



MODULO III

Criteri per la Misurazione del Miglioramento e
dell'Adeguamento Sismici



Esiste un responsabile?

Il comportamento delle strutture in CEMENTO ARMATO in condizioni di scuotimento sismico - Meccanismi di danno

1. Quadro storico normativo nazionale
2. Alcune osservazioni preliminari
3. Proprietà delle strutture in c.a.
4. Elementi principali sede del danno
5. Principali meccanismi
6. Alcuni esempi di rotture strutturali:
 - i. meccanismi globali
 - ii. meccanismi locali:
 - a. meccanismi duttili
 - b. meccanismi fragili

Quadro storico normativo



- ✓ L'ingegneria sismica in Italia è stata introdotta sistematicamente negli anni '70.
- ✓ Le norme sismiche hanno trovato **diffusa applicazione** a partire dai primi anni '80, a seguito della vasta operazione di classificazione del territorio conseguente al sisma del 23 novembre 1980 (i.e. Terremoto dell'Irpinia: colpì la Campania centrale e la Basilicata centro-settentrionale).
- ✓ La maggior parte del costruito esistente in Italia risulta progettato senza esplicito riferimento a normative sismiche.



- ✓ Gli stessi edifici progettati in accordo alle prime normative hanno sofferto/soffriranno l'azione sismica in quanto **queste trascuravano alcuni aspetti fondamentali**:
 - Intensità sismica spesso maggiore di quella di progetto,
 - Carattere dinamico della risposta sismica,
 - ...
- ✓ I danneggiamenti e i crolli delle strutture in c.a. sono il frutto delle conoscenze all'epoca della costruzione e, molto spesso, dell'inerzia nel recepire nuovi concezioni strutturali e metodi di calcolo.
- ✓ I livelli di prestazione delle strutture esistenti in c.a. sotto sisma severo sono molto distanti dai livelli imposti dalle ultime normative.

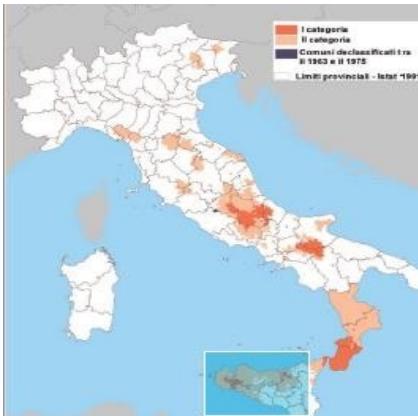




Si posso distinguere sostanzialmente 4 periodi:

✓ 1° periodo 1937-1962

- dall'entrata in vigore R. D. 22/11/1937 n. 2105, «Norme tecniche di edilizia con speciali prescrizioni per le località colpite dai terremoti» alla L. n. 1684 del 25/11/1962 “Provvedimenti per l'edilizia, con particolari prescrizioni per le zone sismiche”.



✓ 2° periodo 1962-1975 (meglio 1980 con il terremoto dell'Irpinia)

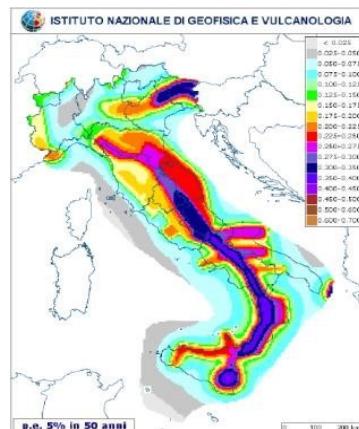
- dall'entrata in vigore della L. n. 1684 del 25/11/1962 al D.M. 3/3/1975 «"Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche"»
 - o Il D.M. 3/3/1975 ha introdotto l'analisi statica equivalente e l'analisi dinamica.

Quadro storico normativo: Norme sismiche

Si posso distinguere sostanzialmente 4 periodi:



- ✓ 3° periodo 1980-2003 (dopo i terremoti Friulano e Irpino)
 - dall'entrata in vigore dei D.M. 7 marzo 1981, D.M. 3 giugno 1981, D.M. 29 febbraio 1984, D.M. 16 gennaio 1996...etc.:
 - hanno costituito la classificazione sismica italiana fino all'emanazione dell' ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003.
- ✓ 4° periodo 2003-oggi (dopo i terremoti Molisano e Aquilano)
 - Ordinanze del Dip. Prot. Civ. (3274, 3361, 3431, etc.)
 - Norme Tecniche per le costruzioni D.M. 14/9/05
 - D.M. 14/1/08 (NTC08) e Circolare n°617 del 2/2/09
 - D.P.C.M. 9/2/11 «Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/1/08» (in applicazione del D-Lgs. N. 42 del 22/1/04 «codice dei beni culturali e del paesaggio»)
 - D.M. 17/1/18 (NTC18) e Circolare n°7 del 21/1/2019.
 - Norme cogenti sono state emesse sia dalla Protezione Civile che dal Ministero, c'è stato un rimbalzo di competenze che si è concluso il 30/6/09 con decreto a seguito del terremoto de L'Aquila



1. Quadro storico normativo nazionale
2. Alcune osservazioni preliminari
3. Proprietà delle strutture in c.a.
4. Elementi principali sede del danno
5. Principali meccanismi
6. Alcuni esempi di rotture strutturali:
 - i. meccanismi globali
 - ii. meccanismi locali:
 - a. meccanismi duttili
 - b. meccanismi fragili

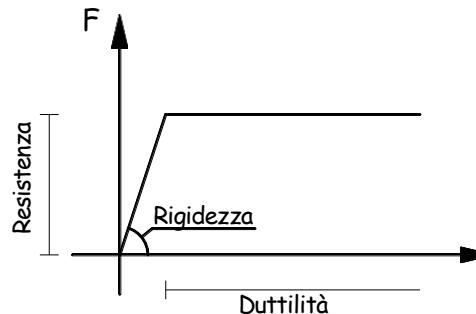
Quantità che governano il comportamento delle strutture in c.a.:

✓ Rigidezza

- è la quantità che mette in relazione i carichi con gli spostamenti quando questi sono ancora in campo elastico:
 - o è di fondamentale importanza fintantoché l'interesse progettuale è posto sul minimizzare i danni di elementi non strutturali sotto terremoti di piccola intensità, poiché a parità di carico imposto i minori spostamenti si verificano su strutture più rigide.

✓ Resistenza

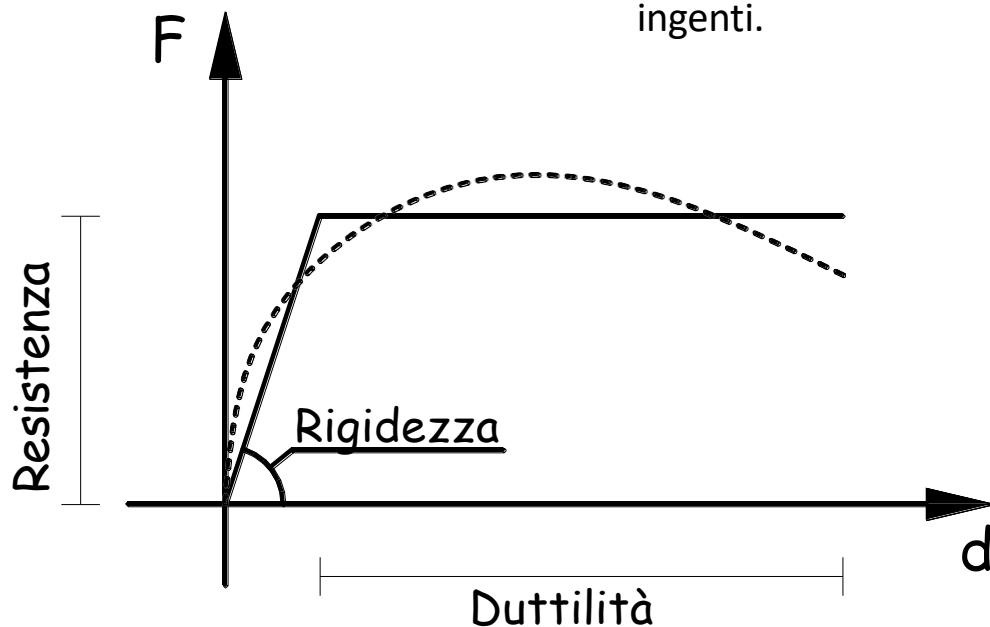
- è la massima forza che la struttura o il singolo elemento possono sopportare:
 - o è di interesse progettuale per terremoti di media intensità, che richiedono limitazioni sugli spostamenti e sulle rotazioni degli elementi o della struttura, così da evitare danneggiamenti ad elementi strutturali e non strutturali (siamo ancora intorno al campo elastico).



Quantità che governano il comportamento delle strutture in c.a.:✓ **Duttilità**

- è la capacità che il generico elemento o l'intera struttura ha di sopportare spostamenti oltre il limite elastico senza un'eccessiva perdita di resistenza:

- o è di interesse principalmente quando si progettano e si verificano le strutture allo Stato Limite Ultimo (SLU), ossia in corrispondenza di terremoti di elevata intensità, per i quali è importante salvare le vite umane anche accettando danni significativi o ingenti.

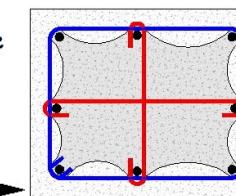
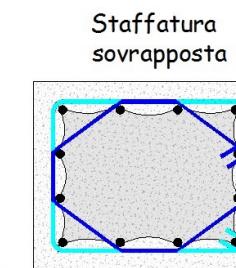
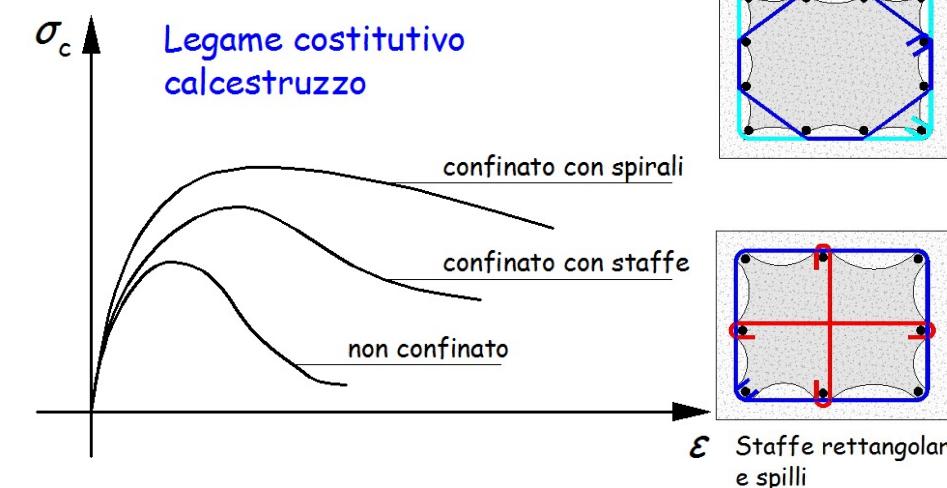
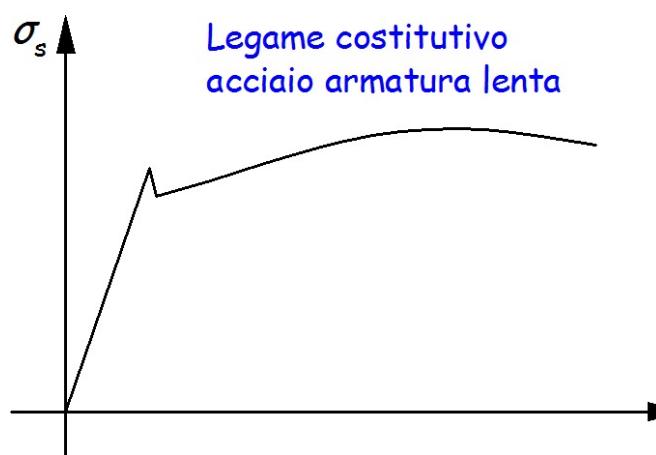


- ✓ Tipico diagramma qualitativo (con l'approssimazione bilineare) di un elemento in c.a., dove sono evidenziate la rigidezza, la resistenza e la duttilità.

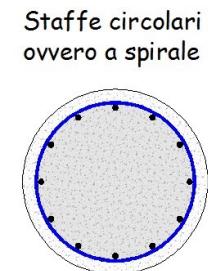
1. Quadro storico normativo nazionale
2. Alcune osservazioni preliminari
3. **Proprietà delle strutture in c.a.**
4. Elementi principali sede del danno
5. Principali meccanismi
6. Alcuni esempi di rotture strutturali:
 - i. meccanismi globali
 - ii. meccanismi locali:
 - a. meccanismi duttili
 - b. meccanismi fragili

La duttilità del materiale

- ✓ I singoli materiali strutturali sono classificati in base alle caratteristiche del **legame costitutivo σ - ϵ** in due categorie:
 - **Duttili**: presentano ampi tratti non lineari prima di arrivare alla rottura.
 - **Fragili**: si rompono in modo improvviso una volta che sia stata raggiunta la propria resistenza massima.



Staffe rettangolari e spilli



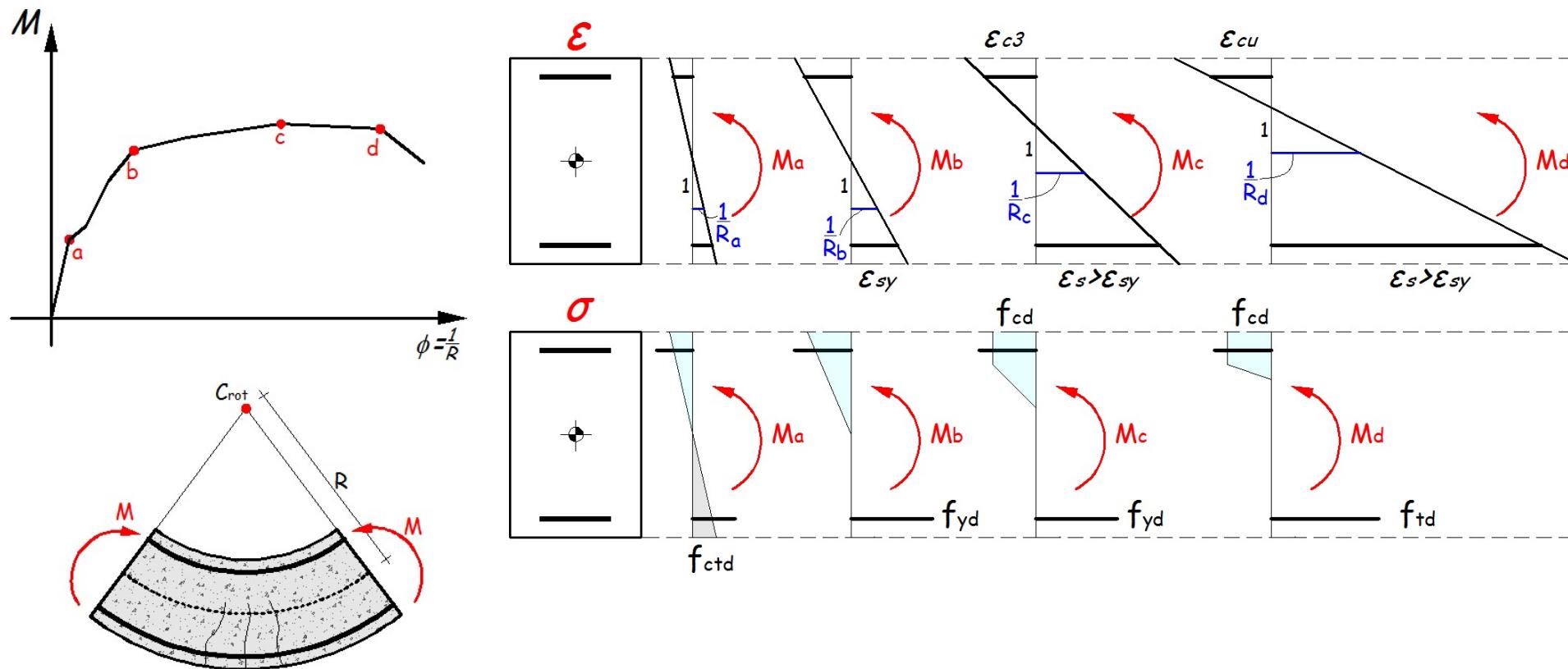
Calcestruzzo confinato



- ✓ la duttilità a livello di materiale si definisce con $\mu_{\text{capacità}} = \epsilon_u / \epsilon_y$; va controllato che $\mu_{\text{capacità}} \geq \mu_{\text{domanda}}$.

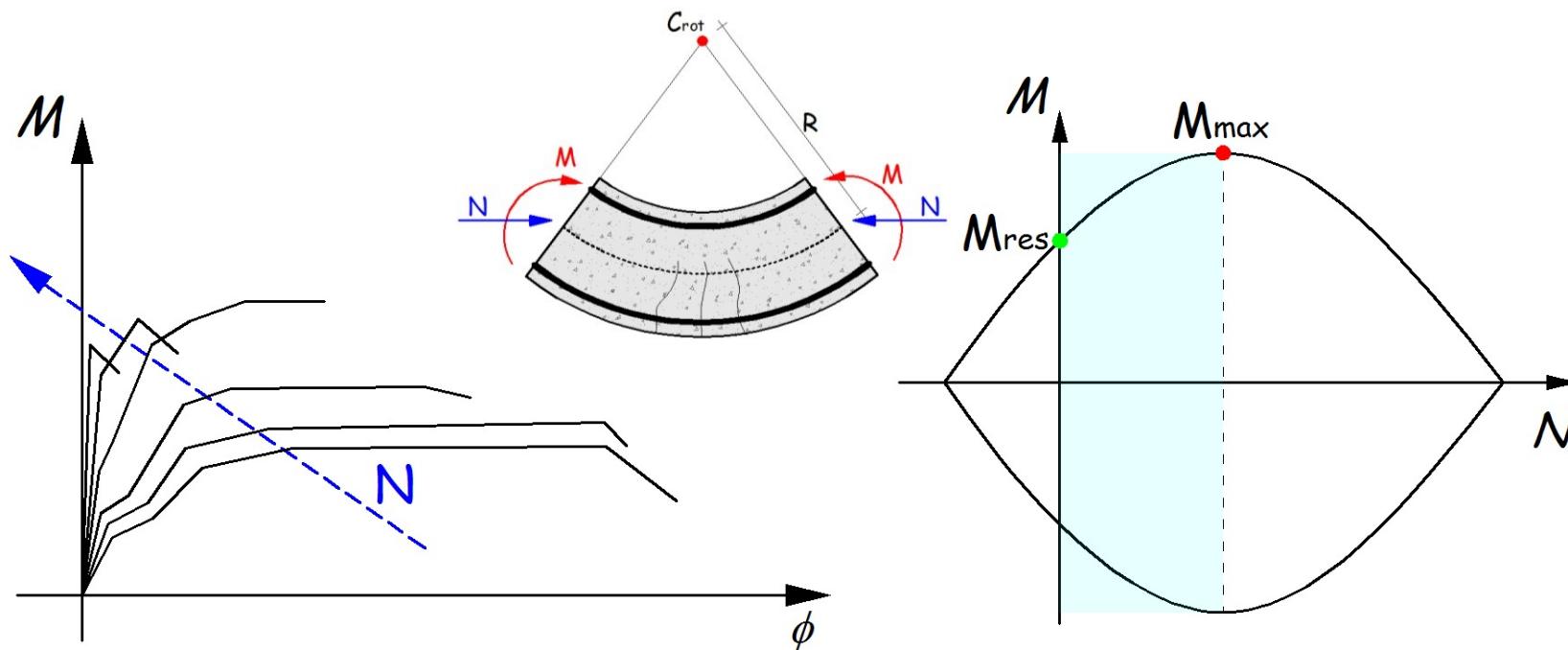
La duttilità della sezione

- ✓ Il comportamento dei materiali si riflette sul comportamento locale degli elementi strutturali descritto dalla legge momento curvatura ($M-\phi$). In una sezione in c.a. sono distinguibili:
- Curvatura allo snervamento: associata allo snervamento dell'acciaio ($\epsilon = \epsilon_{sy} = f_{yd}/E_s$).
 - Curvatura ultima: associata alla deformazione ultima cls ($\epsilon = \epsilon_{cu} = 3,5\%$).



La duttilità della sezione

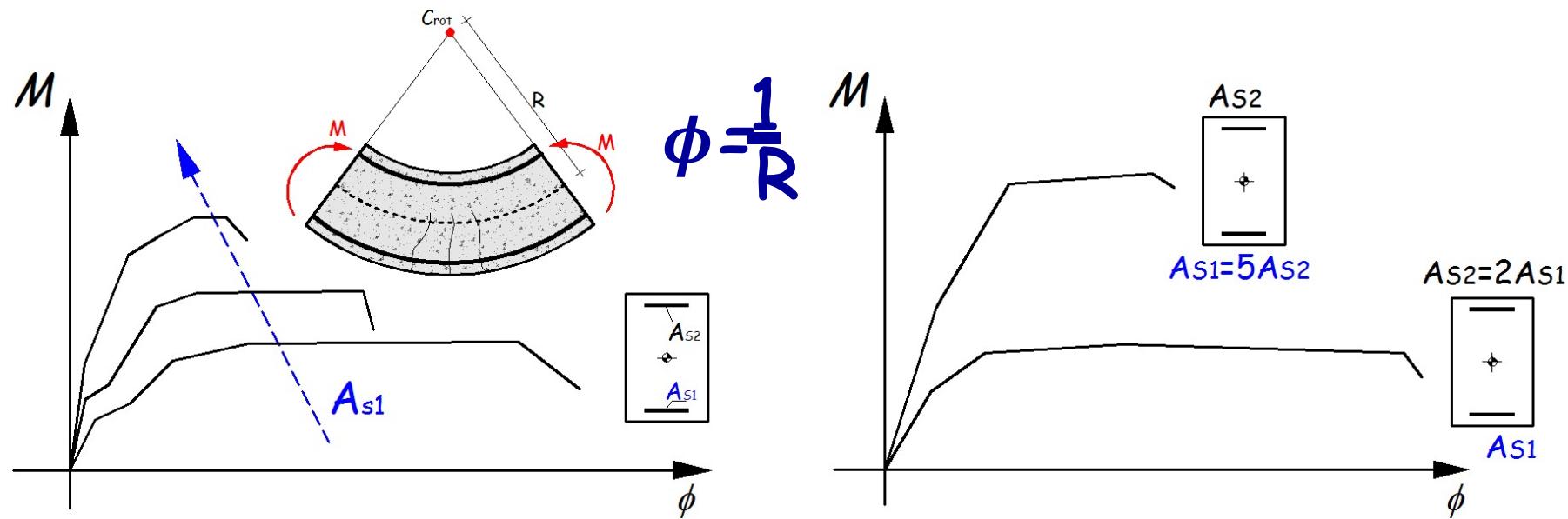
- ✓ A parità di sezione, armatura longitudinale e trasversale, il legame ($M-\phi$) è influenzato dalla **forza assiale**.
 - $N=0,5-0,6N_{Rd}$ si ha un aumento di resistenza e di rigidezza della sezione (la forza di compressione riduce la zona fessurata).
 - Per valori superiori la N accelera il raggiungimento della ϵ_{cu} , riducendo la duttilità.



