

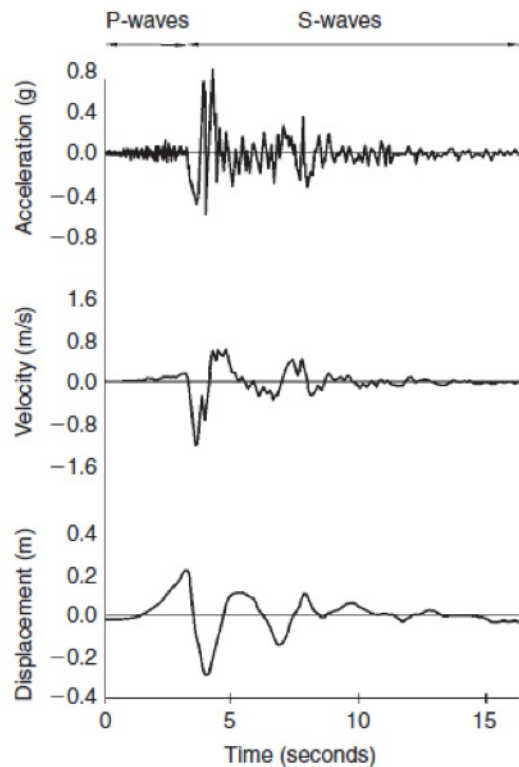
## F2 - Elementi di progettazione in zona sismica

---

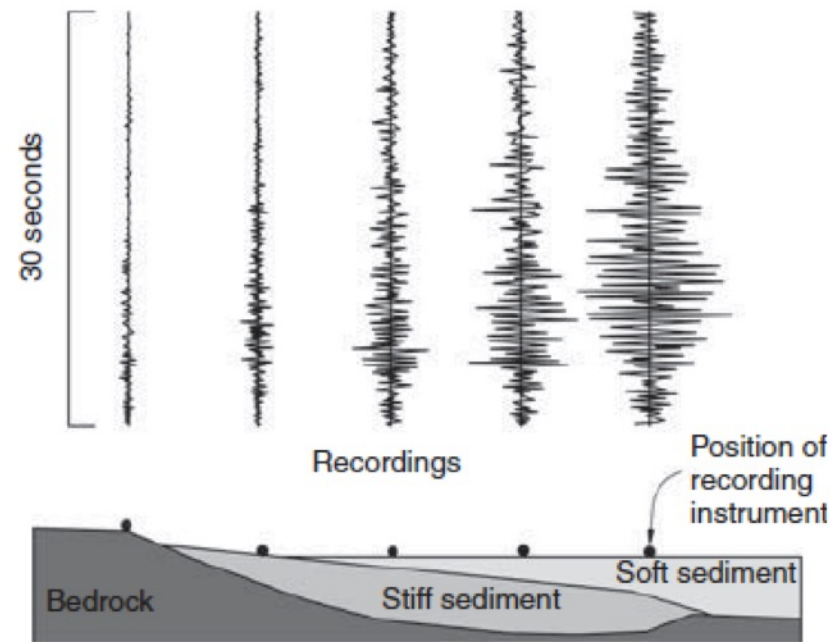
# Risposta sismica

La risposta sismica globale di un edificio dipende dall'interazione delle sue **proprietà dinamiche** (massa, rigidità e smorzamento) con le caratteristiche del **moto del suolo**.

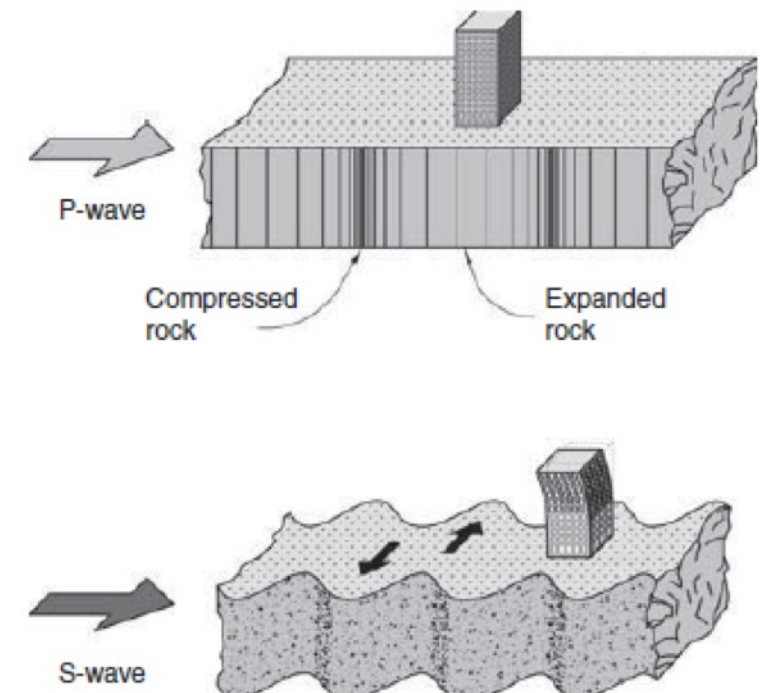
Queste ultime possono essere espresse in termini di **accelerazione di picco, contenuto in frequenza, durata ed eventuali effetti amplificativi del sito** di costruzione.



*Sylmar, CA, 1994*



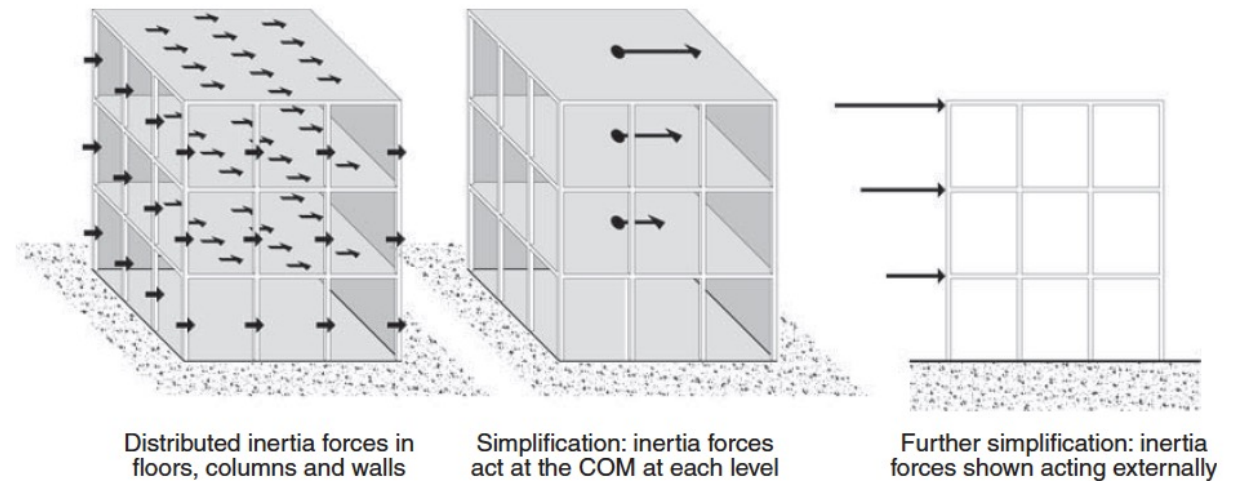
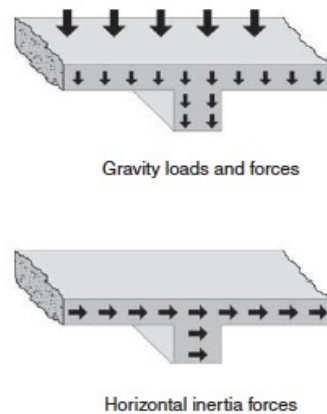
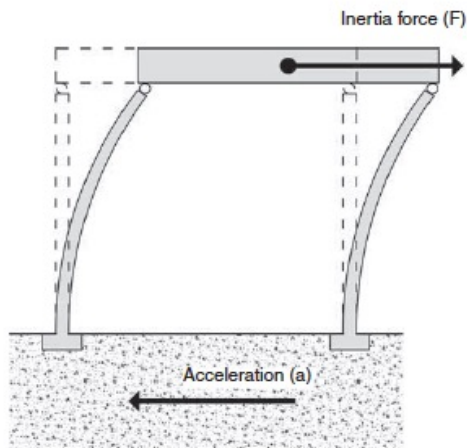
*Wellington, NZL*



# Le forze d'inerzia

Per effetto di un moto sismico del suolo, l'edificio inizia a vibrare e al suo interno nascono **forze d'inerzia** proporzionali alle masse, che si oppongono al moto. Le forze d'inerzia sono distribuite come le forze di gravità, eccetto che agiscono in direzione orizzontale.

Le forze d'inerzia, che assumono il ruolo di **forze sismiche**, possono essere quantificate mediante la **seconda legge di Newton**,  $F = ma$ , in cui  $m$  e  $a$  sono la massa e l'accelerazione rispettivamente. Per semplicità, le forze sismiche si considerano applicate ai centri di massa di ogni impalcato.

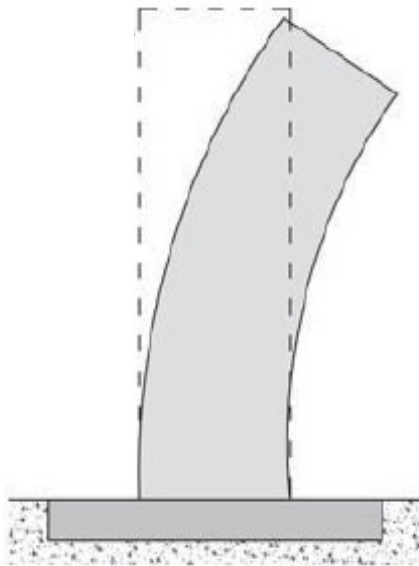


La seconda legge di Newton afferma che, a parità di accelerazione, le forze sismiche sono proporzionali alla massa e dunque al **peso dell'edificio**. Per questa ragione, le costruzioni in zona sismica dovrebbero essere **leggere**.

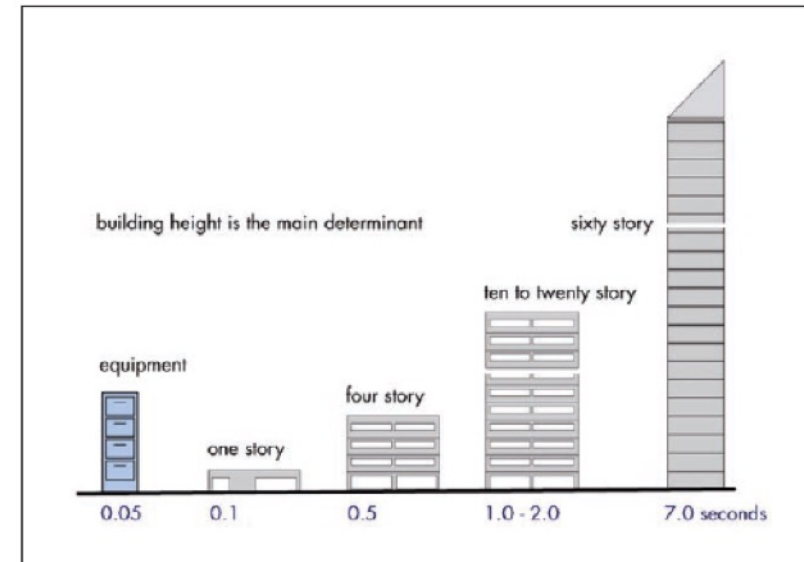
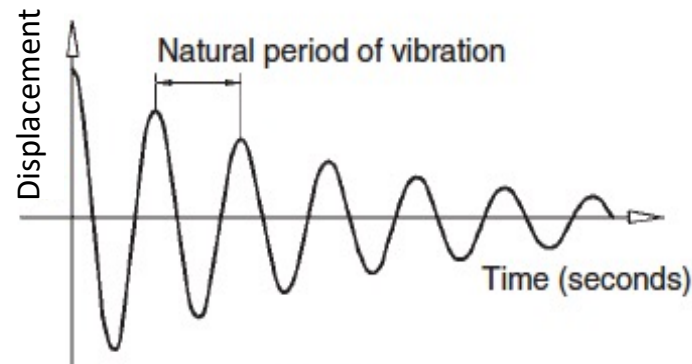
# Il periodo fondamentale di vibrazione

Si consideri un edificio e lo si deformi idealmente imponendo uno spostamento arbitrario in sommità. Se viene rilasciato improvvisamente, l'edificio inizia a vibrare avanti e indietro. Il tempo impiegato a compiere un ciclo completo di vibrazione, misurato in secondi, prende il nome di **periodo fondamentale di vibrazione**.

Ogni edificio ha un periodo fondamentale di vibrazione, che corrisponde a una forma con cui vibra. Questa forma, caratterizzata da spostamenti aventi tutti lo stesso segno, prende il nome di **primo modo di vibrazione** o **modo fondamentale di vibrazione**. Il periodo fondamentale di vibrazione di un edificio dipende essenzialmente dalla sua altezza. Una stima approssimata si può ottenere dividendo per 10 il numero dei piani.



(a) First mode of vibration



# Fattori che influenzano l'intensità delle forze sismiche

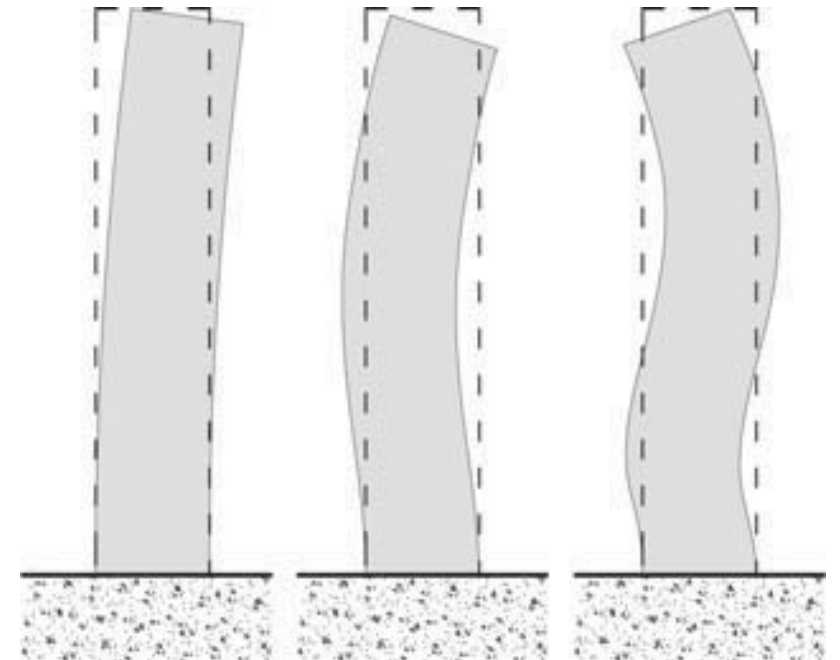
---

Oltre che dall'altezza, il periodo fondamentale di vibrazione è influenzato anche dal **sistema strutturale**, dal **materiale** e dalle **proporzioni geometriche** della costruzione. Più rigido è il sistema strutturale, più piccolo sarà il periodo. Per esempio, poiché un sistema a pareti è più rigido di un sistema a telaio, il suo periodo sarà minore. Inoltre, maggiore è il peso dell'edificio, più grande sarà il suo periodo fondamentale di vibrazione. In pratica, il periodo fondamentale di vibrazione può variare da un minimo di 0,05 s per edifici rigidi a un piano, fino a oltre 7 s per gli edifici alti.

