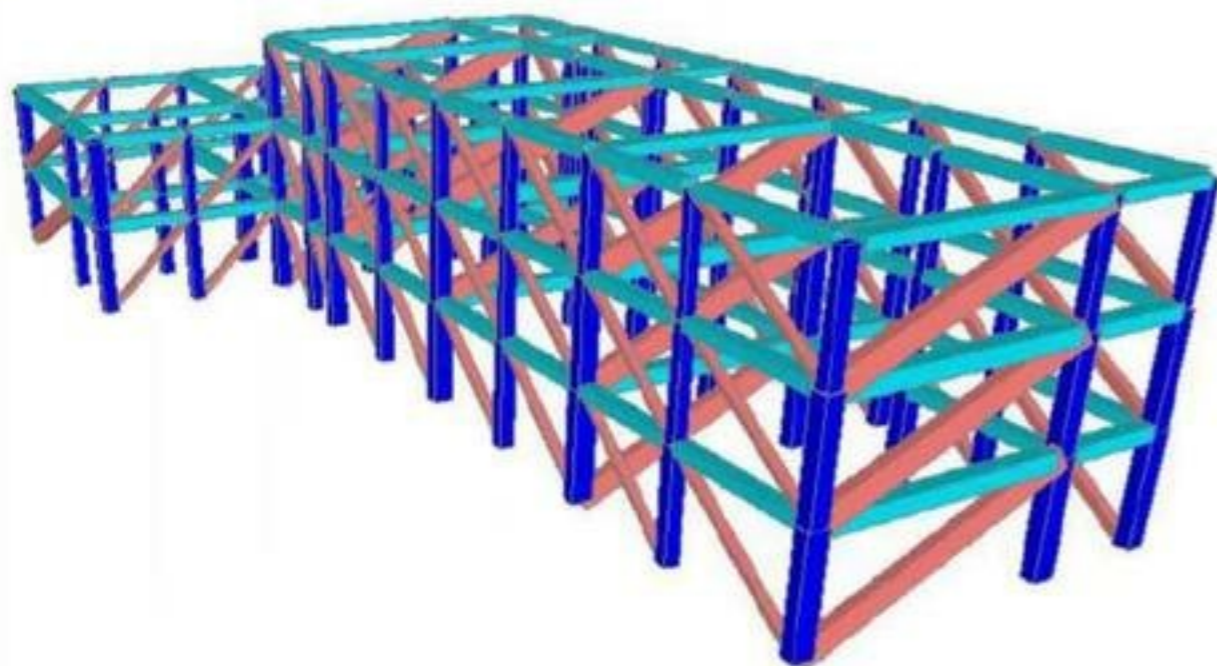


Figura 110. Applicazione di fazzoletto in tessuto unidirezionale in fibre di acciaio e primerizzazione del foro

Le ragioni risiedono nella non verifica della struttura nei confronti dello Stato Limite di Danno.

Per una stima più realistica (meno cautelativa) degli spostamenti attesi, è apparso tuttavia opportuno tenere conto, per questo edificio, della presenza dei tamponamenti.

L'effetto irrigidente del generico pannello di tamponamento è modellato attraverso un puntone diagonale equivalente inserito nella maglia del telaio e resistente solo a compressione. La sezione trasversale del puntone equivalente, di forma rettangolare, ha larghezza  $s$  pari allo spessore del pannello (300 mm) e di altezza  $w$  pari a 1/10 della lunghezza della diagonale della maglia



$$\left( \frac{PGA, C}{PGA, D} \right)_{SLD} = 0.92$$

Verifiche allo SLD includendo il contributo dei tamponamenti	EDIFICIO B			
	h (m)	$d_{r,limite}$ (mm)	$d_r$ (mm)	$\alpha_{SLD}$
<b>Piano primo (z=4 m)</b>				
direzione x	4	20	21.7	0.92
direzione y	4	20	14.8	1.35
<b>Piano secondo (z =7.8 m)</b>				
direzione x	3.8	18.0	7.7	2.33
direzione y	3.8	18.	7.85	2.29
<b>Piano terzo (z=11.6 m)</b>				
• direzione x	3.8	18.00	17.9	1.00
direzione y	3.8	18.00	12.8	1.40

Si ottiene:

$$T_{rC,SLD} = T_{rD,SLD} \left( \left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLD} \right)^\eta = 75 \cdot (0.92)^{1/0.41} = 61 \text{ anni}$$

$$T_{rC,SLV} = T_{rD,SLV} \left( \left( \frac{PGA,C}{PGA,D} \right)_{SLV} \right)^\eta = 712 \cdot (0.80)^{1/0.41} = 413 \text{ anni}$$