La duttilità della sezione

- ✓ A parità di sezione, forza assiale e armatura trasversale, il legame ($M-\phi$) è influenzato dalle percentuali di armatura longitudinale tesa.

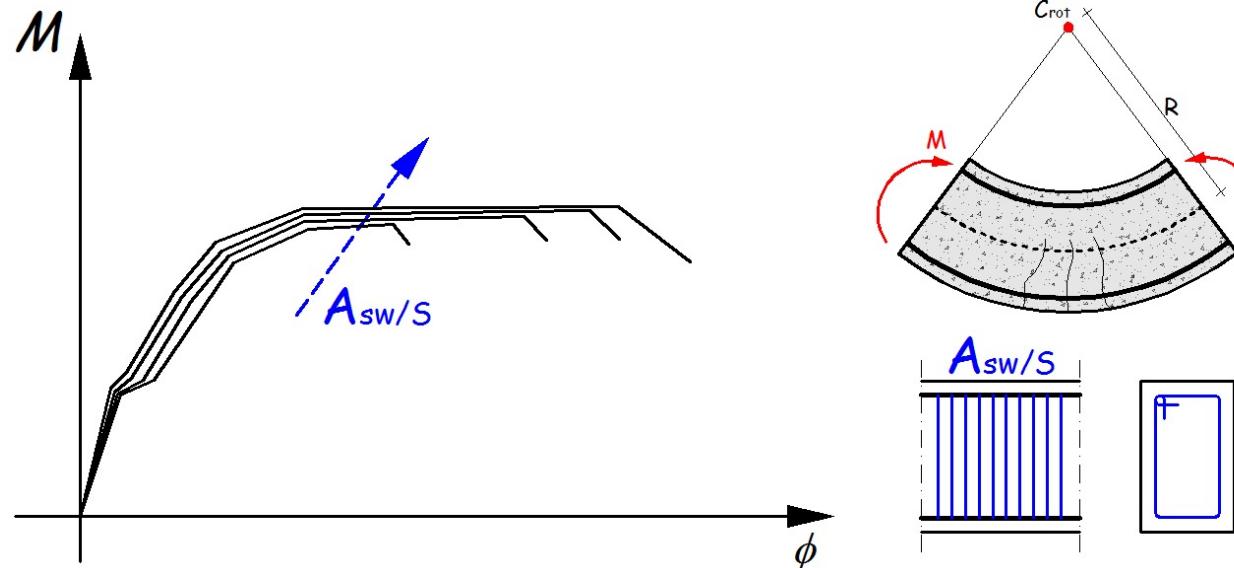
- Aumentando A_{s1} si ha sempre un aumento di M_{Rd} ma si riduce la ϕ_u :
 - o per A_{s1} molto elevate (sezioni fortemente armate) non si snerva l'acciaio e ϵ_{cu} si ottiene per curvature ridotte;
- La presenza dell'armatura compressa mitiga i precedenti effetti.



La duttilità della sezione

- ✓ A parità di sezione, forza assiale e armatura longitudinale, il legame ($M-\phi$) è influenzato dalle percentuali di **armatura trasversale**.

- Aumentando A_{sw}/s si ha sempre un **aumento** di ϕ_u :
 - o incrementa la ϵ_{cu} (per effetto confinamento) lasciando invariato l' M_{Rd} .
- In sezioni fortemente armate, per le quali si verifica la rottura per schiacciamento del calcestruzzo, si ha un incremento dell' M_{Rd} .

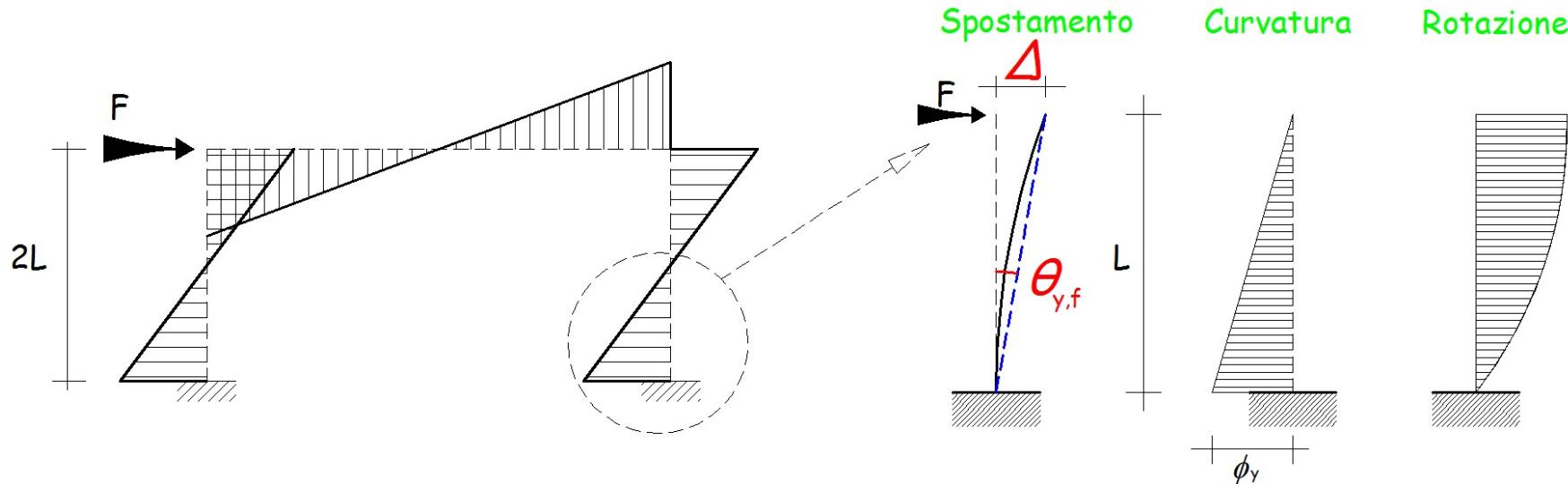


$$\phi = \frac{1}{R}$$

- ✓ Le staffe devono essere ben ancorate nel nucleo.

La duttilità dell'elemento

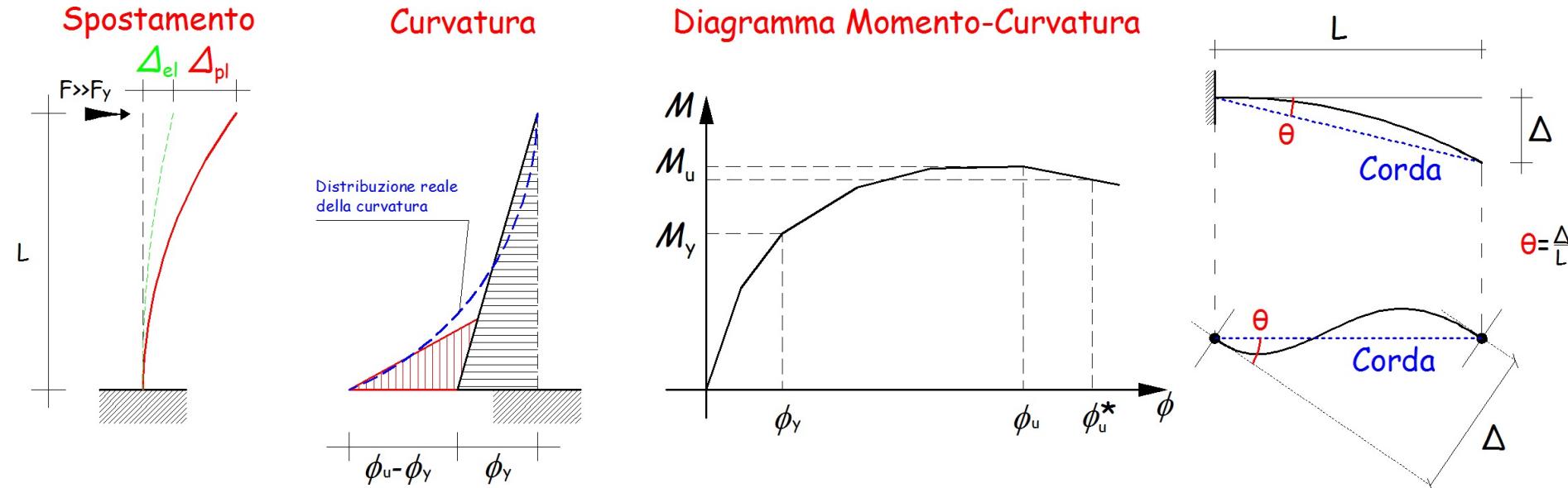
- ✓ La duttilità dell'elemento è funzione della duttilità delle sezioni trasversali che lo compongono:
 - dipenderà dagli stessi parametri, ossia dalle caratteristiche delle armature, dalla loro quantità e disposizione e dal carico assiale agente.



- ✓ La duttilità dell'elemento si può misurare con quantità globali:
 - spostamento Δ di un punto rappresentativo,
 - rotazione θ (il più delle volte rispetto alla corda).

La duttilità dell'elemento

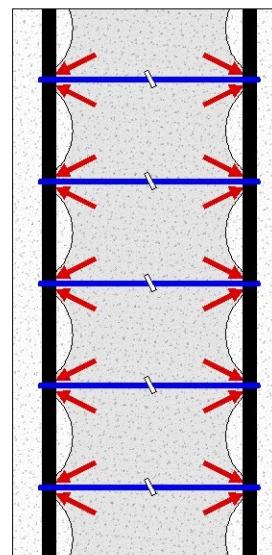
- ✓ La **linearità** tra M e ϕ si perde con la plasticizzazione:
 - c'è una **concentrazione della curvatura** nell'intorno della sezione dove $M > M_y$,
 - la **diffusione del tratto anelastico** è funzione dell'incrudimento dell'armatura.



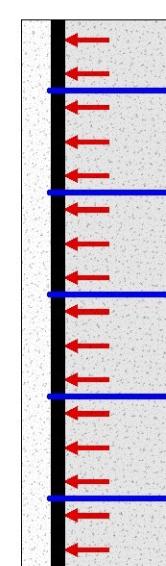
- ✓ Lo spostamento in testa finale sarà la somma del contributo elastico e di quello anelastico.

La duttilità dell'elemento

- ✓ Il $\theta_y = \Delta_y / L$ è associato allo snervamento delle armature.
- ✓ Il $\theta_u = \Delta_u / L$ è associato allo schiacciamento del calcestruzzo o alla instabilità dell'armatura longitudinale.



Confinamento delle armature trasversali



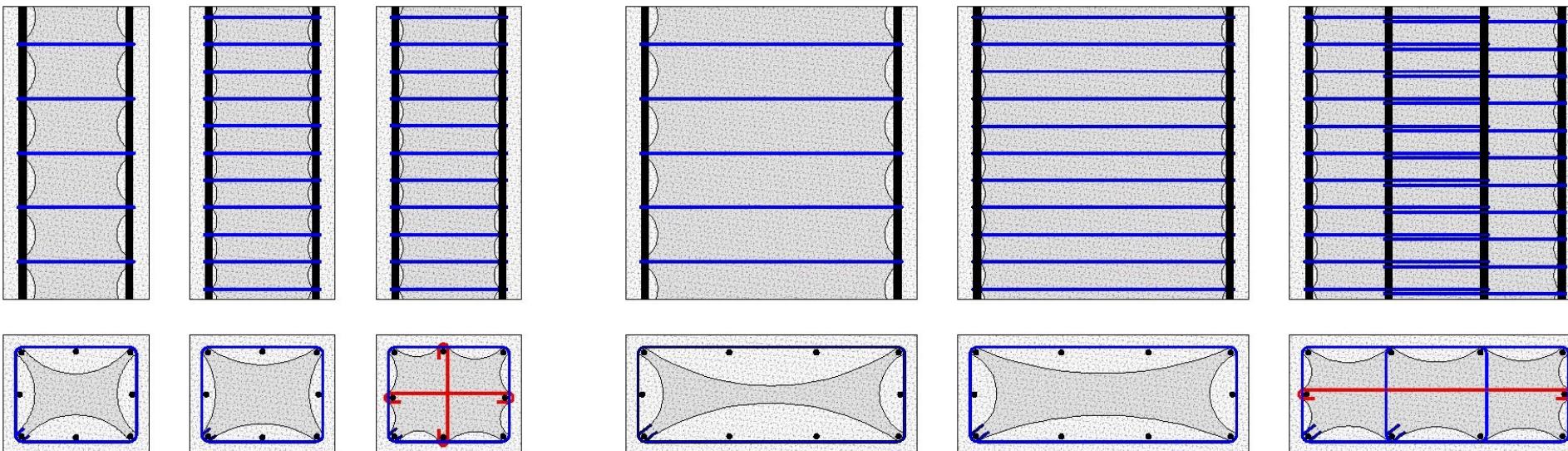
Confinamento delle armature longitudinali

- ✓ Una **staffatura** con un **buon passo** può **migliorare le prestazioni ultime**:
 - confinando il calcestruzzo interno,
 - limitando la **lunghezza libera di inflessione** delle **barre longitudinali** (molto importante una volta che il copriferro è stato espulso sotto elevate compressioni dell'elemento).

La duttilità dell'elemento

✓ Affinché il **confinamento** sia **efficace** è necessario che le staffe siano:

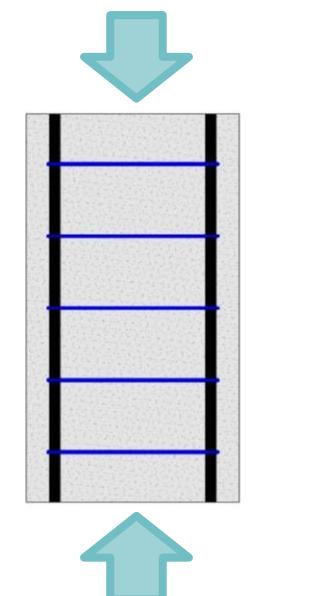
- **ancorate nel nucleo** di calcestruzzo,
- con un **passo** **sufficientemente fitto**,
- ogni **barra longitudinale** sia **interessata** da un **braccio** di una staffa o da uno **spillo**.



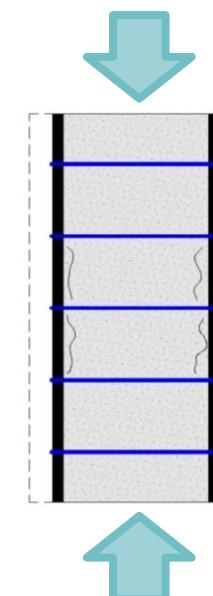
La duttilità dell'elemento

✓ Se il **confinamento** non è efficace, per forze di compressione crescenti, si potrà avere:

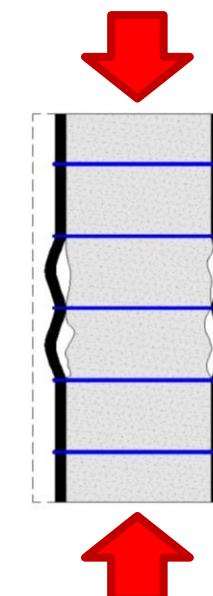
- **espulsione del copriferro** (calcestruzzo non confinato),
- **sbandamento delle barre longitudinali** se le staffe, oltre a non essere chiuse, sono disposte con passo elevato. Da qui in poi le barre perdono completamente la loro capacità portante.



Elemento integro



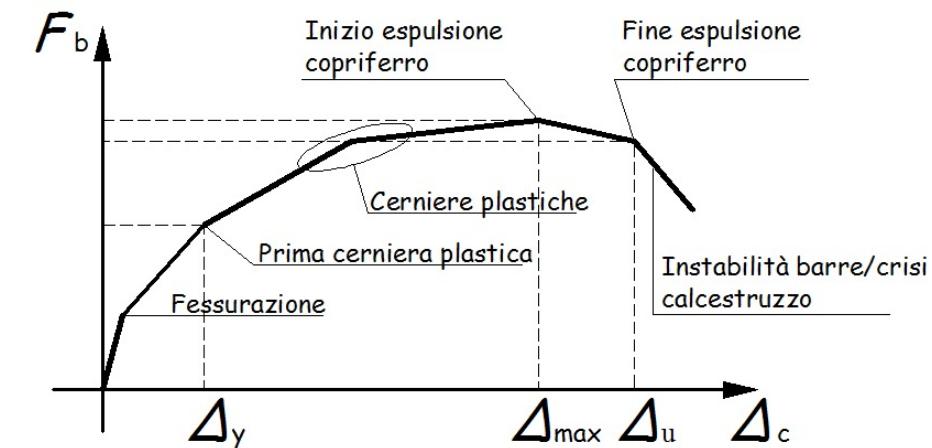
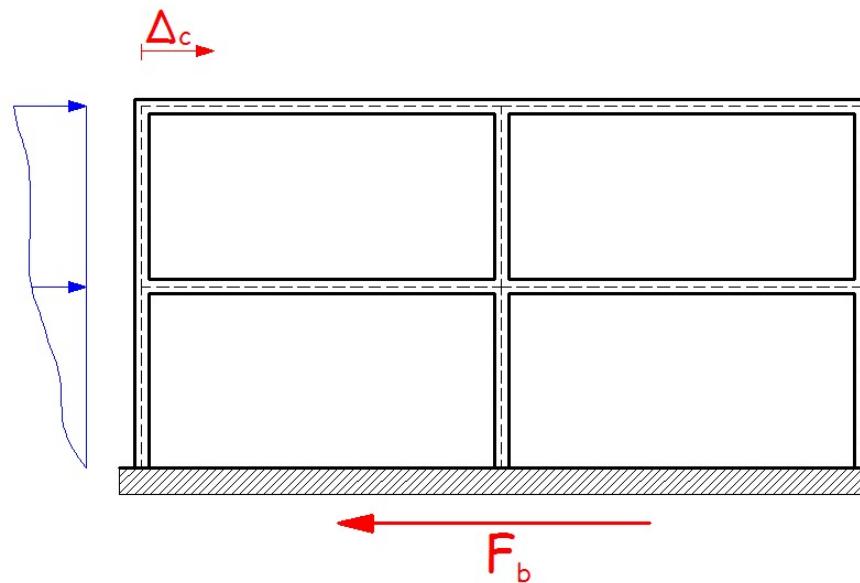
Espulsione del copriferro



Sbandamento delle barre e schiacciamento calcestruzzo

La duttilità della struttura

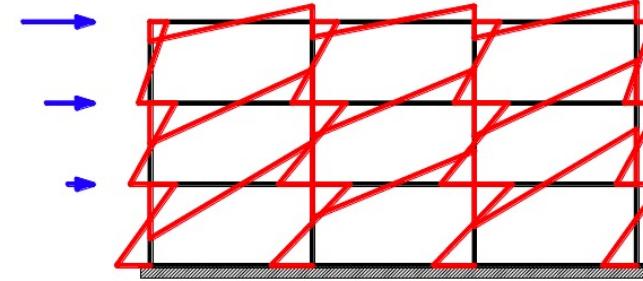
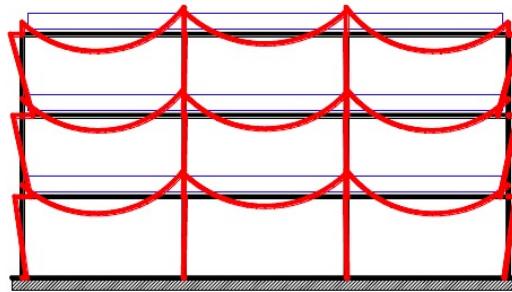
- ✓ Per poter parlare di duttilità della struttura si deve far riferimento alla **CURVA DI CAPACITA'**:
 - Diagramma il taglio alla base della struttura in funzione dello spostamento di un punto (di solito all'ultimo piano).



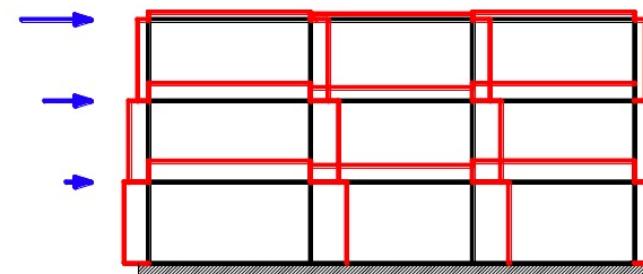
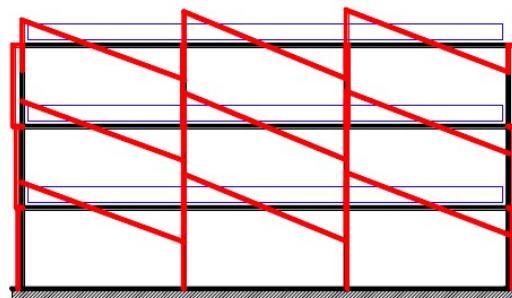
- ✓ La **DUTTILITA' IN SPOSTAMENTO** dell'edificio sarà sempre la capacità dello stesso di sopportare spostamenti ulteriori oltre il limite elastico senza una sensibile diminuzione della forza resistente:

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y$$

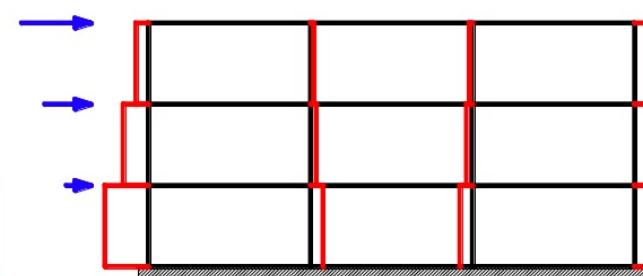
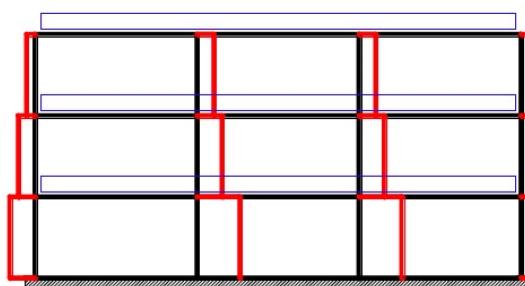
1. Quadro storico normativo nazionale
2. Alcune osservazioni preliminari
3. Proprietà delle strutture in c.a.
4. Elementi principali sede del danno
5. Principali meccanismi
6. Alcuni esempi di rotture strutturali:
 - i. meccanismi globali
 - ii. meccanismi locali:
 - a. meccanismi duttili
 - b. meccanismi fragili

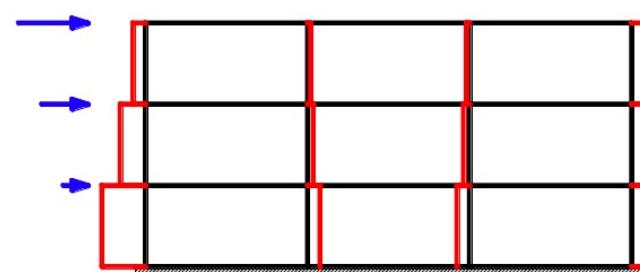
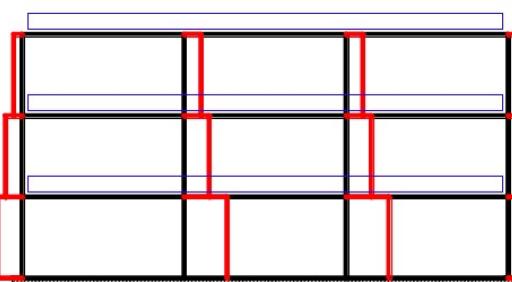
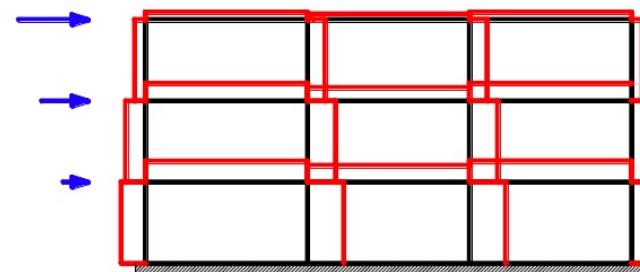
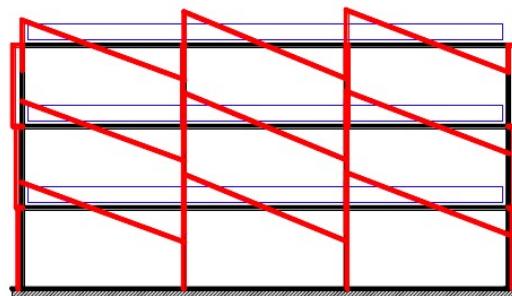
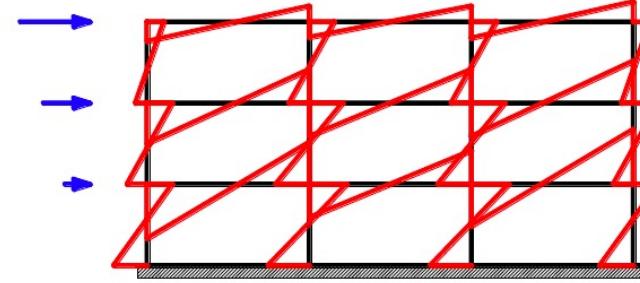
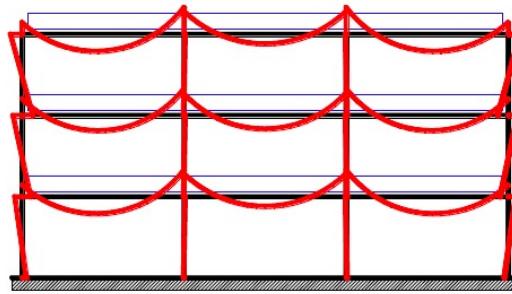
Sollecitazioni statiche e sismiche

✓ I pilastri centrali, in condizioni statiche sono soggetti solo a sforzo assiale.