L'inverso del periodo prende il nome di **frequenza**, e rappresenta il numero di cicli di vibrazione compiuti nell'unità di tempo.

In generale, un edificio può avere altri periodi di vibrazione, di valore sempre decrescente, che corrispondono ad altre forme con cui può vibrare, indicate come **modi superiori** (*secondo modo, terzo modo, ecc...*). In generale, un edificio ha tanti modi quanti sono i suoi piani.

Di solito, però, solo i primi pochi modi di vibrazione contribuiscono in modo rilevante alla risposta sismica. I modi più alti, infatti, sono poco eccitati dal sisma e contengono una quantità molto minore di energia.



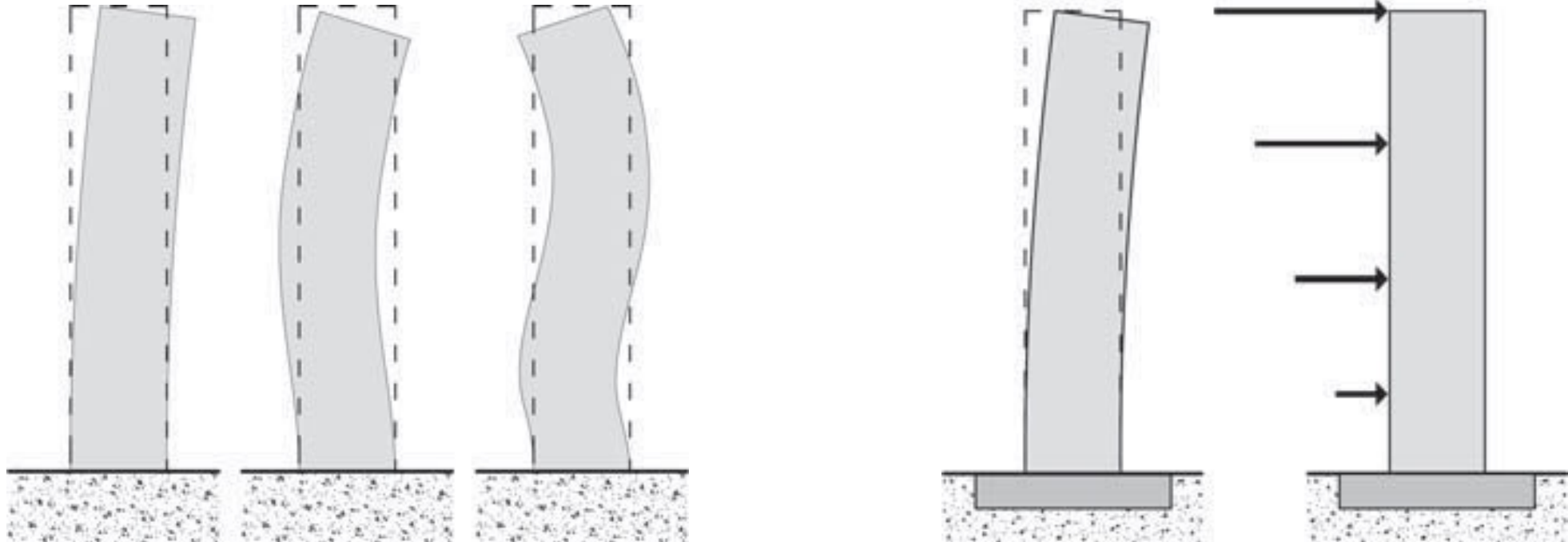
# Distribuzione spaziale delle forze sismiche

---

Quando le onde sismiche colpiscono le fondazioni di un edificio, con il loro caotico contenuto in frequenza, la struttura in elevazione risponde secondo una combinazione dei modi naturali di vibrazione, posti in risonanza dai diversi periodi contenuti nel moto del suolo.

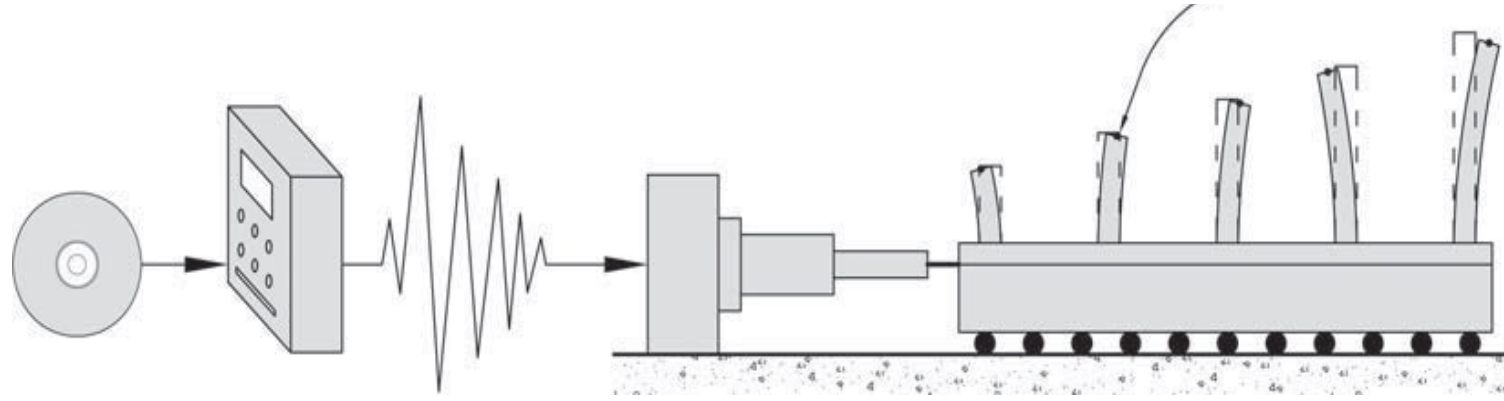
Negli edifici di bassa o media altezza molta dell'energia trasmessa dal sisma pone in risonanza principalmente il primo modo di vibrazione e molto meno gli altri.

Negli edifici regolari, la forma del primo modo somiglia a un **triangolo inverso** e ciò spiega perché le forze d'inerzia che agiscono ai piani crescono con l'altezza.



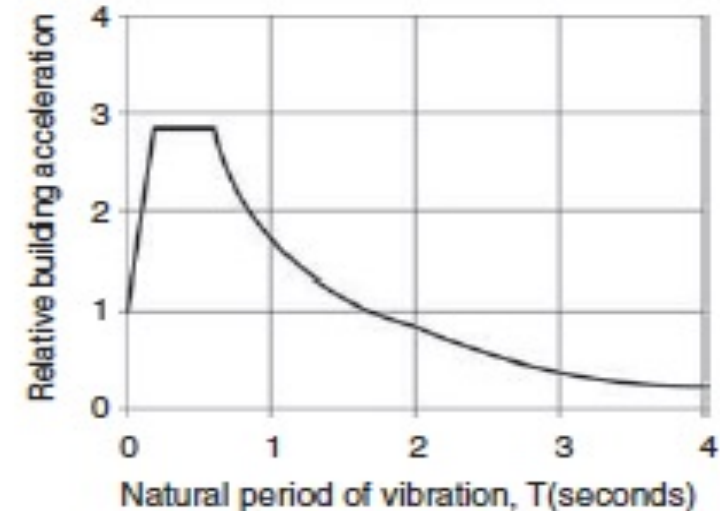
# Spettro di risposta

Lo **spettro di risposta** è un diagramma che illustra e quantifica come il periodo fondamentale di vibrazione influenza la risposta sismica di un edificio.



Una registrazione sismica viene trasmessa attraverso un sistema elettro-meccanico a una tavola vibrante su cui sono fissati diversi modelli di un edificio con identico smorzamento, ma con periodi fondamentali crescenti da sinistra verso destra. Sulla sommità di ognuno è montato un accelerometro per misurare la massima accelerazione orizzontale.

Quando la tavola vibrante simula un moto sismico, ogni modello vibra diversamente e la sua massima accelerazione misurata è riportata in un grafico, detto **spettro di risposta**. Il grafico mostra che per periodi compresi tra 0,2 e 0,7 secondi, tipici della maggior parte degli edifici, l'accelerazione massima dell'edificio è circa tre volte quella del suolo, mentre per periodi maggiori tende a diminuire.



# Smorzamento

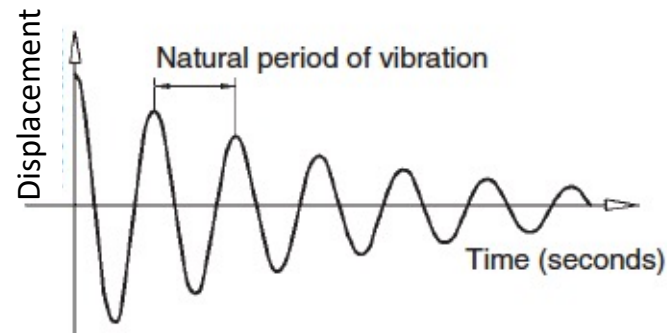
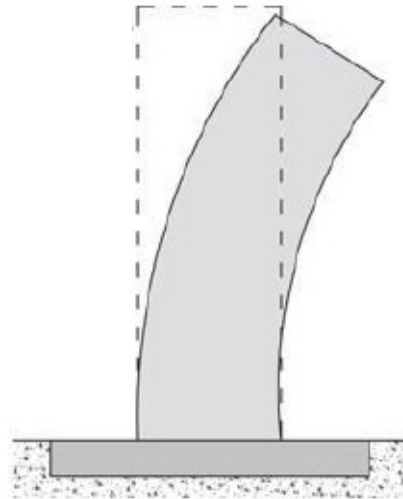
---

Con il termine **smorzamento** s'intende la **dissipazione** di energia dinamica durante il moto. Lo smorzamento è una proprietà dinamica di un sistema strutturale. Principalmente è causato dall'attrito tra i diversi elementi di una costruzione e determina una riduzione dell'ampiezza delle vibrazioni.

In un edificio, il grado di smorzamento dipende dai dettagli costruttivi e dai materiali con cui sono realizzati il sistema strutturale e gli elementi non strutturali.

Le strutture in calcestruzzo armato possiedono uno smorzamento maggiore di quelle in acciaio e uno smorzamento minore di quelle in legno.

L'effetto dello smorzamento è **benefico** perché dissipa parte dell'energia del sisma e riduce la risposta strutturale.

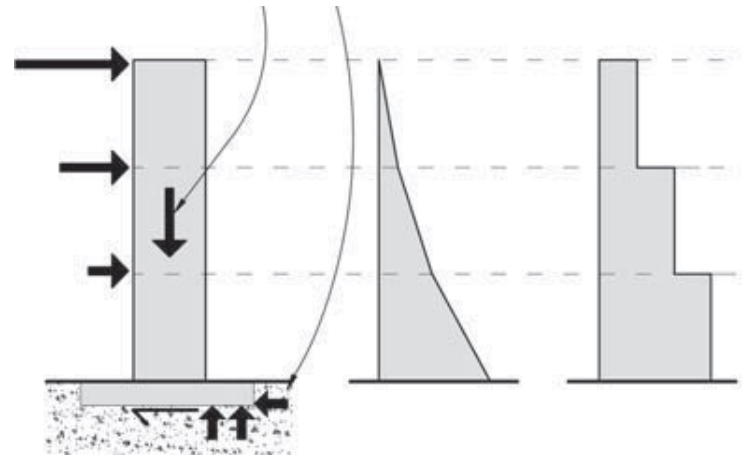
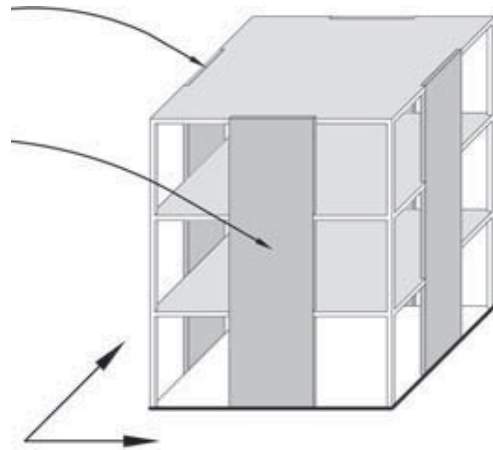




Per opporsi con successo alle azioni sismiche, gli edifici devono possedere adeguate **resistenza**, **duttilità** e **rigidezza**.

## *Resistenza*

La struttura di un edificio deve avere una sufficiente resistenza per resistere alle sollecitazioni prodotte dalle azioni sismiche e una fondazione in grado di evitare ribaltamenti e slittamenti. La resistenza deve essere garantita almeno in due direzioni ortogonali.

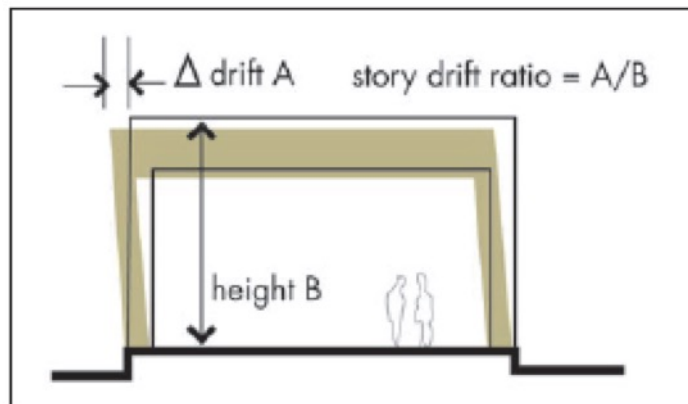


## *Duttilità*

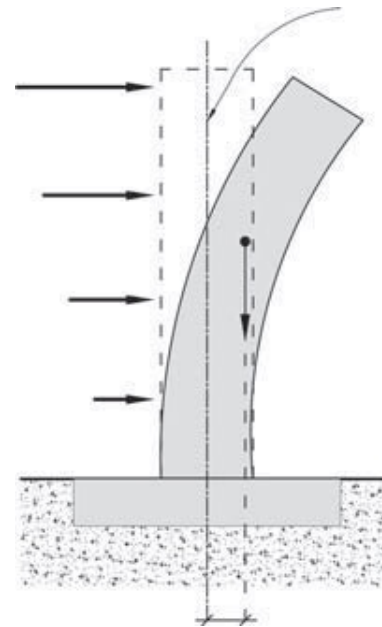
Gli elementi strutturali devono potersi deformare abbondantemente oltre il limite elastico, senza pervenire a rotture di tipo fragile.

