

METODI DI ADEGUAMENTO

INNOVATIVO

Prof. Gaetano Manfredi

gamanfre@unina.it

L'edilizia esistente

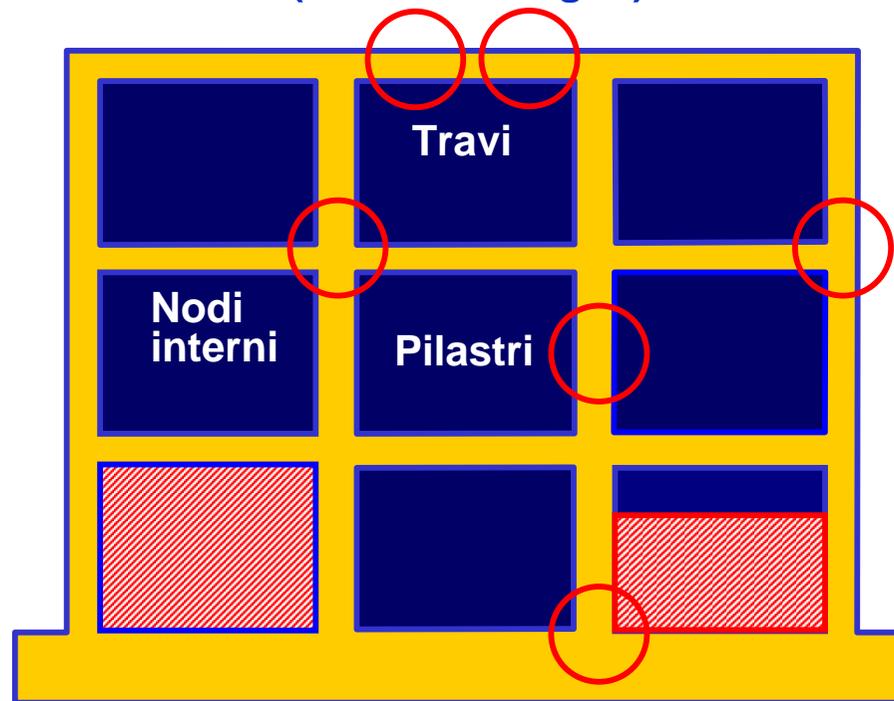


Tipologia di degrado	Migliaia di alloggi a rischio	val. % sul totale generale
Degrado per vetust�		
Edilizia storica nelle grandi citt�	105	2,9
Edilizia storica nel resto del territorio nazionale	430	12,1
Edifici con oltre 40 anni di vita	770	21,5
Totale	1.305	36,5
Degrado per ragioni costruttive		
Boom edilizio di fine anni '60	680	19,0
Edifici abusivi multipiano (1)	1.590	44,5
Totale	2.270	63,5
Totale Generale	3.575	100,0



Le strutture in cemento armato

(Flessione Taglio)

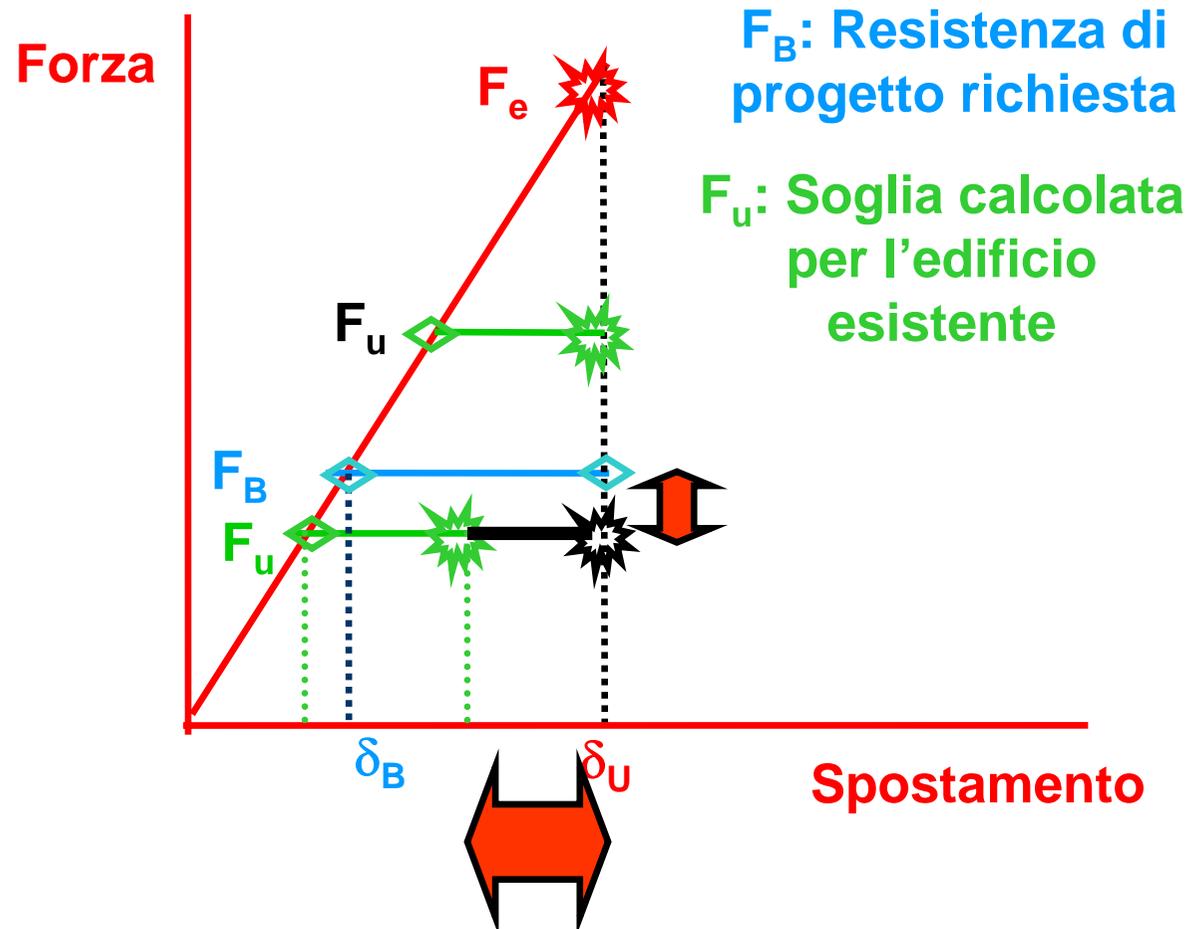


Valutazione ed adeguamento

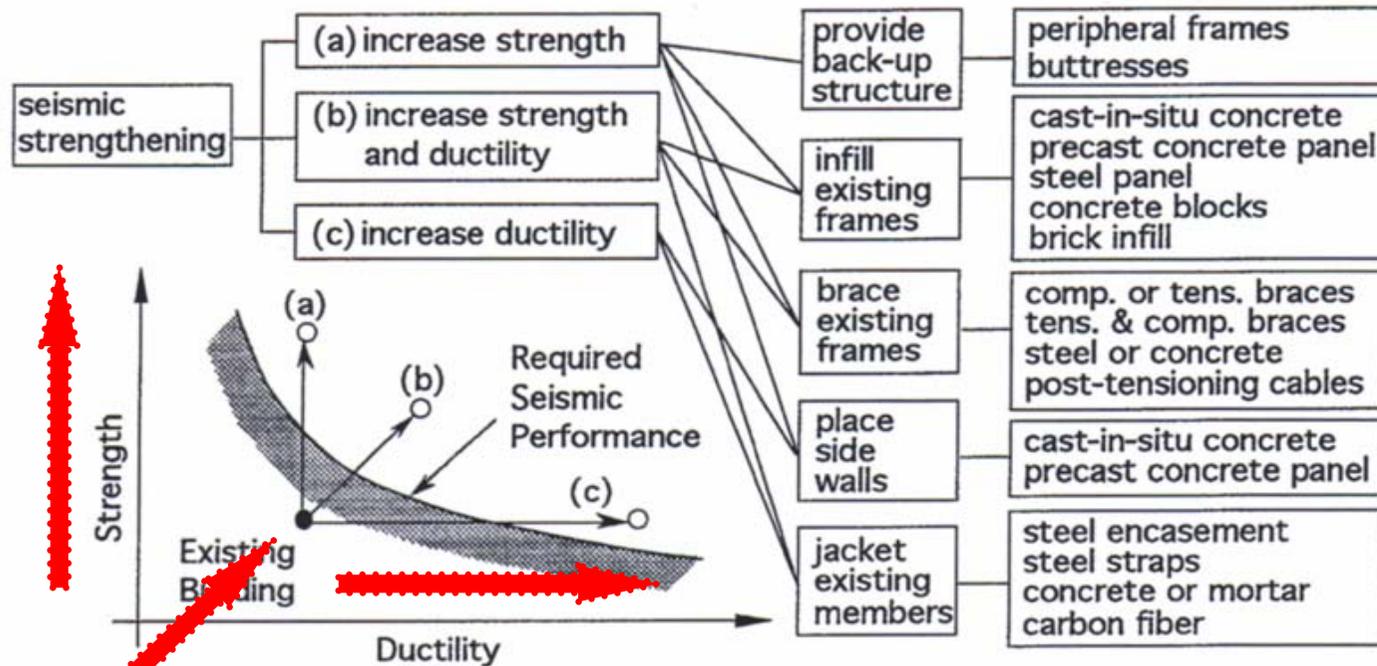
Il processo logico

- **Conoscenza**
 - ✓ Geometria
 - ✓ Caratteristiche dei materiali
 - ✓ Condizioni di conservazione
- **Definizione delle prestazioni richieste**
 - ✓ Sismicità dell'area
 - ✓ Destinazione d'uso
 - ✓ Livello di protezione richiesto/accettato
- **Valutazione della struttura esistente**
 - ✓ Definizione del modello
 - ✓ Analisi sismica
 - ✓ Verifica di sicurezza
- **Progetto di adeguamento**
 - ✓ Scelta in relazione a vincoli e prestazioni richieste
 - ✓ Dimensionamento dell'intervento
- **Valutazione della struttura adeguata**

Valutazione dell'esistente ed adeguamento



Strategie di adeguamento sismico



Bollettino FIB-24: TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Descrizione di parametri sintetici utili alla selezione

Tecnica	Effetti locali	Effetti globali	Costo relativo	"Disturbo"	Livello tecnologico	Commenti
Iniezione di resine	Ripristino resistenza e rigidezza	Nessuno	Da basso a medio	Basso	Medio	Approccio di ripristino
Camicie in c.a.	Incremento rigidezza e resistenza ed eventualmente duttilità	Modifica della risposta sismica. Se applicate ai pilastri, sposta la richiesta plastica verso le travi	Basso, per elemento	Da medio a alto	Basso, a meno che non si faccia uso estensivo di saldature	Può porre rimedio alla risposta di "piano soffice". Se interessa pochi piani, può spostare tale meccanismo ai piani superiori
Camicie o collari in acciaio	Incremento duttilità e resistenza a taglio. Garantendo una forte azione composita, incremento di rigidezza	Incremento capacità deformativa globale	Medio	Basso	Medio	Efficace ove il principale problema sia scarsa armatura trasversale. Veloce installazione.
Fasciatura parziale con FRP	Sensibile incremento di duttilità. Limitati effetti su resistenza o rigidezza	Come per collari in acciaio	Alto	Basso	Da medio a alto	Soluzione adeguata quando il costo non è un criterio predominante
Rinforzo dei nodi con FRP	Eliminazione rottura a taglio dei nodi	Riduce marginalmente il drift globale riducendo la deformabilità dei nodi trave-pilastro	Alto	Basso	Da medio a alto	Come sopra

Bollettino FIB-24: TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Descrizione di parametri sintetici utili alla selezione

Tecnica	Effetti locali	Effetti globali	Costo relativo	"Disturbo"	Livello tecnologico	Commenti
Fasciatura completa in FRP	Notevole incremento di duttilità e resistenza a taglio; piccolo incremento di rigidezza	Distribuzione delle rigidezze invariata. Sensibili effetti in termini di distribuzione delle resistenze	Alto	Basso	Da medio a alto	Come sopra
Tecniche selettive	Incremento di un parametro scelto o di una combinazione di parametri	Regola la risposta strutturale per adeguarla agli obiettivi prestazionali	Basso, per elemento	Medio	Da medio a alto (maggiore per le analisi ed il know-how che non per i materiali)	E' l'approccio più adeguato se si dispone di elevate capacità di analisi ed esperienza di ingegneri specializzati
Pareti in c.a.	Potrebbe portare ad un incremento di sollecitazioni nelle immediate vicinanze	Riduzione drastica della domanda di deformazione in tutti gli altri elementi. Risolve i problemi di "piano soffice"	Medio	Alto	Baso	E' l'approccio più adeguato se il "disturbo" arrecato non è un problema. E' necessario un drastico intervento in fondazione.
Controventi in acciaio	Protezione nei confronti del collasso di elementi fragili in c.a. posti nelle vicinanze. Può indurre notevoli sollecitazioni nei nodi.	Incremento di duttilità globale a capacità dissipativa. Può risolvere i problemi di "piano soffice".	Da medio a alto.	Da basso a medio	Medio	Occorre porre attenzione nel progetto di aste e connessioni al fine di proteggersi da fenomeni di instabilità locale e rotture post-buckling.

Bollettino FIB-24: TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

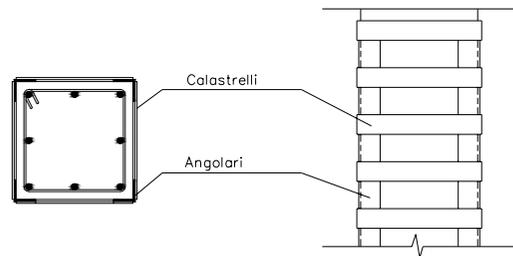
Descrizione di parametri sintetici utili alla selezione

Tecnica	Effetti locali	Effetti globali	Costo relativo	"Disturbo"	Livello tecnologico	Commenti
Inserimento di pannelli murari	Induce sensibili sollecitazioni nei nodi. Incrementa la rigidezza di piano e riduce quindi gli spostamenti di interpiano	Incremento di peso, dunque di forze sismiche. Riduce il periodo, dunque incrementa le accelerazioni. Se i pannelli sono monolitici possono modificare la risposta globale fino ad un comportamento a mensola.	Medio	Da medio a alto (a seconda che l'applicazione sia esterna od interna)	Basso	Soluzione efficace quando i pannelli sono applicati all'esterno e ben assicurati alla struttura. È possibile adottare moduli di calcestruzzo prefabbricati anziché pannelli in muratura.
Contrafforti esterni	Induce notevoli sollecitazioni locali presso la connessione con la struttura	Come per le pareti in c.a.	Da medio a alto.	Basso	Medio	Occorre prevedere un intervento in fondazione.

TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Tecniche di intervento locale

- Incremento di sezione ed armature
- Confinamento con profilati metallici



- Confinamento con FRP



Tecniche di intervento globale

- Inserimento di controventi metallici

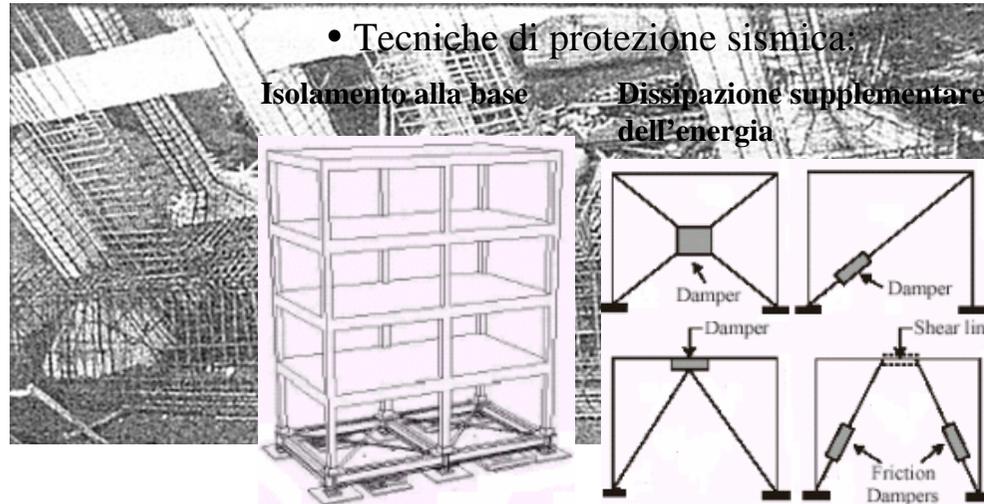


- Inserimento di pareti sismoresistenti

- Tecniche di protezione sismica:

Isolamento alla base

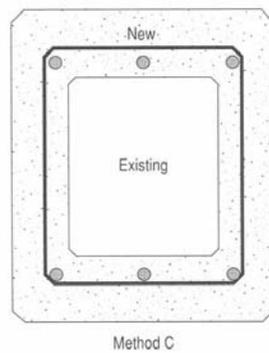
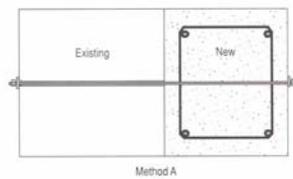
Dissipazione supplementare dell'energia



TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Tecniche di intervento locale

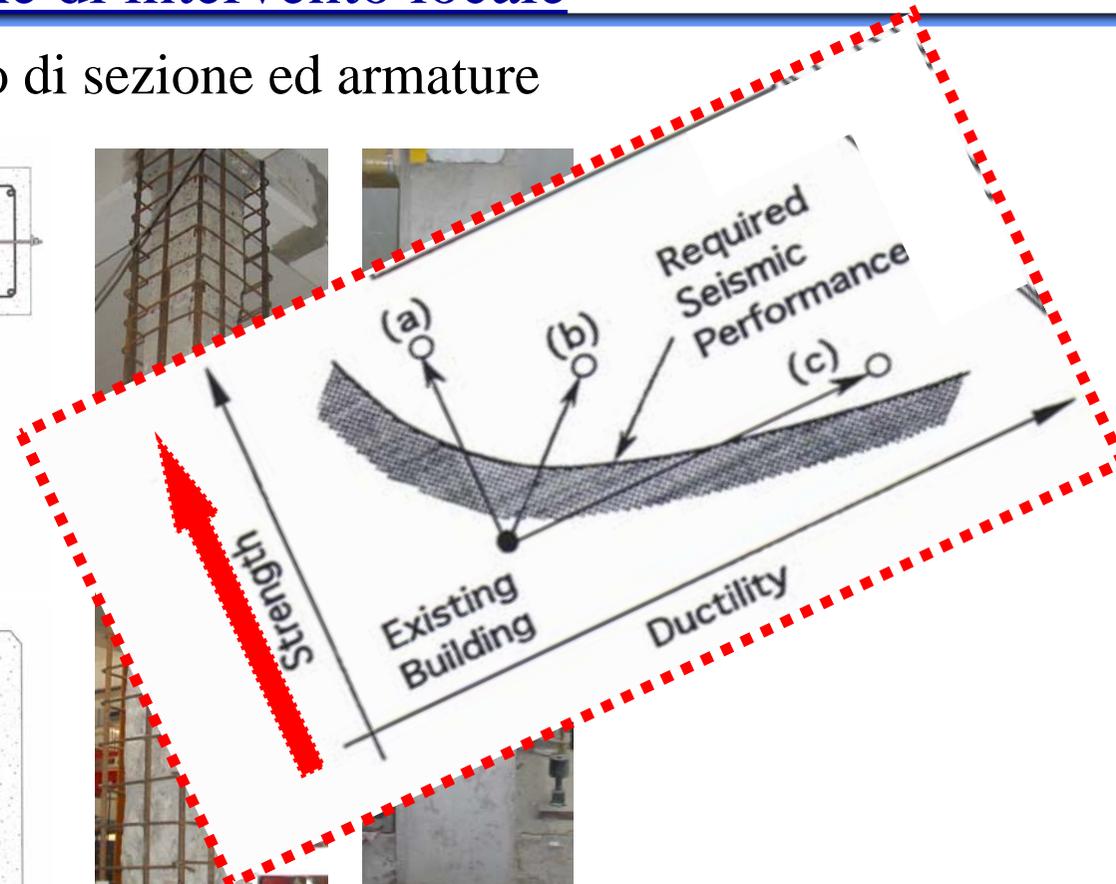
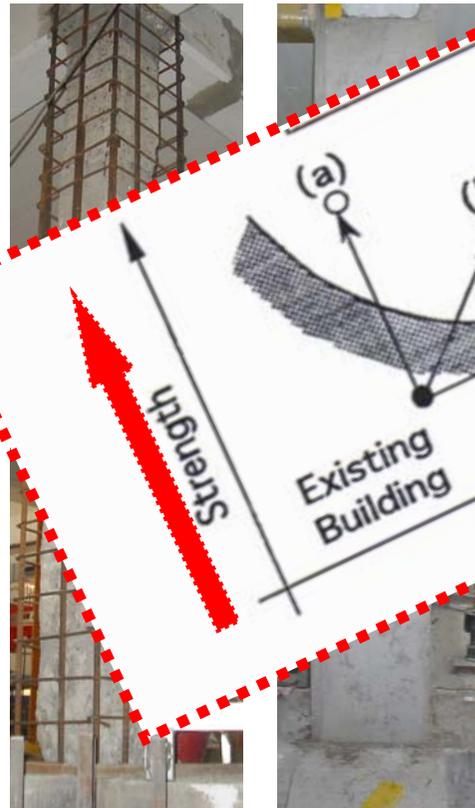
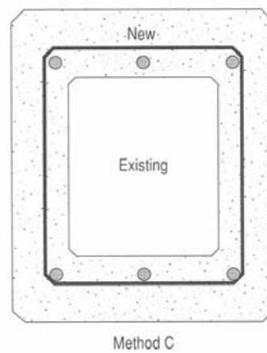
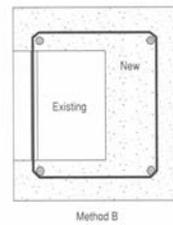
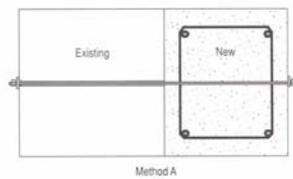
- Incremento di sezione ed armature



TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Tecniche di intervento locale

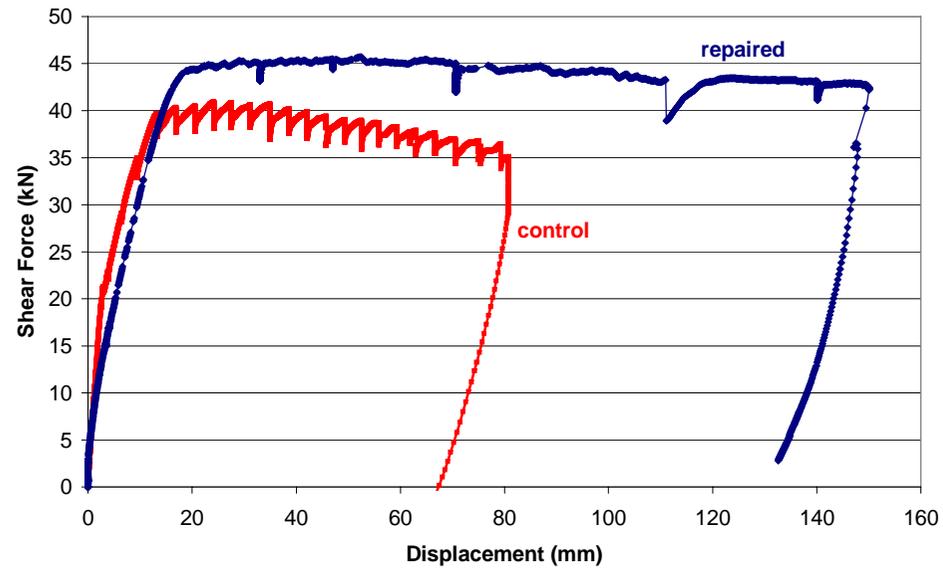
- Incremento di sezione ed armature



TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Tecniche di intervento locale

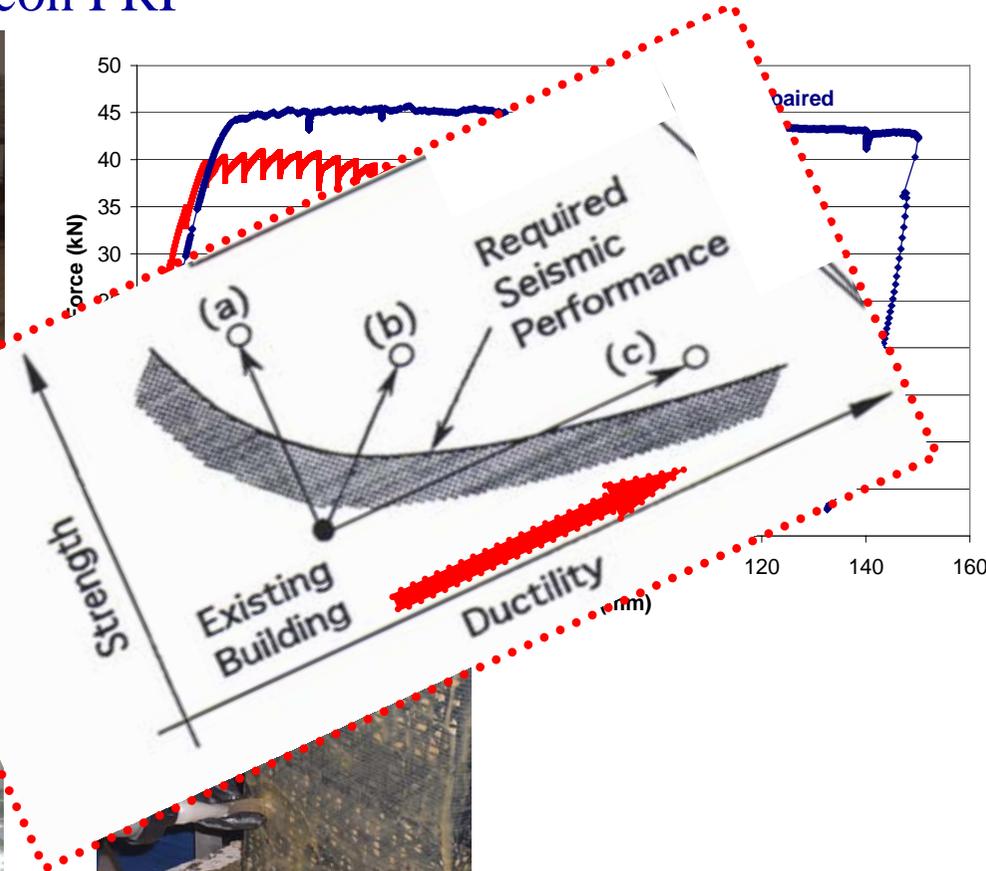
- Confinamento con FRP



TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Tecniche di intervento locale

- Confinamento con FRP



TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Tecniche di intervento locale

- Confinamento con profilati metallici
 - Confinamento e rinforzo



**Fiocchi in Tessuti
Metallici**



Fasciatura in FRP

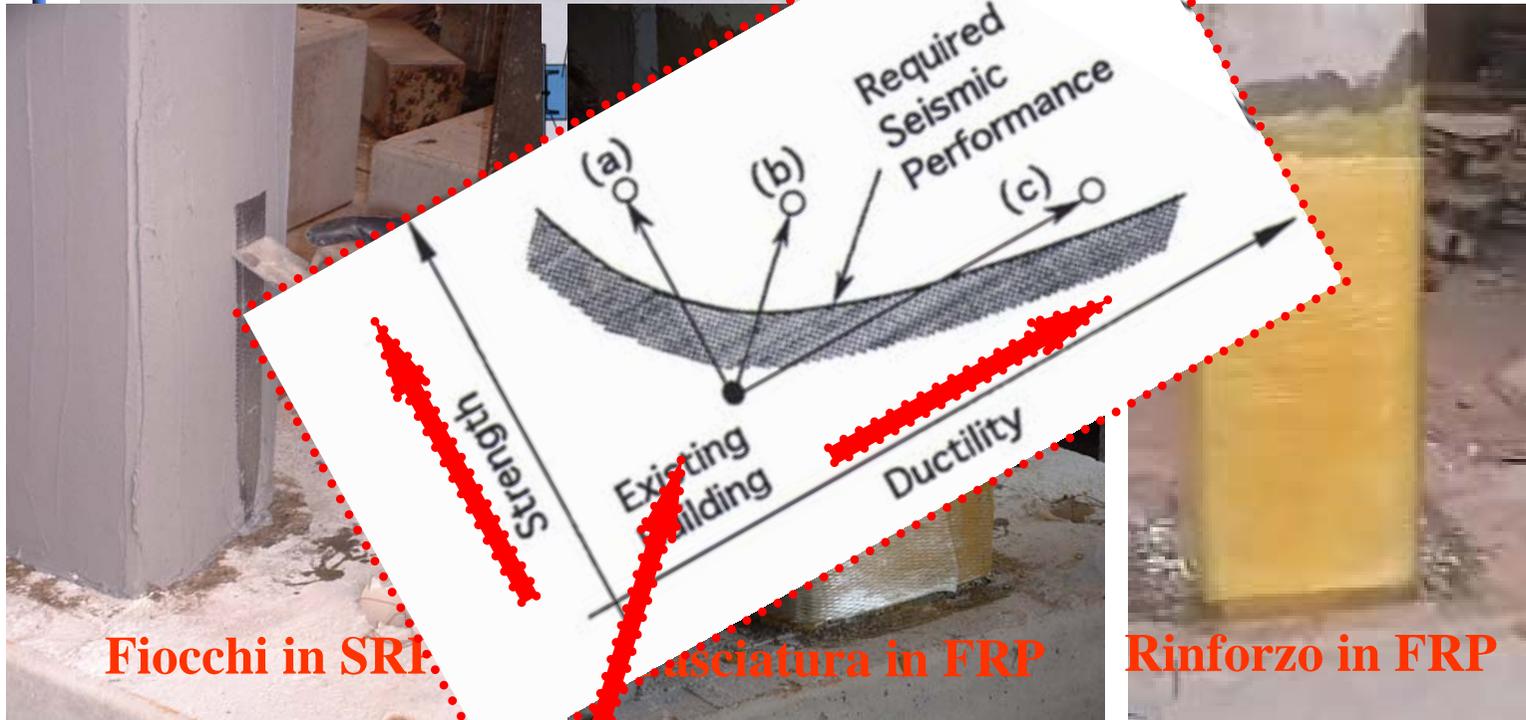


Rinforzo in FRP

TECNICHE DI ADEGUAMENTO SISMICO

Tecniche di intervento locale

- Confinamento con profilati metallici
- Confinamento con FRP



Adeguamento sismico con FRP

Ordinanza 3431 del 3 maggio 2005

11.3 Edifici esistenti in c.a.

11.3.3. Modelli di capacità per il rinforzo

11.3.3.1 Incamiciatura in cemento armato

11.3.3.2 Incamiciatura in acciaio

11.3.3.3 Placcatura e fasciatura in materiali fibrorinforzati (FRP)

Ai fini delle verifiche di sicurezza degli elementi rafforzati con FRP si possono adottare le procedure e le formule riportate nell'Allegato 11.B

LE ISTRUZIONI CNR-DT 200/04

Adeguamento sismico con FRP

L' intervento di adeguamento sismico attraverso FRP deve essere effettuato tenendo presente che:

- errori grossolani vanno eliminati;
- forti irregolarità degli edifici (in termini di resistenza e/o rigidità) non possono essere sanate con tale tecnica;
- una maggiore regolarità in resistenza può essere ottenuta rinforzando un numero ridotto di elementi;
- risultano sempre opportuni interventi volti a migliorare la duttilità locale;
- l'introduzione di rinforzi locali non deve ridurre la duttilità globale della struttura.