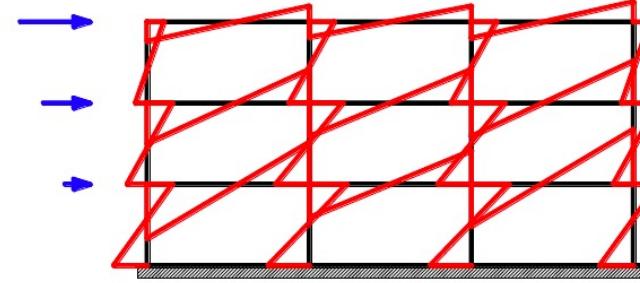
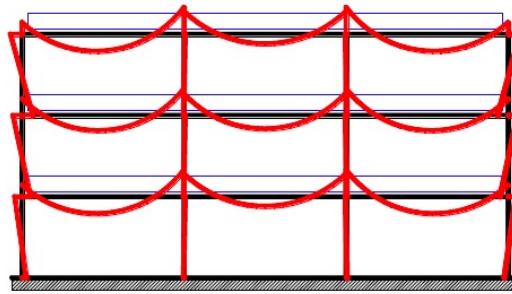


✓ Le travi e i pilastri perimetrali sono invece soggetti a taglio e momento alle estremità.

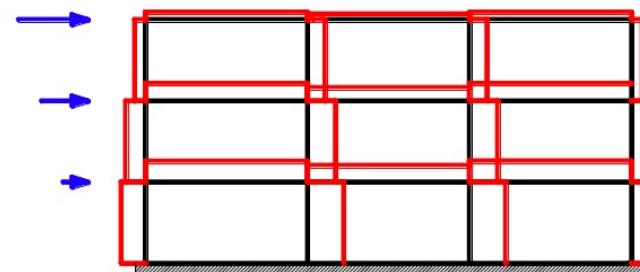
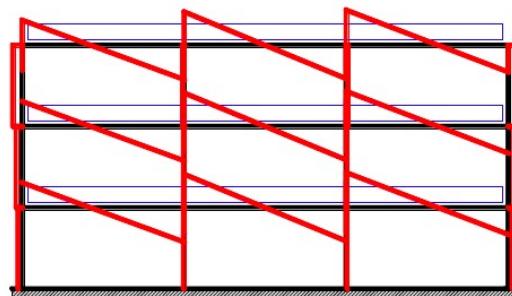


Sollecitazioni statiche e sismiche

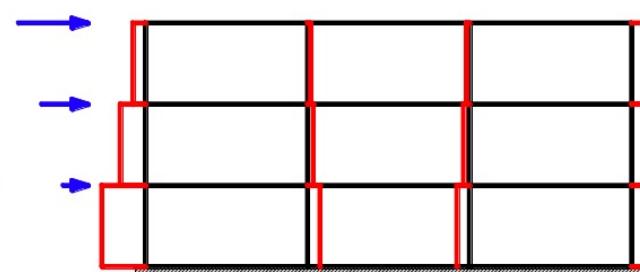
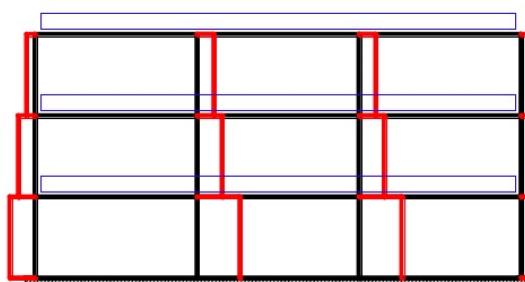
- ✓ In presenza di azioni sismiche, le sollecitazioni statiche verranno incrementate solo in alcune zone della struttura.
- ✓ Tali zone, definite zone critiche, sono destinate a danneggiarsi.

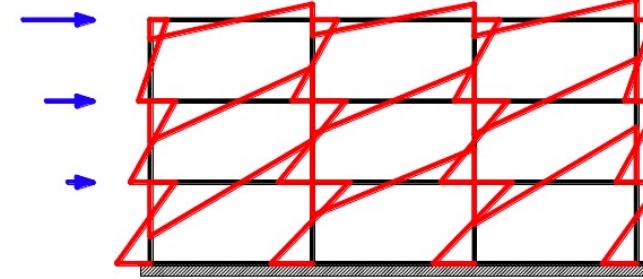
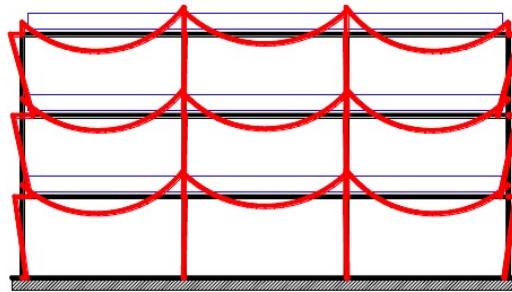
Sollecitazioni statiche e sismiche

✓ Nelle strutture intellaiate e zone critiche sono poste alle estremità di travi e pilastri, dove i tagli e i momenti sono massimi.

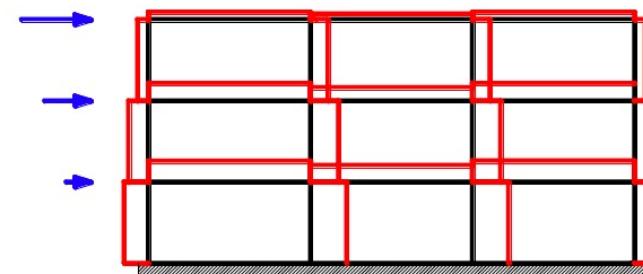


✓ I nodi travi/pilastri rappresentano ulteriori zone critiche, in quanto trasferiscono le sollecitazioni.

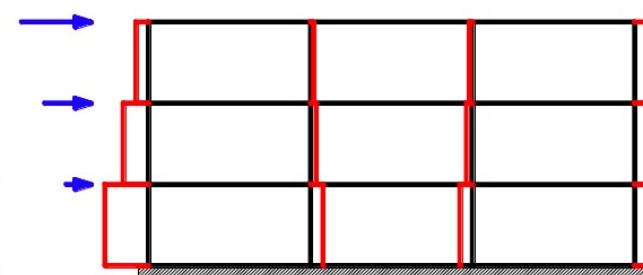
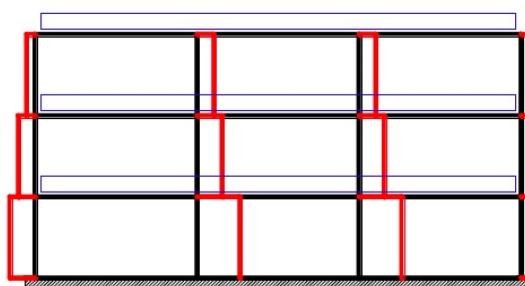


Sollecitazioni statiche e sismiche

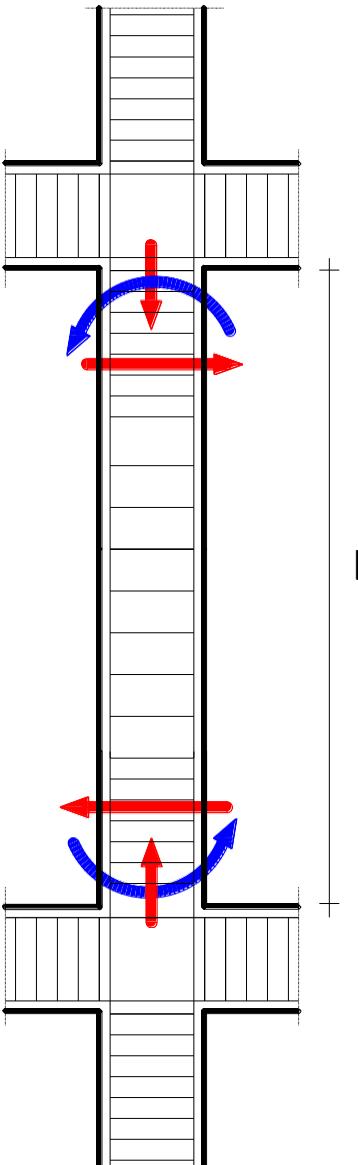
✓ Nelle campate delle travi di solito non si hanno problemi in quanto il sisma dà contributi praticamente nulli.



✓ Molta attenzione deve essere posta nei pilastri centrali soggetti a elevati sforzi assiali (→ fragili).

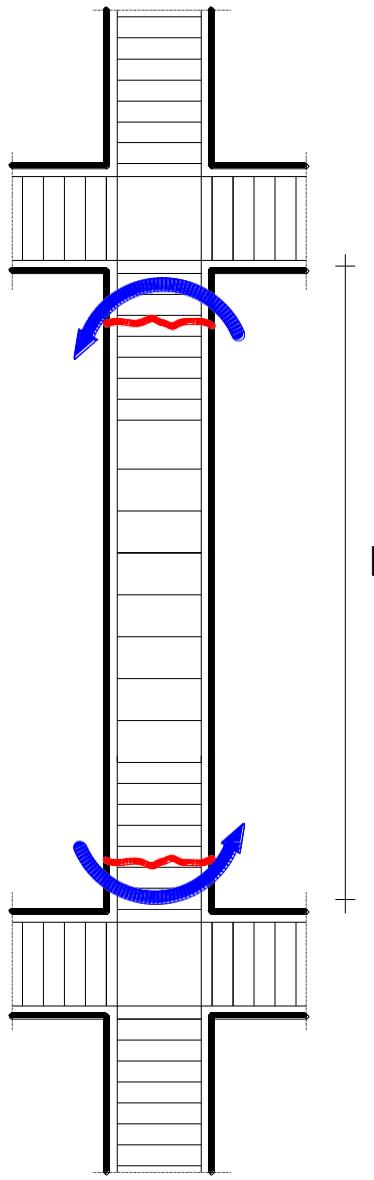


Pilastri

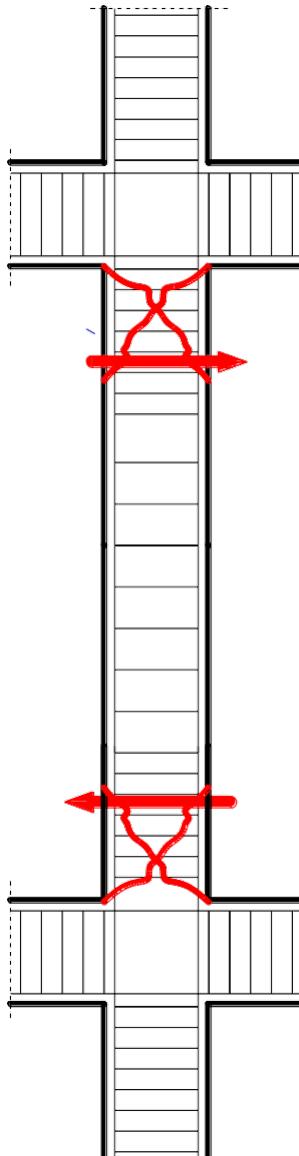


- ✓ I **PILASTRI** sono sottoposti a:
 - sforzo assiale,
 - taglio,
 - flessione.
- ✓ La **presenza di sforzo assiale**, per quanto precedentemente ricordato, fa sì che il pilastro abbia **capacità deformative tanto minori quanto maggiore è la compressione** su di esso agente.
- ✓ Una buona staffatura, ben ancorata nel nucleo, può migliorare sensibilmente il suo comportamento a rottura, anche in presenza di elevati sforzi assiali.

Pilastri



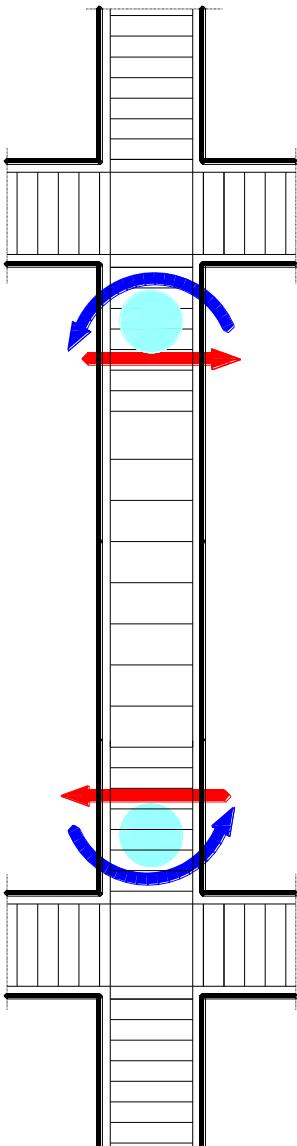
- ✓ Nel pilastro **si possono** comunque accendere **cerniere plastiche flessionali alle estremità** malgrado ci sia sforzo assiale, anche se il processo non è sempre garantito.
- ✓ Le **possibili lesioni** per accensione delle cerniere plastiche possono essere di varie tipologie, in particolare:
 - la rottura classica presenta fessure orizzontali o sub orizzontali,
 - in presenza di elevate compressioni e scarsa staffatura, sia nel passo sia nel tipo di chiusura, si possono manifestare instabilità delle barre longitudinali.

Pilastri

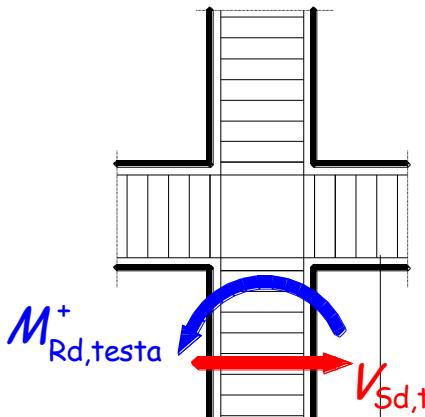
- ✓ Il **meccanismo a taglio** può invece **attivarsi in due modi diversi** a seconda che si abbia:
 - schiacciamento della biella compressa,
 - snervamento delle staffe.

- ✓ In una trave con staffe disposte con un passo molto elevato potrebbe non attivarsi il secondo meccanismo.

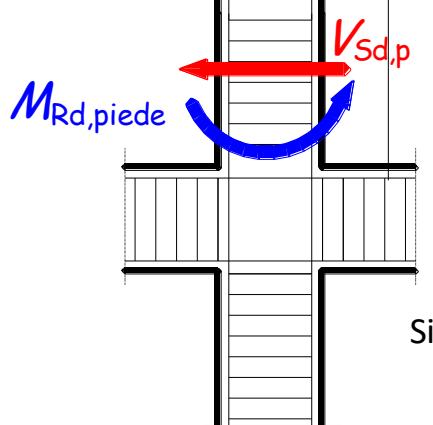
- ✓ In particolare, le trazioni sul calcestruzzo possono portare alla formazione di poche fratture diagonali (i.e. ad X) che, estendendosi per tutta l'altezza della sezione, possono provocare il **collasso improvviso** del pilastro.

Pilastri

- ✓ I due meccanismi, i.e. flessionale e tagliante, non si possono attivare contemporaneamente: uno esclude l'altro.
- ✓ Il processo flessionale è di tipo duttile, in quanto dissipa molta energia.
- L ✓ Il processo di rottura a taglio è invece di tipo fragile, in quanto «improvviso» e scarsamente dissipativo.
- ✓ In linea teorica è possibile ottenere un processo di rottura controllato, che vede l'accensione della cerniera flessionale prima della resistenza a taglio.

Pilastri

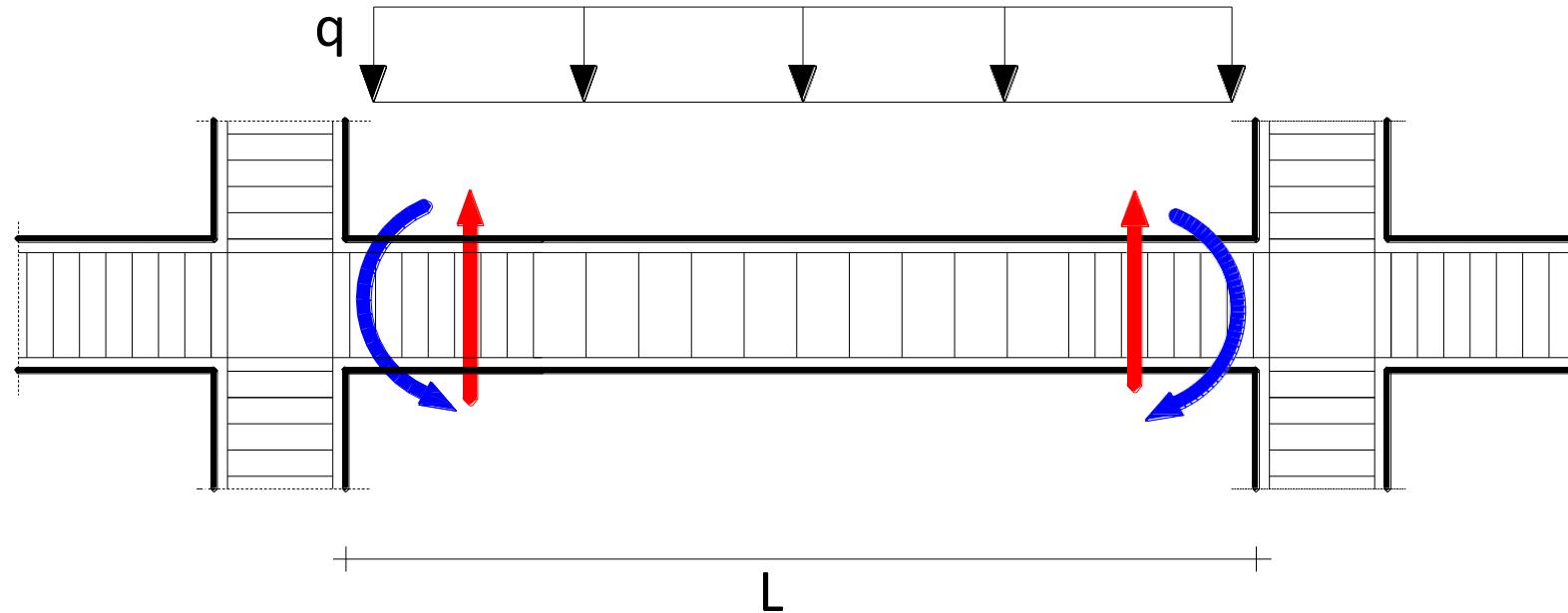
$$V_{sd,t} = \left(\frac{M_{Rd,t}^+ + M_{Rd,p}^-}{L} \right)$$



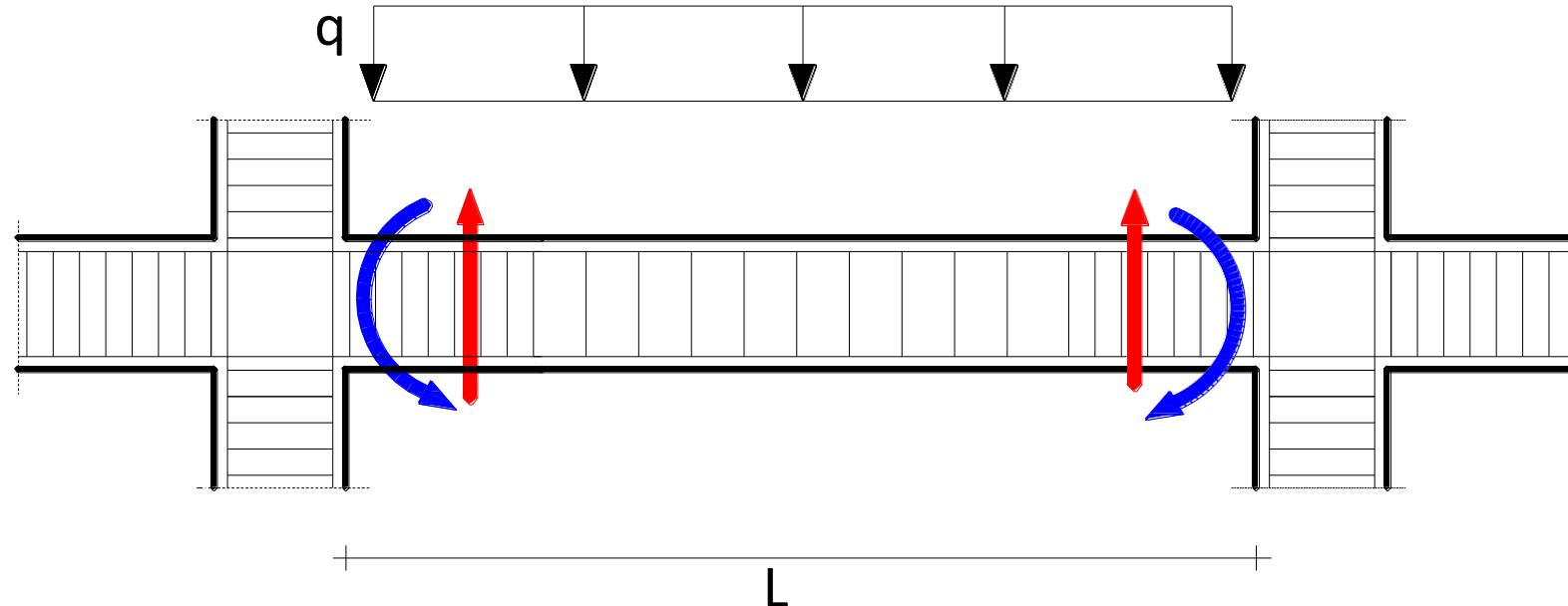
$$V_{sd,p} = \left(\frac{M_{Rd,t}^+ + M_{Rd,p}^-}{L} \right)$$

Si prendono i momenti di segno concorde sia perché vengono da una distribuzione sismica sia perché rappresentano un frattile superiore.