## *Rigidezza*

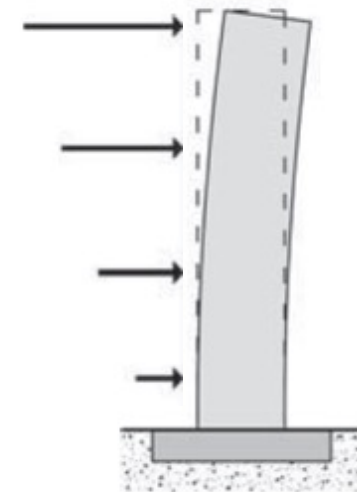
Più una struttura è rigida, meno si deforma per effetto delle azioni sismiche. Edifici sufficientemente resistenti, ma poco rigidi (flessibili) presentano spostamenti grandi. In questo caso gli elementi non strutturali potrebbero danneggiarsi e/o ribaltare. A ciò si aggiunge che più gli spostamenti sono grandi, più si sposta il baricentro delle masse e il peso incrementa l'instabilità degli elementi verticali. Tutto questo condurrebbe a preferire strutture rigide, anche se queste ultime presentano un periodo fondamentale piccolo, cui sono associate forze d'inerzia amplificate.



*Spostamento di interpiano*



*Struttura flessibile (poco rigida)*



*Struttura rigida*

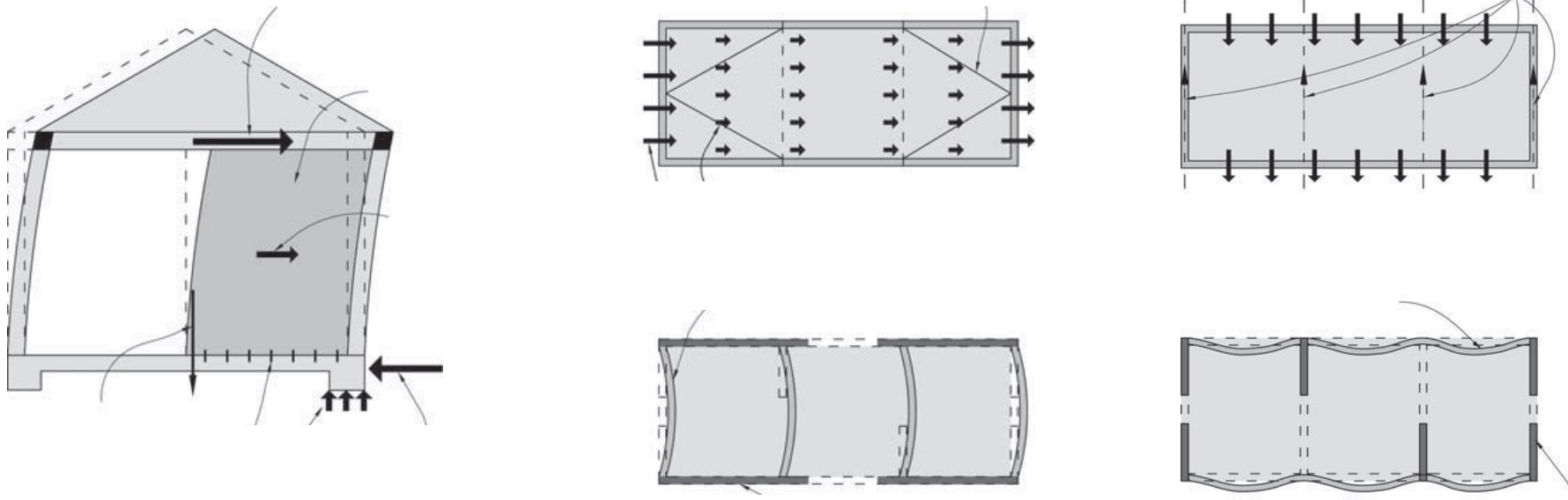
# Percorso delle forze

---

Le azioni esterne si trasmettono alle fondazioni e al terreno attraverso gli elementi strutturali. Il loro percorso dipende da come tali elementi strutturali sono disposti all'interno della costruzione e collegati tra di loro. In altre parole dipende dalla **configurazione** strutturale.

Il termine **percorso delle forze** è metaforico perché le forze in effetti non si muovono, ma esistono all'interno degli elementi resistenti in uno stato di azione e reazione in modo che l'intero organismo strutturale rimanga in equilibrio dinamico.

Tuttavia, il concetto di percorso delle forze costituisce un utile strumento per la visualizzazione e la comprensione del comportamento strutturale, poiché descrive come i diversi elementi resistono alle forze che li sollecitano, e come le trasferiscono ad altri elementi e infine al suolo.



# Elementi strutturali orizzontali (diaframmi)

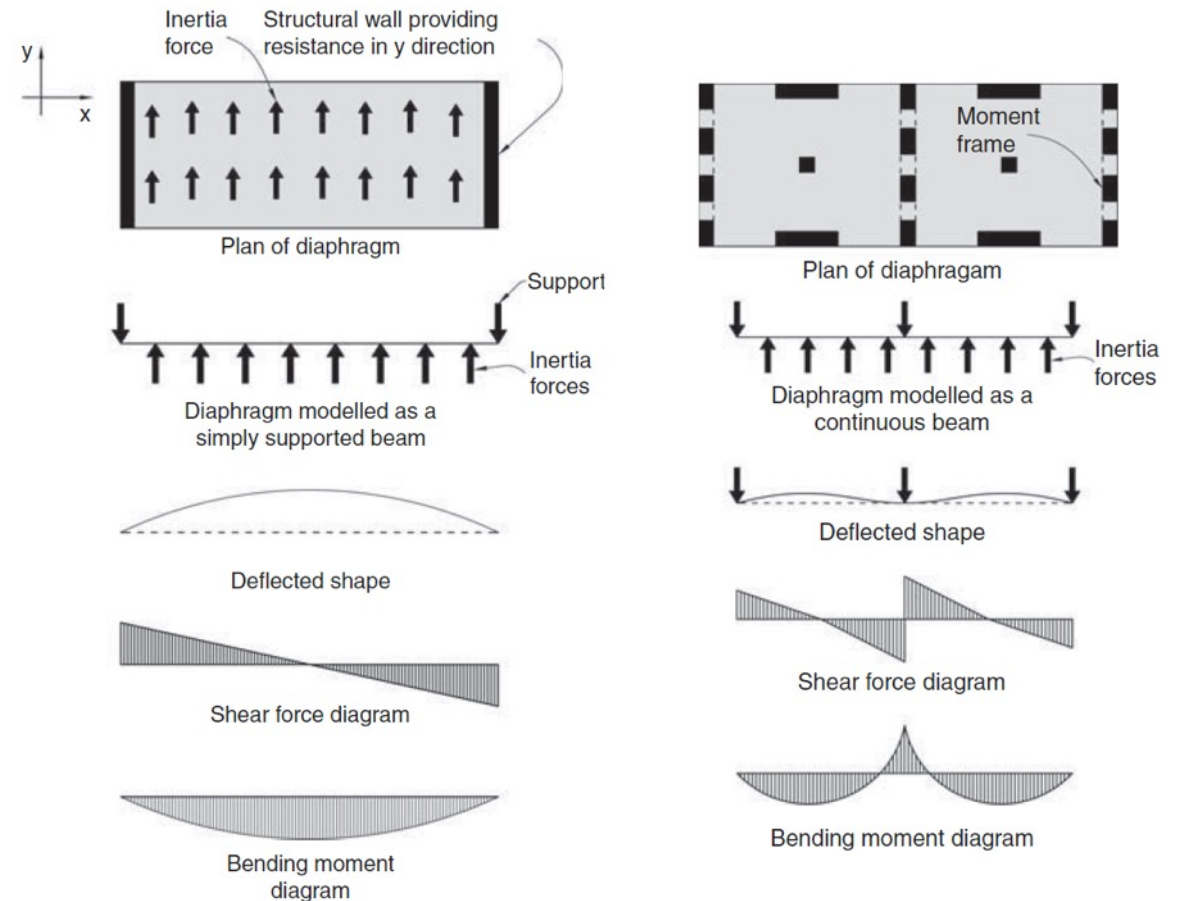
Le principali forze sismiche (forze d'inerzia) nascono in corrispondenza degli elementi strutturali orizzontali, cui è associata la maggior parte della massa della costruzione.

Tuttavia, per la maggior parte del loro periodo di utilizzo, gli elementi di questo tipo sostengono solo i carichi verticali trasversali dovuti all'accelerazione di gravità, permanenti e variabili. In questo caso prendono il nome di **solai** o **impalcati**.

Durante un terremoto, che può durare al massimo alcune decine di secondi, i solai resistono anche alle forze sismiche orizzontali, che agiscono secondo la direzione del loro piano. In questo caso vengono indicati con il termine di **diaframmi**.

Quando funziona come un diaframma, un solaio si comporta come una trave disposta orizzontalmente caratterizzata da un rapporto lunghezza-altezza molto più piccolo di quello di una tipica trave.

Per effetto delle forze sismiche, il solaio sarà soggetto a uno sforzo di taglio e a un momento flettente, il cui andamento dipende dal numero e dalla posizione dei vincoli, costituiti dagli elementi resistenti verticali.

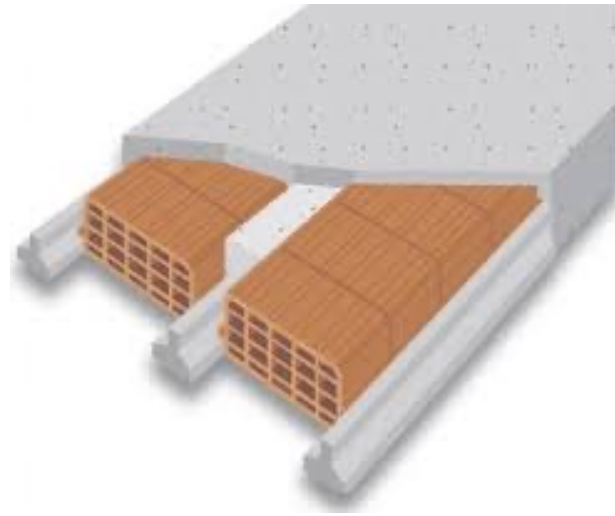


# Diaframmi rigidi e flessibili

---

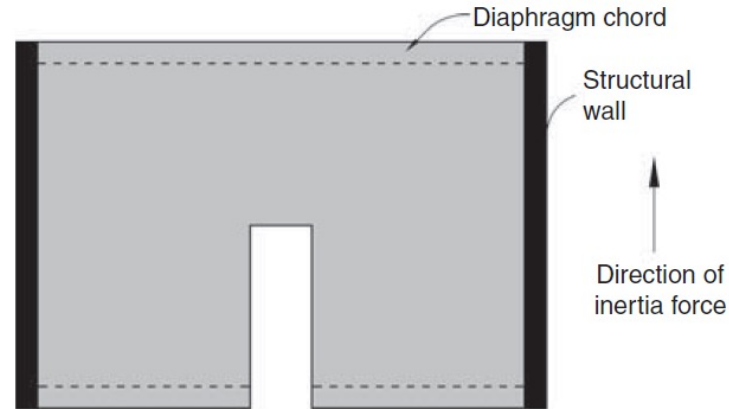
Gli spostamenti massimi orizzontali di un solaio in conglomerato cementizio armato sono di solito molto più piccoli di quelli degli elementi resistenti verticali, cui trasferisce le forze orizzontali. Per effetto della notevole rigidità nel suo piano, un diaframma di questo tipo può considerarsi del tutto rigido. Un ***diaframma rigido*** impone agli elementi verticali di spostarsi della stessa quantità, indipendentemente dalla loro rispettiva rigidità.

Solai realizzati con altri materiali possono avere una rigidità nel proprio piano molto minore degli elementi resistenti verticali. È questo il caso dei ***diaframmi flessibili***, dove ogni elemento verticale è sollecitato dalla forza sismica relativa all'area di solaio corrispondente, proporzionale alla sua rigidità.

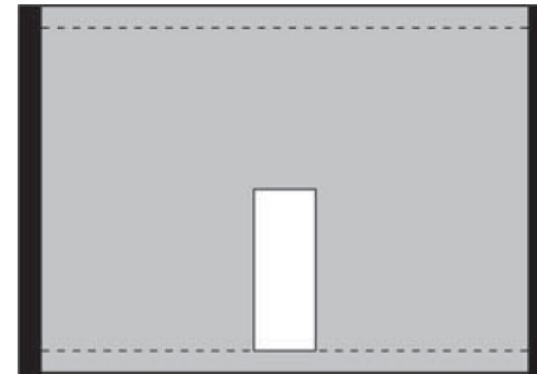


# Aperture nei diaframmi

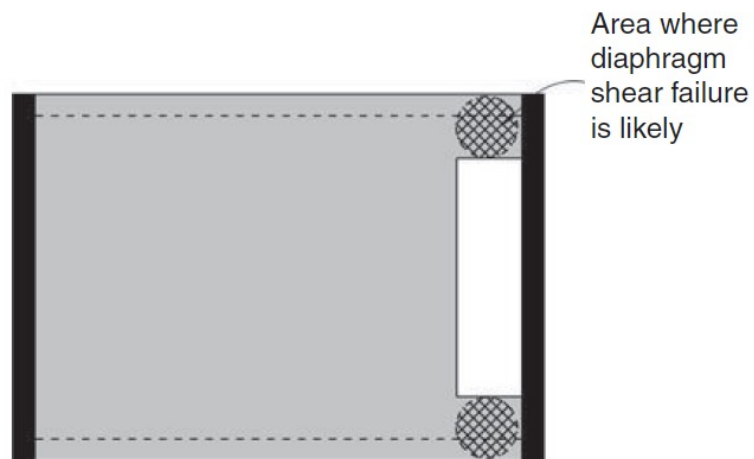
Di solito i diaframmi sono dotati di aperture per consentire il passaggio di scale e ascensori. È importante che queste aperture siano di dimensioni non eccessive e siano posizionate in maniera tale da non pregiudicare la capacità del diaframma di trasferire le forze sismiche agli elementi verticali resistenti.