Adeguamento sismico con FRP

In quanto selettiva, la strategia di intervento con FRP deve essere ispirata ai seguenti principi:

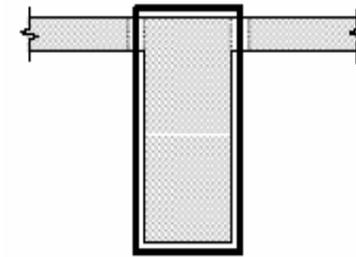
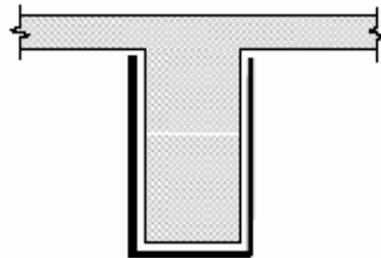
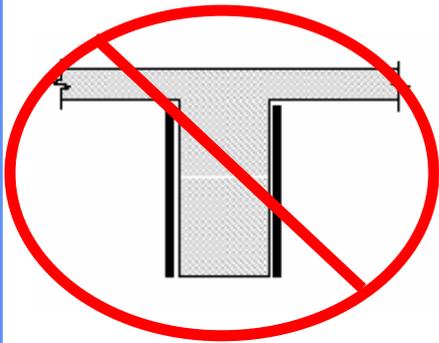
- **eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di tipo fragile;**
- eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di piano (“piano soffice”);
- miglioramento della capacità deformativa globale della struttura conseguibile in uno dei seguenti modi:
 - incrementando la duttilità delle potenziali cerniere plastiche senza variarne la posizione;
 - rilocalizzando le potenziali cerniere plastiche nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze.

Adeguamento sismico con FRP

Elementi e meccanismi fragili

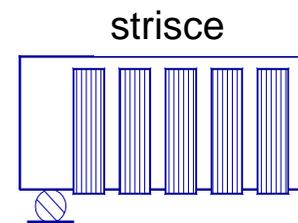
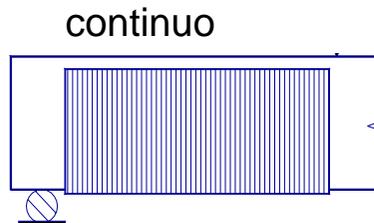
Taglio

- sono consentite unicamente le configurazioni ad U o in avvolgimento;



- Rinforzo laterale
- Rinforzi ad U
- Avvolgimento

- sono consentiti unicamente rinforzi la cui direzione di maggior resistenza sia ortogonale all'asse longitudinale dell'elemento ($b = 90^\circ$).



Adeguamento sismico con FRP

Elementi e meccanismi fragili

Zone di sovrapposizione

Il pericolo di scorrimento delle giunzioni per aderenza nei pilastri può essere eliminato mediante l'applicazione di una fasciatura di confinamento in FRP.

Per sezioni circolari di diametro D , lo spessore da attribuire a tale fasciatura può essere valutato mediante la seguente relazione:

$$t_f = \frac{D(f_1 - \sigma_{sw})}{2 \cdot 0.001 E_f}$$

σ_{sw} = tensione circonferenziale nelle staffe corrispondente alla deformazione dell'1‰

f_1 = pressione di confinamento nella zona di sovrapposizione di lunghezza L_s , pari a:

$$f_1 = \frac{A_s f_{yd}}{\left[\frac{u_e}{2n} + 2(d_b + c) \right] L_s}$$

u_e = perimetro della sezione all'interno del poligono che circoscrive le barre longitudinali

n = numero di barre giuntate lungo u_e

c = spessore del copriferro

Adeguamento sismico con FRP

Elementi e meccanismi fragili

Svergolamento delle barre longitudinali

Il pericolo di svergolamento delle barre longitudinali di armatura può essere eliminato mediante l'applicazione di una fasciatura di confinamento in FRP. Lo spessore da attribuire alla fasciatura può essere valutato:

$$t_f = \frac{0.45 n f_y^2 d}{4 E_{ds} E_f} \approx \frac{10 n d}{E_f}$$

- - n il numero totale di barre longitudinali in condizioni di potenziale svergolamento
- - f_y la tensione di snervamento delle barre longitudinali ottenuta da prove *in situ* sui materiali esistenti, in accordo con la Normativa Sismica vigente;
- - d la dimensione della sezione parallela al piano di flessione;
- - E_f il modulo di elasticità normale della fasciatura in FRP;
- - E_{ds} un opportuno "modulo ridotto" fornito dalla seguente relazione

$$E_{ds} = \frac{4E_s E_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2}$$

E_s ed E_i sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale iniziale e quello tangente in campo plastico delle barre longitudinali

Adeguamento sismico con FRP

Elementi e meccanismi fragili

Nodi

Il calcolo dell'incremento di resistenza a trazione conseguibile nei pannelli dei nodi non confinati va eseguito tenendo conto del contributo dell'FRP nella direzione delle tensioni principali di trazione e limitando la massima deformazione di quest'ultimo al valore del 4%. L'intervento risulterà efficace solo se le estremità del rinforzo sono perfettamente ancorate, attraverso l'adozione di opportuni particolari costruttivi. In caso contrario il rinforzo non può essere considerato come efficace.



Turchia, Agosto 1999



*Elsa-Jrc, telaio in scala reale:
rinforzo con CFRP del nodo trave-pilastro*

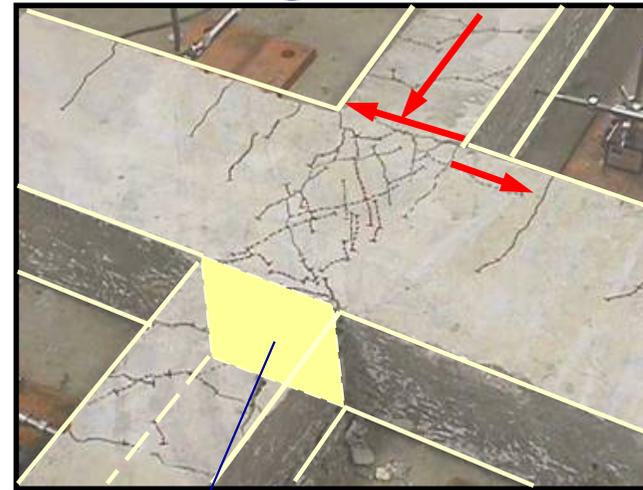
Adeguamento sismico con FRP

Elementi e meccanismi fragili

- **Nodi trave-pilastro**

La verifica di resistenza va effettuata solo per i nodi non interamente confinati

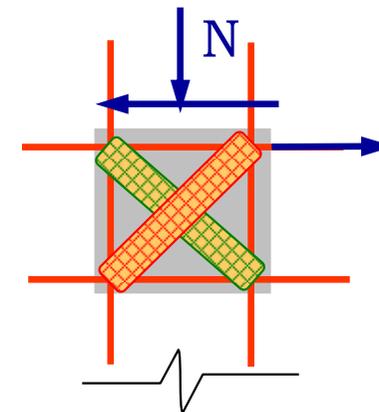
La resistenza deve essere verificata sia lungo la **diagonale compressa** che lungo la **diagonale tesa**



A_g

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.3\sqrt{f_c}$$

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.5f_c$$



Adeguamento sismico con FRP

In quanto selettiva, la strategia di intervento con FRP deve essere ispirata ai seguenti principi:

- eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di tipo fragile;
- **eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di piano (“piano soffice”);**
- miglioramento della capacità deformativa globale della struttura conseguibile in uno dei seguenti modi:
 - incrementando la duttilità delle potenziali cerniere plastiche senza variarne la posizione;
 - rilocalizzando le potenziali cerniere plastiche nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze.

Adeguamento sismico con FRP

Eliminazione dei meccanismi di collasso di piano

I meccanismi di collasso di piano possono attivarsi a seguito della formazione di cerniere plastiche sia in testa che al piede di tutti i pilastri di quel piano:



l'intervento sarà finalizzato ad incrementare in tali zone la resistenza a flessione composta, con l'obiettivo di inibire la formazione delle suddette cerniere.

Adeguamento sismico con FRP

In quanto selettiva, la strategia di intervento con FRP deve essere ispirata ai seguenti principi:

- eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di tipo fragile;
- eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di piano (“piano soffice”);
- **miglioramento della capacità deformativa globale della struttura conseguibile in uno dei seguenti modi:**
 - A) Incrementando la duttilità delle potenziali cerniere plastiche senza variarne la posizione;**
 - B) Rilocalizzando le potenziali cerniere plastiche nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze.

Adeguamento sismico con FRP

Incremento duttilità potenziali cerniere plastiche

- Confinamento in FRP su elementi pressoinflessi

Consente di incrementare la duttilità ed in misura ridotta la resistenza

La valutazione della curvatura ultima di una sezione pressoinflessa può essere perseguita adottando un classico legame parabola-rettangolo, il cui tratto costante si estenda fino ad un valore della deformazione ultima, ε_{ccu} , fornito dalla seguente relazione:

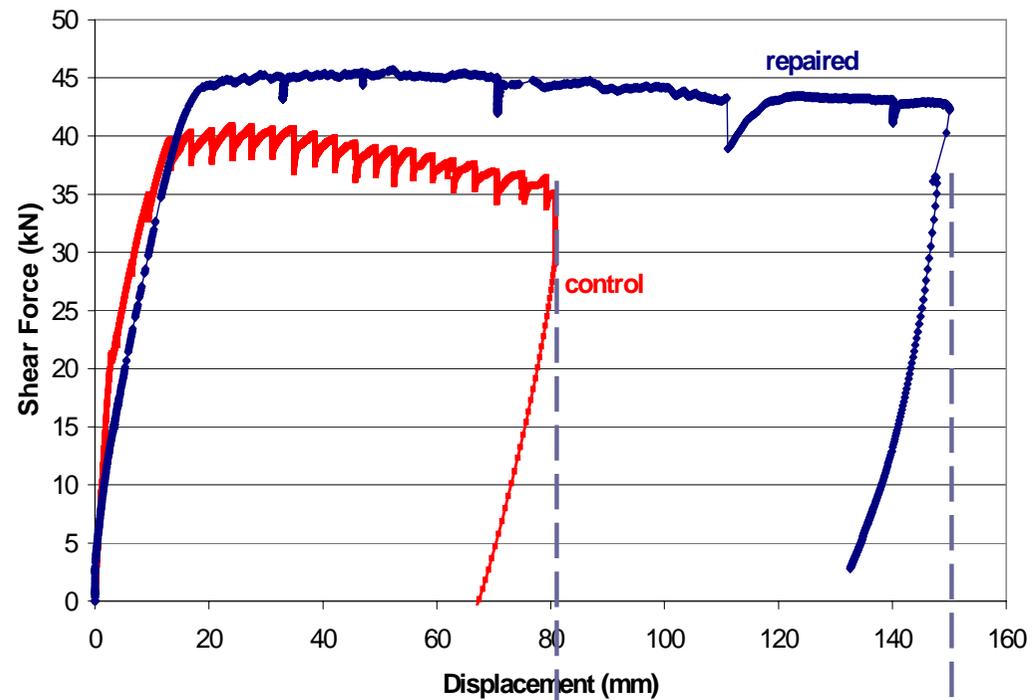
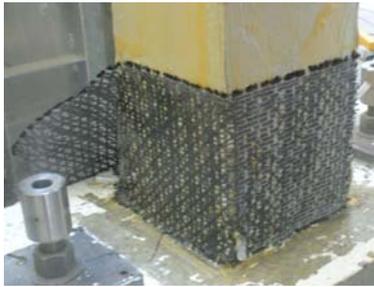
$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 \sqrt{\frac{f_1}{f_{cd}}}$$

$f_{l,eff}$: pressione efficace di confinamento = $f(\rho_f; E_f; \varepsilon_{fd,rid}; p_f)$

f_{cd} : resistenza di progetto calcestruzzo non confinato

Adeguamento sismico con FRP

Incremento duttilità potenziali cerniere plastiche



Incremento di duttilità

Adeguamento sismico con FRP

In quanto selettiva, la strategia di intervento con FRP deve essere ispirata ai seguenti principi:

- eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di tipo fragile;
- eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di piano (“piano soffice”);
- **miglioramento della capacità deformativa globale della struttura conseguibile in uno dei seguenti modi:**
 - A) Incrementando la duttilità delle potenziali cerniere plastiche senza variarne la posizione;
 - B) Rilocalizzando le potenziali cerniere plastiche nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze.**

Adeguamento sismico con FRP

Applicazione criterio gerarchia delle resistenze

Pilastro debole – Trave forte

Turchia, Agosto 1999



- L'applicazione del criterio della gerarchia delle resistenze comporta l'eliminazione di tutte le potenziali cerniere plastiche nei pilastri.
- Nelle situazioni di "pilastro debole-trave forte", usuali per strutture intelaiate progettate per soli carichi verticali, le sezioni dei pilastri sono sottodimensionate e denunciano carenza di armatura longitudinale.
- In questi casi è necessario incrementarne la resistenza a flessione composta con l'obiettivo di ricondurre la struttura intelaiata ad una situazione di "pilastro forte-trave debole".

Adeguamento sismico con FRP

Applicazione criterio gerarchia delle resistenze

- L'applicazione del criterio della gerarchia delle resistenze conduce ad un incremento della resistenza a flessione dei pilastri e quindi ad un incremento del taglio agente in condizioni ultime.
- È opportuno pertanto eseguire le verifiche a taglio previste dalla Normativa, incrementando eventualmente la resistenza nei confronti di tale caratteristica allo scopo di evitare un collasso di tipo fragile.