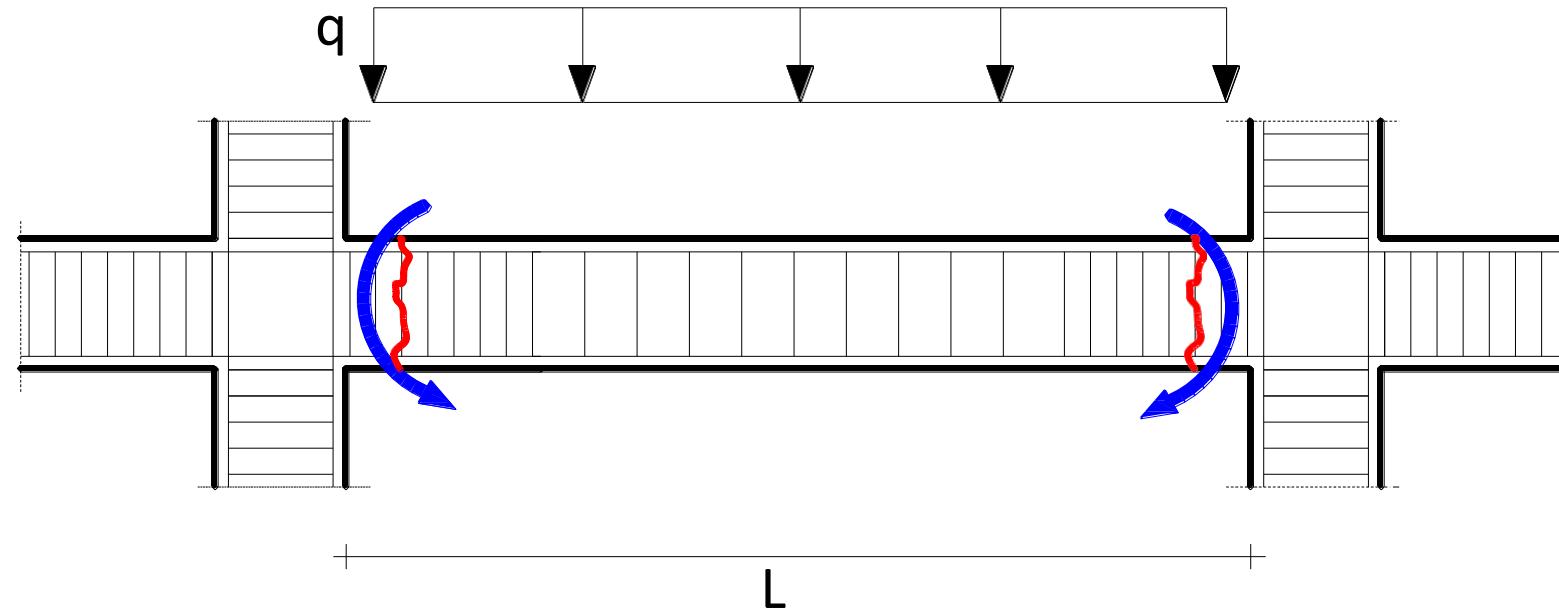
- ✓ I tagli che sollecitano i pilastri dovranno essere ricavati dai momenti resistenti valutati alle estremità dell'elemento.
- ✓ Il meccanismo di collasso a taglio non si attiverà se il taglio sollecitante, funzione del taglio resistente
- ✓ Il risultato sarà quello di avere un passo ridotto delle staffe nelle estremità, ossia dove si avrà la plasticizzazione.

Travi

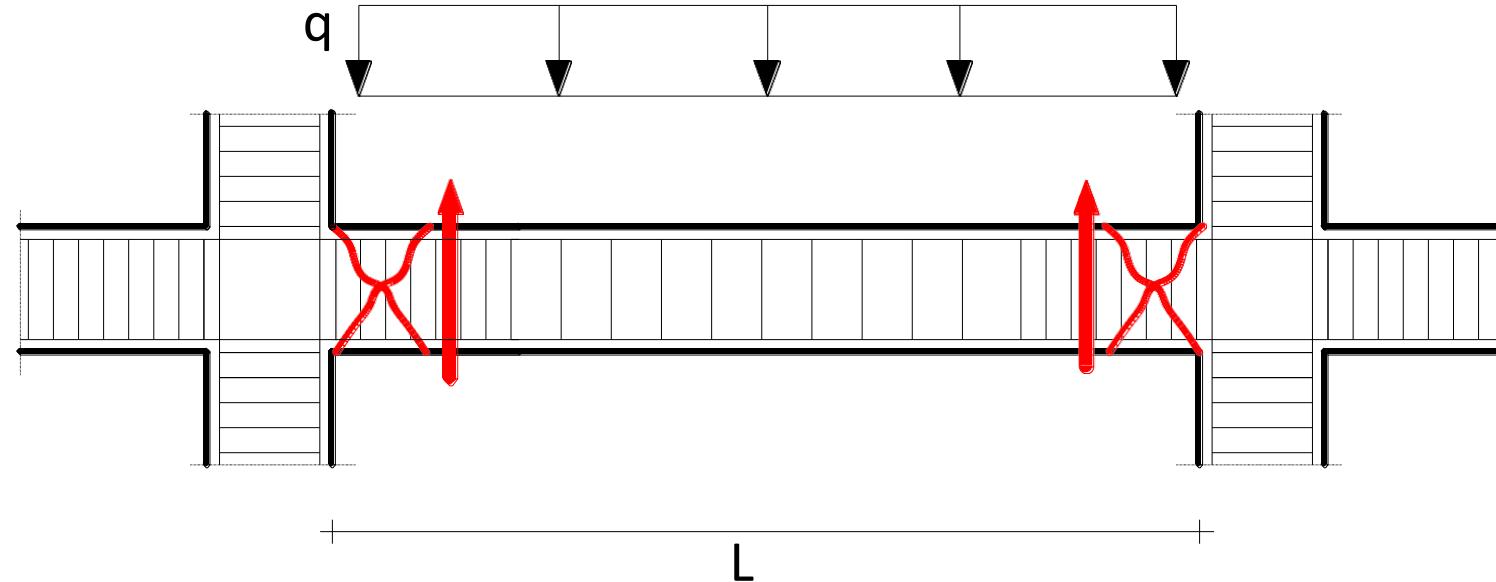
- ✓ Le **TRAVI** sono sottoposte a:
 - taglio e flessione,
 - e nella maggior parte dei casi a carichi distribuiti direttamente applicati.
- ✓ Lo sforzo assiale è generalmente basso.

Travi

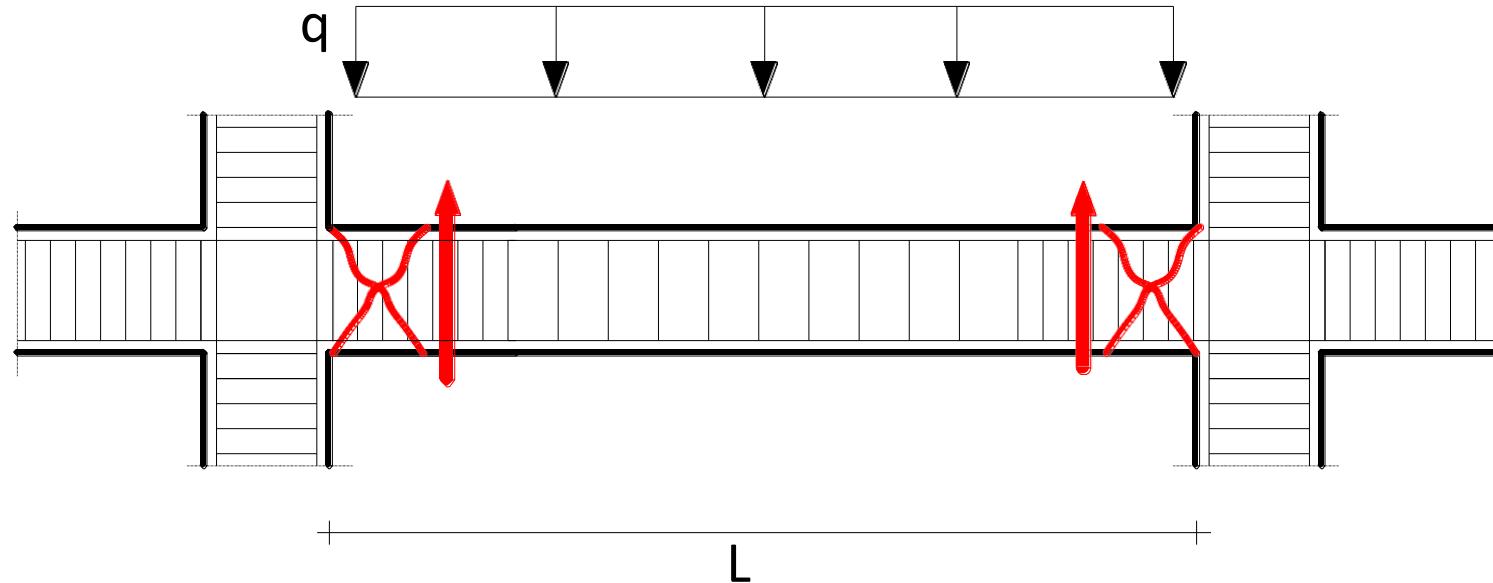
- ✓ Quindi le travi sono dotate di un'ottima capacità rotazionale nelle sezioni di estremità.
- ✓ Anche in questo elemento la presenza di staffe ben chiuse e con passo adeguato potrà migliorare sensibilmente il comportamento in campo plastico.

Travi

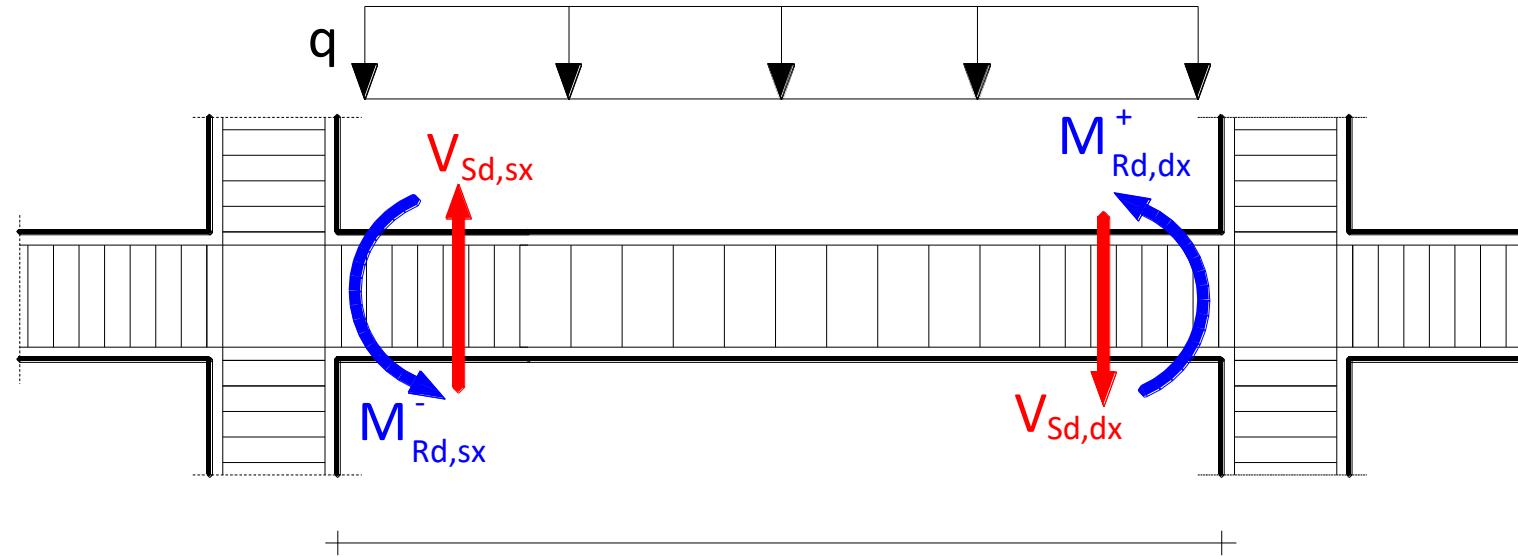
- ✓ Le **cerniere plastiche flessionali** si formeranno alle estremità dissipando una importante quantità di energia visto che $N_{sd} \approx 0$.
- ✓ La **rottura a flessione** produrrà **fessure verticali o sub verticali all'estremità** dell'elemento trave, raramente accompagnate da instabilità delle barre longitudinali compresse.

Travi

- ✓ Le **rotture a taglio** si possono attivare, come per i pilastri, con lo snervamento delle staffe o con lo schiacciamento della biella compressa di calcestruzzo.
- ✓ Per evitarla è necessaria una buona staffatura soprattutto alle estremità delle travi

Travi

- ✓ Nel caso di **travi scarsamente staffate** non si avrà lo snervamento delle staffe, ma probabilmente la formazione di fessure inclinate (i.e. ad X) alle estremità dell'elemento.
- ✓ La rottura duttile continua ad essere quella a flessione (dissipativa) e la rottura fragile quella a taglio (non dissipativa).

Travi

$$V_{Sd,sx} = \left(\frac{M^+_{Rd,sx} + M^-_{Rd,dx}}{L} \right) + \frac{qL}{2} \quad V_{Sd,dx} = \left(\frac{M^+_{Rd,sx} + M^-_{Rd,dx}}{L} \right) - \frac{qL}{2}$$

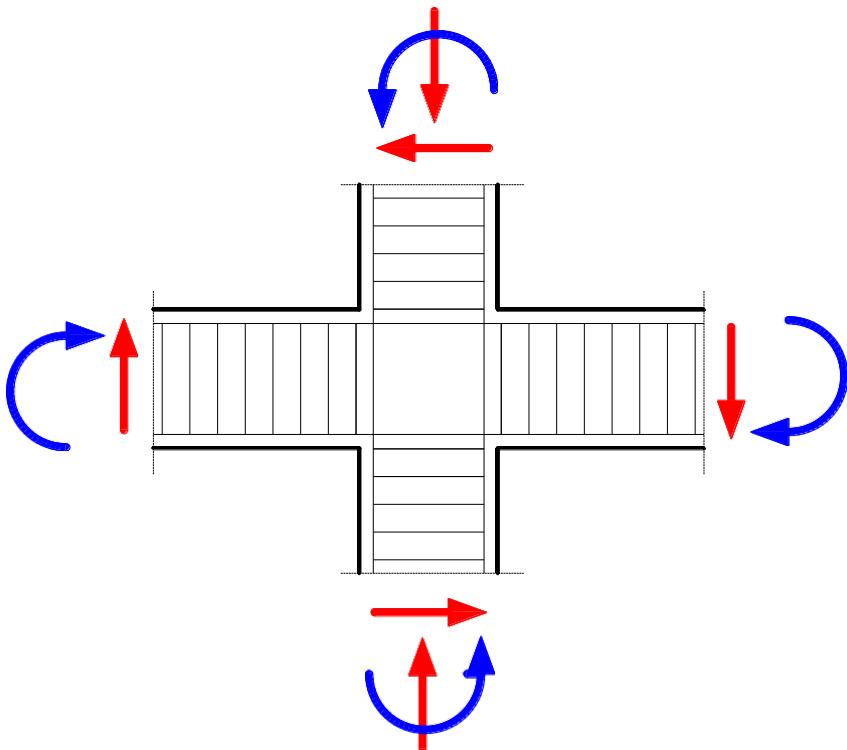
- ✓ Anche in questo caso è possibile pilotare la rottura a flessione prima di quella a taglio:

$$V_{Sd}(M_{Rd,trave}) \geq V_{Rd}(\text{passo staffe, sezione, etc.})$$

Nodo trave/pilastro

- ✓ Il nodo, visto come punto di intersezione tra elementi monodimensionali verticali e orizzontali, è soggetto alle azioni di:

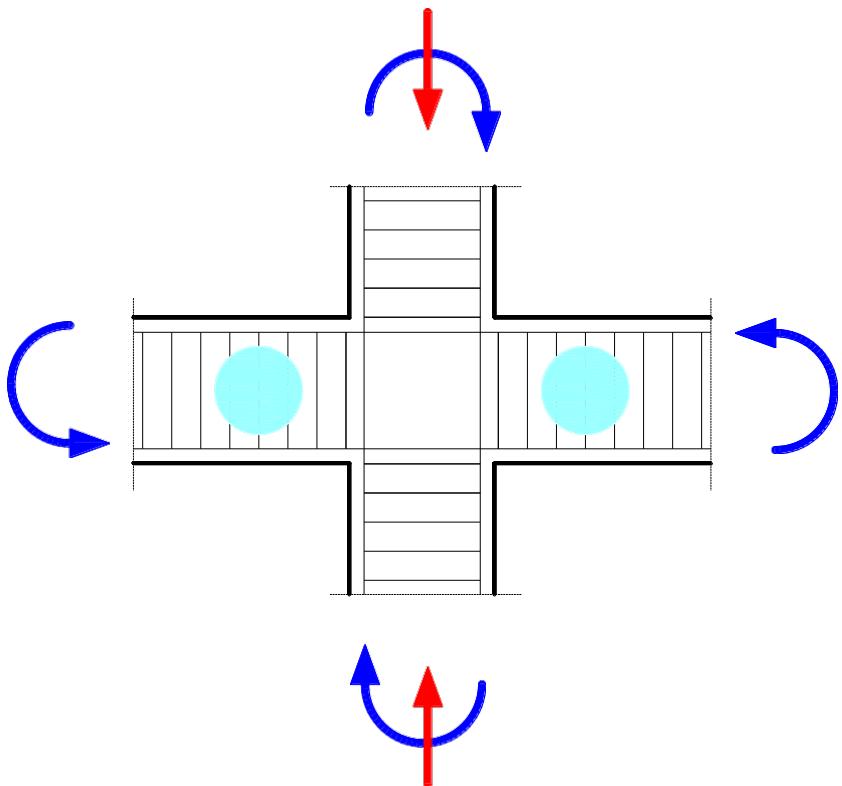
- sforzo assiale dovuto ai pilastri,
- tagli derivanti da travi e pilastri in esso confluenti,
- momenti flettenti sempre derivanti da travi e pilastri.



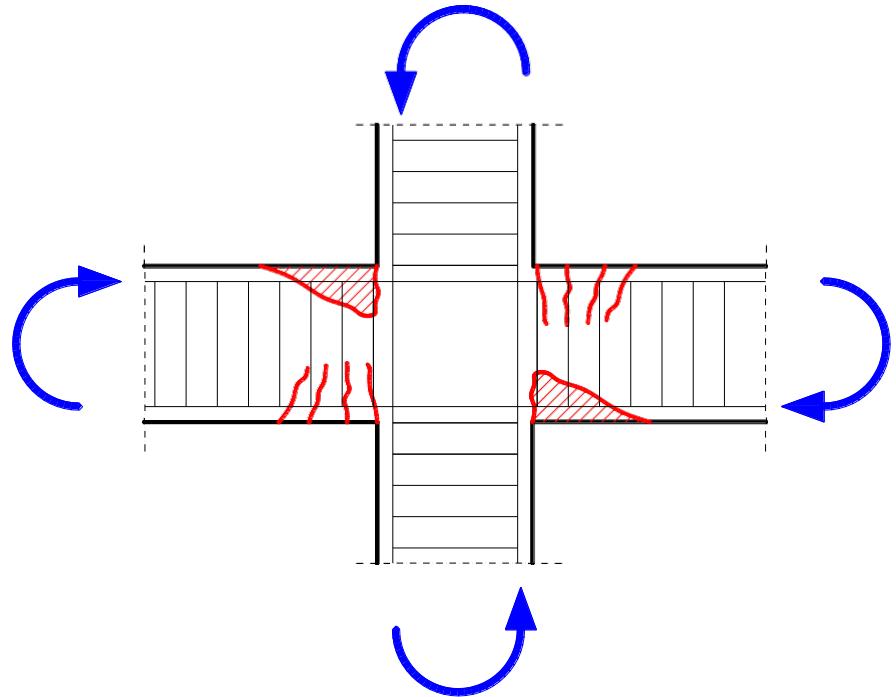
- ✓ Nel nodo trave/pilastro si avranno dunque possibili rotture per:
- flessione alle estremità di travi e pilastri,
 - taglio alle estremità di pilastri e travi.

Nodo trave/pilastro

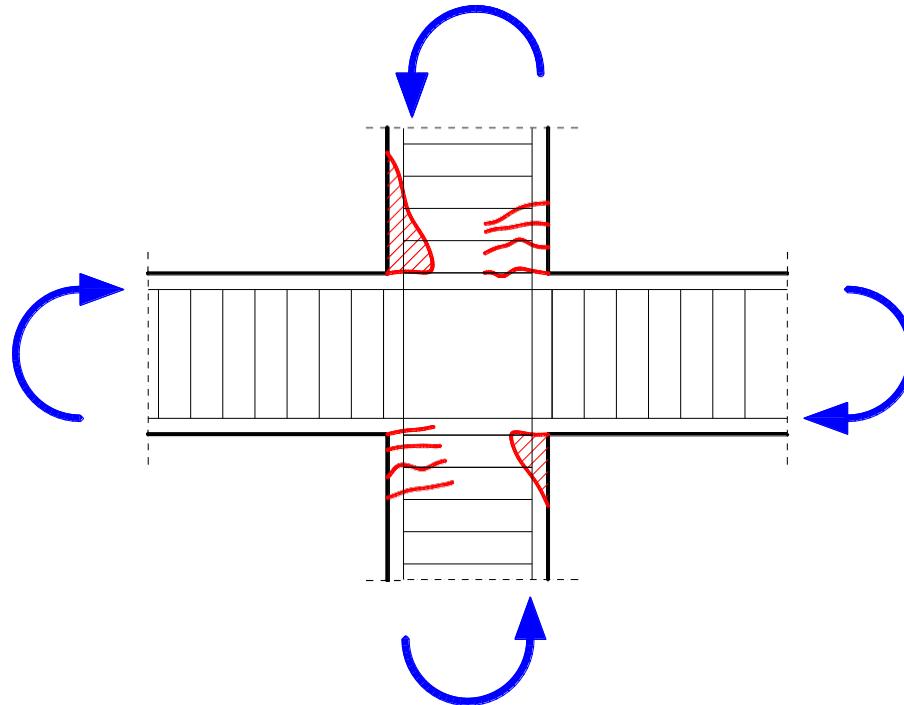
- ✓ Le rotture a flessione sono anche in questo caso quelle da prediligere, in quanto più dissipative, in particolare:
 - l'accensione delle cerniere plastiche nelle travi risulta essere energeticamente favorevole visti i bassi sforzi assiali,
 - nei pilastri, invece, è più complicata per la presenza di N_{sd} .