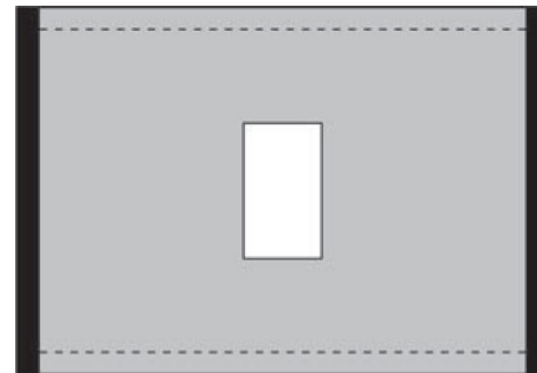
(a) Notch destroys continuity of chord



(b) Bending moments can be carried across the notch by a continuous chord



(c) Penetration where the diaphragm shear force is at its maximum

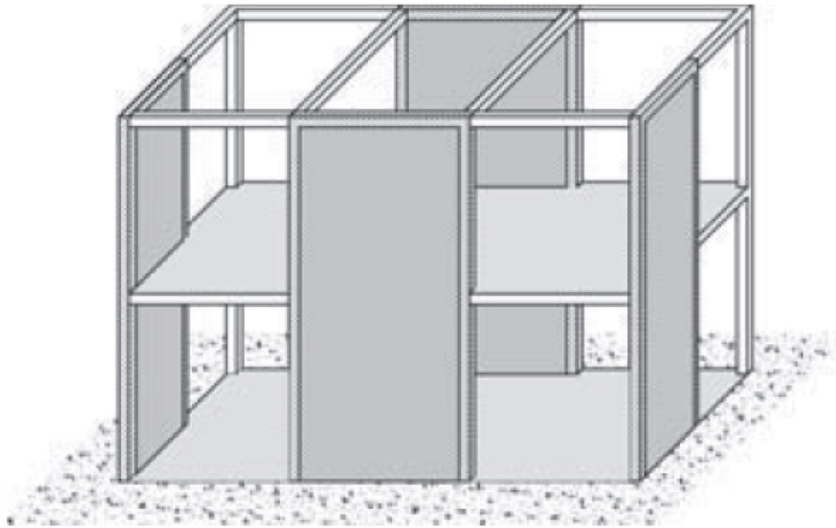


(d) Optimal location of penetration

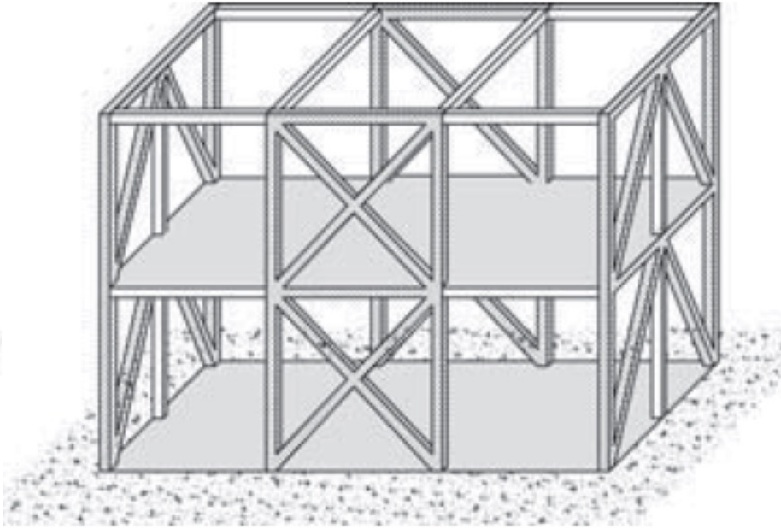
# Sistemi resistenti verticali

---

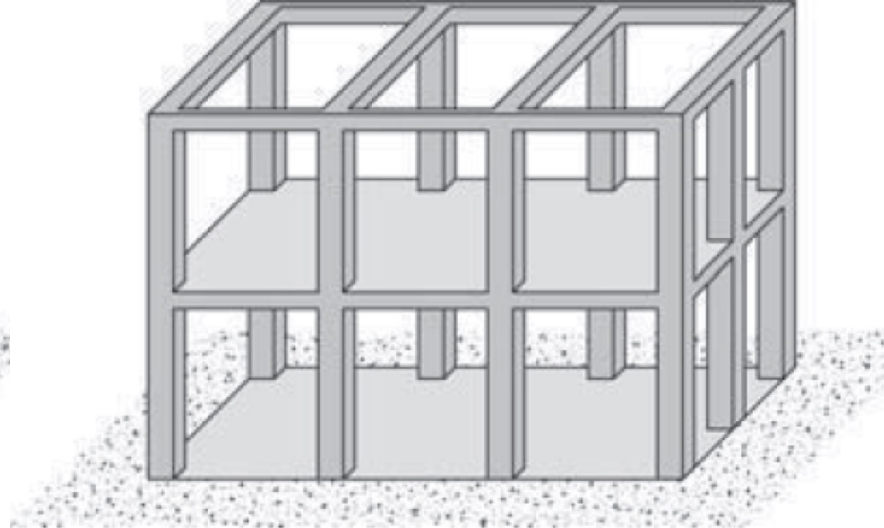
I sistemi verticali che possono resistere alle azioni sismiche sono essenzialmente di tre tipi:



*Pareti di taglio*



*Telai con controventi*



*Telai resistenti a momento*

Questi sistemi, che generalmente resistono anche ad azioni verticali, sono rappresentati in ordine decrescente di rigidità. Devono essere disposti secondo due direzioni ortogonali rispetto alla planimetria della costruzione, in maniera da resistere ad azioni sismiche agenti secondo qualsiasi direzione.

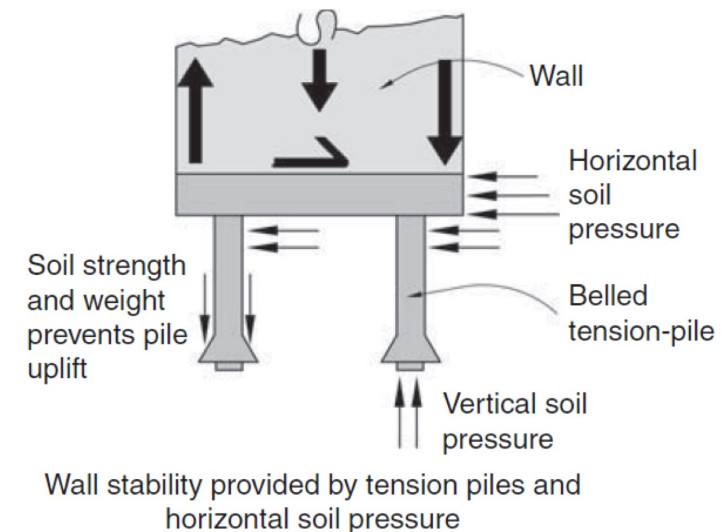
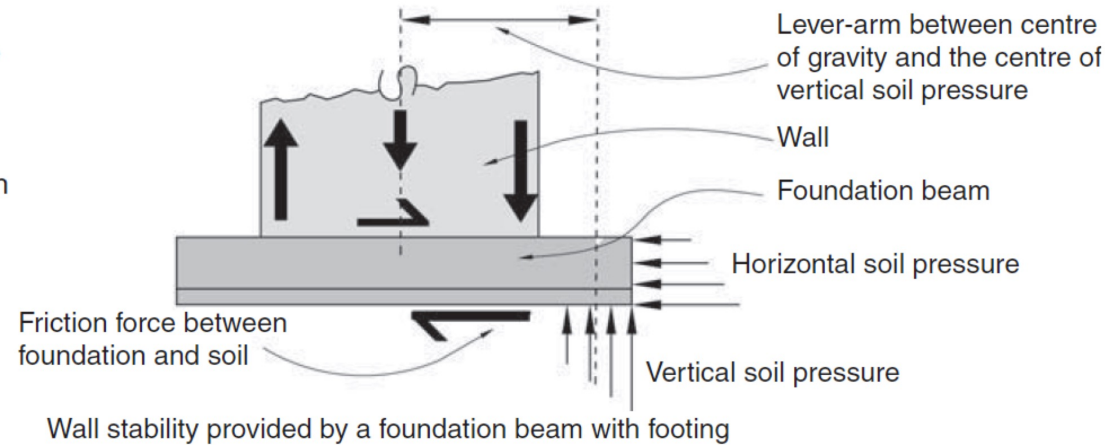
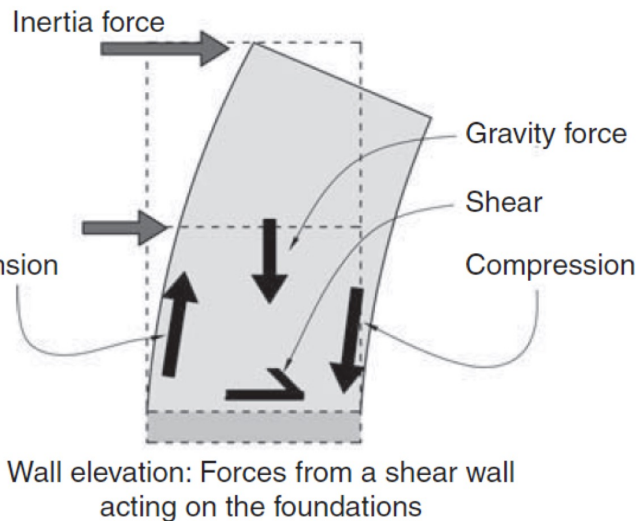
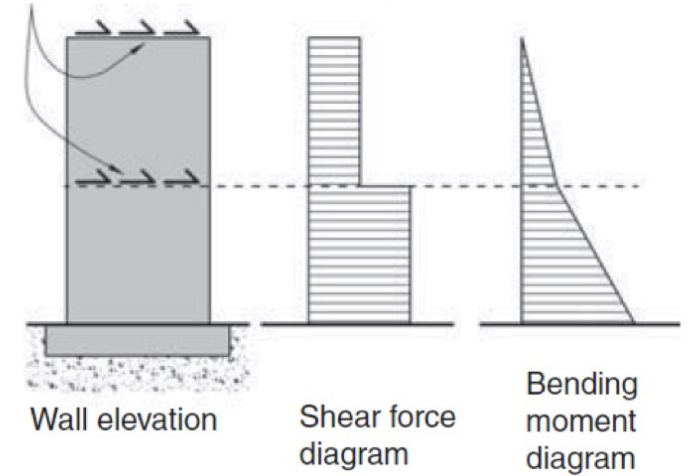
I sistemi resistenti verticali devono essere estesi a tutta l'altezza dell'edificio e devono essere vincolati saldamente al suolo attraverso il sistema di fondazione. Sono soggetti a sforzo normale, sforzo di taglio e momento flettente per effetto delle forze sismiche orizzontali trasmesse dai diaframmi di piano.

# Pareti di taglio

Le *pareti di taglio* sono di solito realizzate in conglomerato cementizio armato e costituiscono un sistema molto efficace nei confronti delle azioni sismiche. La loro notevole rigidezza minimizza gli spostamenti di interpiano e, di conseguenza, i danni agli elementi strutturali e non strutturali.

Lo sforzo di taglio e il momento flettente aumentano dall'alto verso il basso e raggiungono i loro valori massimi in corrispondenza della fondazione. La resistenza a taglio è fornita dall'intera parete, mentre il momento flettente provoca sforzi di compressione e di trazione principalmente ai suoi estremi. Questi sforzi sono poi trasmessi alla fondazione che deve essere in grado di resistere allo scorrimento e al ribaltamento indotti dalla parete.

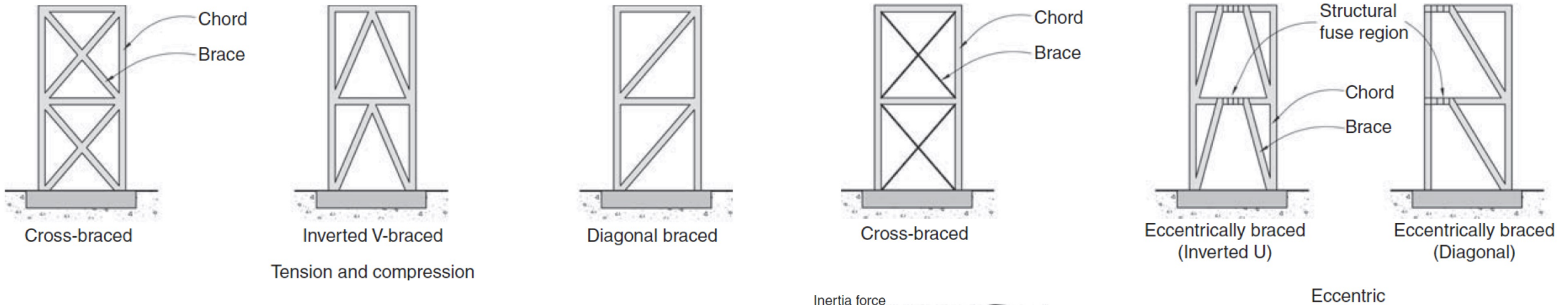
Forces acting on wall from diaphragm



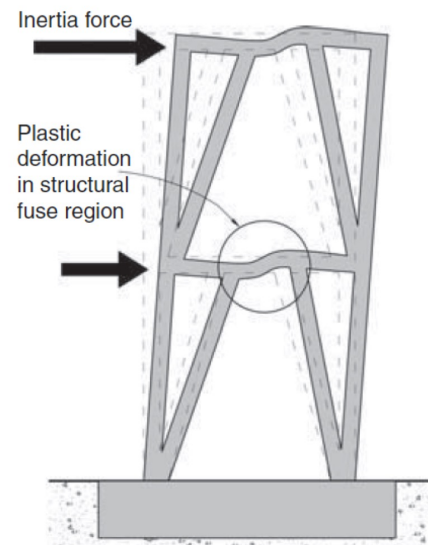


# Telai con controventi

I *telai con controventi* sono di solito realizzati in carpenteria metallica e sono essenzialmente costituiti da una trave reticolare disposta verticalmente. Tutti collegamenti possono essere di tipo cerniera e in questo caso le aste sono soggette solo a sforzo normale di trazione o di compressione. I tipi principali sono i seguenti:



I telai con *controventi eccentrici* sono i più *duttili*, perché parte della trave può entrare in campo plastico, dissipando parte dell'energia sismica e costituendo un *fusibile strutturale*.