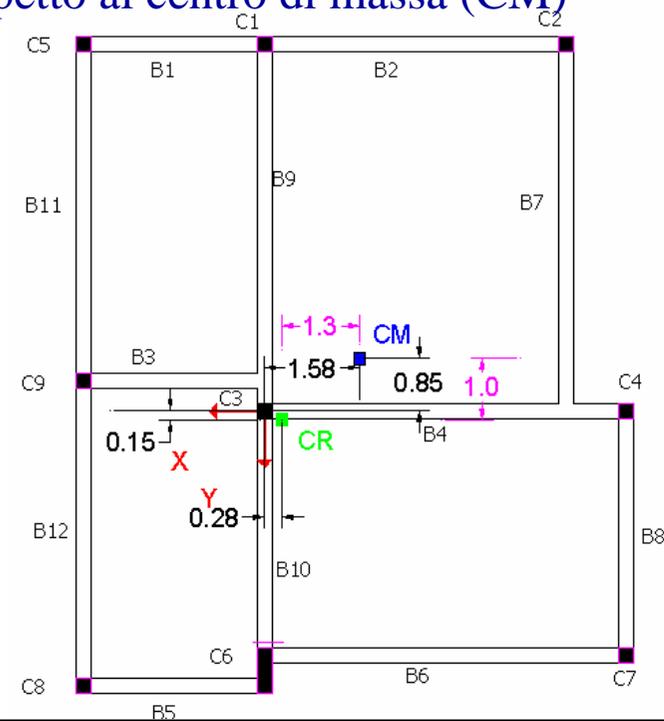
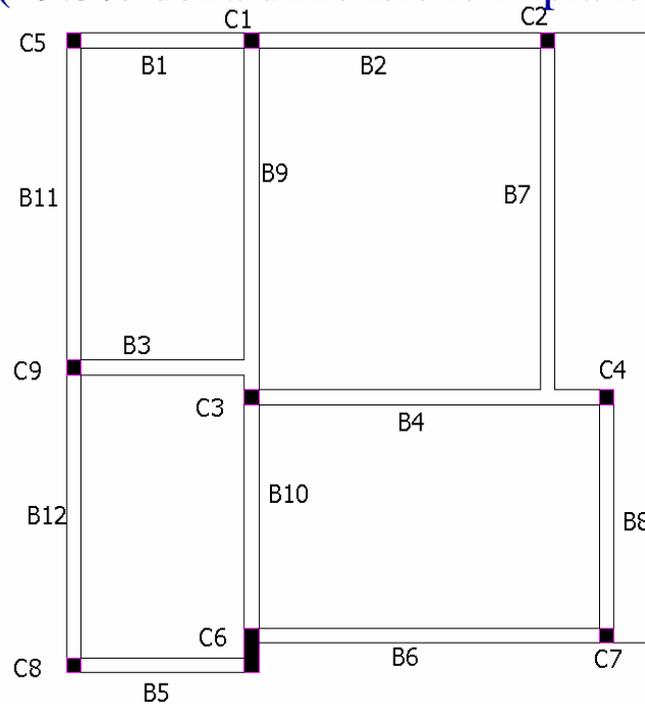
La Struttura SPEAR



- Edificio di **tre piani** progettato per **solli carichi verticali**
- Progettato secondo le indicazioni della Normativa Greca utilizzata dal **1954 al 1995**
- Struttura regolare in elevazione ma **doppiamente non simmetrica in pianta**
- Telai a 2 campate con luci da 3 a 6 m

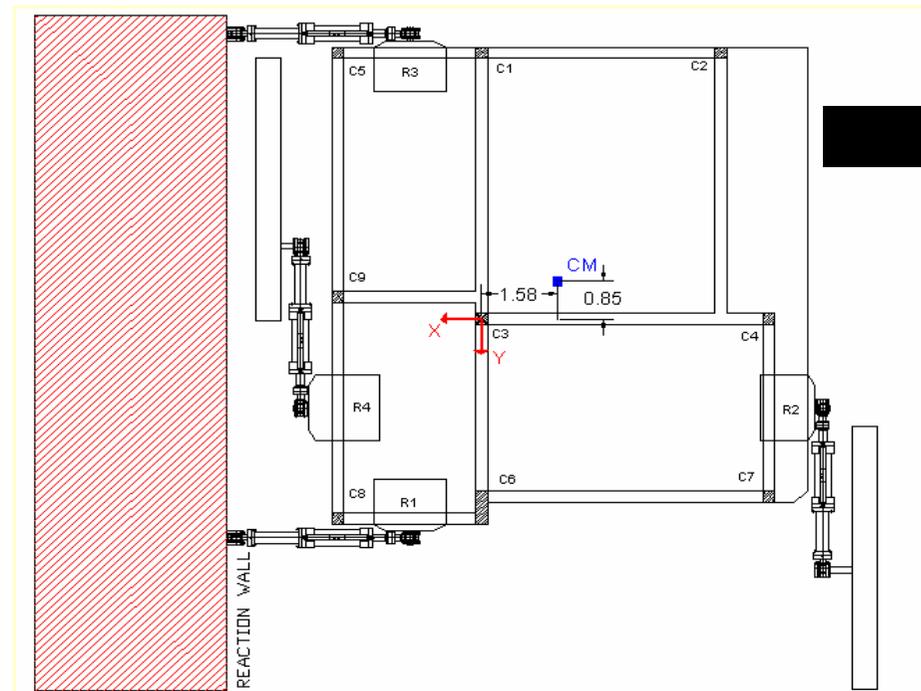
Descrizione della Struttura

- Struttura regolare in elevazione
- Travi e colonne di ciascun piano sono armate allo stesso modo
- Il centro di rigidezza (CR) presenta un'eccentricità pari a 1.3 m nella direzione X (~13% della dimensione in pianta) e 1.0 m nella direzione Y (~9.5% della dimensione in pianta) rispetto al centro di massa (CM)

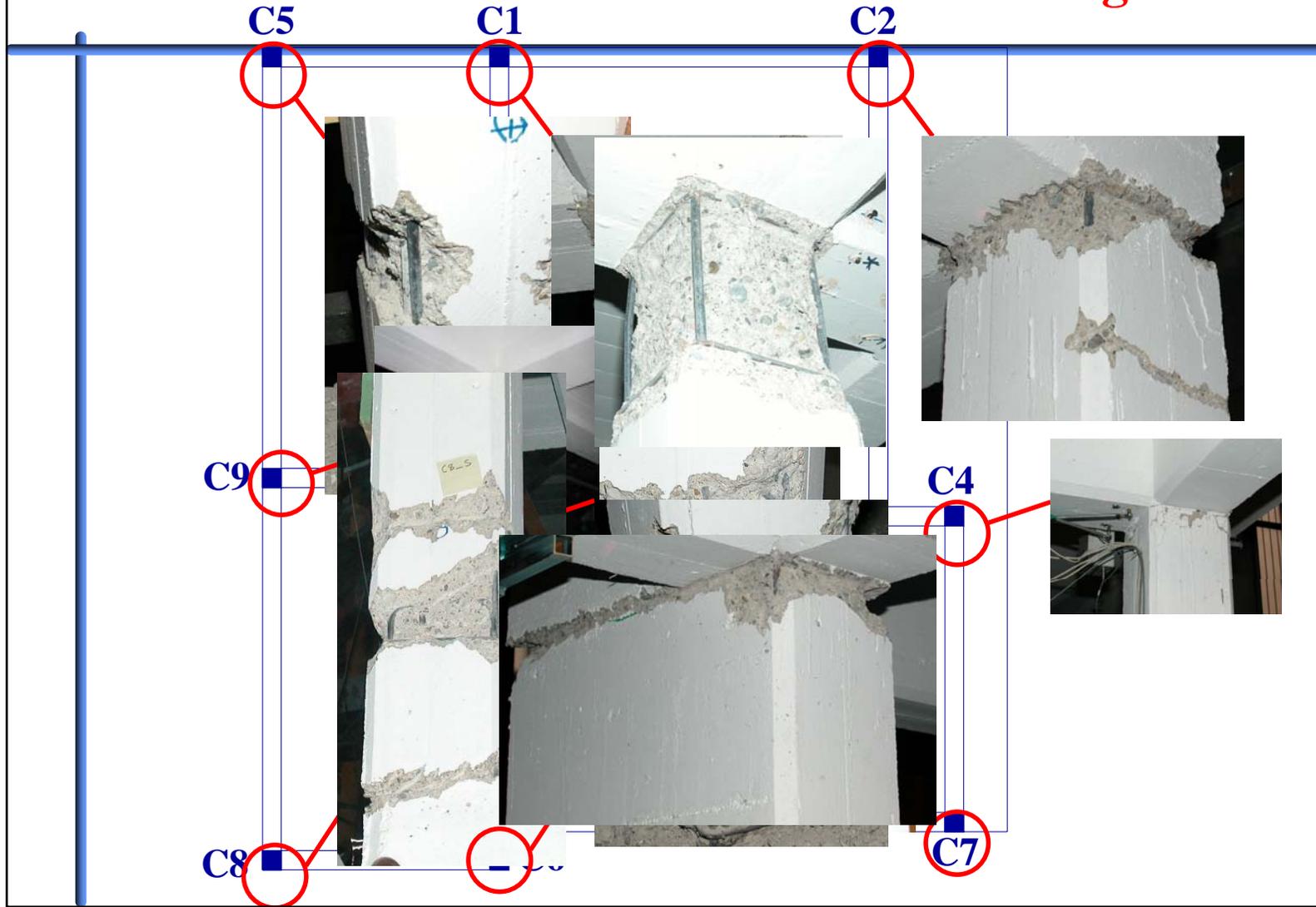


Test Set-up

- Tre gradi di libertà per piano: due traslazioni e una rotazione attorno all'asse verticale
- Quattro attuatori (dei quali tre strettamente necessari) applicati alla struttura per ciascun piano



Struttura NON RINFORZATA 0.2g



Struttura **NON RINFORZATA** **0.2g**



Risultati Sperimentali: Struttura non rinforzata

▪ Maggiori danni riscontrati sulle colonne:

- La struttura progettata per soli carichi verticali – nessuna attenzione alla gerarchia delle resistenze
- Colonne di dimensioni ridotte e armatura insufficiente a sopportare sforzo normale e flessione biassiale

▪ Meccanismo di trave forte pilastro fragile con formazione di cerniere plastiche nelle colonne

- La mancanza di infittimento della staffatura nei nodi aumenta il rischio di fenomeni locali di collasso fragile: rottura del calcestruzzo, instabilità delle barre di acciaio longitudinali, sfilamento delle barre



Progettazione Intervento di Rinforzo

OBIETTIVI :

- Incrementare la duttilità globale della struttura migliorando la sua capacità di dissipare energia
- Prevenire meccanismi di rottura locale al fine di ottenere un soddisfacente comportamento sismico strutturale



Intervento di rinforzo con materiali compositi:

- Consente di incrementare la duttilità
- Facile e rapido da realizzare
- Non incrementa la massa della struttura
- Non modifica la geometria della struttura

Progettazione Intervento di Rinforzo

- **Tre tipologie di intervento adottate al fine di incrementare:**

1) Confinamento delle colonne

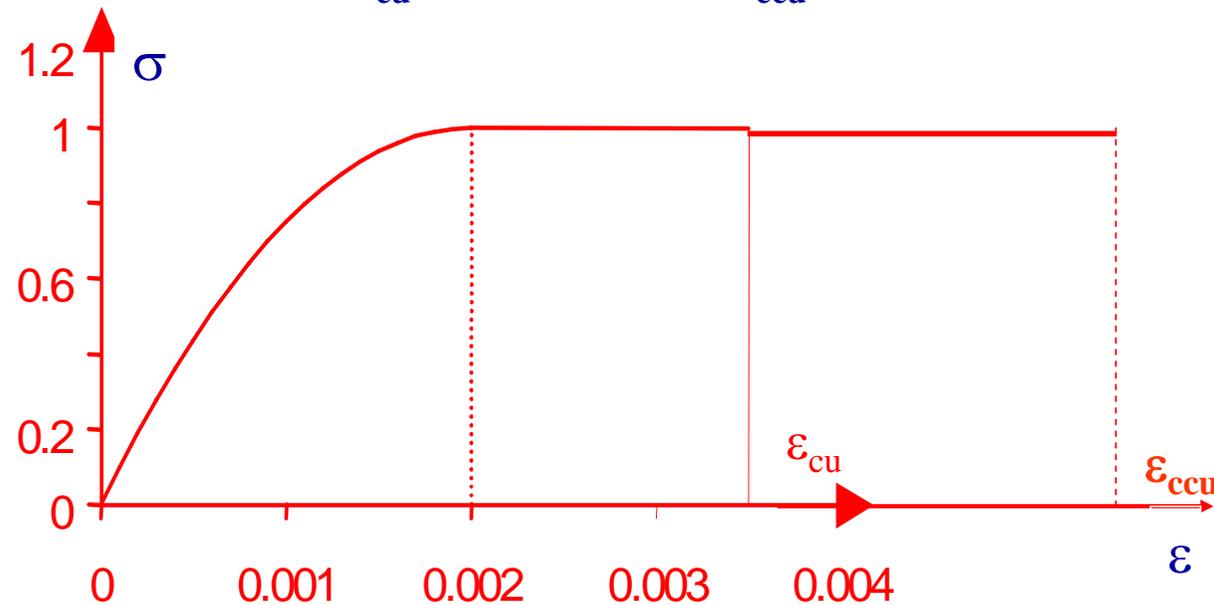
2) Capacità di resistenza a taglio colonna rettangolare C6

3) Capacità di resistenza a taglio nodi d'angolo

Confinamento delle colonne

OBIETTIVO: Incremento duttilità cerniere plastiche
(nessuna modifica gerarchia resistenze)

Il confinamento mediante FRP consente, di incrementare il valore della deformazione convenzionale ultima di progetto del calcestruzzo, ε_{cu} , ad un valore ε_{ccu}