- ✓ Una gerarchia ottimale di danneggiamento nel nodo trave/pilastro risulta essere:
 - accensione delle cerniere plastiche in tutte le travi e, solo alla fine, nei pilastri.

Nodo trave/pilastro

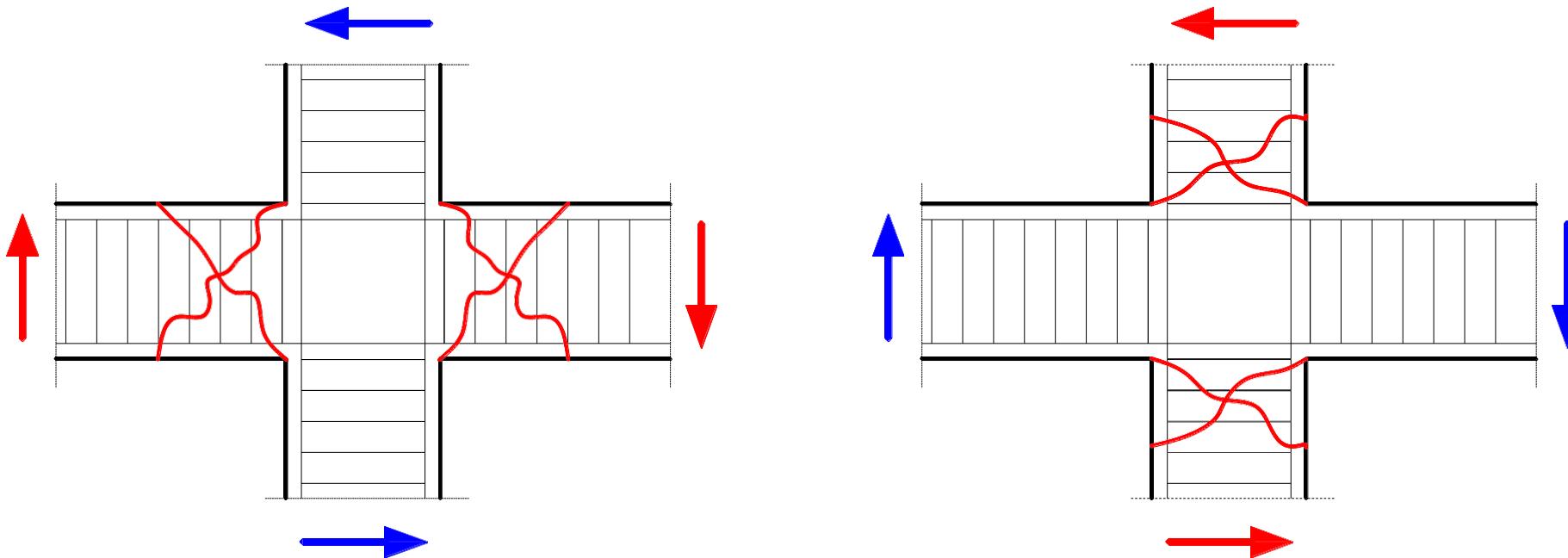
✓ *L'accensione delle cerniere flessionali nelle travi si manifesta con la formazione di fessure verticali o sub verticali alle estremità della stessa: **trave debole- pilastro forte**.*



✓ *L'accensione delle cerniere flessionali nei pilastri si manifesta con la formazione di fessure orizzontali o sub orizzontali alle estremità della stessa: **pilastro debole-trave forte**.*

Nodo trave/pilastro

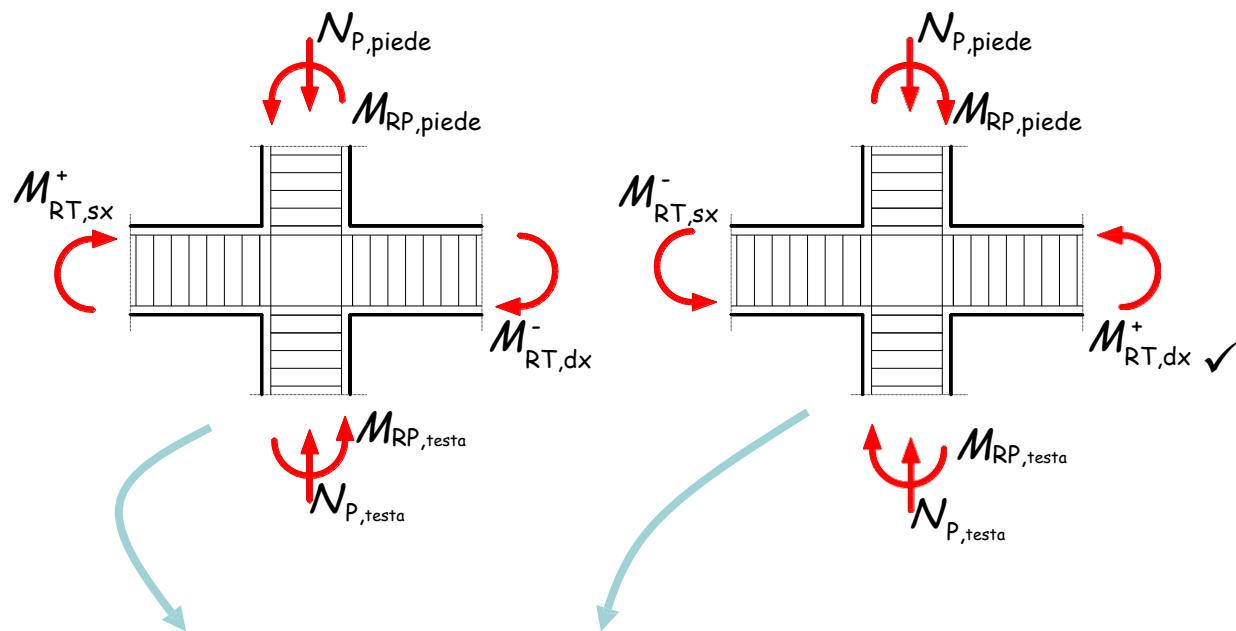
- ✓ Le rotture a taglio si possono avere, come nello studio dei singoli elementi, sia alle estremità delle travi che dei pilastri.
- ✓ Sono rotture sempre da evitare sia nelle travi che nei pilastri, e si manifestano con lesioni ad X come visto in precedenza.



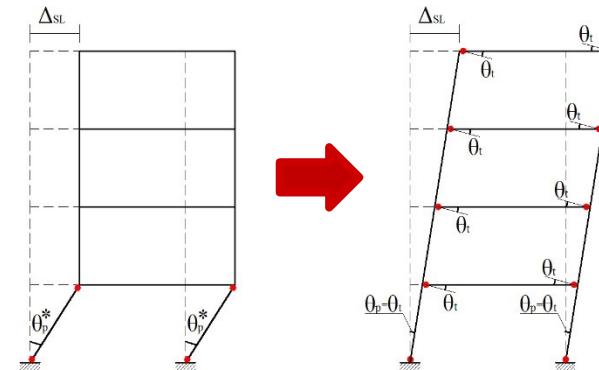
Nodo trave/pilastro

✓ La situazione ottima si presenta con il passaggio dalla situazione «trave forte, pilastro debole» a «pilastro forte, trave debole»

- sarà necessario preservare il pilastro fino a far accendere le cerniere alle estremità delle travi.



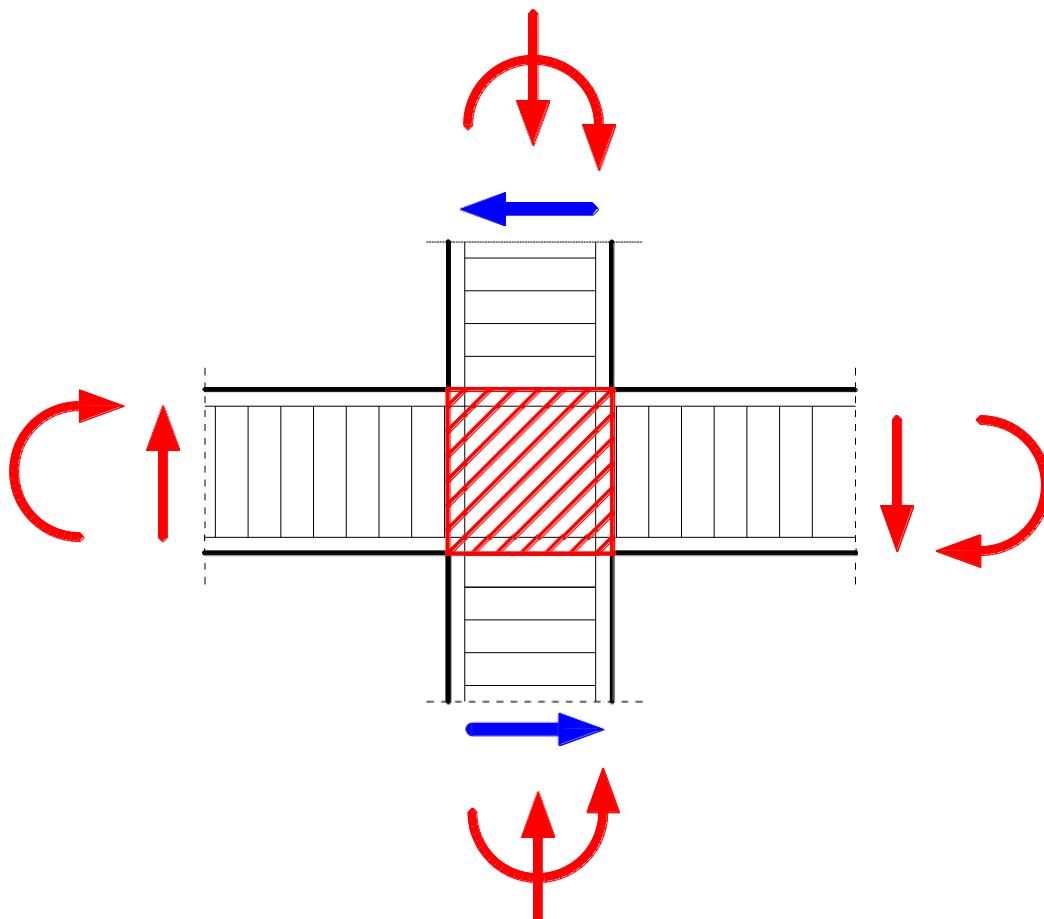
$$M_{RP,piede} + M_{RP,testa} \geq M_{RT,dx} + M_{RT,piede}$$



Per la Gerarchia delle Resistenze il **progetto** dei pilastri (non dissipativi) deve fare riferimento alle resistenze delle travi (dissipative), amplificate di un γ_{RD} .

Pannello nodale

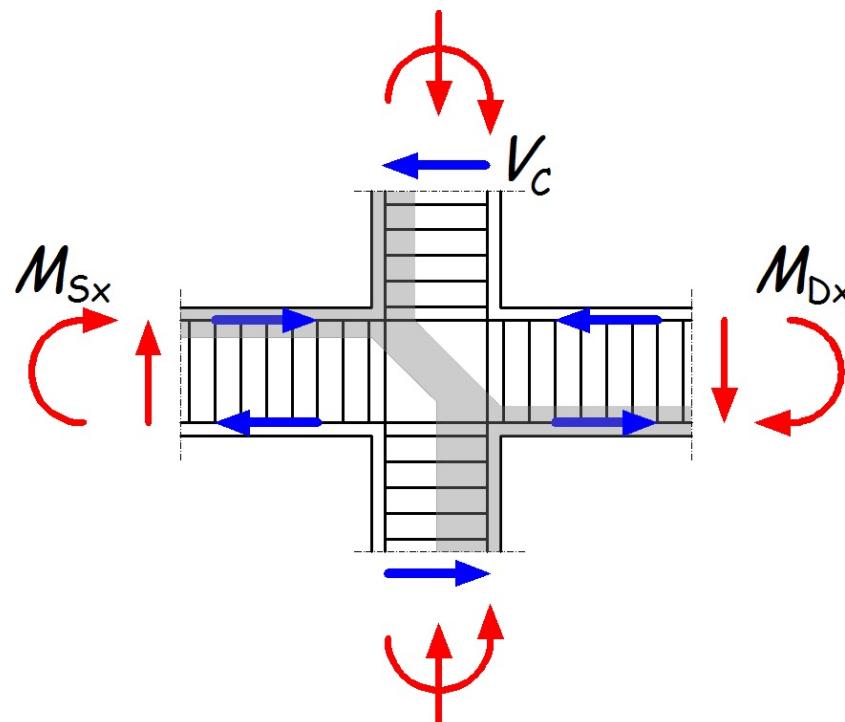
- ✓ E' poi necessario individuare il nodo come parte di struttura che trasmette, con meccanismi complessi, le sollecitazioni tra travi e pilastri.



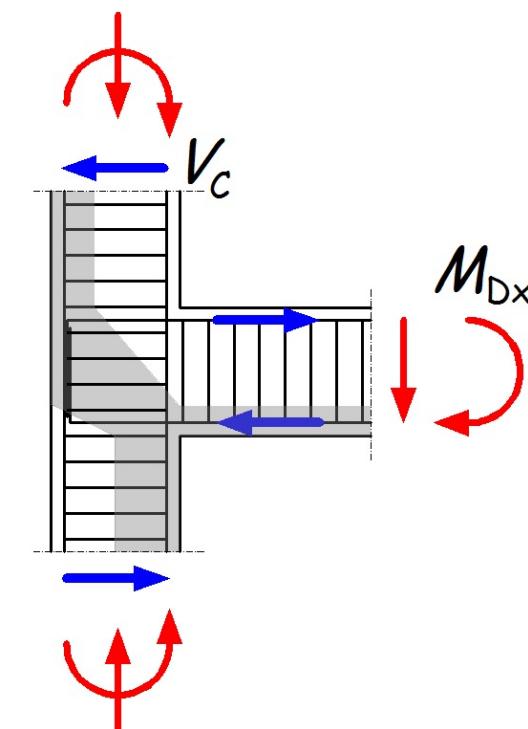
- ✓ Tale elemento, noto come **PANNELLO NODALE**, è solitamente soggetto ad uno stato almeno bidimensionale, a causa delle sollecitazioni indotte dalle travi e pilastri in esso confluenti.

Pannello nodale

- ✓ *I pannello nodale trasmettono le sollecitazioni dalle travi alle colonne attraverso la formazione di meccanismi di tipo puntone.*



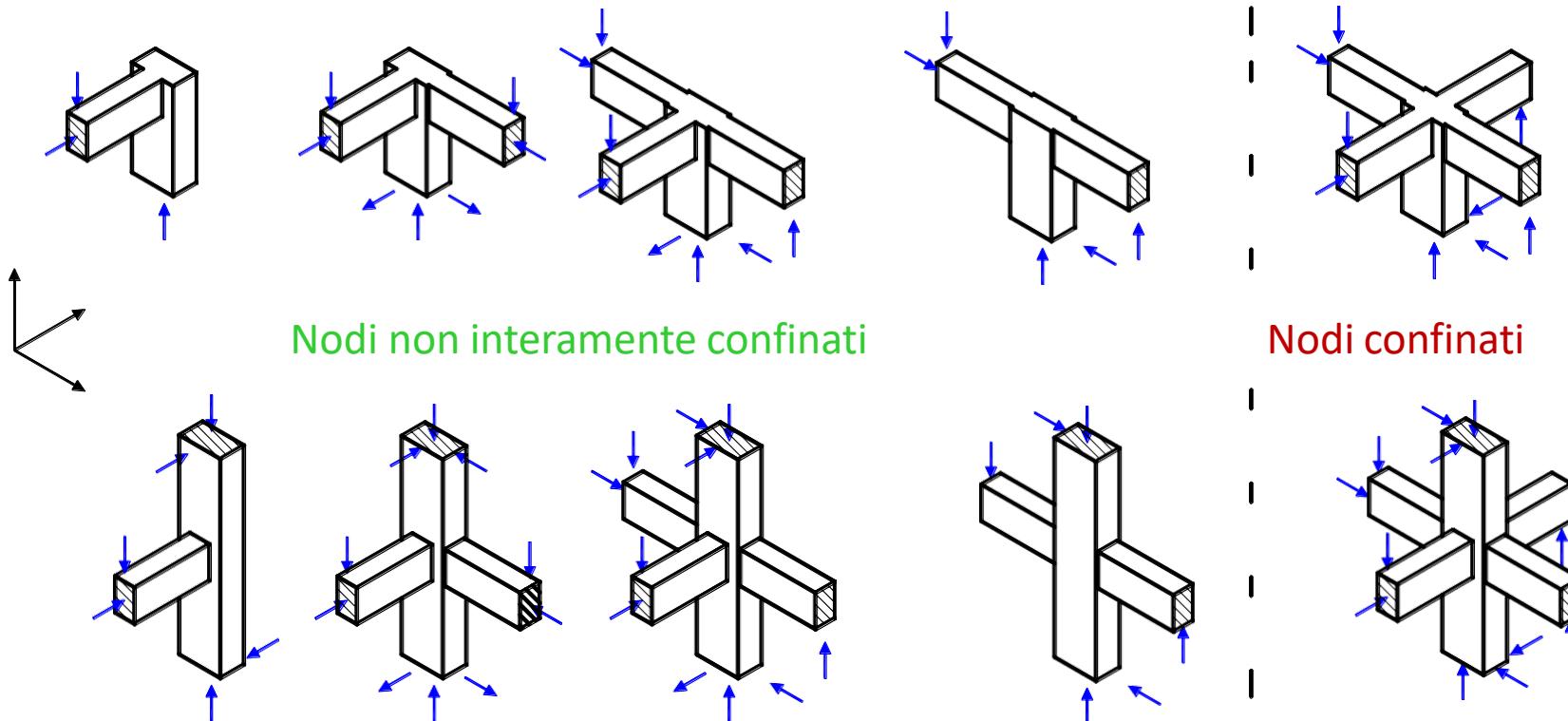
$$V_{\text{nodo}} = \left(\frac{M_{Sx} + M_{Dx}}{z} \right) - V_c$$



$$V_{\text{nodo}} = \left(\frac{M_{Dx}}{z} \right) - V_c$$

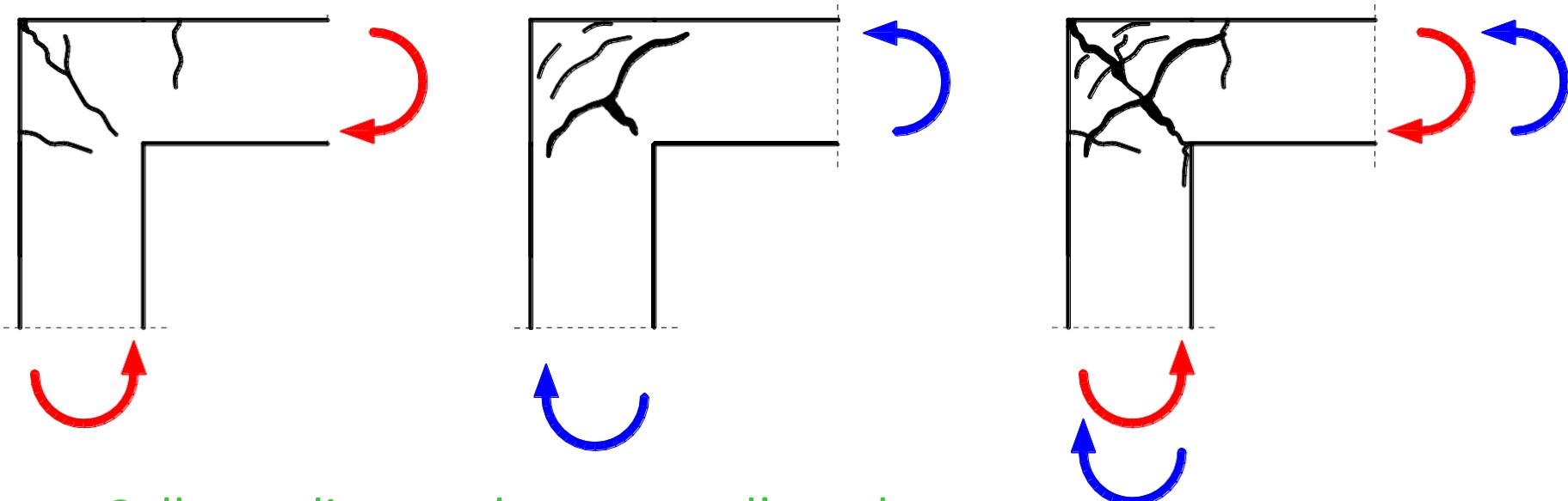
Pannello nodale

- ✓ Affinché il **meccanismo** si possa **formare**, il **nodo** deve essere **efficacemente confinato** dalla presenza delle travi.
- ✓ Nel caso di **nodi non confinati**, la **staffatura** del nodo è **fondamentale** per la formazione del puntone di calcestruzzo.



Pannello nodale

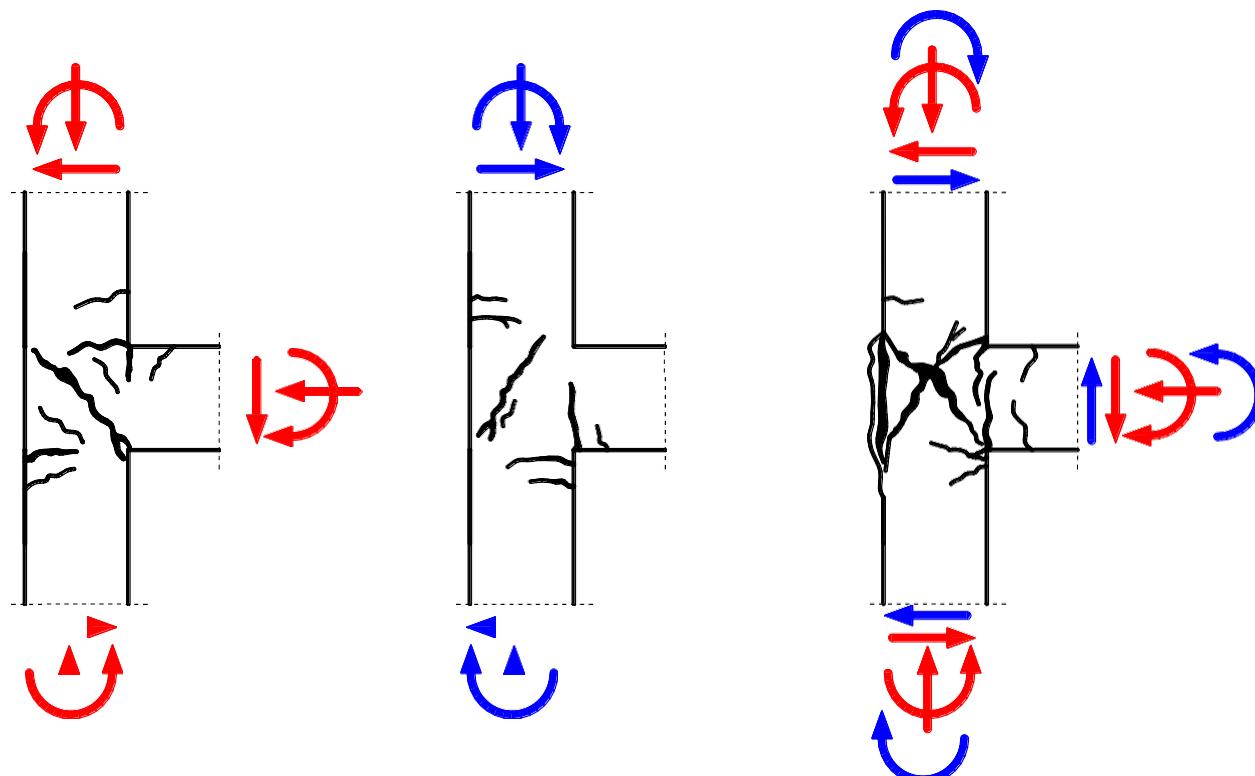
- ✓ Tipiche fessurazioni nei nodi esterni d'angolo, che solitamente non sono interamente confinati, sono le lesioni inclinate nel pannello nodale, a volte accompagnate da lesioni all'attacco di travi e pilastri.