# Telai resistenti a momento

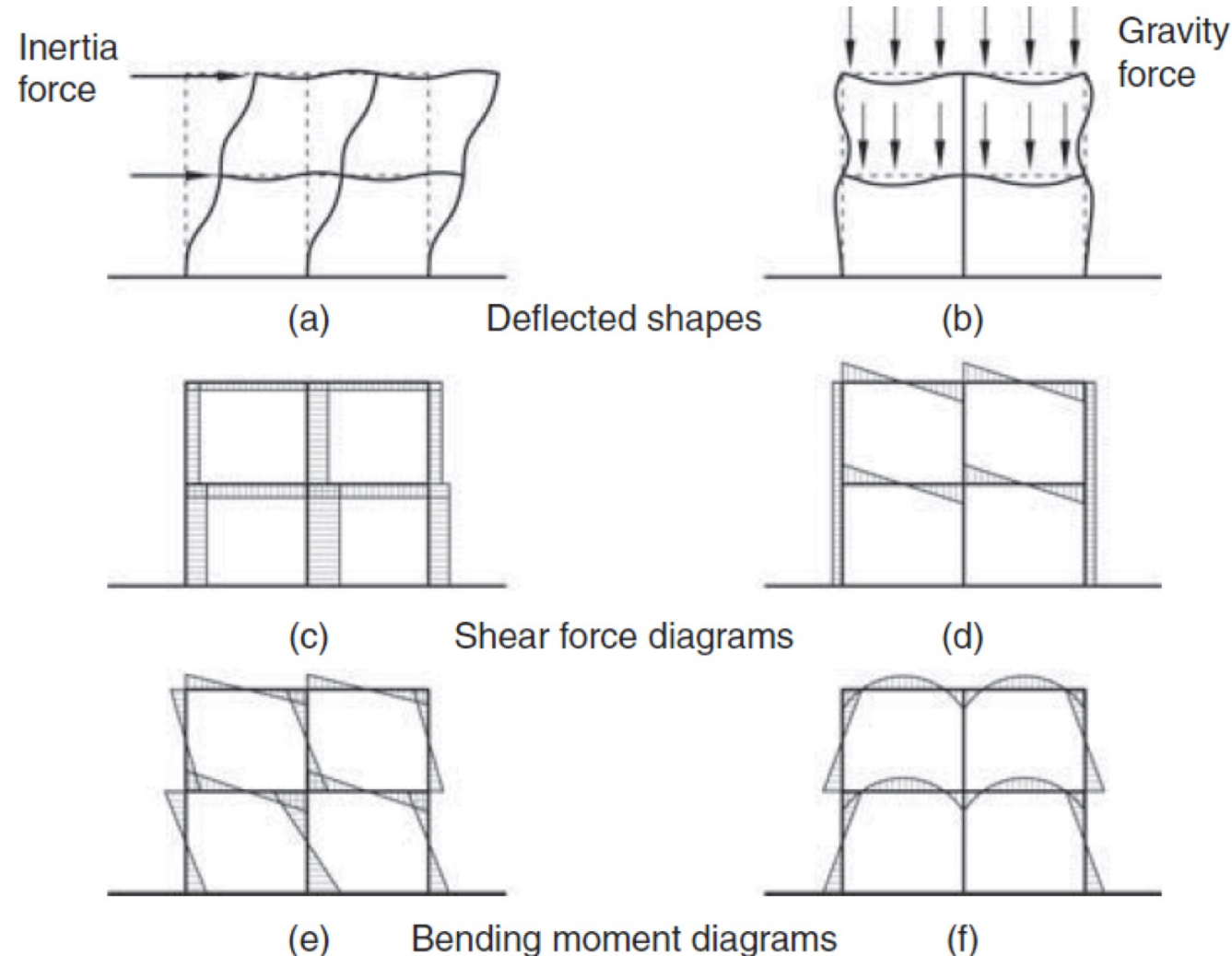
I *telai resistenti a momento* devono possedere connessioni del tutto rigide tra travi e colonne, tali cioè da trasmettere gli elevati momenti flettenti provocati dalle forze sismiche. Di solito sono progettati per resistere all'azione combinata delle forze sismiche orizzontali e di quelle statiche verticali.

Le colonne, che sono gli elementi più vulnerabili, devono avere dimensioni sufficienti per limitare gli spostamenti di interpiano e resistere ai notevoli sforzi di taglio cui sono soggette.

Per effetto del momento ribaltante alla base, le loro estremità possono essere sottoposte anche a notevoli sforzi normali di trazione e di compressione.

Per assicurare un comportamento duttile del telaio, le colonne devono essere più resistenti delle travi. A tal fine l'altezza della sezione di una colonna dovrebbe essere non minore di quella della trave.

Nel caso in cui appartengano a due telai ortogonali, le colonne dovrebbero essere a sezione quadrata.



# Configurazione

---

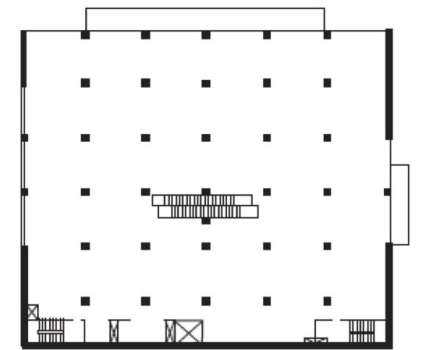
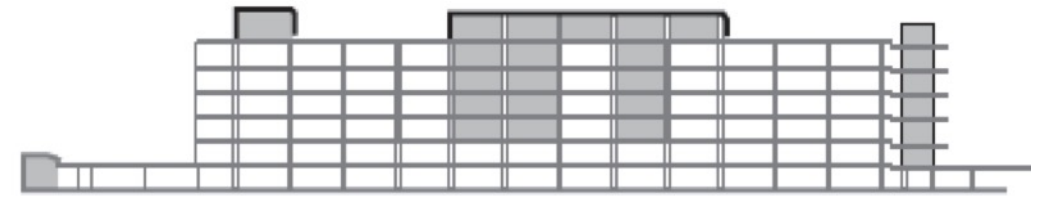
Il termine *configurazione* descrive la distribuzione spaziale, in **pianta** e in **elevazione**, degli elementi resistenti di una costruzione. Il termine indica come la struttura e la volumetria di un edificio si integrano per raggiungere la desiderata resistenza sismica.

Gli effetti della configurazione sul comportamento sismico sono messi in evidenza in occasione di ogni forte terremoto. Infatti, la qualità della configurazione influenza, più di ogni altro fattore, le possibilità che ha una costruzione di sopravvivere a una forte scossa.

La semplicità e la simmetria, in altre parole la **regolarità strutturale**, sono due requisiti importanti di una configurazione adeguata.

L'Eurocodice afferma che *Le strutture dovrebbero avere una forma semplice e regolare sia in pianta, sia in elevazione. Se necessario, ciò può anche essere ottenuto suddividendo la costruzione in parti dinamicamente indipendenti.*

A ciò si aggiunge che per un edificio irregolare le norme impongono forze di progetto maggiori e che i modelli analitici per la descrizione del loro comportamento dinamico sono più complicati e incerti.



Le costruzioni devono avere, quanto più possibile, struttura iperstatica caratterizzata da *regolarità in pianta e in altezza*. Se necessario, ciò può essere conseguito suddividendo la struttura, mediante giunti, in unità tra loro dinamicamente indipendenti.

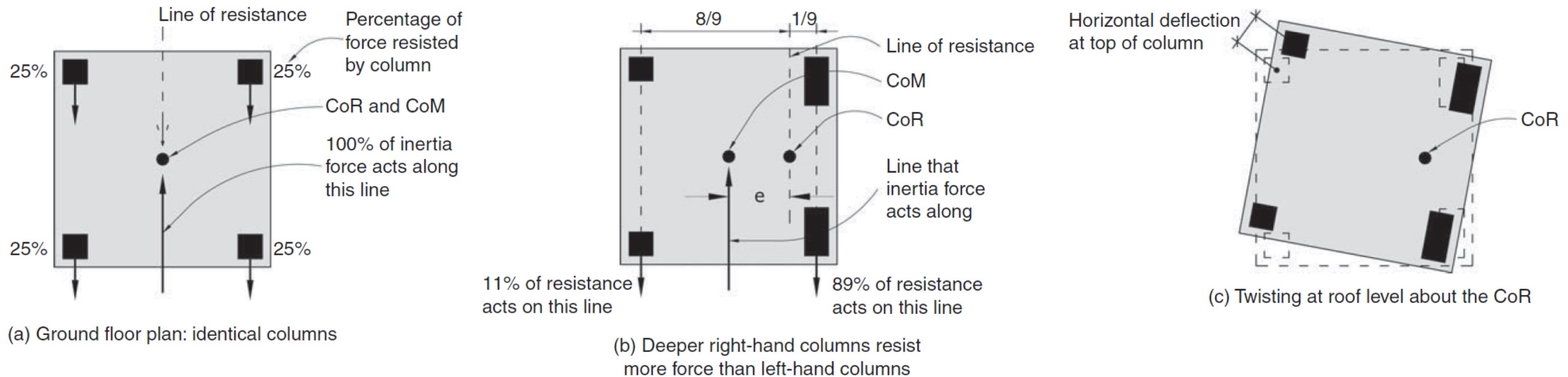
Per quanto riguarda gli edifici, una costruzione è *regolare in pianta* se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:

- a) la distribuzione di masse e rigidezze è approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali e la forma in pianta è compatta, ossia il contorno di ogni orizzontamento è convesso; il requisito può ritenersi soddisfatto, anche in presenza di rientranze in pianta, quando esse non influenzano significativamente la rigidezza nel piano dell'orizzontamento e, per ogni rientranza, l'area compresa tra il perimetro dell'orizzontamento e la linea convessa circoscritta all'orizzontamento non supera il 5% dell'area dell'orizzontamento;
- b) il rapporto tra i lati del rettangolo circoscritto alla pianta di ogni orizzontamento è inferiore a 4;
- c) ciascun orizzontamento ha una rigidezza nel proprio piano tanto maggiore della corrispondente rigidezza degli elementi strutturali verticali da potersi assumere che la sua deformazione in pianta influenzi in modo trascurabile la distribuzione delle azioni sismiche tra questi ultimi e ha resistenza sufficiente a garantire l'efficacia di tale distribuzione.

Sempre riferendosi agli edifici, una costruzione è *regolare in altezza* se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:

- d) tutti i sistemi resistenti alle azioni orizzontali si estendono per tutta l'altezza della costruzione o, se sono presenti parti aventi differenti altezze, fino alla sommità della rispettiva parte dell'edificio;
- e) massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non superano il 25%, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%); ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di pareti o nuclei in c.a. o di pareti e nuclei in muratura di sezione costante sull'altezza o di telai controventati in acciaio, ai quali sia affidato almeno il 50% dell'azione sismica alla base;
- f) il rapporto tra la capacità e la domanda allo *SLV* non è significativamente diverso, in termini di resistenza, per orizzontamenti successivi (tale rapporto, calcolato per un generico orizzontamento, non deve differire più del 30% dall'analogo rapporto calcolato per l'orizzontamento adiacente); può fare eccezione l'ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;
- g) eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengano con continuità da un orizzontamento al successivo; oppure avvengano in modo che il rientro di un orizzontamento non superi il 10% della dimensione corrispondente all'orizzontamento immediatamente sottostante, né il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento. Fa eccezione l'ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro orizzontamenti, per il quale non sono previste limitazioni di restringimento.

La torsione dei diaframmi è uno dei problemi più pericolosi che possono insorgere per effetto di una configurazione irregolare in pianta. Quando il baricentro della massa di un diaframma non coincide con quello delle rigidezze degli elementi resistenti verticali, nel piano orizzontale nasce un momento torcente, che determina una rotazione del diaframma intorno all'asse verticale passante per il baricentro delle rigidezze.

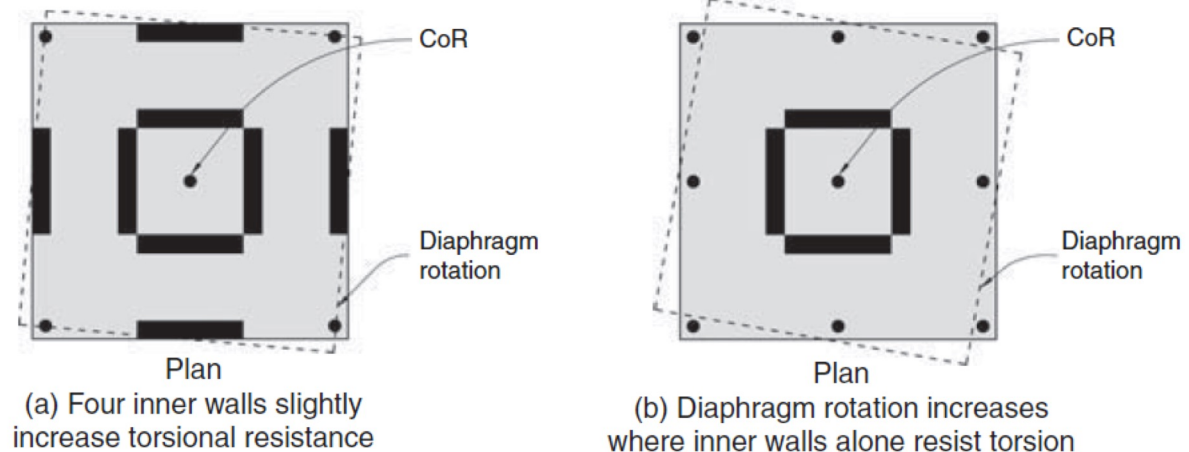
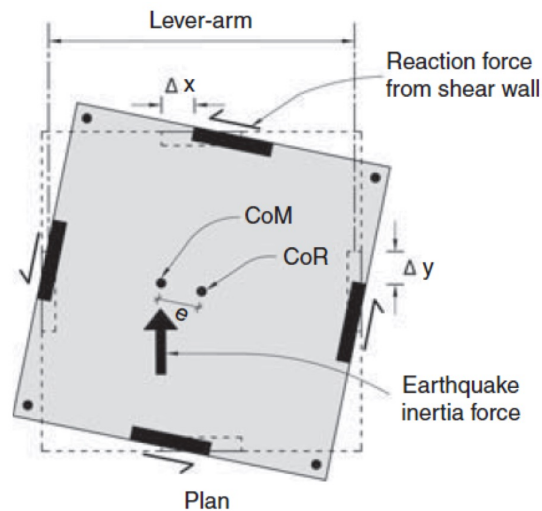
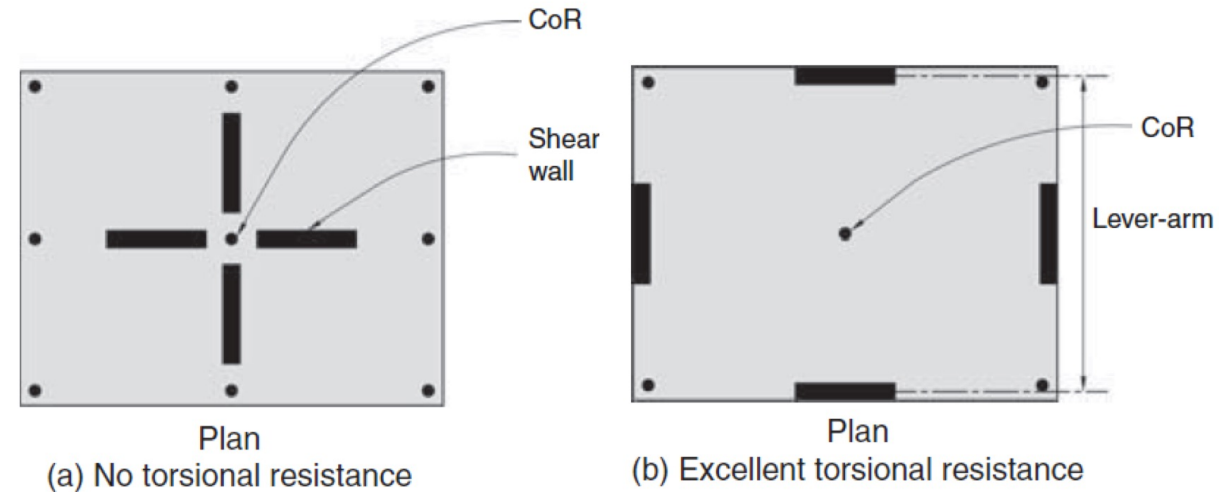


La torsione dei diaframmi dovrebbe essere evitata il più possibile, perché può provocare spostamenti molto grandi delle colonne più lontane dal baricentro delle rigidezze, che possono danneggiarsi in maniera tale da pervenire al collasso.