Confinamento delle colonne

8 Colonne quadrate:

2 strati GFRP uniassiale

1° Piano: Testa: h= 60 cm

Piede: h=77cm

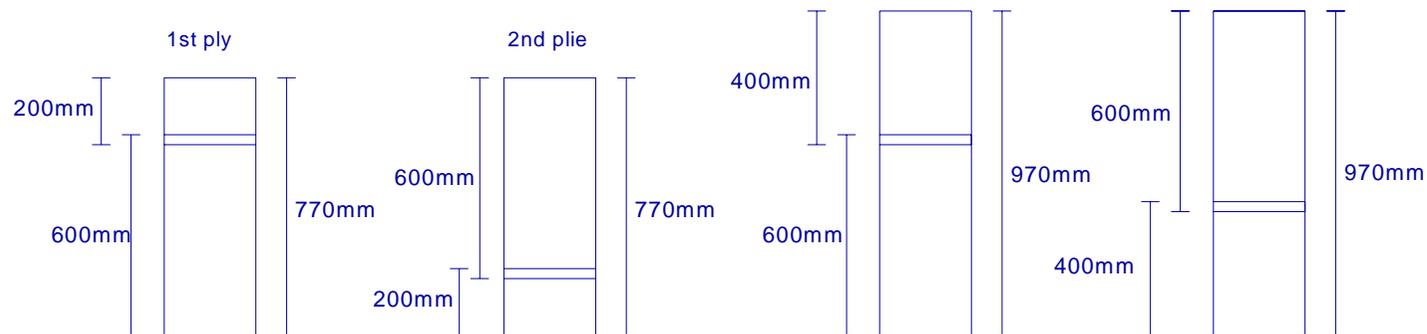
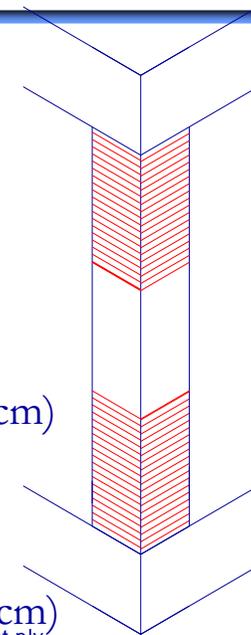
(60+20cm sovrapposizione: 3 cm)

C8 h=97cm (70+20cm sovrapposizione 3 cm)

2° e 3° Piano : Testa: h= 60 cm

Piede h=60cm

C8 h=77cm (60+20cm sovrapposizione: 3 cm)

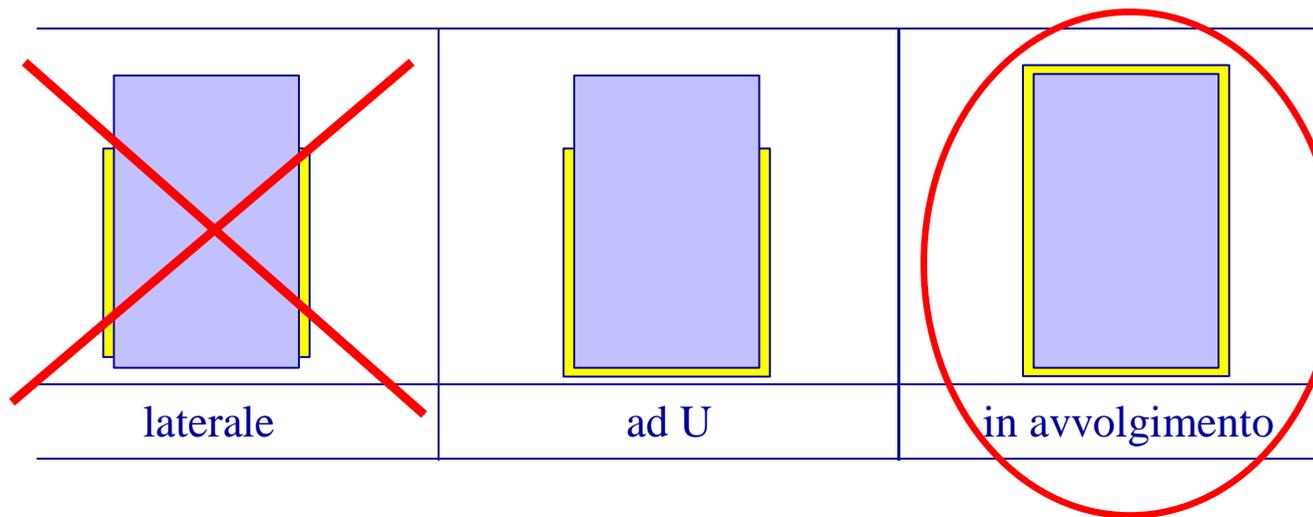


Rinforzo a taglio colonna rettangolare

OBIETTIVO: Impedire la formazione di meccanismi di rottura di tipo fragile

La resistenza di progetto a taglio di un elemento rinforzato si valuta come: $V_{Rd} = \min \left\{ V_{Rd,ct} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max} \right\}$

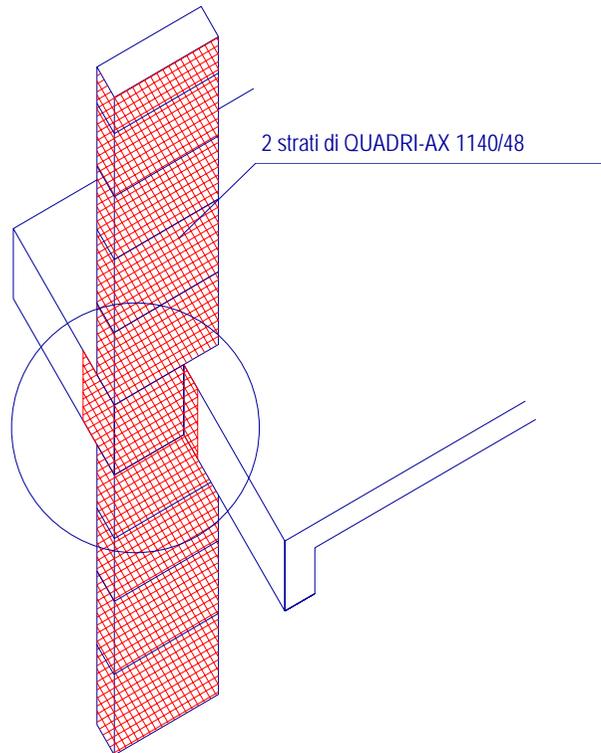
Disposizione di rinforzo prescelta:



Rinforzo a taglio colonna rettangolare

Rinforzo colonna C6:

Fasciatura a tutta altezza, 2 strati di tessuto quadriassiale con sovrapposizione tra le fasce di 3 cm



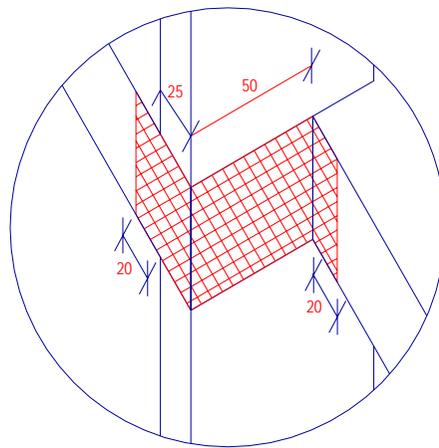
Rinforzo a taglio colonna rettangolare

Rinforzo colonna C6 Nodo:

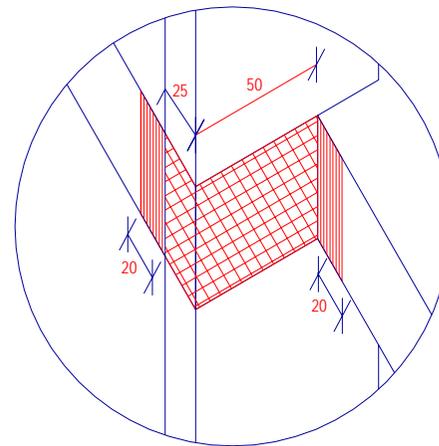
2 Starti quadriassiale prolungati oltre il pilastro per 20 cm

1 Strato fasce ad U rinforzo a taglio per la trave

ESTERNO



1° fase



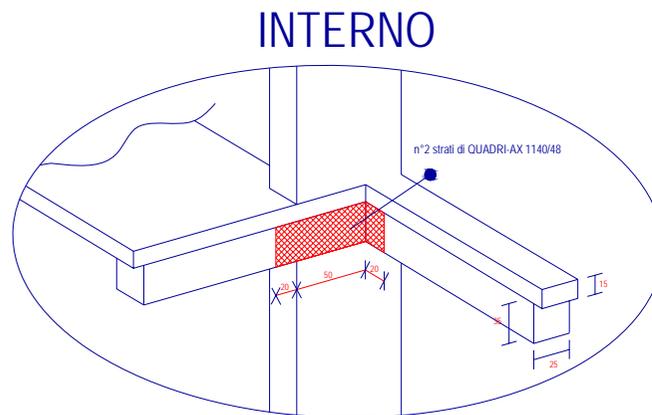
2° fase

Rinforzo a taglio colonna rettangolare

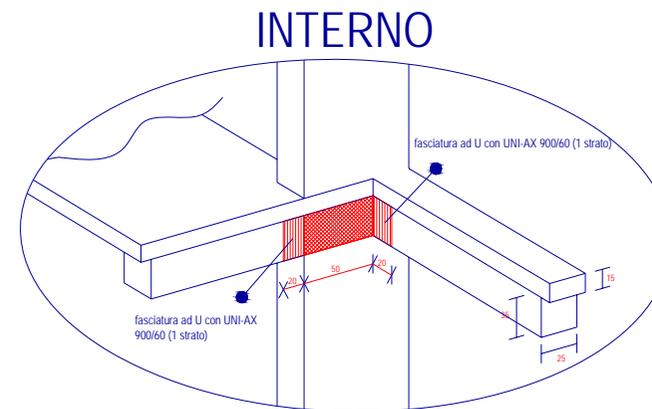
Rinforzo colonna C6 Nodo:

2 Starti quadriassiale prolungati oltre il pilastro per 20 cm

1 Strato fasce ad U rinforzo a taglio per la trave



1° fase



2° fase

Rinforzo a taglio nodi d'angolo

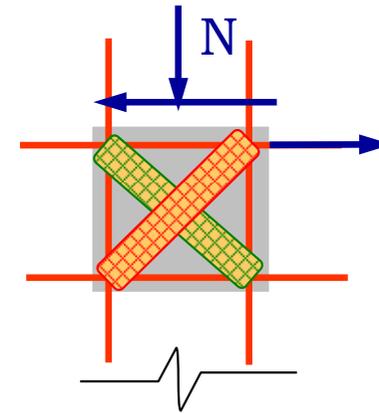
OBIETTIVO: Impedire la formazione di meccanismi di rottura di tipo fragile

Sollecitazioni di taglio comparabili con quelle di rottura a taglio dei pannelli di nodo calcolate secondo quanto prescritto nell'Ordinanza 3274:

Ordinanza 3274: Limitazioni tensionali diagonale tesa e diagonale compressa :

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.3\sqrt{f_c}$$

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{2A_g} + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g}\right)^2 + \left(\frac{V_n}{A_g}\right)^2} \leq 0.5f_c$$



Rinforzo dei pannelli di nodo con tessuto di vetro quadriassiale di vetro secondo il modello di calcolo proposto da Antonoupoulos&Triantafillou(2002)

Rinforzo a taglio nodi d'angolo

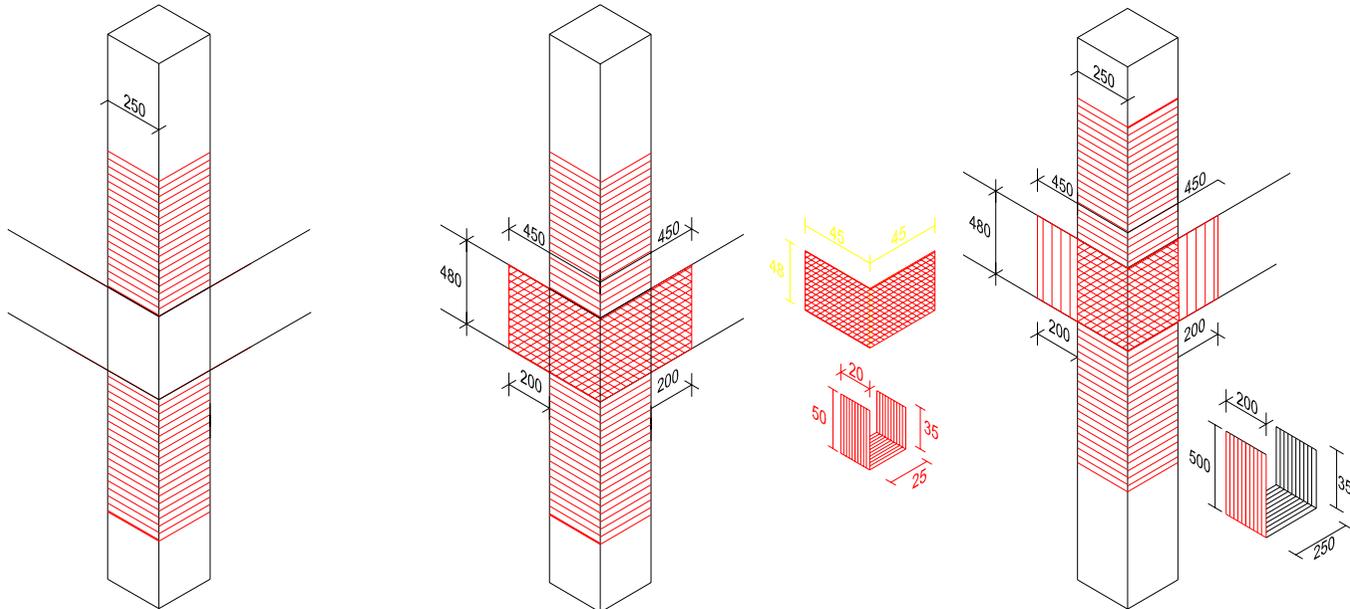
Rinforzo nodi di vertice C2 C5 C7 C8:

2 strati di tessuto

Quadriassiale + U-wrap unidirezionale (rinforzo a taglio trave)



a) Rinforzo del nodo b) Pannello di nodo c) U-wrap trave



Struttura Rinforzata

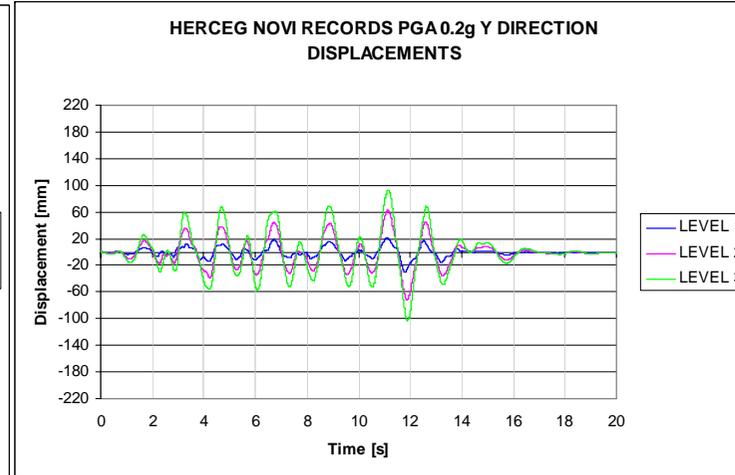
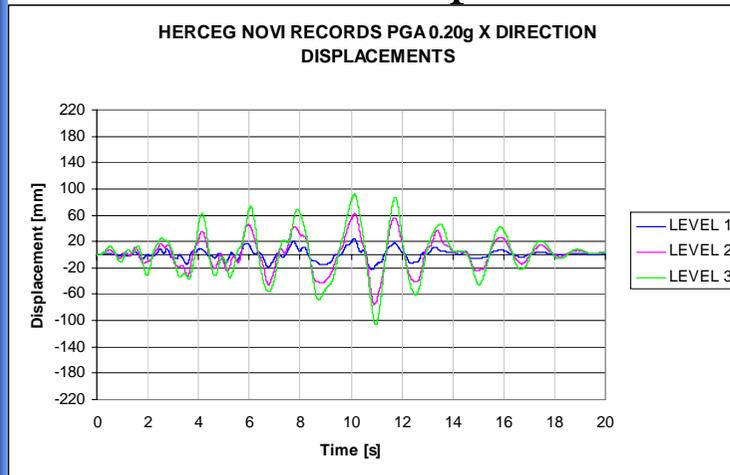