Colla^sso di un nodo esterno d'angolo
considerando l'inversione delle
sollecitazioni nodali

Pannello nodale

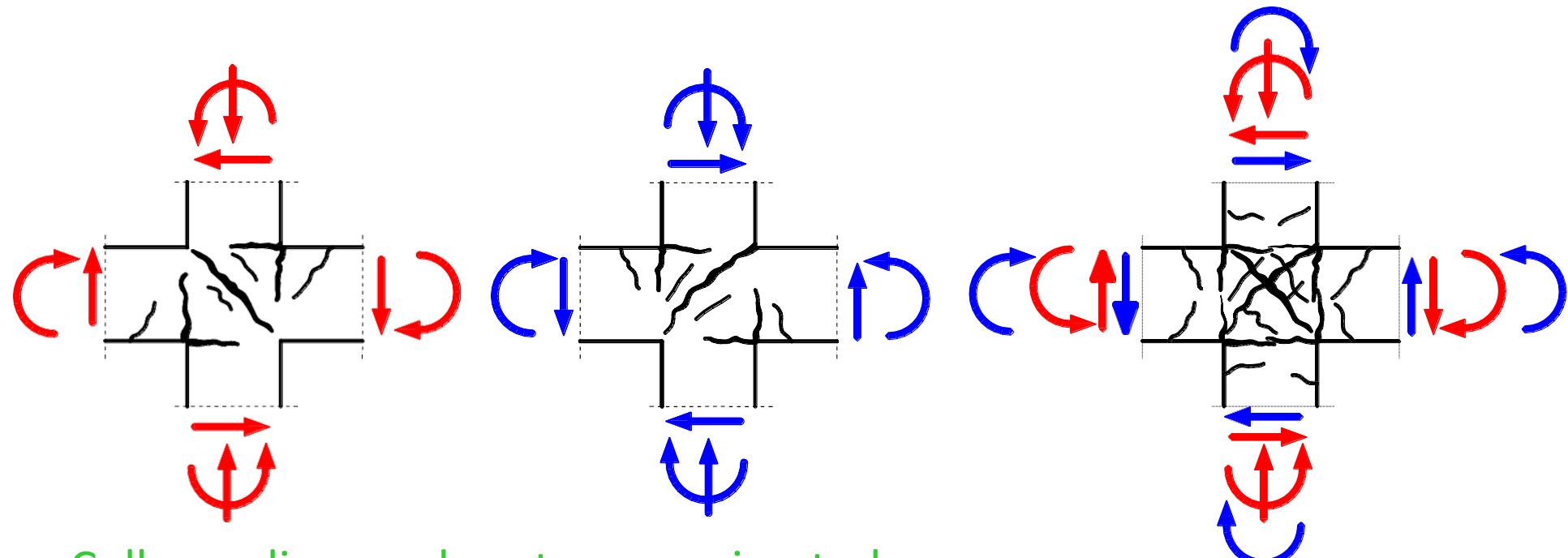
- ✓ Tipiche fessurazioni nei nodi esterni d'angolo a tre vie, che solitamente non sono interamente confinati, sono le lesioni inclinate nel pannello nodale, a volte accompagnate da lesioni all'attacco di travi e pilastri.



Collasso di un nodo esterno d'angolo a tre vie per effetto dell'inversione delle sollecitazioni

Pannello nodale

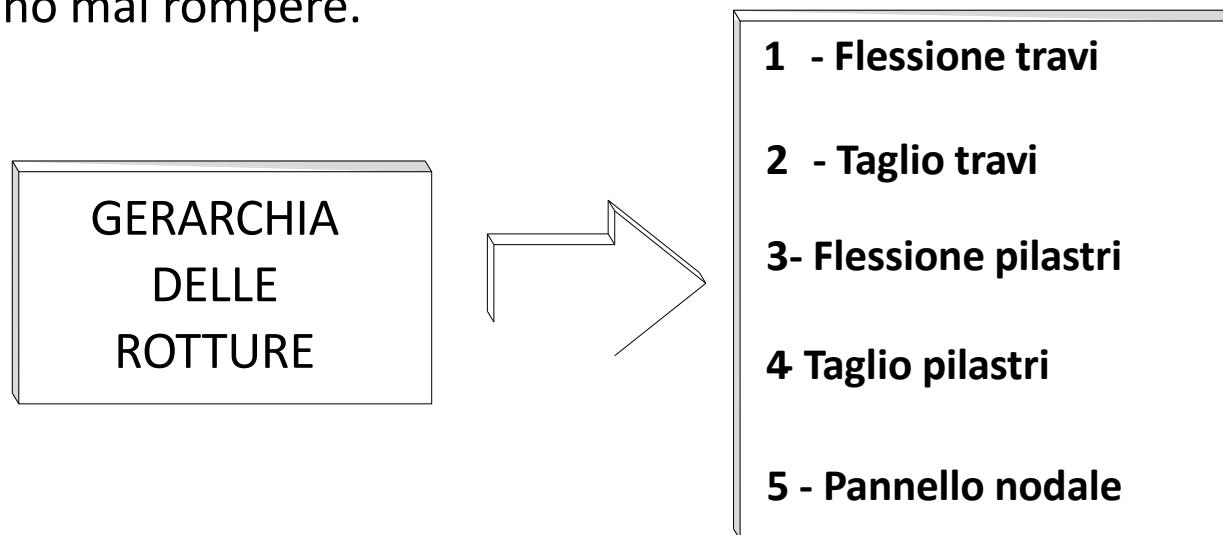
- ✓ Tipiche fessurazioni nei nodi esterni perimetrali, che solitamente non sono interamente confinati, sono le lesioni inclinate nel pannello nodale, a volte accompagnate da lesioni all'attacco di travi e pilastri.



Collasso di un nodo esterno perimetrale per effetto dell'inversione delle sollecitazioni

Sintesi roture negli elementi

- ✓ Per quanto visto la **gerarchia ottimale delle roture** è quella riportata in figura, che suggerisce ancora come la **rottura a flessione delle travi debba essere il primo meccanismo attivato** dal terremoto e come, viceversa, i nodi non si debbano mai rompere.



- ✓ Tale gerarchia di roture è difficilmente rispettata nelle strutture esistenti.



1. Quadro storico normativo nazionale
2. Alcune osservazioni preliminari
3. Proprietà delle strutture in c.a.
4. Elementi principali sede del danno
5. **Principali meccanismi**
6. Alcuni esempi di rotture strutturali:
 - i. meccanismi globali
 - ii. meccanismi locali:
 - a. meccanismi duttili
 - b. meccanismi fragili

Si posso distinguere sostanzialmente 2 «categorie» di meccanismi:



✓ **MECCANISMI GLOBALI:**

- interessano la struttura nel suo complesso,
- non tutti gli elementi necessariamente collaborano alla resistenza complessiva,
- l'innesto inficia la resistenza di tutta la struttura.

✓ **MECCANISMI LOCALI:**

- dipendono dal singolo elemento,
- possono non inficiare il comportamento strutturale globale se interessano solo una piccola aliquota di elementi,
- possono essere classificabili in due tipologie:
 - **meccanismi duttili** (tipicamente flessionali),
 - **meccanismi fragili** (tipicamente a taglio).



I meccanismi «Globali» sono favoriti da:

- ✓ **Variazioni eccessive di rigidezza e resistenza in elevazione:**
 - pilastri non continui dalla fondazione alla copertura,
 - disposizione irregolare di tamponature,
 - deformate modali irregolari con concentrazione di forze in un piano.
- ✓ **Inadeguata «combinazione» travi-pilastri:**
 - travi a spessore troppo larghe (trasmettono male gli sforzi nei pilastri),
 - travi calate troppo alte (trave forte e pilastro debole).
- ✓ **Inefficaci legature (provvisorie) delle armature:**
 - in fase di getto del calcestruzzo le staffe si ritrovano tutte nel piede del pilastro (situazione estrema).



I meccanismi «Globali» sono favoriti da:

✓ Irregolarità in pianta:

- effetti torsionali rilevanti con aggravio di sforzi nelle membrature perimetrali.

✓ Presenza di elementi strutturali rigidi, eccentrici rispetto al baricentro:

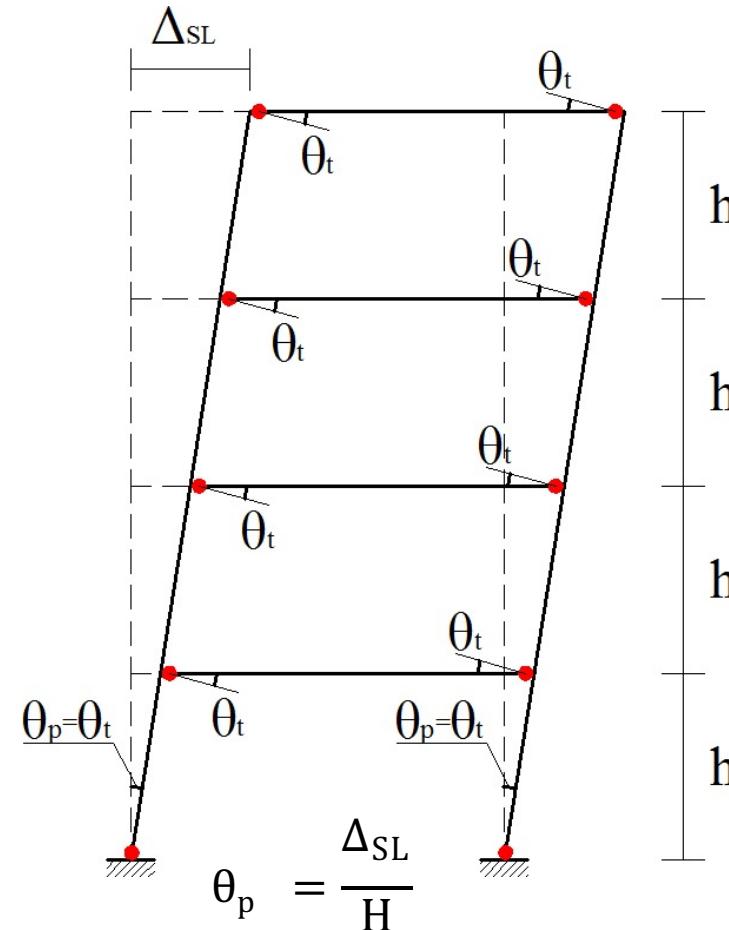
- scale, pareti a taglio, vani ascensore, tamponature «strutturali».

✓ Assenza di telai nelle due direzioni principali.

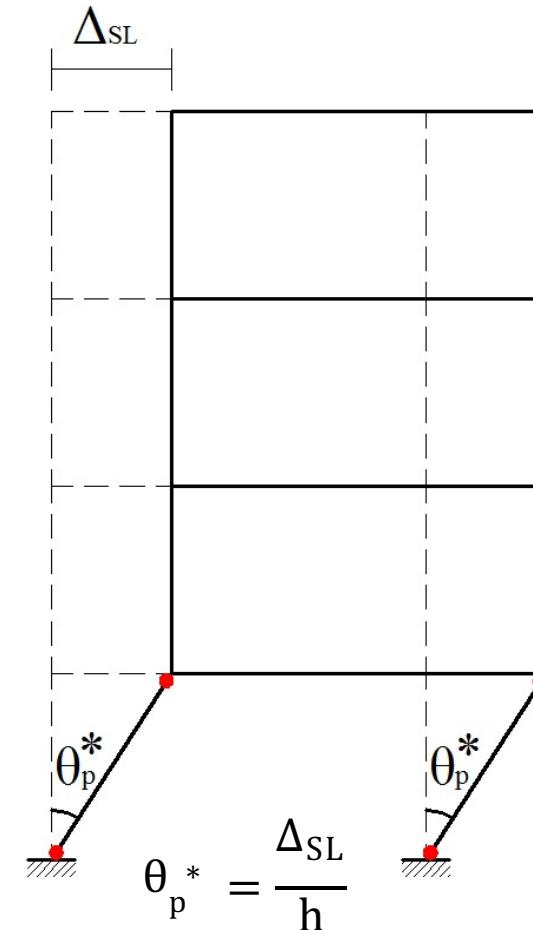


- ✓ Il comportamento globale delle strutture esistenti in c.a. a telaio può condurre a meccanismi molto diversi tra loro.

Meccanismo globale «duttile»



Meccanismo globale «fragile»



$$\theta_p^* \geq n \cdot \theta_p \quad \text{dove } n \text{ è il n° di piani}$$

- ✓ I due precedenti casi hanno **capacità dissipativa** completamente **diversa**:
 - 1° «trave debole-pilastro forte» → si plasticizza la trave,
 - 2° «trave forte-pilastro debole» → si plasticizza il pilastro.
- ✓ A parità di spostamento in testa Δ_{SL} da voler raggiungere:
 - nel 1° caso le cerniere sulle travi e i pilastri dovranno essere in grado di tollerare una rotazione:

$$\theta_p = \Delta_{SL}/H,$$

- nel 2° caso le cerniere in testa al pilastro dovranno sopportare una rotazione n volte maggiore (dove n è il n° di piani):



$$\theta_p^* = \Delta_{SL}/H.$$



I meccanismi «Locali» sono favoriti da:

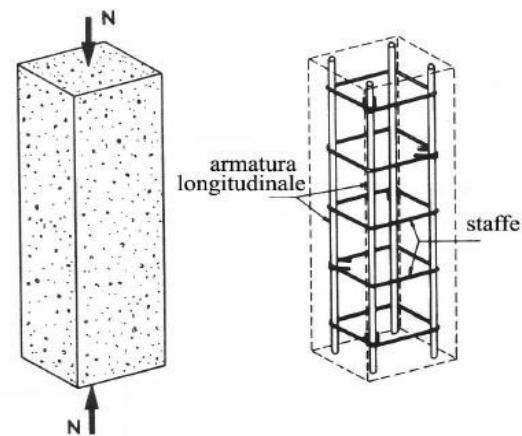
✓ **Interasse eccessivo tra le staffe:**

- scarsa resistenza a taglio con rottura fragile,
- scarso confinamento del nucleo del calcestruzzo,
- scarso contenimento dei ferri longitudinali.



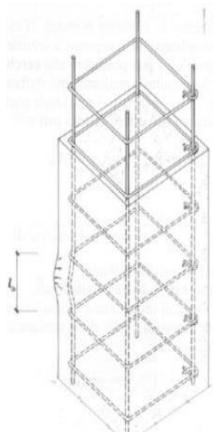
✓ **Ancoraggio insufficiente:**

- dei ferri longitudinali,
- delle staffe.



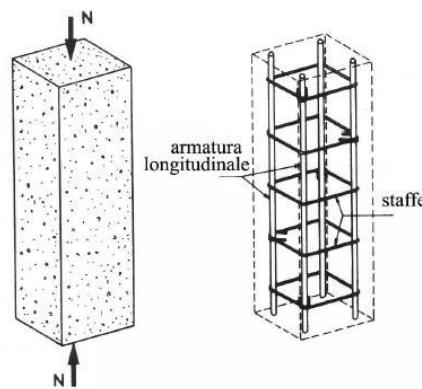
✓ **Presenza di ferri piegati per assorbire il 50% del taglio:**

- assorbono lo sforzo di taglio in un solo verso,
- sono frequenti errori di posizionamento.



I meccanismi «Locali» sono favoriti da:

- ✓ Presenza di barre d'armatura lisce:
 - molto spesso senza piegature finali (code di rondine).



- ✓ Calcestruzzi prestazionalmente scarsi:
 - errati rapporti a/c,
 - aggregati reattivi,
 - getti non vibrati,
 - diffusa carbonatazione.



- ✓ Armatura trasversale al nodo inadeguata o inesistente:
 - quando presenti sono chiuse per sovrapposizione superficiale.
- ✓ Manutenzione assente o poco efficace.

Ulteriori problematiche strutturali:

✓ Martellamento strutturale:

- giunti tecnici di insufficiente ampiezza,
- giunti, di discreta dimensione, riempiti con materiale molto rigido.



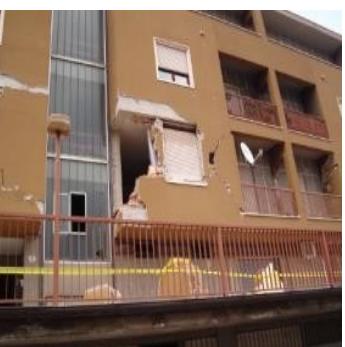
✓ Influenza della tamponatura:

- presenza di pannelli esterni non ben collegati al telaio,
- elementi di rigidezza paragonabile al calcestruzzo,
- interruzioni di tamponature che creano pilastri corti.



✓ Assenza dei piani infinitamente rigidi:

- presenza di solai di modesto spessore,
- solette collaboranti senza reti elettrosaldate.



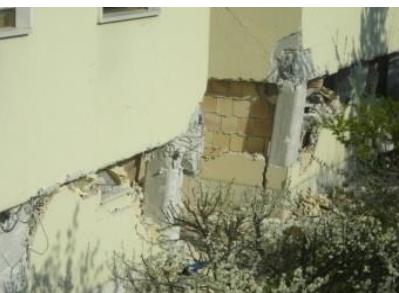
1. Quadro storico normativo nazionale
2. Alcune osservazioni preliminari
3. Proprietà delle strutture in c.a.
4. Elementi principali sede del danno
5. Principali meccanismi
6. Alcuni esempi di rotture strutturali:
 - i. meccanismi globali
 - ii. meccanismi locali:
 - a. meccanismi duttili
 - b. meccanismi fragili



PIANO SOFFICE

1. Accensione di tutte le cerniere plastiche in testa ai pilastri di una elevazione;
2. Formazione di meccanismi di piano per
 - i. effetti torsionali,
 - ii. distribuzione irregolare della tamponatura in pianta e in elevazione (concentrazione del danno nel piano meno rigido).
3. Possibile incremento delle azioni sismiche per amplificazione locale.

**Meccanismo globale
«fragile»: dissipa poca
energia.**

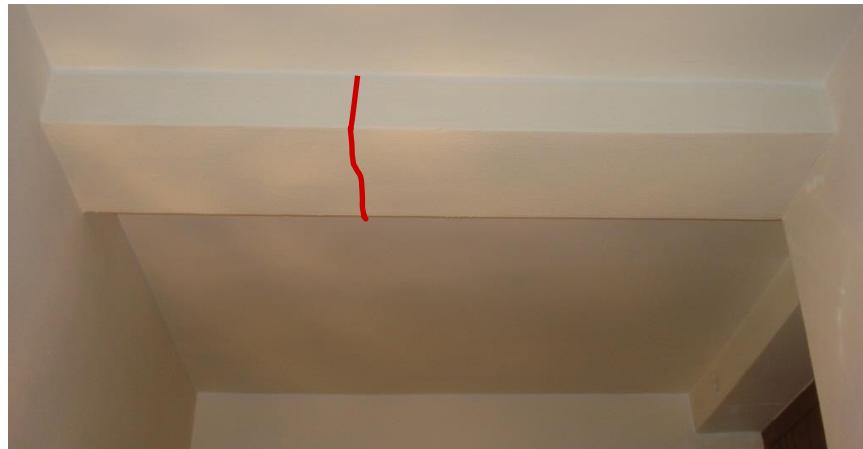
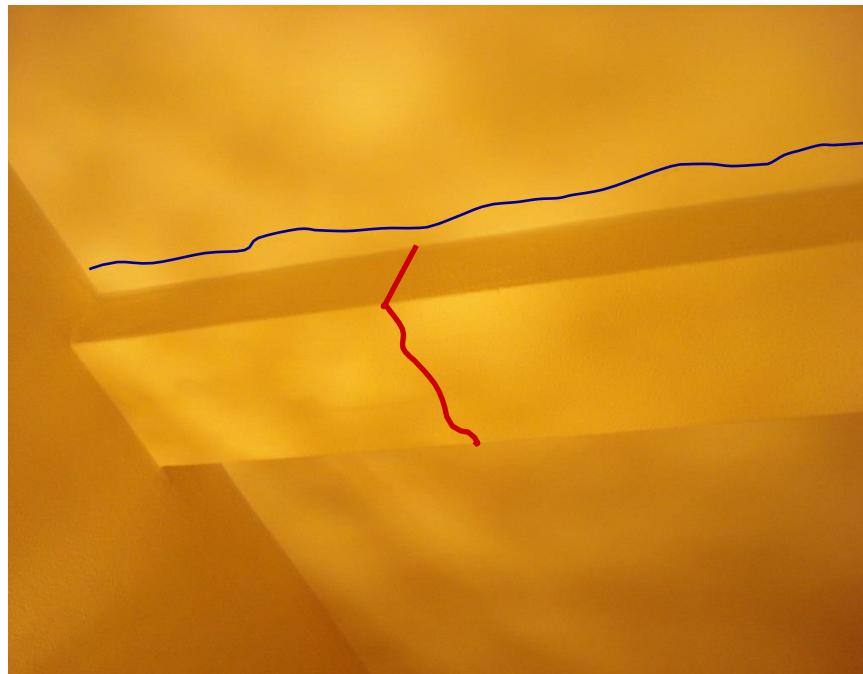








1. Quadro storico normativo nazionale
2. Alcune osservazioni preliminari
3. Proprietà delle strutture in c.a.
4. Elementi principali sede del danno
5. Principali meccanismi
6. Alcuni esempi di rotture strutturali:
 - i. meccanismi globali
 - ii. meccanismi locali:
 - a. meccanismi duttili
 - b. meccanismi fragili



LESIONI DA FLESSIONE

1. Fessure verticali o sub-vertic平ali in prossimità della mezzeria.
2. Formazione causata da interazione tra carichi statici (preponderanti) e sismici.
3. Si presume buona staffatura trasversale della trave.