Da cui si determina la frequenza media annua di superamento:

$$\lambda_{SLD} = \frac{1}{T_{rC,SLD}} = \frac{1}{61} = 0.0163$$

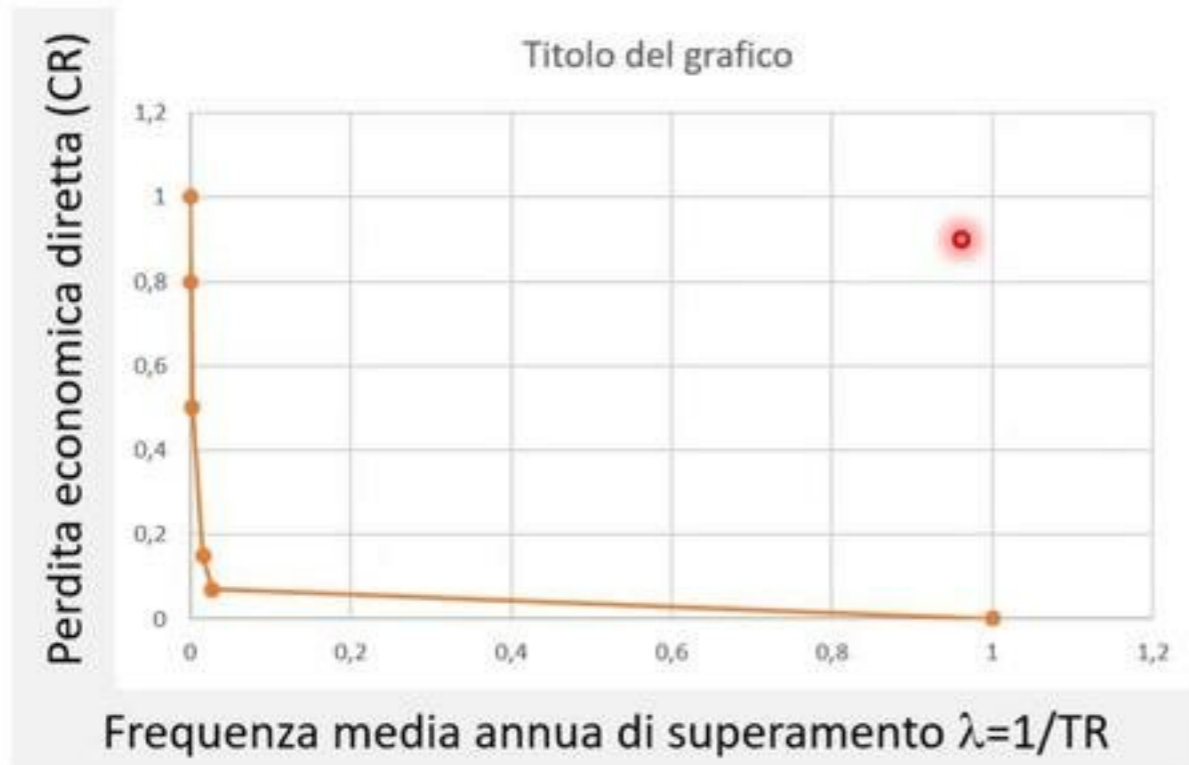
$$\lambda_{SLV} = \frac{1}{T_{rC,SLV}} = \frac{1}{413.16} = 0.00242$$

Se si valuta il PAM ricorrendo alla determinazione dei due soli Stati Limite di Danno e salvaguardia della Vita le frequenze medie annue di superamento con riferimento ai due Stati Limite di Operatività e Collasso possono essere valutati attraverso le seguenti espressioni:

$$\lambda_{SLO} = 1.67 \cdot \lambda_{SLD} = 1.67 \cdot 0.0163 = 0.027$$

$$\lambda_{SLC} = 0.49 \cdot \lambda_{SLV} = 0.49 \cdot 0.00242 = 0.0011$$

## Perdita economica diretta in funzione della frequenza media annua di superamento



Perdita Media Annuale attesa (PAM)	Classe PAM
$PAM \leq 0,50\%$	$A^+_{PAM}$
$0,50\% < PAM \leq 1,0\%$	$A_{PAM}$
$1,0\% < PAM \leq 1,5\%$	$B_{PAM}$
$1,5\% < PAM \leq 2,5\%$	$C_{PAM}$
$2,5\% < PAM \leq 3,5\%$	$D_{PAM}$
$3,5\% < PAM \leq 4,5\%$	$E_{PAM}$
$4,5\% < PAM \leq 7,5\%$	$F_{PAM}$
$7,5\% \leq PAM$	$G_{PAM}$

Computando l'area sottesa dalla curva si ottiene la Perdita Annuale Media (PAM) attesa e la relativa classe PAM dalla Tabella sopra riportata.

$$PAM = 0.041 = 4.1\% \quad \Rightarrow \quad \text{Classe PAM } E_{PAM}$$

**GRAZIE PER L'ATTENZIONE**