Struttura rinforzata: 0.3g input



Struttura non rinforzata: 0.2g input

- Time histories spostamento CM



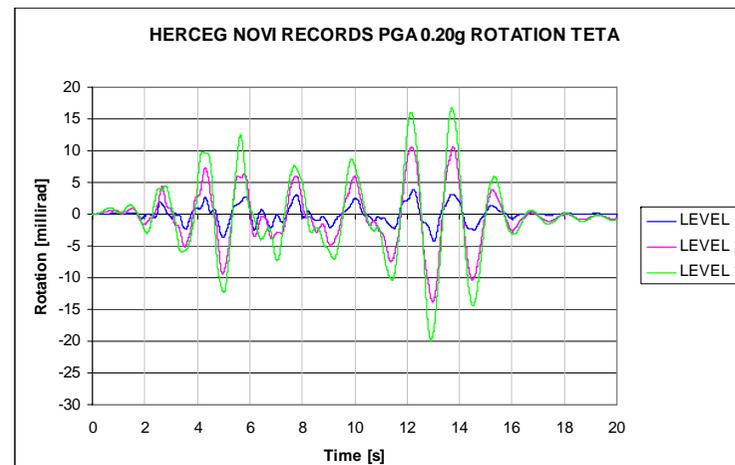
Spostamenti massimi:

circa **100** mm in direzione X

circa **100** mm in direzione Y

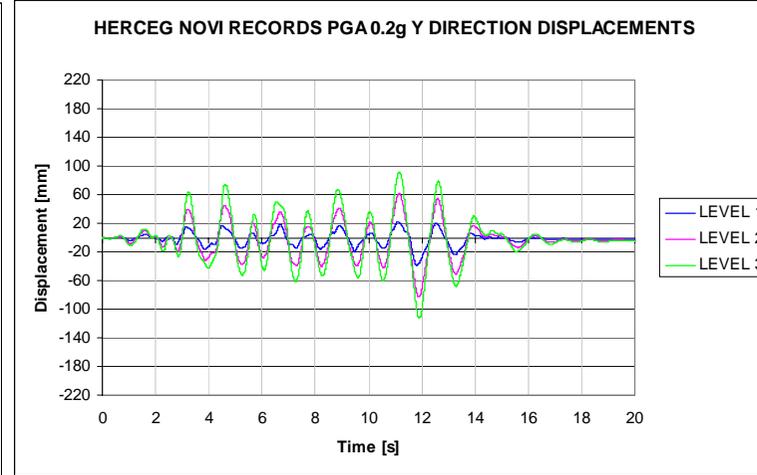
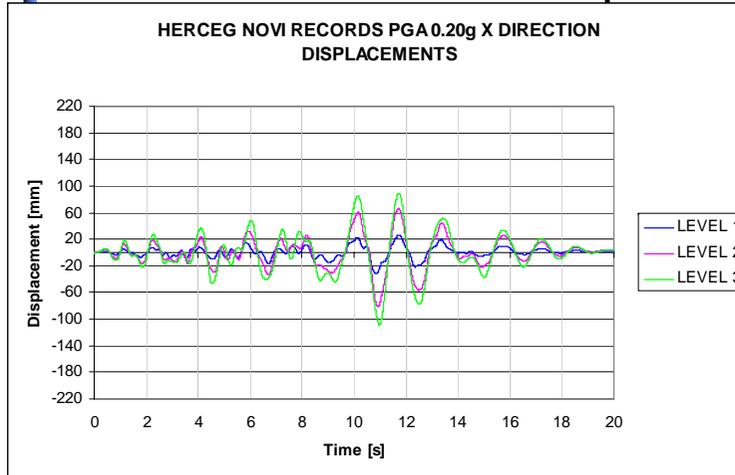
Rotazione massima:

circa **20** mrad



Struttura rinforzata: 0.2g input

- Time histories spostamento CM



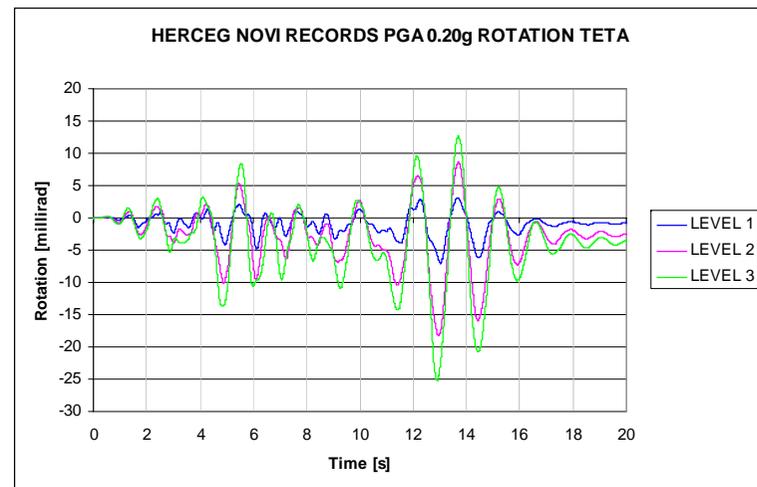
Spostamenti massimi:

circa **110** mm in direzione X

circa **120** mm in direzione Y

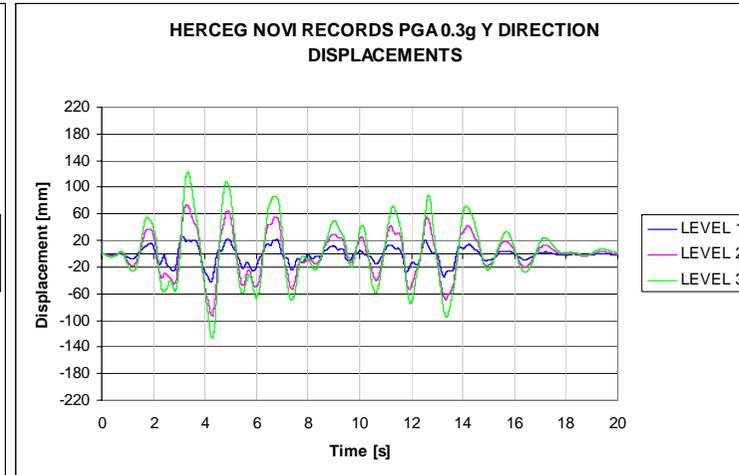
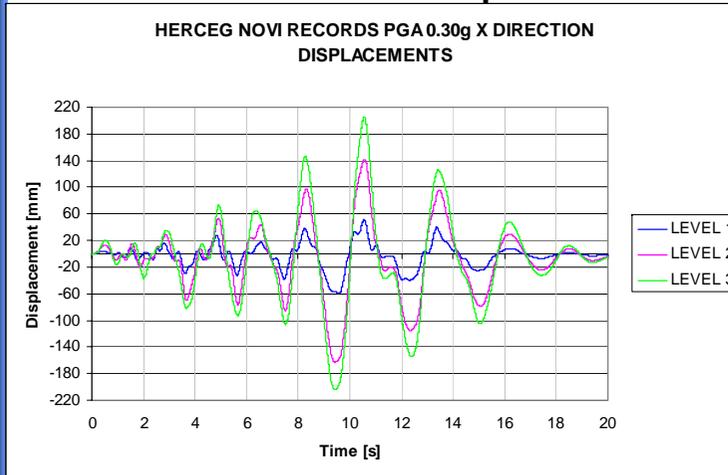
Rotazione massima:

circa **25** mrad



Struttura rinforzata: 0.3g input

- Time histories spostamento CM



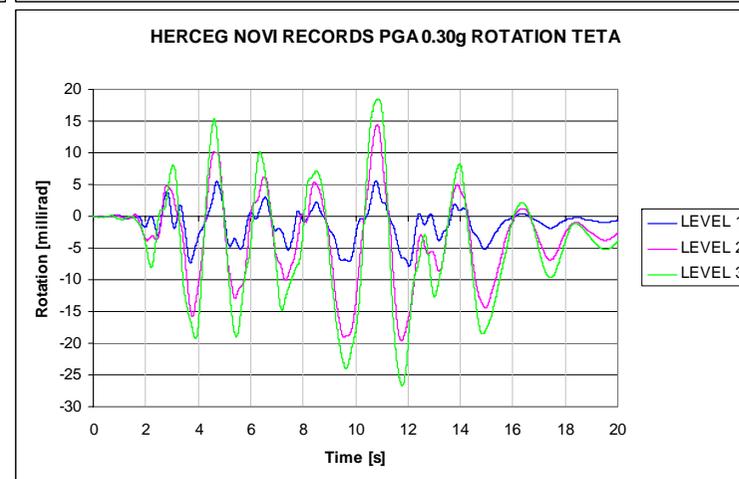
Spostamenti massimi:

circa **220** mm in direzione X

circa **140** mm in direzione Y

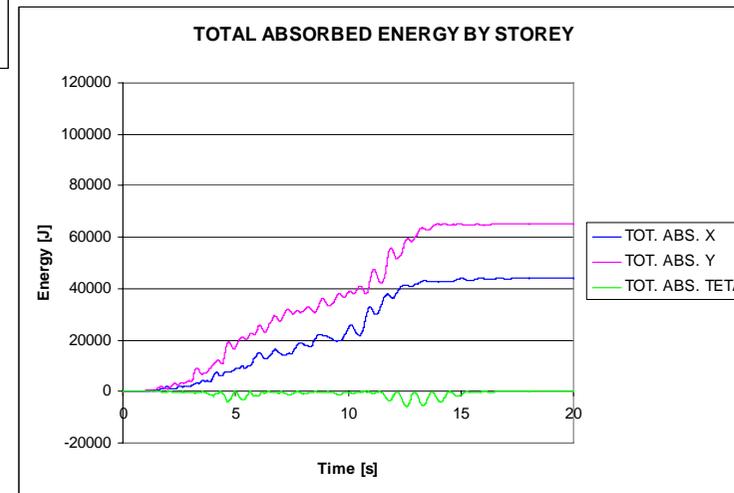
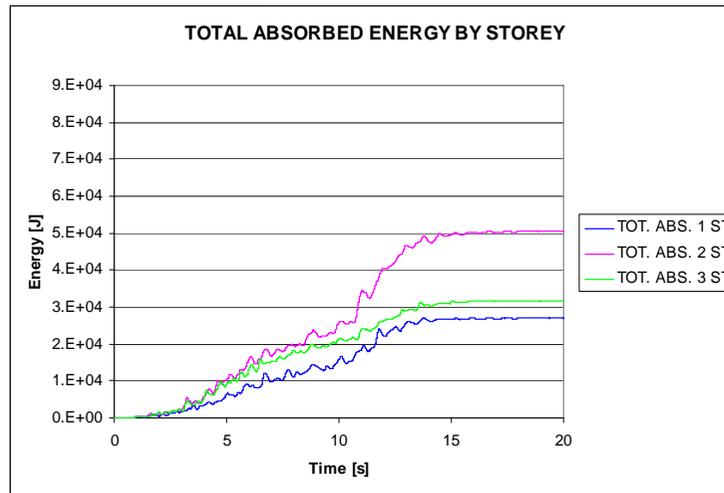
Rotazione massima:

circa **25** mrad



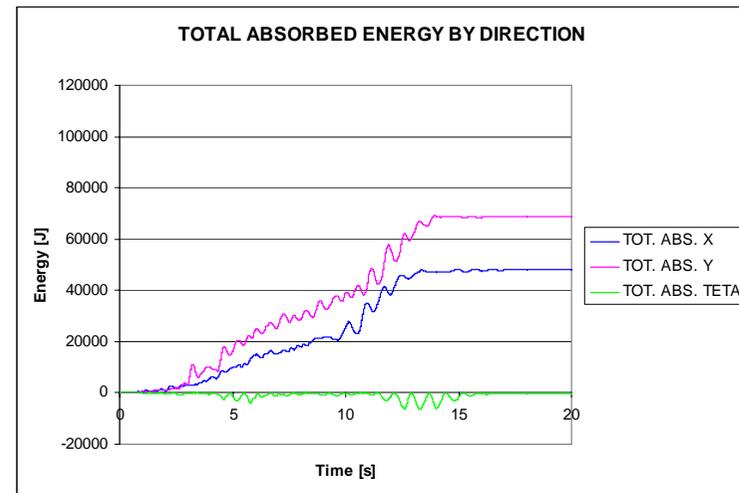
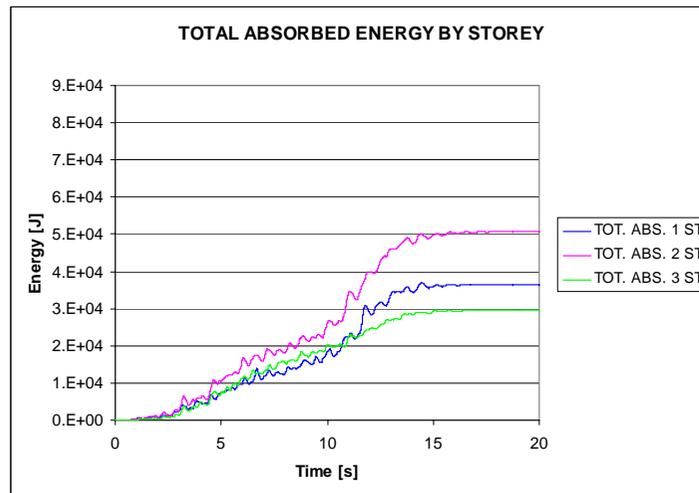
Struttura non rinforzata: 0.2g input

- Energia Totale Assorbita per piano e direzione



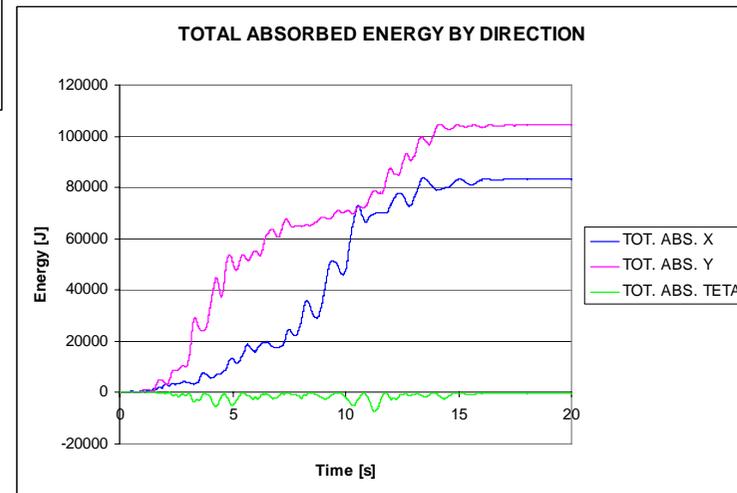
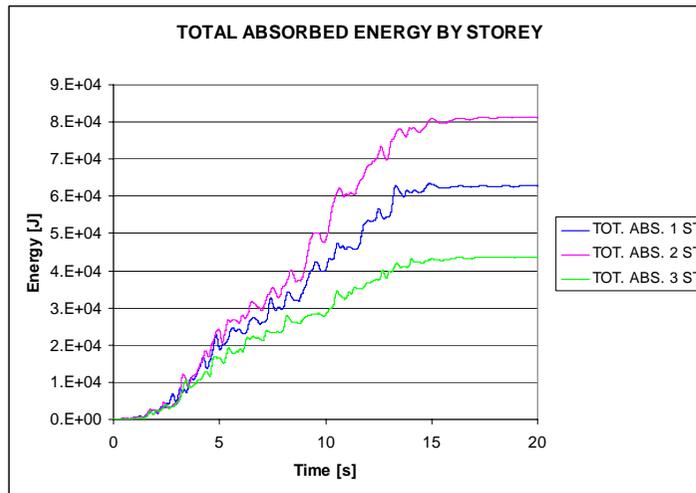
Struttura rinforzata: 0.2g input