Meccanismo locale che non conduce a particolari problemi strutturali.

Possibile ripristino in tempi brevi anche con tecniche tradizionali ovvero FRP.

ROTTURA TRAVI PER FLESSIONE





CERNIERE PLASTICHE

1. Innesco cerniere plastiche flessionali.
2. Acciaio appena in campo post- elastico in quanto fessure poco inclinate (piccole rotazioni della sezione).
3. Si presume buona staffatura trasversale della trave.
4. Il pilastro non è lesionato:
 - i. si presume sia ben armato a pressoflessione,
 - ii. si presume ben staffato.

Meccanismo locale da prediligere.

Ottima capacità dissipativa. Grazie alle piccole rotazioni della sezione è possibile ripristinare rapidamente.



CERNIERE PLASTICHE

1. Innesco cerniere plastiche flessionali.
2. Pilastri soggetti ad elevati sforzi assiali:
 - bassa capacità rotazionale.
3. Insufficiente passo staffatura in testa e al piede pilastri:
 - le barre compresse sono instabilizzate;
 - la cerniera plastica dissipa molto meno (cicli d'isteresi molto più allungati verso l'alto e stretti).

Meccanismo scarsamente dissipativo.

Presenza di un piano non tamponato dove si è concentrato il danno.

Struttura non recuperabile in breve tempo, consigliabili forti ringrossi.



CERNIERE PLASTICHE

1. Innesco cerniera plastica in testa al pilastro del primo piano.
2. Barre longitudinali lisce.
3. Calcestruzzo di bassa qualità.
4. A causa di una inesistente staffatura:
 - le barre compresse si sono subito instabilizzate;
 - la cerniera non ha dissipato energia,
 - la rottura è poi avvenuta per taglio.

Meccanismo scarsamente dissipativo.

Tamponatura molto rigida.

Struttura recuperabile, consigliabili forti ringrossi.



CERNIERE PLASTICHE

1. Innesco di cerniere plastiche in una scala a soletta rampante:
 - i. all'attacco tra pianerottolo e rampa,
 - ii. all'attacco trave interpiano e pianerottolo.

Meccanismo INUSUALE.

Scala difficilmente recuperabile.

1. Quadro storico normativo nazionale
2. Alcune osservazioni preliminari
3. Proprietà delle strutture in c.a.
4. Elementi principali sede del danno
5. Principali meccanismi
6. Alcuni esempi di rotture strutturali:
 - i. meccanismi globali
 - ii. meccanismi locali:
 - a. meccanismi duttili
 - b. meccanismi fragili



TAGLIO PILASTRI

1. Pilastro molto corto vista la presenza di tamponatura rigida non su tutta la luce (finestra a nastro).
2. Lesione inclinata in testa al pilastro.
3. Si presume cattiva staffatura trasversale del pilastro.
4. E' evidente l'enorme rigidezza della tamponatura di chiusura.

Capacità dissipativa «NULLA».

Pilastro recuperabile con rinforzo locale.

Consigliabile scollegamento tamponatura interponendo materiale deformabile.

Meccanismo locale sempre da evitare nella progettazione del nuovo.



TAGLIO PILASTRI

1. Pilastri corti a causa trave d'interpiano;
2. Rottura a taglio all'attacco travi a ginocchio e d'interpiano;
3. Staffe pilastro con passo insufficiente e non ancorate nel nucleo;
4. Forte interazione con tamponatura esterna di elevata rigidezza che ha sollecitato le zone nodali;
5. Esplosione del calcestruzzo a causa dello stato pluriassile di sollecitazione vista l'assenza di staffatura adeguatamente confinante;
6. Non c'è rottura nei pilastri lunghi malgrado l'espulsione della tamponatura



TAGLIO PILASTRI

7. Staffe, chiuse per sovrapposizione superficiale, rotte;
8. Barre longitudinali con vistosi sbandamenti longitudinali:
 - i. la lunghezza libera d'inflessione è aumentata a seguito della rottura delle staffe;
9. Pilastro impossibilitato a sorreggere ulteriori azioni cicliche;
10. Pannello nodale apparentemente integro;
11. Travi armate con barre di piccolo diametro;
12. Staffe non passanti nel nodo (perimetrale) non confinato da travi.



TAGLIO PILASTRI

13. Rottura a taglio della trave d'interpiano;
14. Localizzazione del danneggiamento in testa ai pilastri.

La struttura è gravemente lesionata.

Difficile riparare i pilastri (soggetti ad elevati sforzi di compressione).

E' sconsigliabile un recupero per le numerose rotture a taglio dei pilastri corti, delle zone d'attacco dei nodi e dell'esplosione del calcestruzzo.

E' possibile stabilizzare la struttura confinando le estremità degli elementi ormai senza tamponatura.



TAGLIO PILASTRI

1. Pilastri corti per la presenza di bocche di lupo per lo scantinato;
2. Vistose rotture a taglio dei pilastri «lunghi» (oltre ai corti) per interazione con tamponatura molto rigida (blocchi di cls);
3. Rottura staffe ancorate superficialmente nei pilastri e con passi di circa 20 cm;
4. Conseguenti vistose instabilità barre longitudinali;
5. Pannelli nodali non staffati rotti.

Difficile recupero della struttura. Forte decentramento tra elementi. Rinforzo eseguibile solo con ringrossi



Viste della struttura dall'esterno



Viste della struttura dall'interno



TAGLIO NODI

1. Struttura ben dimensionata per gli elementi tozzi presenti (e.g. finestre a nastro scantinato);
2. Nodi non staffati;
3. Espulsione copriferro nel pannello nodale a seguito degli scorrimenti delle armature longitudinali delle travi.





TAGLIO NODI

4. Interazione tamponatura esterna, di diverse tipologie nei vari lati della struttura, con elementi resistenti;
5. Incipiente rottura a taglio pilastri che sta propagando nella zona del pannello nodale (nel bordo terminale nella zona di ancoraggio delle barre longitudinali travi).

Rotture sono allo stato iniziale.

Tutte facilmente riparabili con tecniche classiche e/o innovative.

Struttura recuperabile in breve tempo.



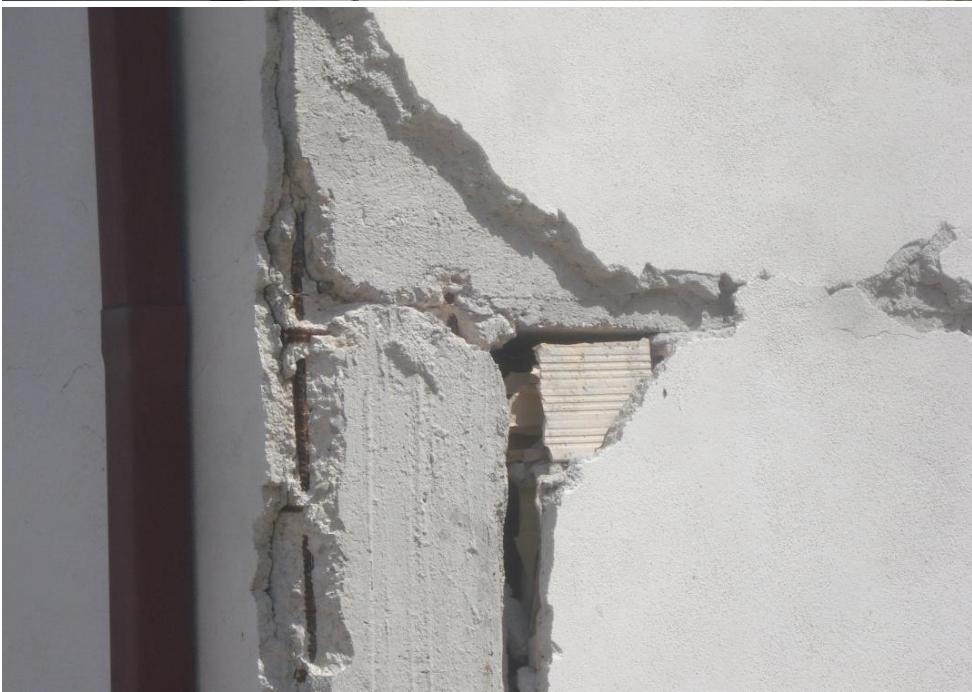
TAGLIO NODI

1. Rottura di taglio degli elementi strutturali con propagazione all'interno del pannello nodale;
2. Rotture dovute anche ad un'interazione con le tamponature perimetrali;
3. Nodi non staffati;
4. Calcestruzzo scadente.

Possibile recupero delle strutture con interventi ridotti.

Si consiglia un ringrosso nodale e, ove possibile, l'inserimento di armatura trasversale.





INTERAZIONE TAMPONATURA

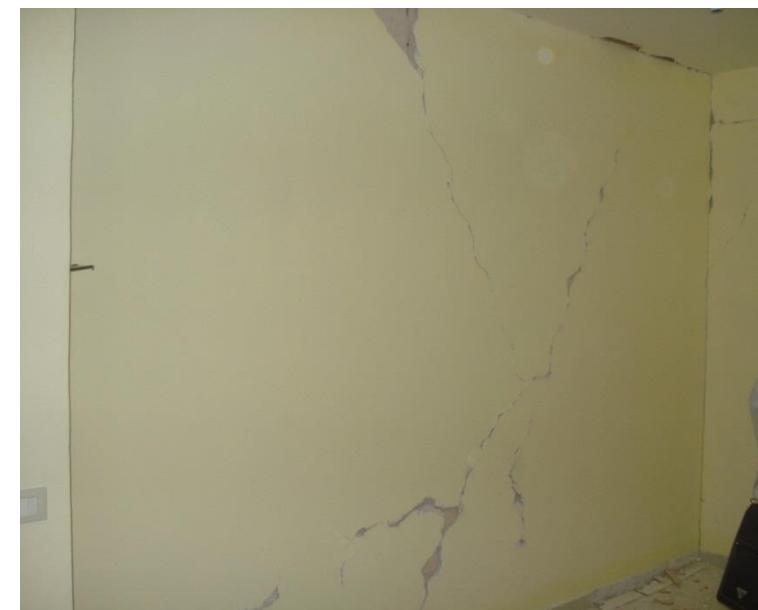
1. Localizzazione del danno in un solo piano dell'edificio a causa dell'interazione tra tamponatura (rigida) esterna e pilastro;





INTERAZIONE TAMPONATURA

1. La rottura dei pannelli di tamponatura è molto più evidente nelle zone interne dell'edificio dove è possibile osservare le tipiche rotture a X;





INTERAZIONE TAMPONATURA

1. Localizzazione del danno in un solo piano dell'edificio a causa dell'interazione tra tamponatura (rigida) esterna e pilastro;
2. La tamponatura si presenta lesionata solo in prossimità del pilastro;
3. Pilastro debole-trave forte;
4. Le rotture per interazione sono spesso in testa ai pilastri e non nelle travi:
 - i. il getto continuo dell'impalcato rende monolitico il blocco trave-solaio.









Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Le **tamponature** sono elementi che in condizioni ordinarie svolgono un **ruolo statico modesto**:
 - possono essere trascurate nella risposta statica dell'edificio in c.a..
- ✓ Nel caso di **sollecitazioni sismiche** svolgono invece un'azione **sostanziale nel comportamento laterale dell'edificio** poiché:
 - il **telaio nudo è più deformabile**, sotto azioni sismiche si rompe per accensione delle cerniere alla estremità delle travi (possibilmente), mostrando un comportamento duttile;
 - il **pannello di tamponatura, molto rigido nel proprio piano**, si rompe per forze molto più elevate e con spostamenti piccoli, presentando un comportamento fragile.



Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Il **telaio tamponato** ha un **comportamento intermedio** rispetto ai due precedenti:
 - la tamponatura interviene fin dalle prime fasi assorbendo una buona parte del carico orizzontale;
 - il telaio migliora la capacità di resistenza della tamponatura grazie all'effetto di confinamento, importante con il manifestarsi delle prime fessurazioni.
- ✓ Il **telaio tamponato** difficilmente presenterà rotture classiche negli elementi portando, nella maggior parte dei casi, a **rotture «ibride» dovute all'interazione telaio-tamponatura**.



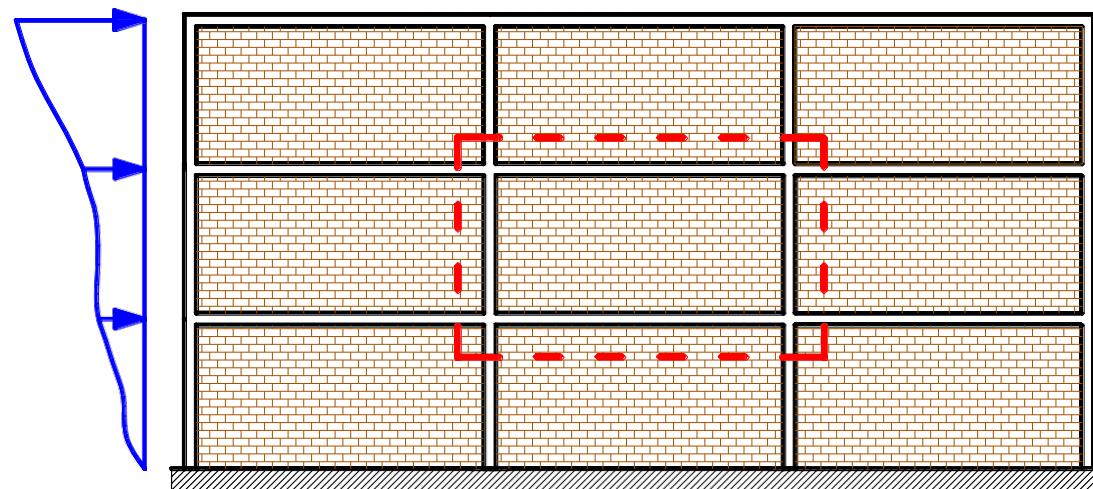


COMPORTAMENTO A TELAIO

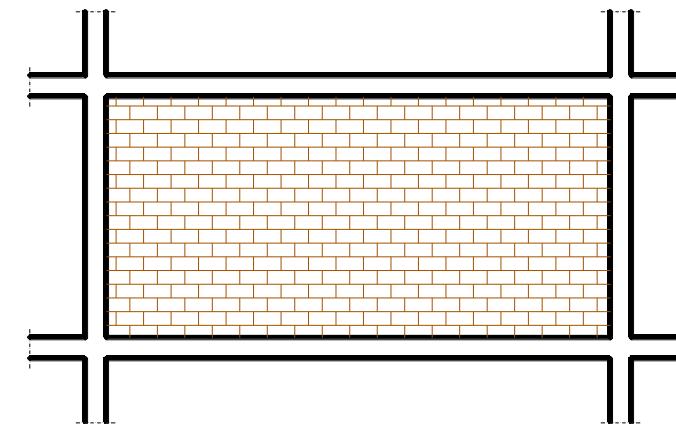
1. La struttura presenta due scale rampanti;
2. Il tetto è in latero cemento così come gli impalcati di piano;
3. Non è mai stato tamponato;
4. Non ha subito alcun danno nel sisma del 2009 che ha colpito L'Aquila;
5. Le tamponature giocano dunque un ruolo cruciale in zona sismica, tanto più quanto la struttura è flessibile.

Comportamento sismico delle tamponature

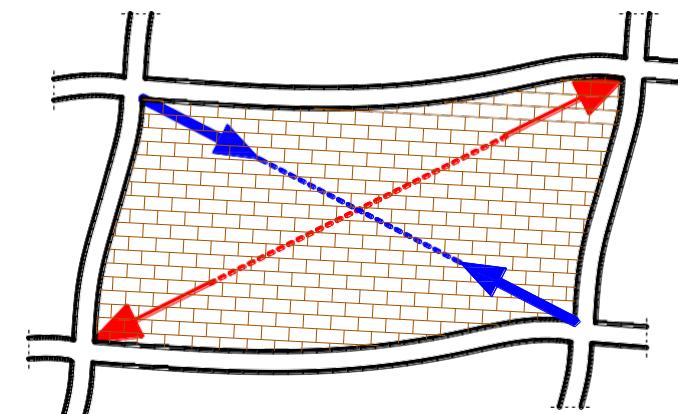
- ✓ Per piccoli spostamenti laterali la resistenza della tamponatura e delle connessioni al telaio garantiscono il comportamento elastico dell'insieme telaio-tamponatura.



Configurazione indeformata

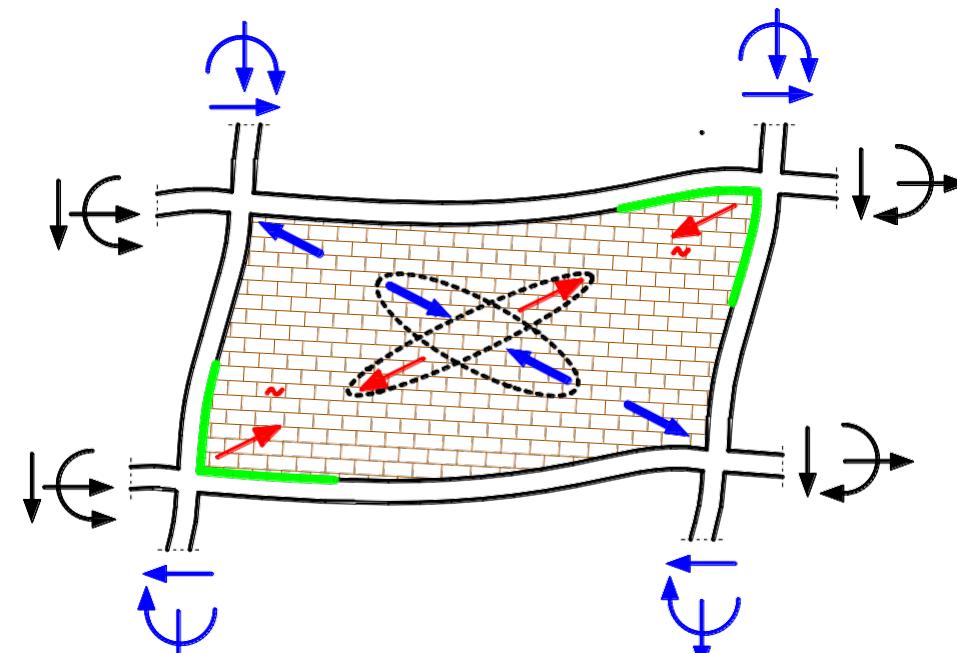


Configurazione deformata



Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ All'aumentare dello spostamento laterale si produce il **distacco della tamponatura dai pilastri lungo la diagonale tesa**.

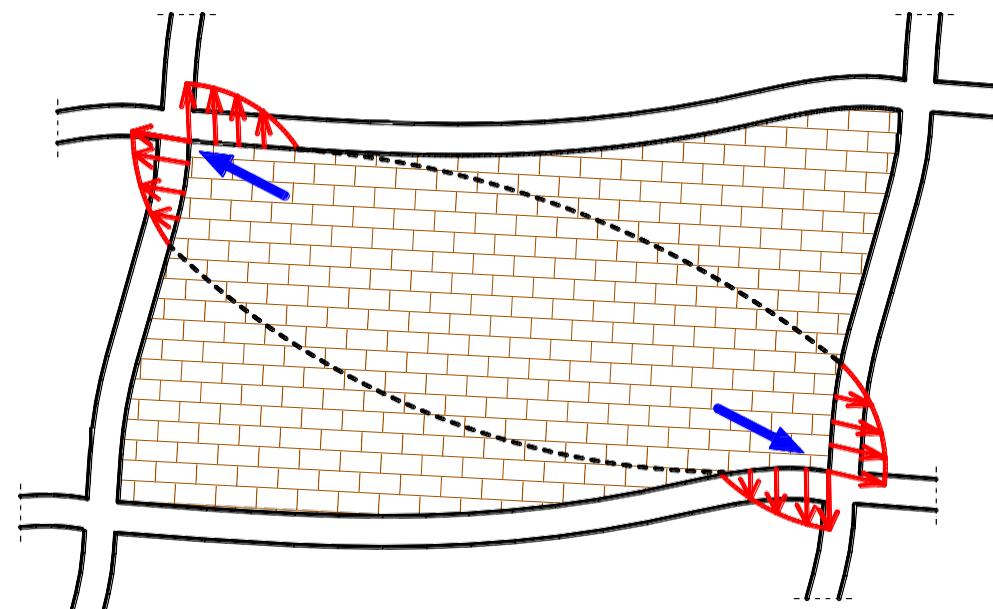


- ✓ In queste condizioni, **la tensione è trasmessa solo dalla zona compressa**, che rimane a contatto con il telaio:
 - la tamponatura è quindi schematizzabile, nel più semplice dei modelli, come una biella inclinata resistente alla sola compressione.

Comportamento sismico delle tamponature

✓ Le **tensioni** che nascono all'**estremità** della **trave** inducono:

- Taglio nella trave,
- Sforzo normale nel pilastro,
- Momento flettente nella trave (indirettamente).

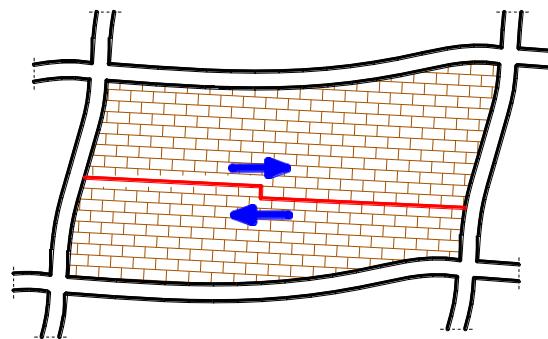


✓ Le **tensioni** che nascono all'**estremità** del **pilastro** inducono:

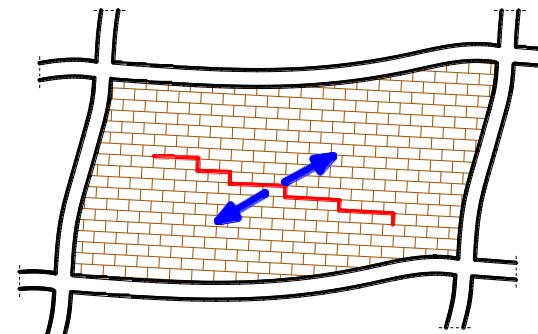
- Taglio nel pilastro,
- Sforzo normale nella trave,
- Momento flettente nel pilastro (indirettamente).