La torsione può manifestarsi anche in strutture simmetriche di forma allungata, a causa dell'inevitabile eccentricità delle masse dei carichi variabili.

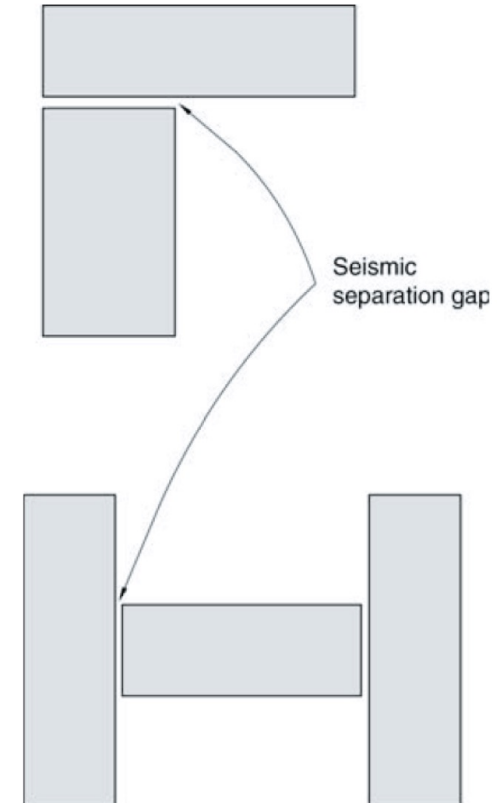
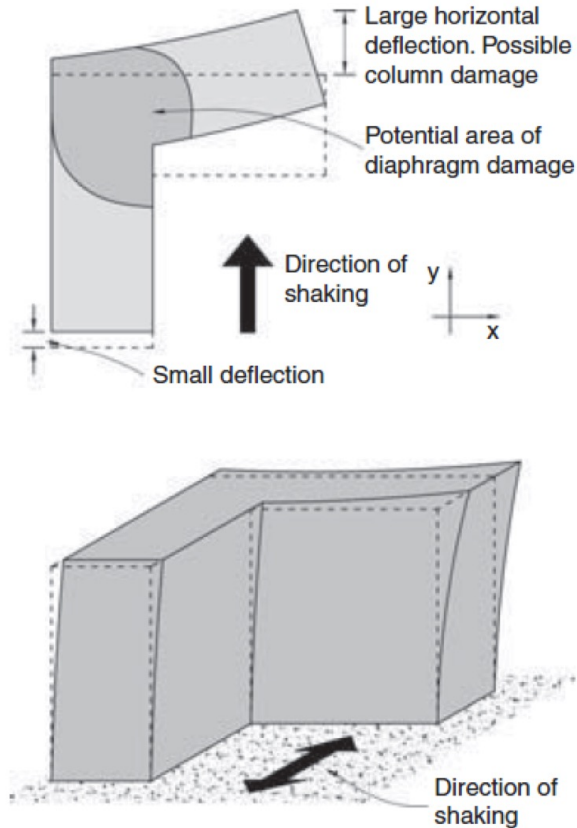
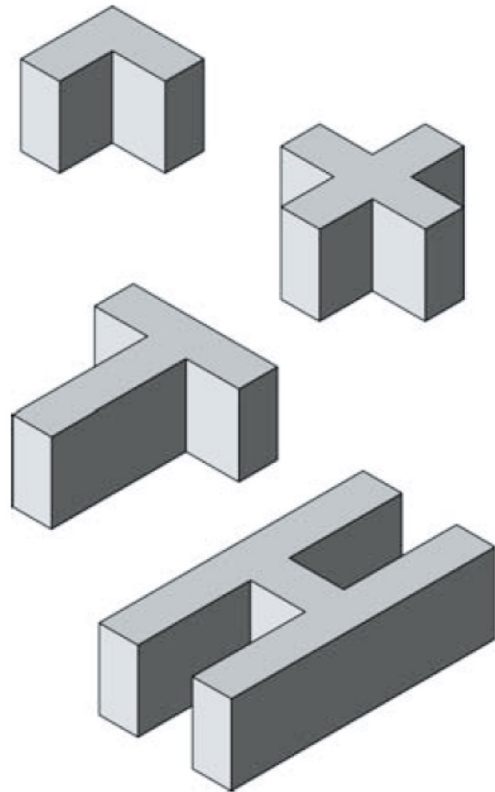
Gli effetti della torsione possono essere ridotti proporzionando opportunamente le dimensioni degli elementi resistenti verticali, in modo da rendere minima la distanza tra il baricentro delle masse e quello delle rigidezze.

In ogni caso, gli elementi resistenti verticali devono essere posti il più lontano possibile dal baricentro delle rigidezze, in maniera tale che il braccio delle forze resistenti sia il più grande possibile. In questo modo la resistenza e la rigidezza torsionale risultano massime.



# Angoli rientranti

Le costruzioni con angoli rientranti presentano l'attitudine a danneggiarsi durante un forte sisma a causa delle diverse proprietà dinamiche delle loro diverse parti.

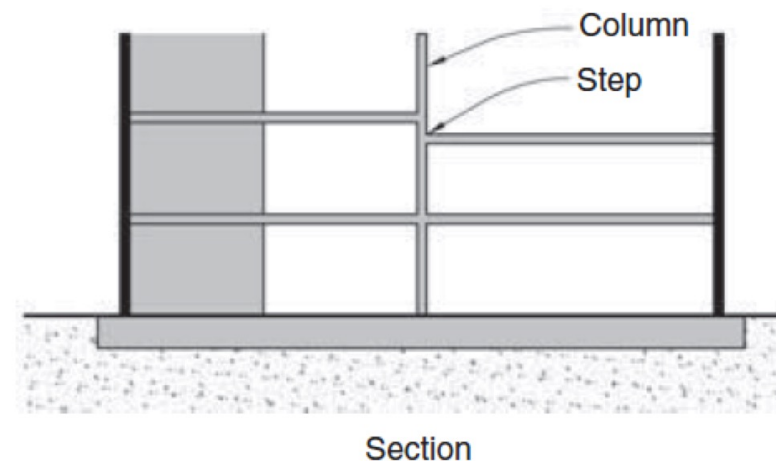
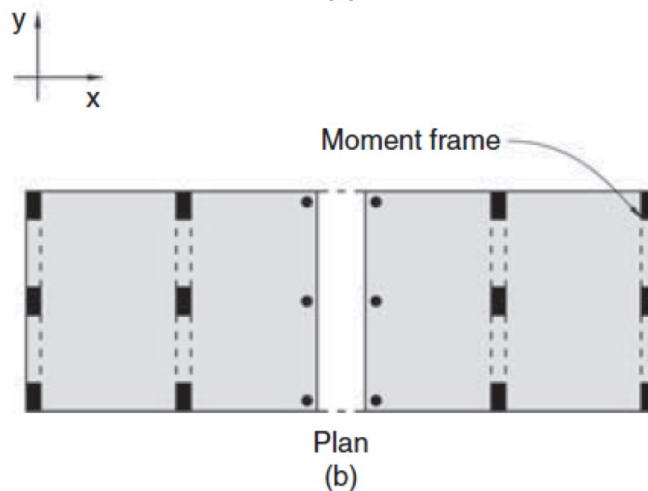
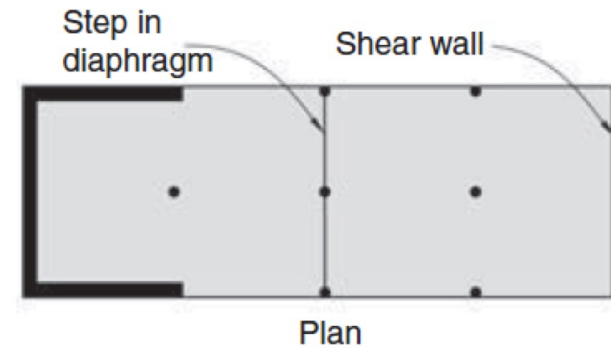
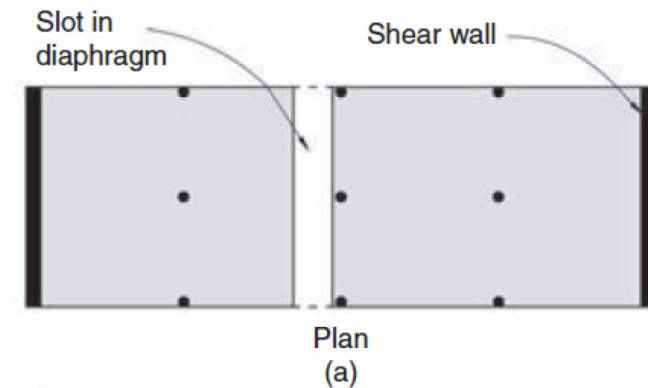


Edifici di questo tipo richiedono un adeguato proporzionamento degli elementi resistenti e un'attenta verifica mediante analisi dinamiche tridimensionali. In alternativa, il problema può essere evitato introducendo adeguati giunti sismici, che separano la costruzione in un insieme di corpi di fabbrica regolari.



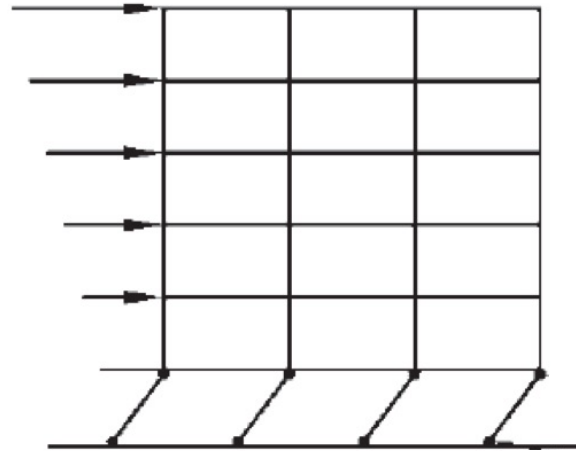
# Discontinuità dei diaframmi

Il passaggio degli elementi verticali di collegamento, quali scale e ascensori, richiede la realizzazione di aperture all'interno dei diaframmi. Tali aperture dovrebbero essere il più possibile simmetriche e tali da non pregiudicare la rigidità del diaframma nel proprio piano e la sua capacità di trasmettere le forze sismiche agli elementi verticali. Un diaframma dovrebbe essere realizzato interamente alla stessa quota. Discontinuità altimetriche possono anche indurre sollecitazioni eccessive negli elementi di collegamento.



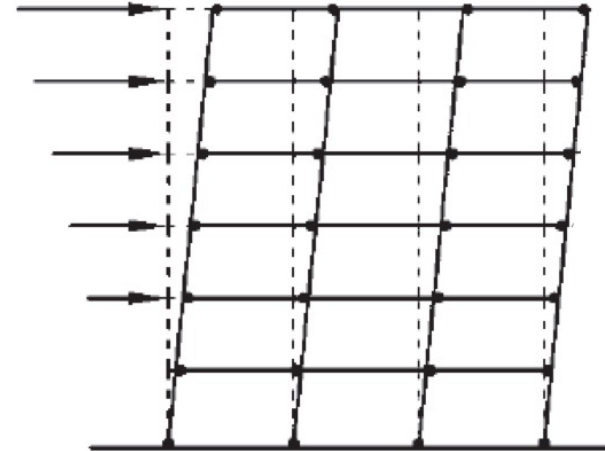
Una configurazione strutturale presenta un **piano soffice** quando un piano della costruzione è più flessibile o più debole nei confronti delle forze sismiche.

Una configurazione di questo tipo è **molto pericolosa** perché l'energia sismica viene dissipata prevalentemente nel piano soffice, impedendo così la formazione di un meccanismo duttile distribuito lungo tutta la struttura. I danni si concentrano prevalentemente alle estremità delle colonne del piano soffice, conducendo quasi sempre la struttura al collasso.



(a) Weak column–strong beam  
Severe damage occurs to columns  
at ground floor

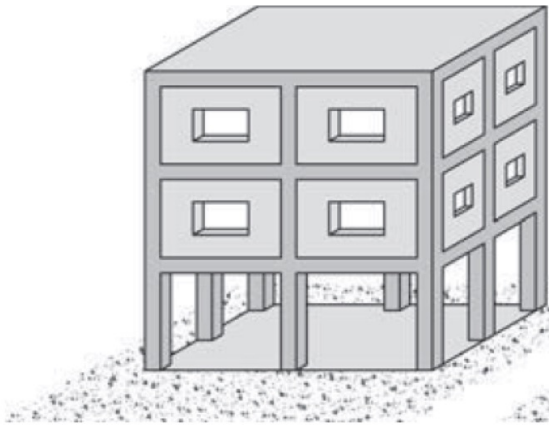
*Progetto che **non tiene conto** del criterio  
della “gerarchia delle resistenze”*



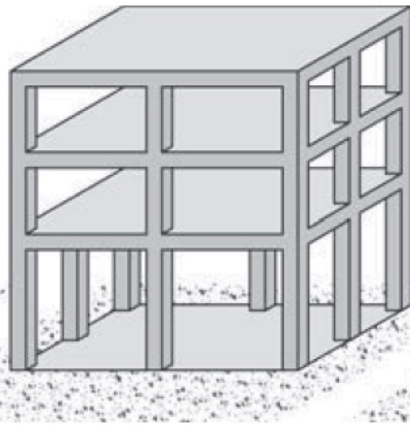
(b) Strong column–weak beam  
Structural fuses or plastic hinges  
form in beams at each floor level

*Progetto che **tiene conto** del criterio  
della “gerarchia delle resistenze”*

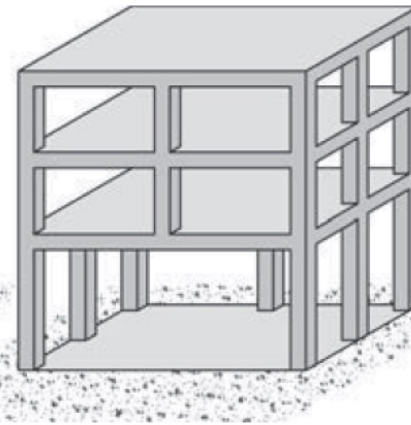
La presenza di un **piano soffice** può essere causata anche da irregolarità della configurazione, come quelle indicate nelle figure seguenti.