- Energia Totale Assorbita per piano e direzione



Struttura rinforzata: 0.3g input

- Energia Totale Assorbita per piano e direzione



Risultati Sperimentali

Massimi spostamenti di interpiano

PIANO /TEST	PIANO 1		PIANO 2		PIANO 3	
	0.20g PGA NON RINFORZAT A	X DIR. (mm)	24.6	X DIR. (mm)	57.1	X DIR. (mm)
Y DIR. (mm)		30.6	Y DIR. (mm)	47.2	Y DIR. (mm)	32.6
θ ROT. (mrad)		4.3	θ ROT. (mrad)	10.0	θ ROT. (mrad)	7.3
0.20g PGA FRP	X DIR. (mm)	32.1	X DIR. (mm)	55.4	X DIR. (mm)	34.3
	Y DIR. (mm)	39.7	Y DIR. (mm)	47.6	Y DIR. (mm)	31.1
	θ ROT. (mrad)	7.1	θ ROT. (mrad)	12.1	θ ROT. (mrad)	7.8
0.30g PGA FRP	X DIR. (mm)	59.5	X DIR. (mm)	106.0	X DIR. (mm)	63.5
	Y DIR. (mm)	42.3	Y DIR. (mm)	55.9	Y DIR. (mm)	50.7
	θ ROT. (mrad)	7.8	θ ROT. (mrad)	13.4	θ ROT. (mrad)	7.4

Risultati Sperimentali

Massimi taglianti di piano

TEST/PIANO	PIANO 1		PIANO 2		PIANO 3	
0.20g PGA NON RINFORZATA	X DIR. (kN)	193	X DIR. (kN)	165	X DIR. (kN)	110
	Y DIR. (kN)	274	Y DIR. (kN)	213	Y DIR. (kN)	166
	θ ROT. (kNm)	955	θ ROT. (kNm)	728	θ ROT. (kNm)	709
0.20g PGA FRP	X DIR. (kN)	208	X DIR. (kN)	163	X DIR. (kN)	112
	Y DIR. (kN)	286	Y DIR. (kN)	258	Y DIR. (kN)	171
	θ ROT. (kNm)	1070	θ ROT. (kNm)	817	θ ROT. (kNm)	716
0.30g PGA FRP	X DIR. (kN)	190	X DIR. (kN)	168	X DIR. (kN)	122
	Y DIR. (kN)	277	Y DIR. (kN)	276	Y DIR. (kN)	102
	θ ROT. (kNm)	1000	θ ROT. (kNm)	801	θ ROT. (kNm)	631

Conclusioni



▪L'intervento con materiali compositi ha consentito un notevole miglioramento della capacità deformativa globale della struttura incrementando la duttilità delle cerniere plastiche e prevenendo la formazione di meccanismi di collasso fragile

Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

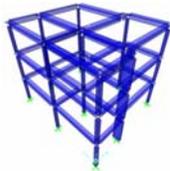
Un problema decisionale Multi-Criterio

- Numerosi possibili interventi, tradizionali ed innovativi.
- Differenti 'prestazioni' degli interventi rispetto ai numerosi criteri di giudizio, socio-economici e tecnici.
- Criteri generalmente conflittuali: non esiste una soluzione che li soddisfi tutti contemporaneamente. La scelta può non essere immediata.
- Opportunità applicazione metodi decisionali multi-criterio per la selezione della "migliore" alternativa di retrofit. Migliore rispondenza globale ai criteri.

Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

Applicazione:
Edificio SPEAR

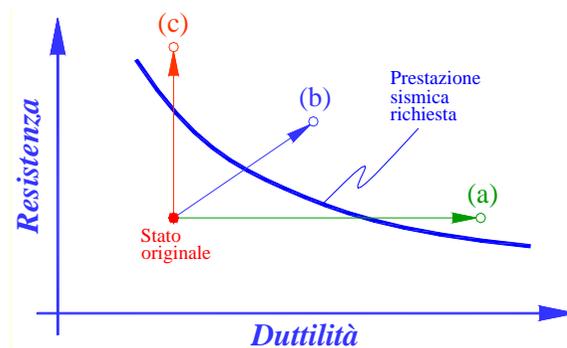


Domanda > Capacità !

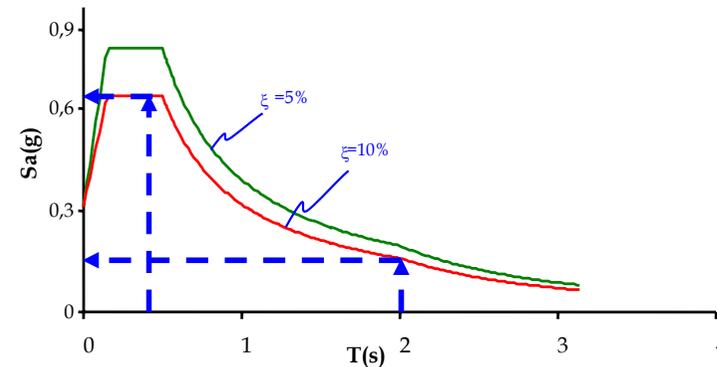
Adeguamento sismico

Selezione *strategia*

INCREMENTO CAPACITA'



RIDUZIONE DOMANDA



Selezione *tecnica*
di adeguamento

(a) Rinforzo con GFRP

A₁

(c) Rinforzo con controventi metallici

A₂

(b) Ringrosso in c.a. di alcuni pilastri

A₃

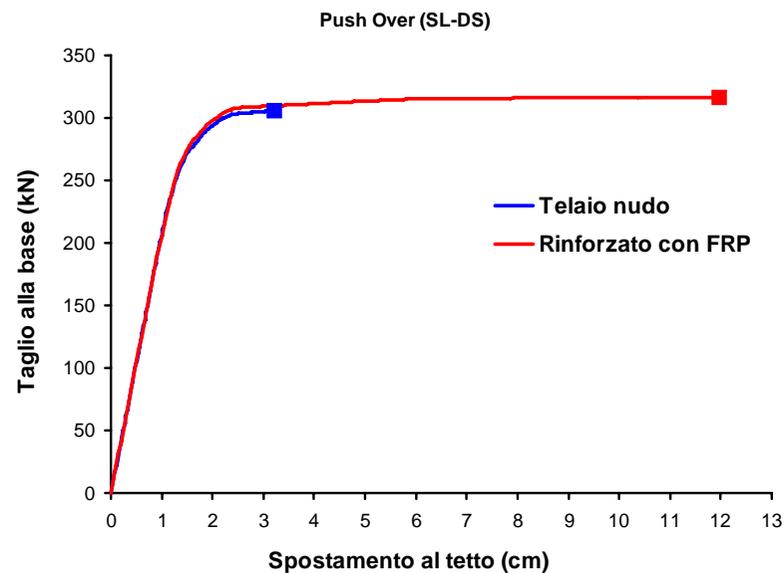
Isolamento alla base **A₄**

Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

Alternativa A₁: rinforzo con fibre di vetro (GFRP)

SCOPO: miglioramento della capacità deformativa globale della struttura.

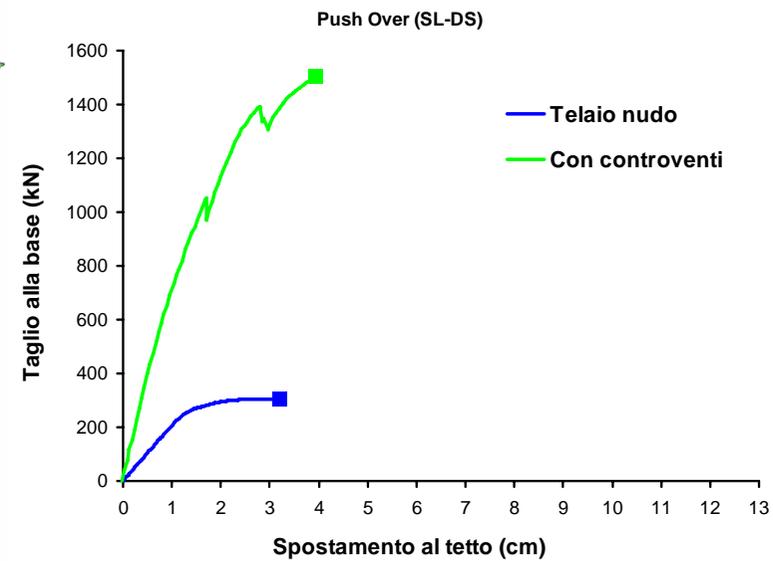
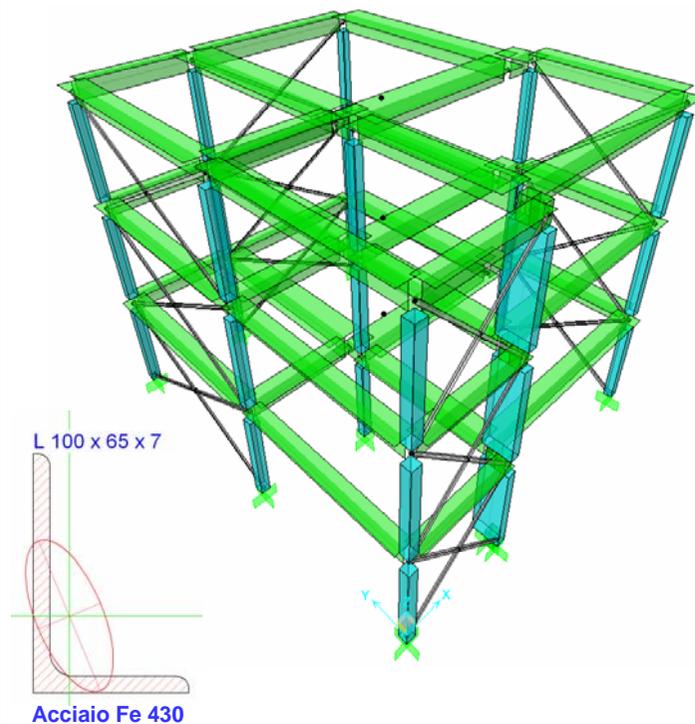


Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

Alternativa A₂: rinforzo con controventi concentrici in acciaio

SCOPO: "ricentraggio" rigidezze. Incremento resistenza globale.

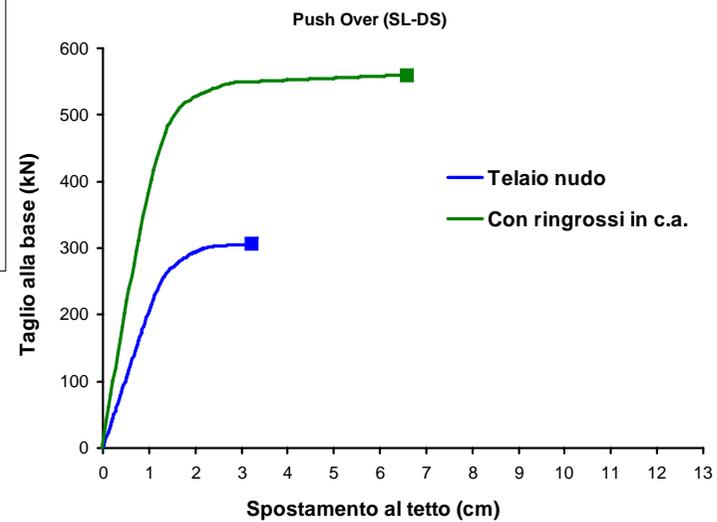
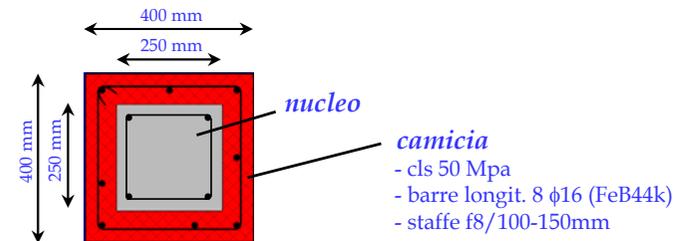
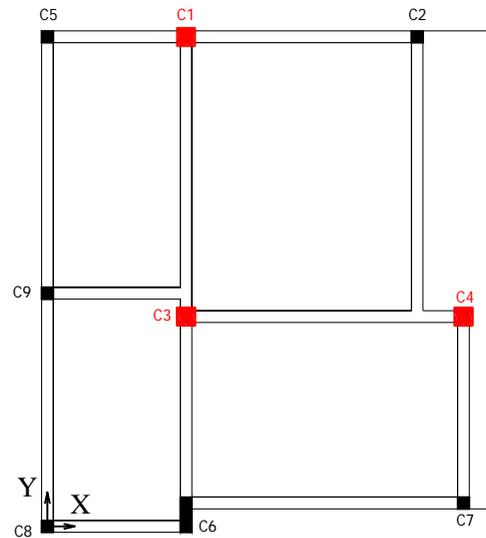


Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

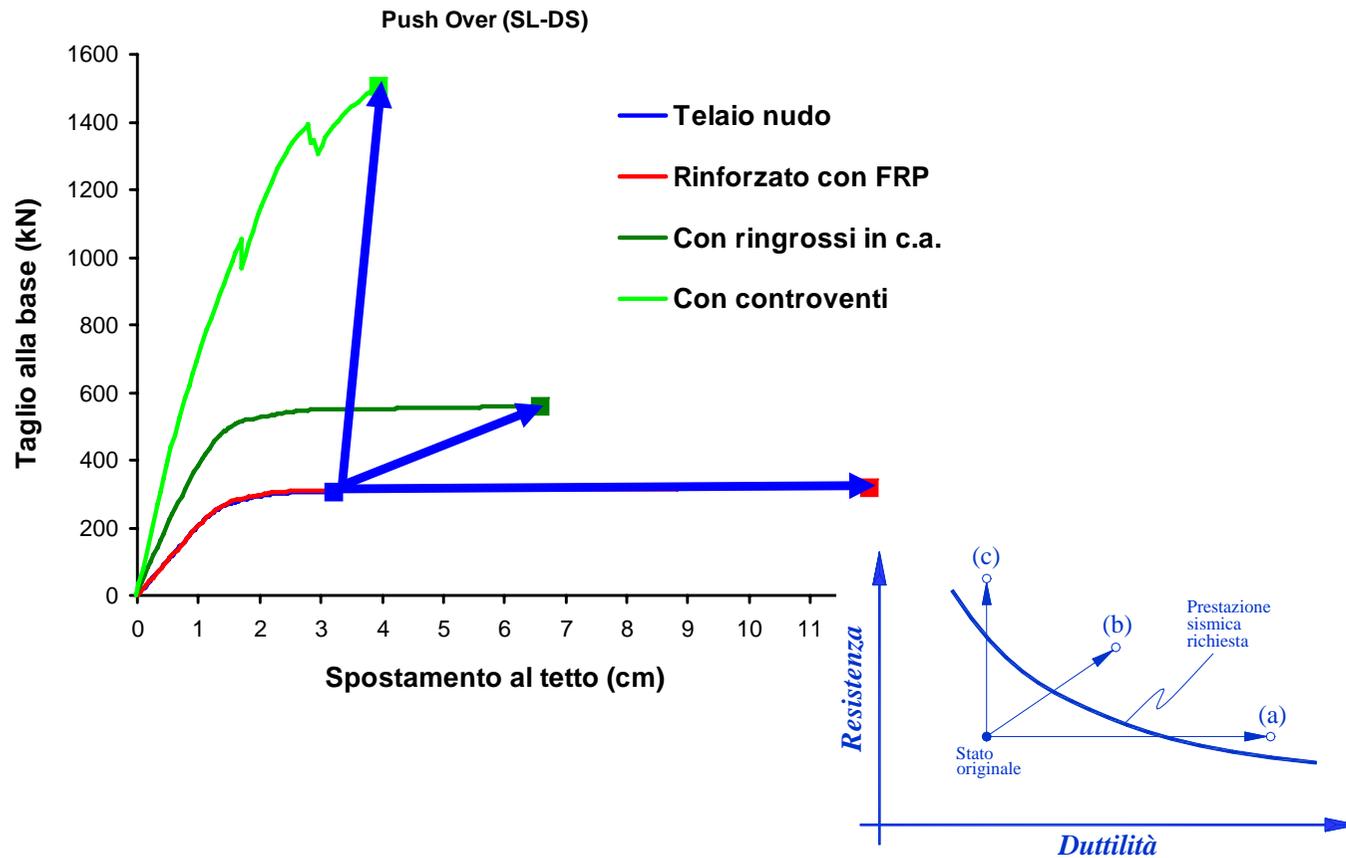
Alternativa A₃: ringrosso in c.a. di pilastri esistenti

SCOPO: "ricentraggio" rigidezze e resistenze. Incremento resistenza e duttilità.



Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio



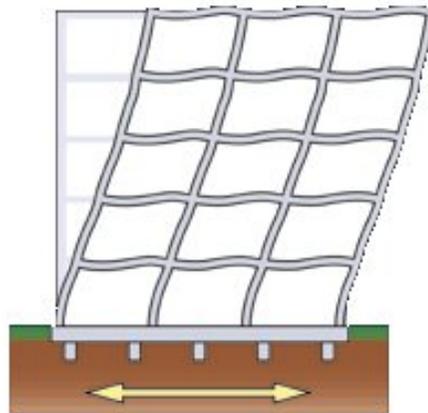
Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

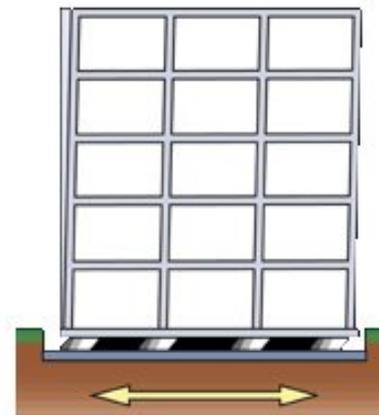
Alternativa A₄: isolamento alla base

SCOPI - Allungamento periodo proprio di vibrazione
- Incremento capacità dissipativa

PRINCIPALI EFFETTI - Riduzione accelerazioni → forze di inerzia sulla sovrastruttura
- Riduzione degli spostamenti di interpiano



Struttura non isolata



Struttura isolata

Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

Alternativa A₄: isolamento alla base

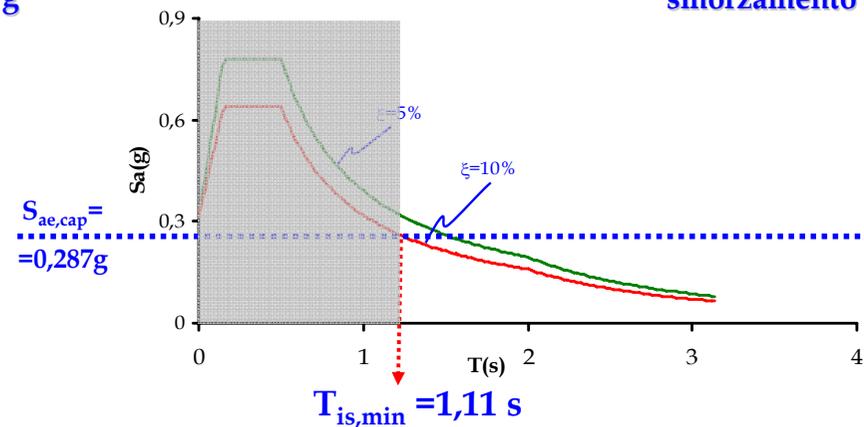
Capacità sismica sovrastruttura

Accelerazione spettrale elastica (pushover)

$$S_{ae, cap} = 0,287 \text{ g}$$

Domanda sismica

Spettro di accelerazione elastica in zona 2, smorzamento $\xi = 10\%$



$$K_{is, max} = \left(\frac{2\pi}{T_{is, min}} \right)^2 \cdot M = 7611 \text{ [t/s}^2\text{]}$$

Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

Alternativa A₄: isolamento alla base

Scelta dei dispositivi di isolamento

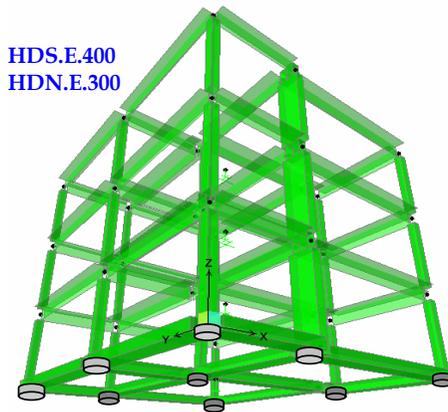
- Dispositivi in gomma armata ad alto smorzamento (High Damping Rubber Bearing, HDRB), smorzamento relativo $\xi=10\%$
- 2 TIPI: HDS.E.400 (mescola morbida, $G = 0,4 \text{ N/mm}^2$)
HDN.E.300 (mescola normale, $G = 0,8 \text{ N/mm}^2$)



Criteria di scelta e posizionamento dispositivi

- Sommatoria rigidezza dei dispositivi $\leq K_{is,max} = 7611 \text{ t/s}^2$
- Adeguata capacità di resistenza allo sforzo normale di progetto
- 'Ricentraggio' delle rigidezze: baricentro masse/baricentro rigidezze

○ HDS.E.400
○ HDN.E.300

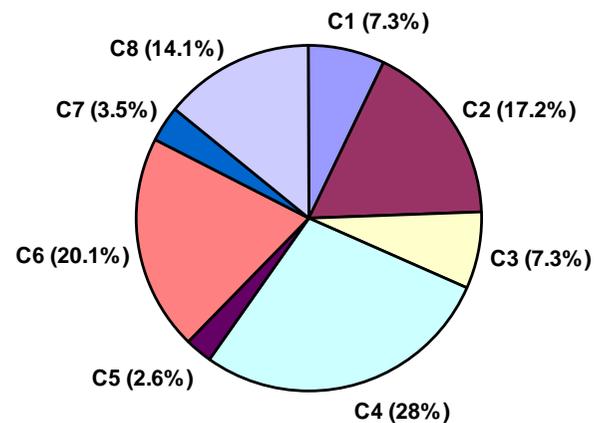


Selezione dell'intervento di adeguamento sismico Un problema decisionale Multi-Criterio

CRITERI DI GIUDIZIO

CRITERI SOCIO-ECONOMICI	CRITERI TECNICI
<ul style="list-style-type: none">➤ C₁: Costo di installazione➤ C₂: Costi di manutenzione➤ C₃: Durata lavori / disturbo uso edificio➤ C₄: Compatibilità funzionale	<ul style="list-style-type: none">➤ C₅: Specializzazione manodopera necessaria➤ C₆: Entità intervento in fondazione richiesto➤ C₇: Rischio di Danno Severo➤ C₈: Rischio di Danno Limitato

“PESI” DEI CRITERI



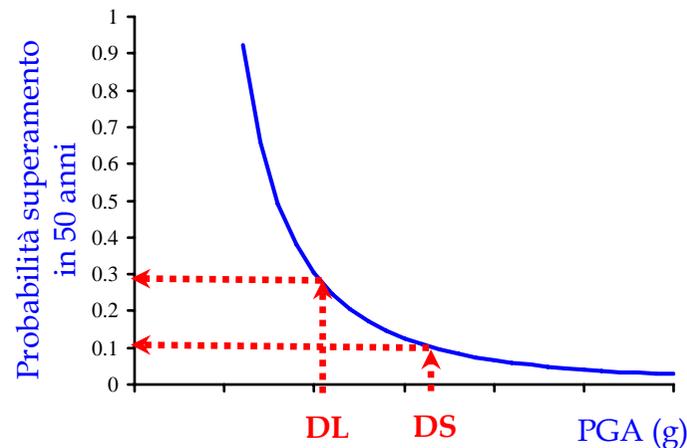
Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

CRITERI DI GIUDIZIO

CRITERI SOCIO-ECONOMICI	CRITERI TECNICI
<ul style="list-style-type: none">➤ C₁: Costo di installazione➤ C₂: Costi di manutenzione➤ C₃: Durata lavori / disturbo uso edificio➤ C₄: Compatibilità funzionale	<ul style="list-style-type: none">➤ C₅: Specializzazione manodopera necessaria➤ C₆: Entità intervento in fondazione richiesto➤ C₇: Rischio di Danno Severo➤ C₈: Rischio di Danno Limitato

Criteria C₇ e C₈:
Confronto delle alternative in termini di riduzione di Rischio Sismico indotta



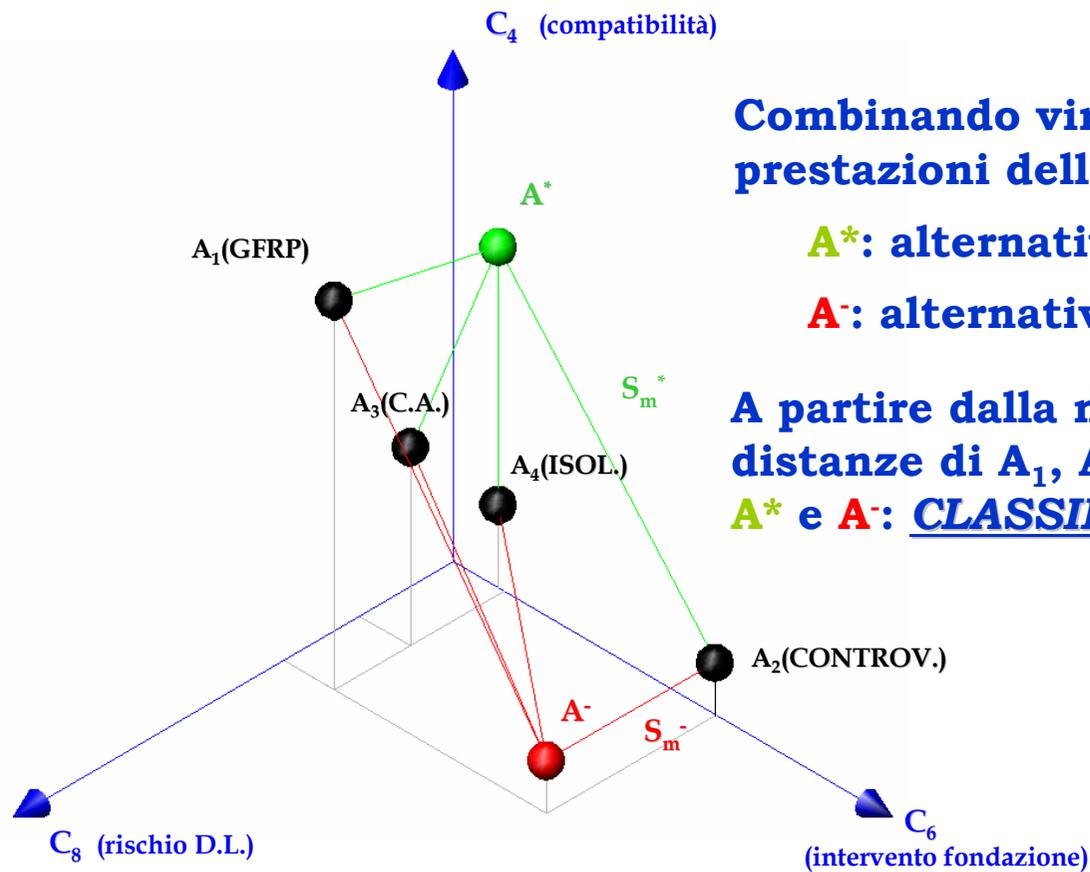
Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

- **Valutate** le 4 alternative rispetto agli 8 criteri
- **Adimensionalizzate e pesate** tali misure

Ogni alternativa può essere geometricamente rappresentata come un punto nello spazio ad 8 dimensioni dei criteri di valutazione

Selezione dell'intervento di adeguamento sismico Un problema decisionale Multi-Criterio



Combinando virtualmente le prestazioni delle 4 alternative:

A^* : alternativa ideale

A^- : alternativa pessima

A partire dalla misura delle distanze di A_1 , A_2 , A_3 , A_4 da A^* e A^- : CLASSIFICA

Selezione dell'intervento di adeguamento sismico Un problema decisionale Multi-Criterio

CLASSIFICA DELLE ALTERNATIVE DI ADEGUAMENTO SISMICO

		Score*	
GFRP	A ₁	<u>0.70</u>	I
Controv. acciaio	A ₂	<u>0.30</u>	IV
Ringrossi in c.a.	A ₃	<u>0.60</u>	II
Isolatori	A ₄	<u>0.48</u>	III

*Lo score **1** corrisponde alla soluzione ideale

Selezione dell'intervento di adeguamento sismico

Un problema decisionale Multi-Criterio

CONCLUSIONI

- Occorre scegliere in modo oculato l'intervento da adottare, considerando non solo le **prestazioni strutturali post-intervento**, ma anche tutti gli altri aspetti (v. **costi, tempi, ecc.**) significativi per il **decisore** (es. proprietario).
- Non esiste un'alternativa di adeguamento **migliore** in senso assoluto. La selezione è strettamente dipendente dal particolare caso in esame.
- Le **procedure decisionali multi-criterio**, applicate allo specifico caso di interesse, possono fornire un valido **supporto** alla selezione dell'intervento di adeguamento sismico di un edificio.