Comportamento sismico delle tamponature

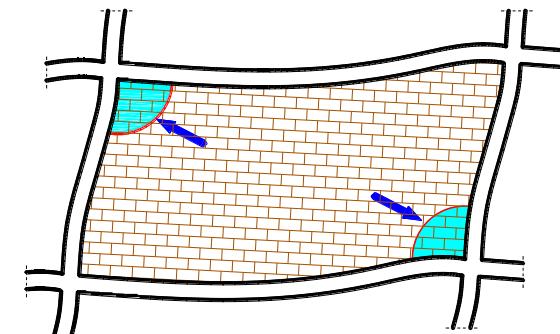
- ✓ All'aumentare dello spostamento la **tamponatura** può giungere a **rottura** per:



**SCORRIMENTO
ORIZZONTALE**
Dovuta alle tensioni
tangenziali agenti nella
zona centrale



**TRAZIONE
DIAGONALE**
Dovuta alle tensioni di
trazione inclinate agenti
nella zona centrale



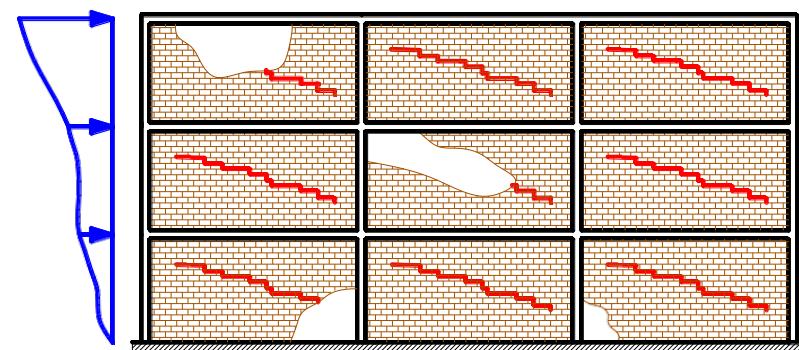
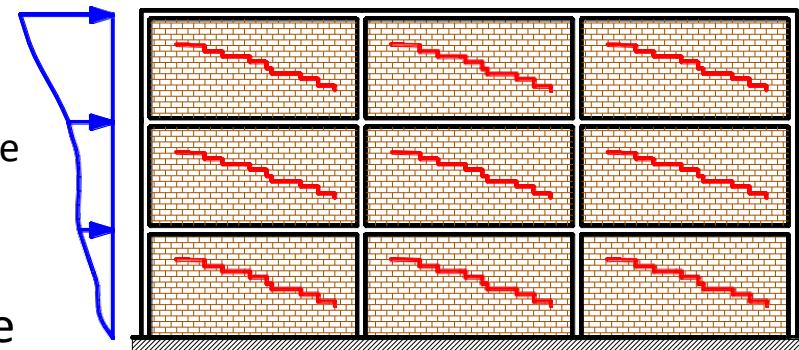
**SCHIACCIAMENTO
SPIGOLI**
Dovuta alla
concentrazione delle
forze orizzontali di
interazione trasmesse dal
telaio

Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Il telaio soggetto a sisma, sotto azioni sismiche, si danneggia prima nelle tamponature:
 - se paragonate al telaio si presentano più rigide e meno resistenti.

- ✓ In presenza di tamponatura «leggera» queste si lesioneranno, al crescere dell'azione sismica, lungo le diagonali dissipando una grande quantità d'energia.

- ✓ Al crescere del danneggiamento delle tamponature ci sarà un progressivo trasferimento di carico da queste al telaio.





INTERAZIONE TAMPONATURA

1. Strutture fortemente controventate dalle tamponature;
2. Progressivo danneggiamento dei pannelli con concentrazione in alcuni piani.





INTERAZIONE TAMPONATURA

1. Localizzazione del danno in un solo piano dell'edificio a causa dell'interazione tra tamponatura (rigida) esterna e pilastro;
2. Crollo parziale della tamponatura per fessurazione diagonale;
3. Prosecuzione del danno in testa al pilastro di primo piano;
4. Evidente scorimento tra impalcato e pilastro;
5. In testa il pilastro presenta una staffatura con una buona chiusura.
6. Incipiente rottura a taglio in mezzeria pilastro.



INTERAZIONE TAMPONATURA

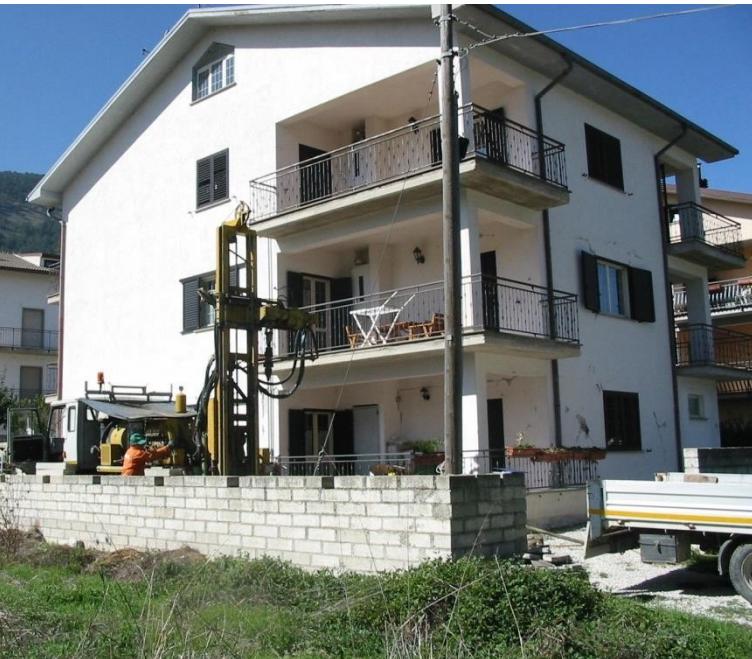
6. Le barre sono instabilizzate a causa di una staffatura con passo insufficiente;
7. Il calcestruzzo è esploso.





INTERAZIONE TAMPONATURA



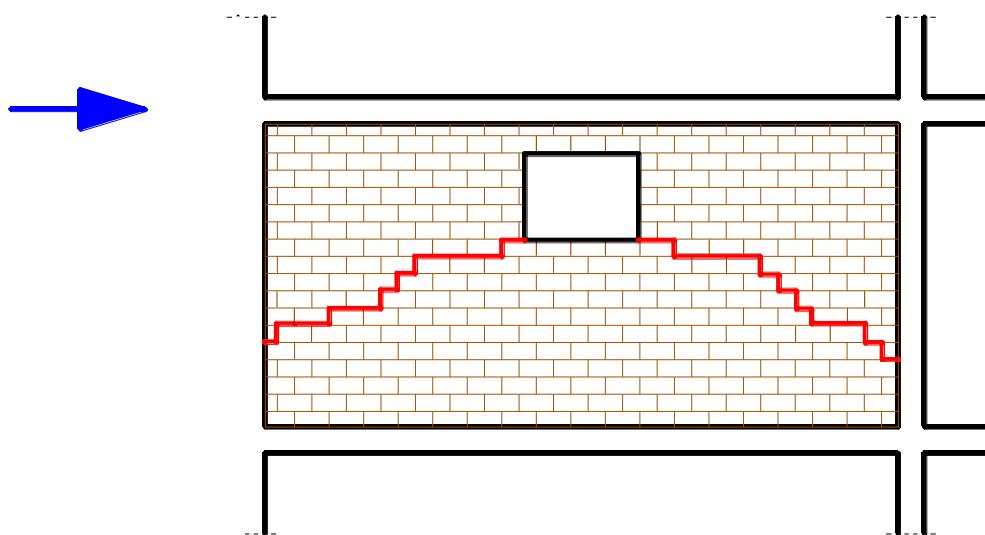


INTERAZIONE TAMPONATURA



Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Il comportamento del pannello di tamponatura è alterato dalla presenza di finestre o porte:
 - il flusso delle compressioni risulta deviato.



- ✓ La rottura dei pilastri laterali non avverrà più in testa (la biella non è più lungo la diagonale del telaio) ma ad una quota intermedia.

Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Il comportamento del pannello di tamponatura è alterato dalla presenza di finestre o porte:
 - il flusso delle compressioni risulta deviato.



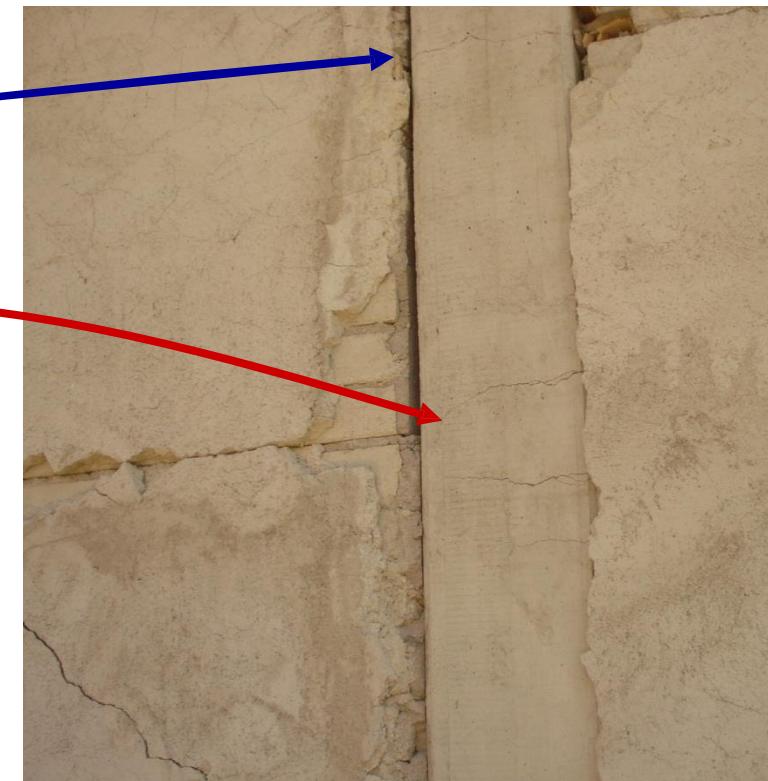
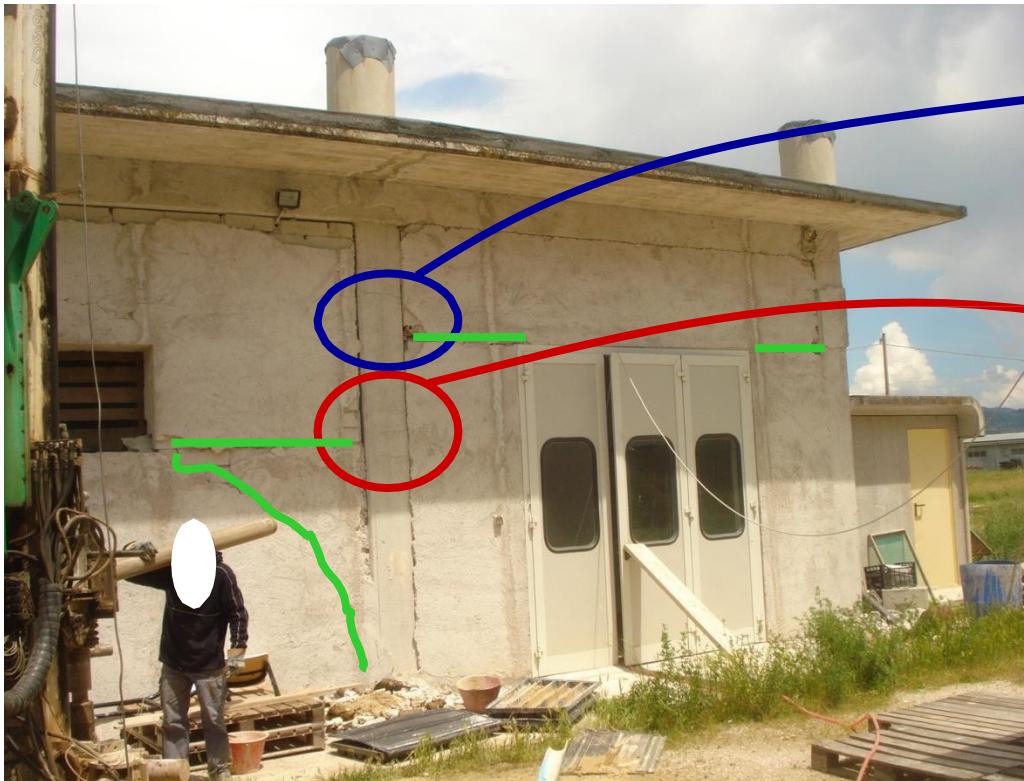
Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Il pilastro risulta sollecitato all'altezza della lesione per scorrimento della tamponatura.



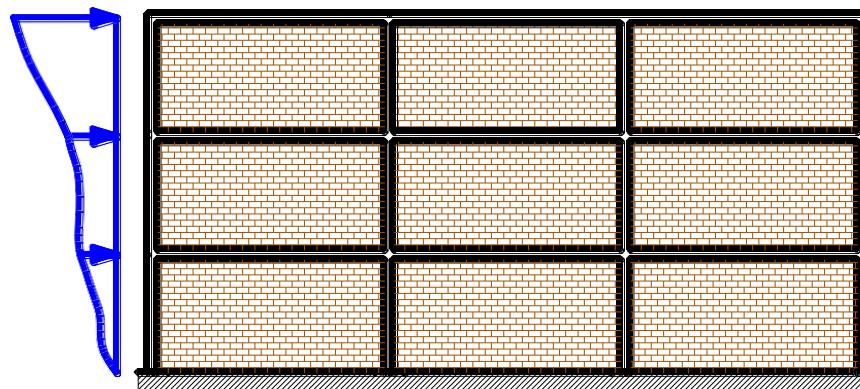
Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Il pilastro risulta sollecitato all'altezza della lesione per scorrimento della tamponatura.

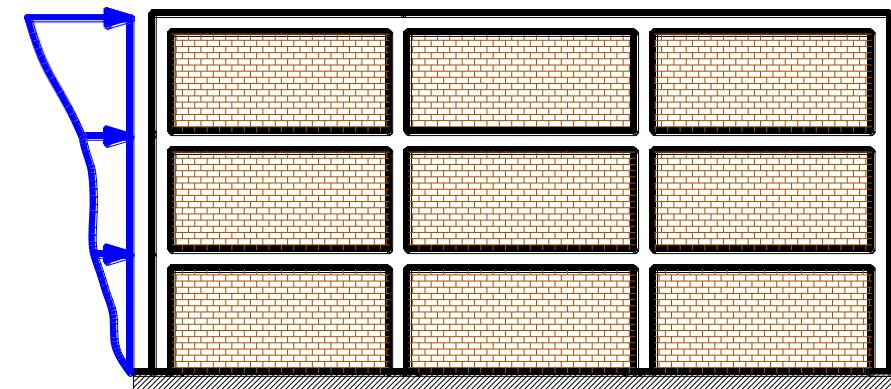


Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Più flessibile è il sistema strutturale maggiore sarà l'effetto irrigidente della tamponatura sul telaio:

STRUTTURA POCO RIGIDA

Tamponatura entra
maggiormente in gioco nel
comportamento globale

STRUTTURA MOLTO RIGIDA

Tamponatura meno
preponderante nel
comportamento globale

Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Esempio di **struttura flessibile** con tamponature molto lesionate.



Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Esempio di **struttura flessibile** con tamponature fortemente lesionate.



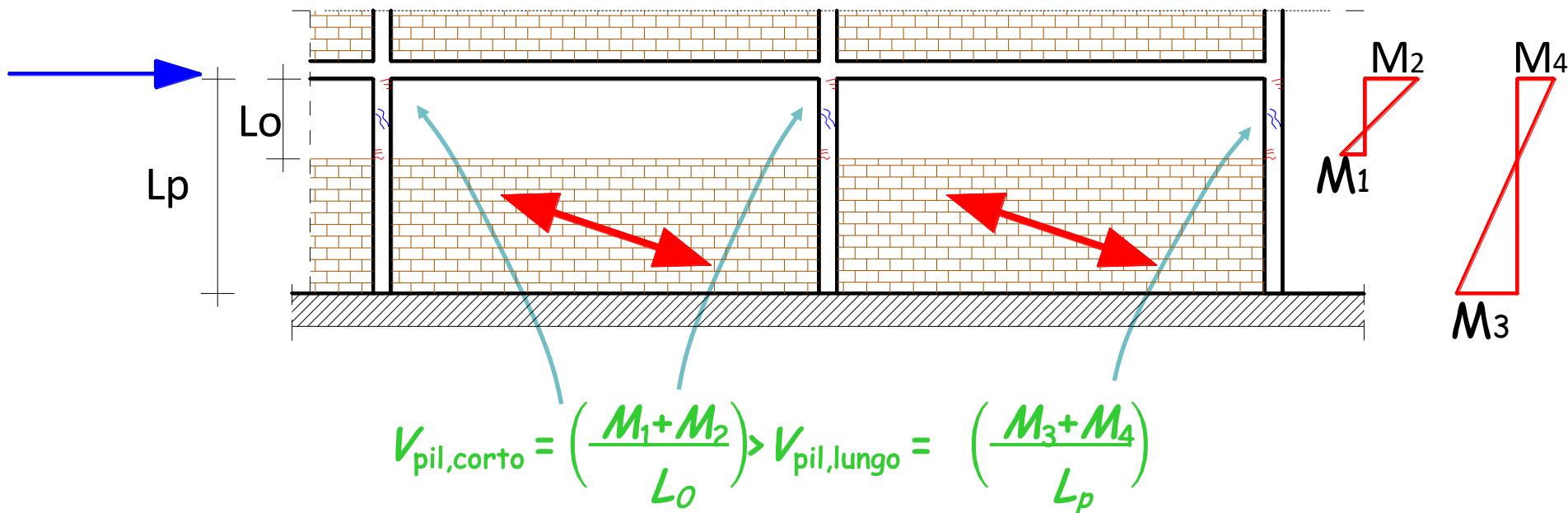
Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Esempio di **flessibile** con tamponature fortemente lesionate.



Comportamento sismico delle tamponature

- ✓ Le tamponature estese solo per porzione del solaio, a causa della presenza di finestre a nastro o di bocche di lupo, modificano negativamente la risposta strutturale:
 - il taglio sollecitante aumenta rispetto al caso di pilastro non tamponato.





TAGLIO PILASTRI

1. Pilastri molto corti;
2. Sollecitazioni di taglio elevate visti i bassi rapporti di snellezza;
3. Tamponatura con diversa rigidezza lungo il pilastro:
 - i. nello scantinato è molto rigida e non contenuta nel solo telaio,
 - ii. fuori terra la tamponatura è confinata all'interno degli elementi resistenti.
4. La rottura interessa anche porzione del pannello nodale perimetrali e non solo la testa/piede dei pilastri

Rottura scarsamente dissipativa.

La struttura è recuperabile previo ringrosso dei pilastri corti e dei relativi nodi trave-pilastro.



Rotture allo stato iniziale.

Tutte facilmente riparabili con tecniche classiche e/o innovative.

Struttura recuperabile in breve tempo.

INTERAZIONE TAMPONATURA

1. Localizzazione del danno in un solo piano dell'edificio;
2. Il danno è concentrato dove c'è una variazione di rigidezza nei pannelli a causa delle aperture;
3. Leggere lesioni in testa ai pilastri.



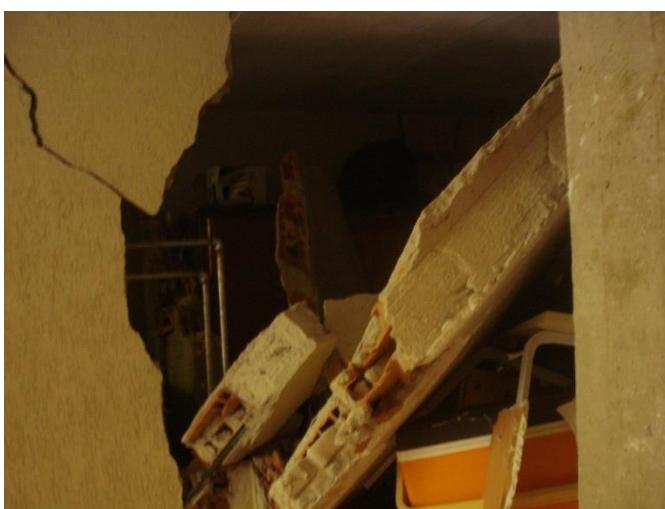




INTERAZIONE TAMPONATURA

1. Localizzazione del danno in un solo piano dell'edificio a causa dell'interazione tra tamponatura (rigida) esterna e pilastro;
2. Crolli parziali delle tamponature per fessurazione diagonale;
3. Interazioni della tamponatura sia con pilastri sia con travi;
4. Calcestruzzo in cattive condizioni.







INTERAZIONE TAMPO NATURA



INTERAZIONE TAMPO NATURA



INTERAZIONE TAMPO NATURA



INTERAZIONE TAMPONATURA



TAMPONATURA MAL AMMORSATE AL TELAIO



TAMPONATURA MAL AMMORSATE AL TELAIO

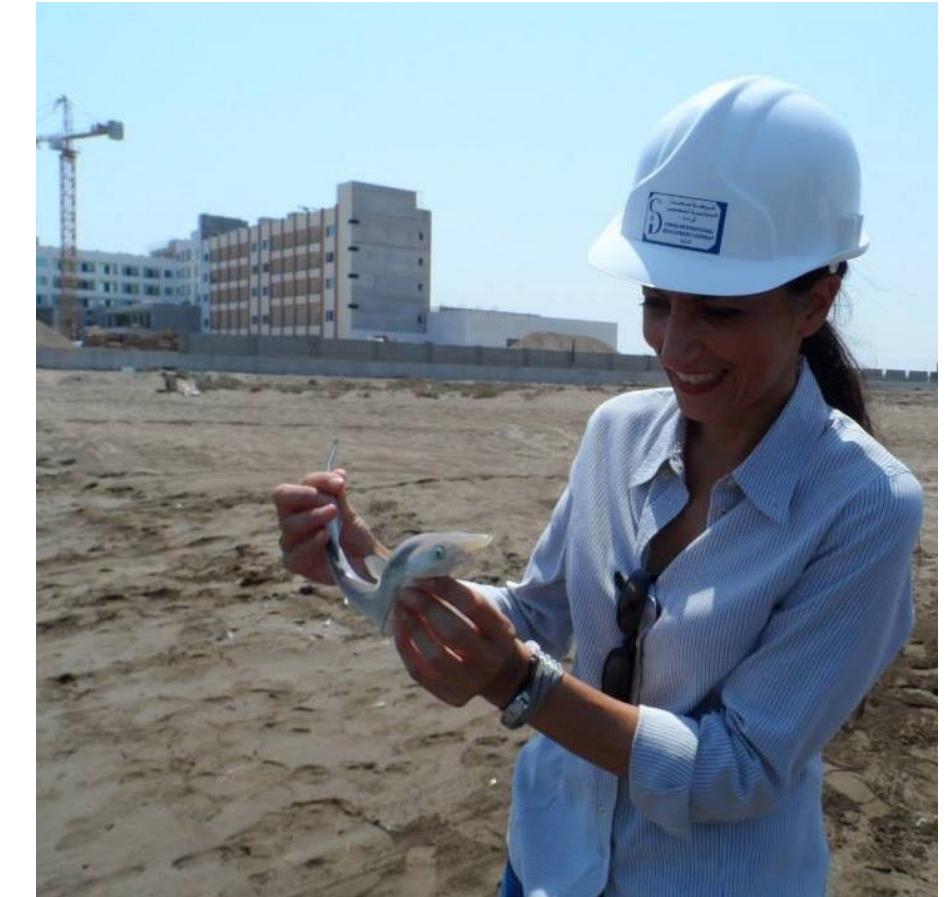


Anche gli squali quando mostrano i denti sembra che sorridano

giuliafresca@gmail.com



Fresca's "Engineering - Architecture - MEP & Energy Technologies - Industry 4.0 & ITT" since 1996



:ITALIACORSI

FORMAZIONE PROFESSIONALE CONTINUA

www.italiacorsi.it