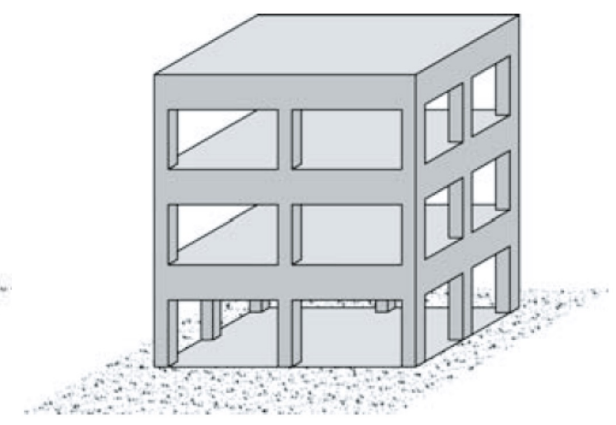
(a) Stiff and strong upper floors due to masonry infills



(b) The columns in one storey longer than those above



(c) Soft storey caused by discontinuous column



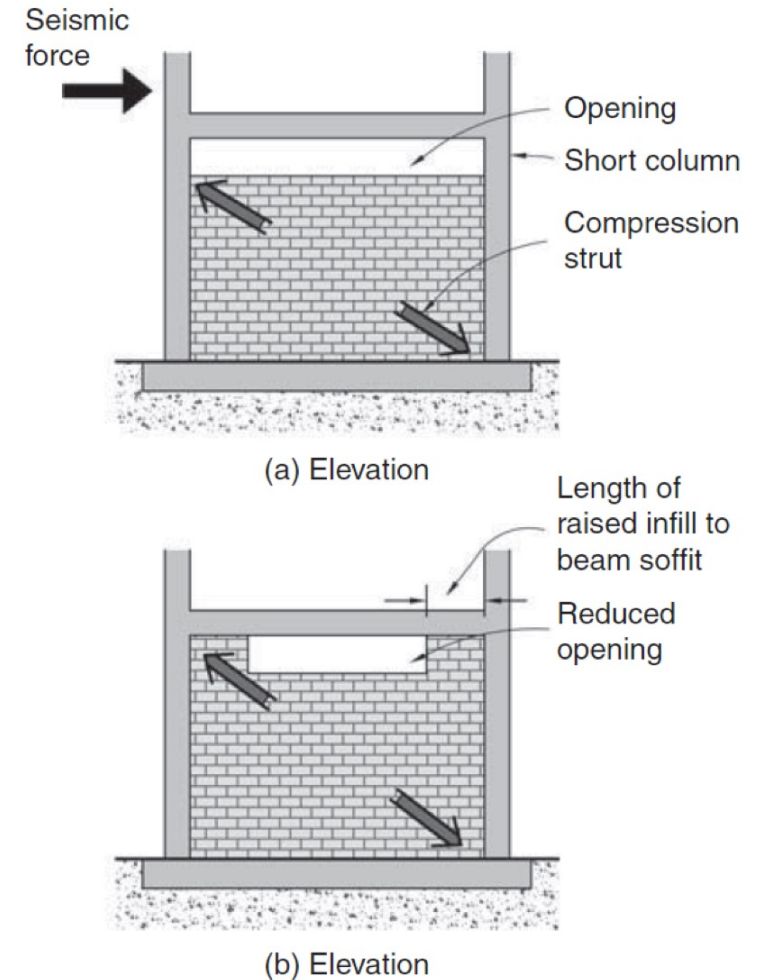
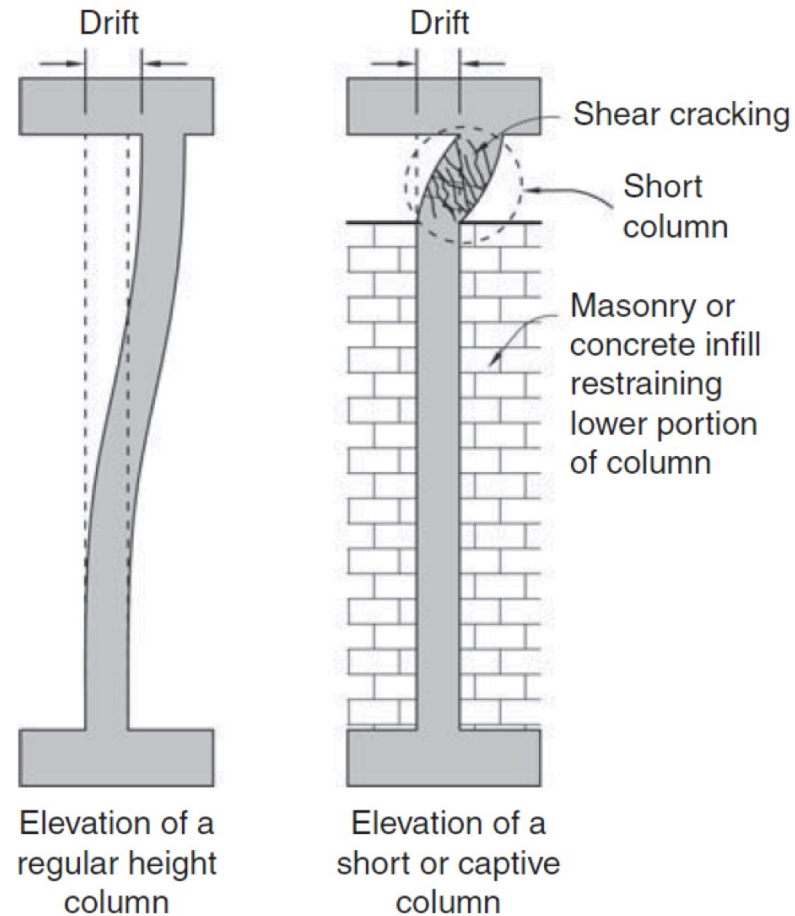
A weak column-strong beam structure develops a soft storey at ground level once columns are damaged.

## *Esempi di collassi strutturali (L'Aquila 2009)*



# Colonne corte

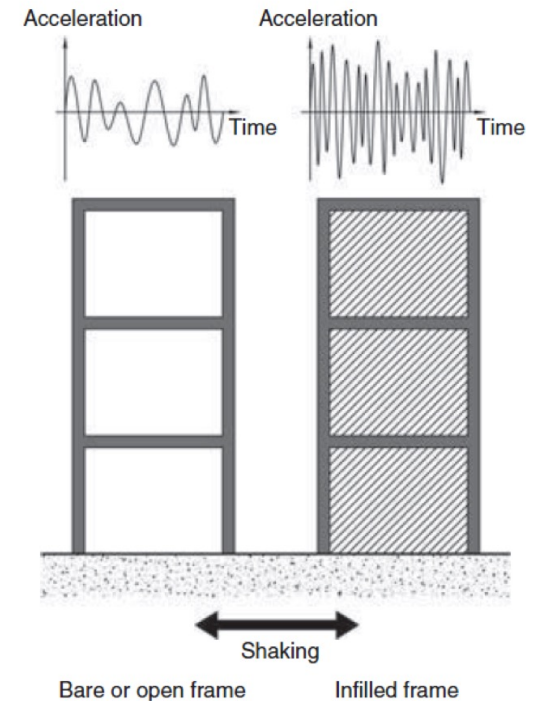
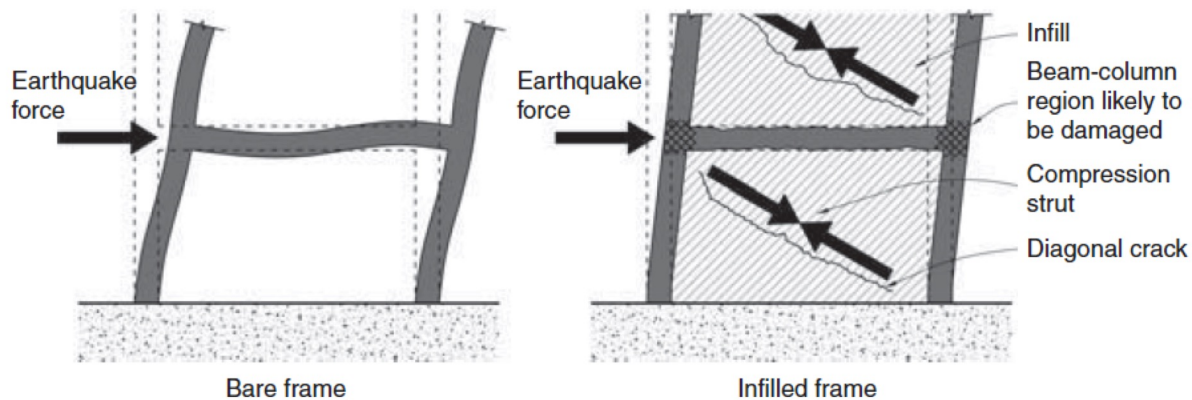
La presenza di **colonne corte** e tozze è da evitare perché manifestano un comportamento a rottura estremamente **fragile**. Può aversi il caso di colonne corte anche a causa di un paramento murario più basso dell'altezza di interpiano.



# Pannelli di facciata

Negli edifici tradizionali in calcestruzzo armato, le tamponature esterne sono realizzate mediante blocchi di laterizio disposti in aderenza con le travi e i pilastri dei telai perimetrali. Questi pannelli sono usualmente considerati come **elementi non strutturali**, ma in realtà per effetto della loro resistenza e rigidezza alterano profondamente il comportamento dinamico dei telai dove sono inseriti. In certi casi la loro presenza può essere benefica, contribuendo a sostenere le azioni sismiche, ma in altri possono causare anche seri danni strutturali in corrispondenza dei nodi di collegamento tra travi e pilastri.

Durante un forte terremoto, l'insorgenza di lesioni diagonali riduce progressivamente la rigidezza dei pannelli. Questo fenomeno è maggiormente evidente al primo interpiano, dove le sollecitazioni sismiche sono maggiori, e ciò potrebbe innescare un meccanismo di piano soffice.



A comparison of roof-top accelerations of a bare or open frame with an infilled frame. Note the shorter periods of vibration and higher accelerations of the infilled frame.

# Cosa si intende per edificio antisismico?

---

Secondo le normative attuali, un edificio antisismico deve garantire le seguenti prestazioni:

- **Proteggere la vita umana** per sismi di **forte** intensità (SLV)
- **Limitare i danni** strutturali e non strutturali per sismi di **bassa** intensità (SLD)

Nei diversi casi, l'**intensità** delle azioni sismiche è stabilita in funzione della **probabilità** di accadimento del sisma in un intervallo di tempo convenzionale, detto **periodo di riferimento**. Le NTC18, attualmente in vigore in Italia, fissano per gli edifici comuni rispettivamente il 10% e il 63% in 50 anni. Per ogni probabilità considerata e per ogni sito, le norme forniscono il corrispondente spettro di risposta.

Per lo Stato Limite di Danno la verifica viene eseguita controllando che il materiale e gli elementi strutturali rimangano in campo elastico. In questo caso gli spostamenti sono piccoli e ciò garantisce che non si verifichino danni significativi.

Per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita questo modo di procedere sarebbe notevolmente anti-economico. Pertanto, si accetta che l'edificio possa danneggiarsi anche gravemente, ma senza crollare, salvaguardando così la vita umana.

Questa prestazione può essere ottenuta progettando strutture **duttili**, cioè in grado di continuare a deformarsi dopo il superamento del limite elastico, in accordo con il principio di **gerarchia delle resistenze (capacity design)**.

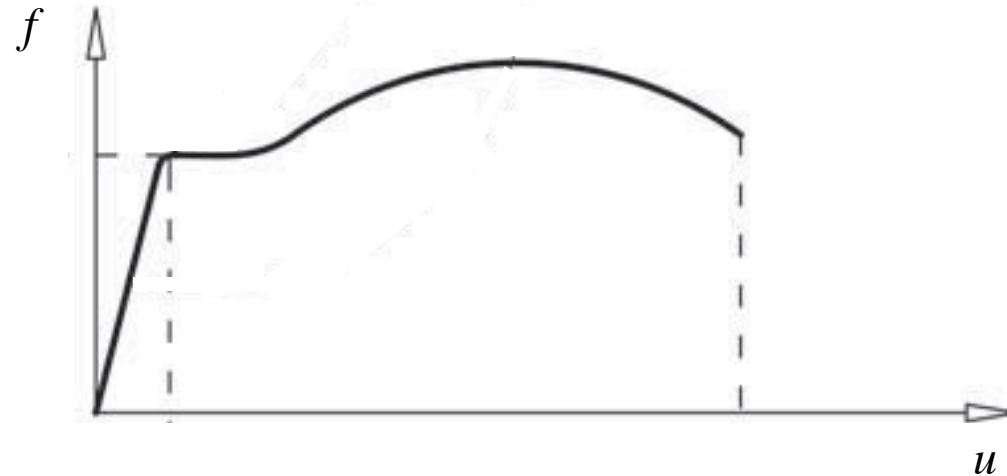
# Duttilità

---

## *Duttilità*

La duttilità è una delle proprietà strutturali più desiderabili per le strutture sismo-resistenti. Se la sollecitazione sismica supera la resistenza di un elemento duttile, infatti, il materiale si deforma plasticamente fino a deformazioni relativamente grandi, assorbendo così una parte dell'energia sismica che altrimenti avrebbe determinato nella struttura accelerazioni maggiori. La duttilità, pertanto, aumenta il livello di smorzamento efficace di un edificio.

Al contrario, se la sollecitazione sismica supera la resistenza di un elemento fragile, trave o colonna che sia, l'elemento si rompe improvvisamente, determinando eventualmente anche il collasso dell'intero sistema strutturale.

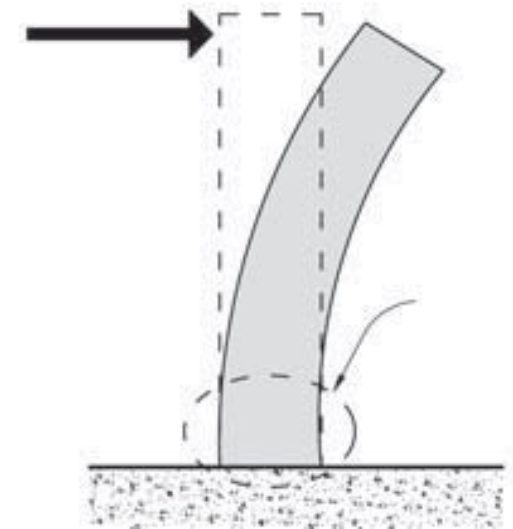


Gli elementi duttili costituiscono una sorta di **fusibili strutturali**: quando viene raggiunto il limite elastico, una porzione di questi elementi può deformarsi plasticamente, producendo un certo danno, ma senza perdere la propria resistenza. In questo modo si evita che il danno si manifesti altrove.

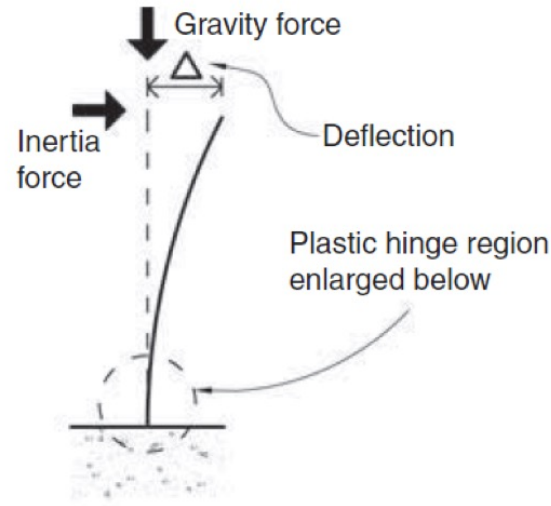
Un edificio duttile, pertanto, può essere progettato per un livello di forze sismiche molto minore rispetto a un analogo edificio fragile. In quest'ultimo caso, infatti, la resistenza deve essere sufficientemente grande per le massime forze d'inerzia che possono manifestarsi. Altrimenti l'edificio si rompe quando viene raggiunto il limite elastico, con il rischio che insorgano collassi parziali o globali.

Questo modo di procedere non potrebbe essere applicato al caso delle forze statiche. Infatti, progettare per una frazione delle forze di gravità che agiscono su una struttura porterebbe inevitabilmente al collasso.

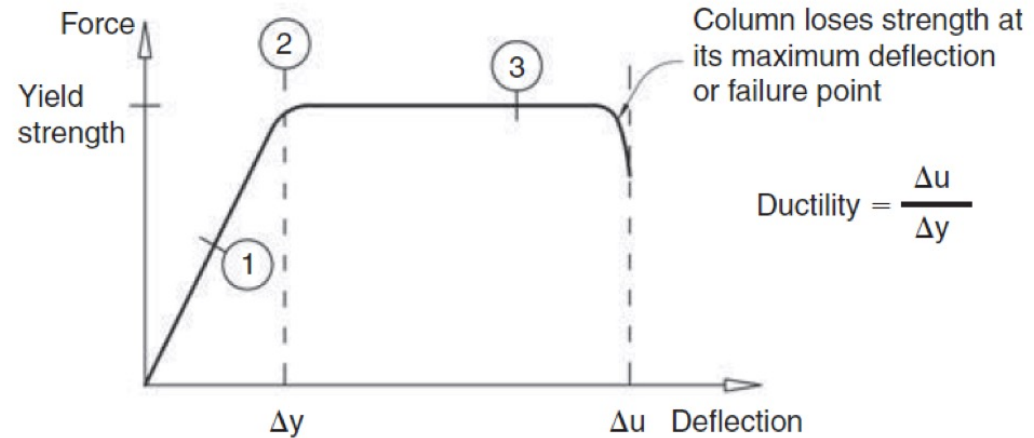
Tuttavia, per la natura ciclica dello scuotimento sismico e per il fatto che le forze d'inerzia massime agiscono in una direzione per un tempo molto breve, molto minore del periodo fondamentale di un edificio, l'approccio di progettare strutture duttili per forze ridotte è verosimile ed è alla base delle moderne normative per il progetto in zona sismica.



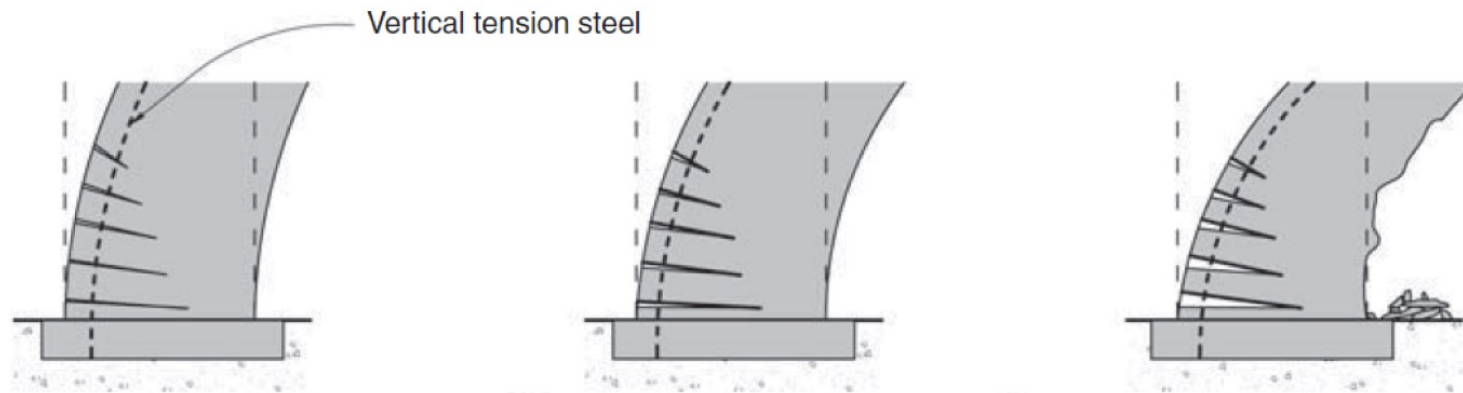




Model of column



Idealised graph of force against deflection



① Fine bending moment cracking. Vertical tension reinforcement is still in the elastic range.

② Cracks widen, tension steel starts to yield.

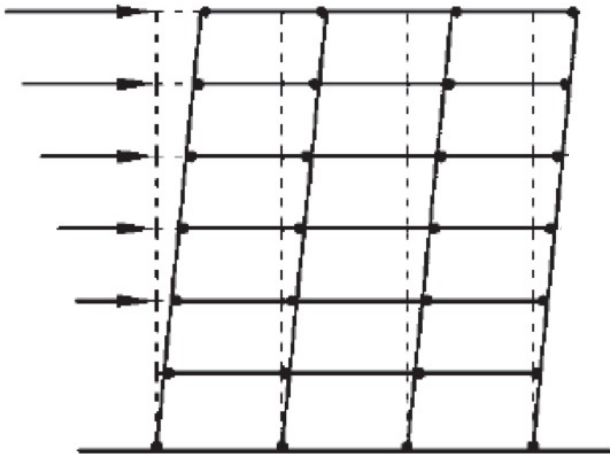
③ Cracks even wider, steel yielding and cover concrete spalled off. Typical damage in a plastic hinge.

# Gerarchia delle resistenze (capacity design)

Questo criterio impone una **gerarchia di danno** agli elementi strutturali in modo che, quando le forze sismiche superano il valore di progetto, il danno si concentra in zone stabilite indicate con il termine di **fusibili strutturali** o di **cerniere plastiche**.

Di solito queste zone coincidono con le estremità delle travi, risparmiando così i pilastri, che costituiscono gli elementi più critici per la sopravvivenza dell'edificio. Danni nei pilastri, infatti, possono condurre al collasso dell'intero organismo strutturale.

## NTC18 – 7.4.4.2.1



(b) Strong column–weak beam  
Structural fuses or plastic hinges  
form in beams at each floor level

Ai fini della progettazione in capacità, per ciascuna direzione e ciascun verso di applicazione delle azioni sismiche, per ogni nodo trave-pilastro (ad eccezione dei nodi in corrispondenza della sommità dei pilastri dell'ultimo orizzontamento), la capacità a flessione complessiva dei pilastri deve essere maggiore della capacità a flessione complessiva delle travi amplificata del coefficiente  $\gamma_{Rd}$ , in accordo con la formula:

$$\sum M_{c,Rd} \geq \gamma_{Rd} \cdot \sum M_{b,Rd} \quad [7.4.4]$$

dove:

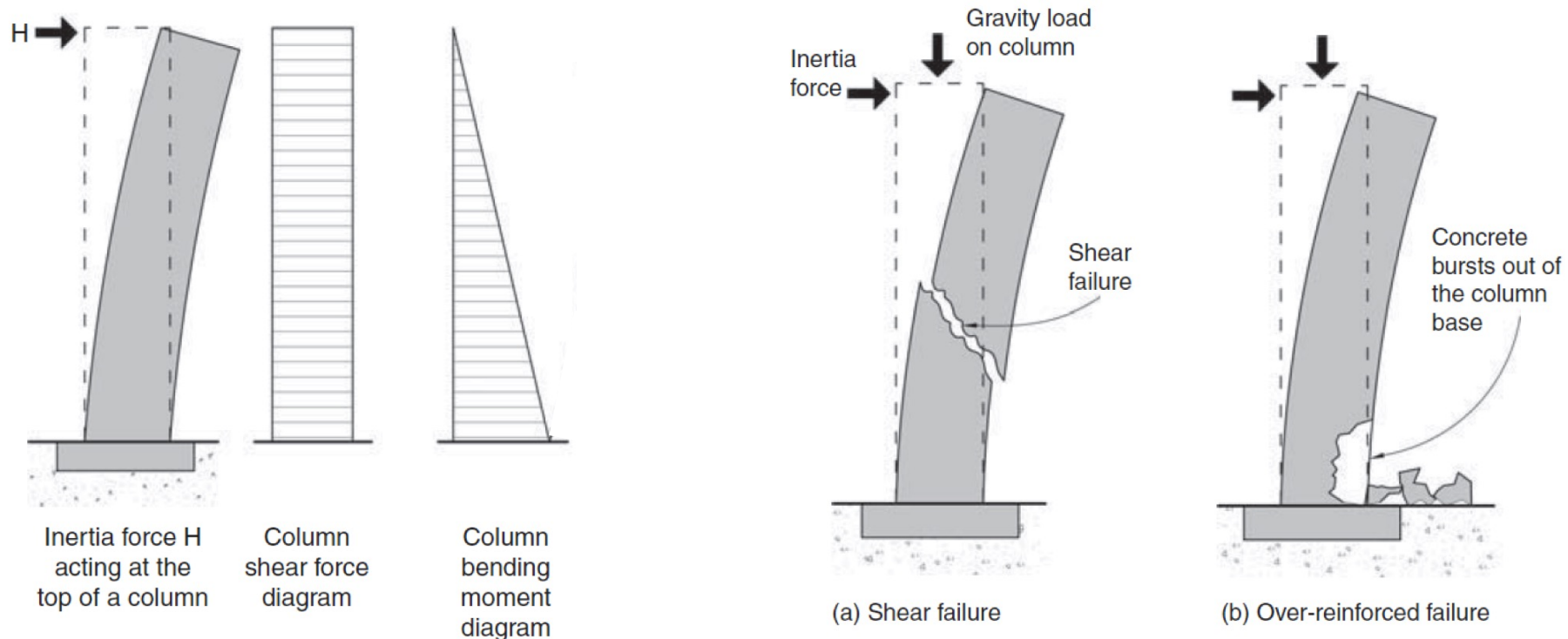
per il valore di  $\gamma_{Rd}$  si veda la Tab. 7.2.I;

$M_{c,Rd}$  è la capacità a flessione del pilastro convergente nel nodo, calcolata per i livelli di sollecitazione assiale presenti nelle combinazioni sismiche delle azioni;

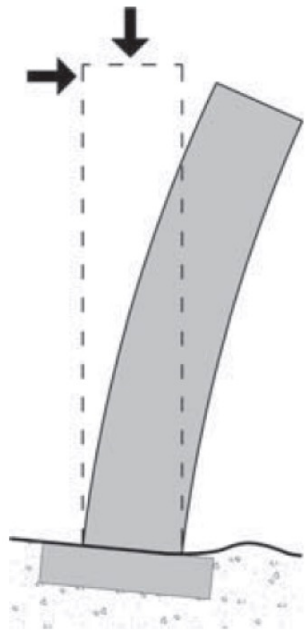
$M_{b,Rd}$  è la capacità a flessione della trave convergente nel nodo.

Si consideri una parete di taglio in calcestruzzo armato sollecitata da una forza sismica applicata in sommità. Se la forza sismica è tale da superare la resistenza della parete, le modalità di danno dipendono da come è armata la parete e dal comportamento della fondazione.

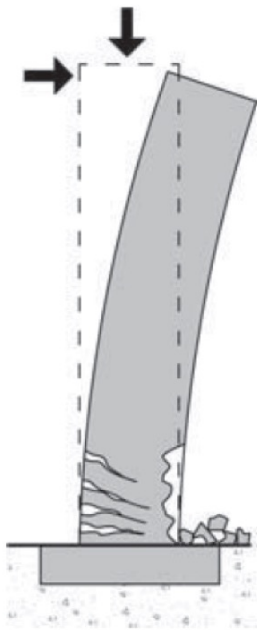
- (a) La resistenza a taglio è inferiore di quella a flessione. La colonna si rompe bruscamente secondo una lesione diagonale. La rottura è di tipo fragile e riduce la possibilità della parete di sostenere i carichi verticali.
- (b) La parete è fortemente armata. Il calcestruzzo compresso risulta l'elemento più debole. Quest'ultimo si frantuma bruscamente (rottura fragile) e la parete crolla improvvisamente.



- (c) La fondazione è troppo debole. Se l'azione combinata delle azioni orizzontali e verticali supera la resistenza della fondazione, quest'ultima può ruotare con gravi danni alla struttura in elevazione.
- (d) La parete è debolmente armata. La sezione di base si fessura e l'acciaio teso si deforma plasticamente. Il calcestruzzo che costituisce il copriferro compresso viene espulso e si forma una cerniera plastica. Il meccanismo di rottura è di tipo duttile.



(c) Foundation failure



(d) Ductile yielding of reinforcement and spalling of cover concrete in plastic hinge region

Il passo successivo consiste nello stabilire una gerarchia delle resistenze, in modo che il meccanismo (d), che è l'unico duttile, possa manifestarsi prima degli altri.

A tale scopo si calcola il momento resistente alla base della parete e lo si incrementa moltiplicandolo per un fattore di sovrarresistenza maggiore di uno.

Si calcola poi la forza sismica che corrisponde al momento resistente incrementato e si previene l'insorgere del meccanismo (a) controllando che si manifesti per una forza maggiore.

Il meccanismo (b) si previene verificando che la base della parete non sia a "forte armatura".

La fondazione, meccanismo (c), si dimensiona per il massimo momento resistente alla base della parete.

La **duttilità** e la **gerarchia delle resistenze** sono state recepite dalle normative internazionali solo da alcuni decenni.

In Italia, in particolare, solo all'inizio degli anni 2000, dall'OPCM 3274 fino alle attuali NTC18. Di conseguenza, la **quasi totalità dei nostri edifici esistenti** è progettata secondo **norme di vecchia concezione**, l'ultima delle quali è il DM 16-1-1996, che non prevedevano né il criterio della gerarchie delle resistenze, né quello della regolarità strutturale.

Secondo queste norme il concetto di costruzione antisismica era ben diverso da quello attuale. La verifica veniva condotta applicando agli impalcati un sistema di forze statiche equivalenti al sisma, pari al 10% del peso dell'edificio nel caso delle zone a sismicità elevata, e minori negli altri casi. Sotto l'azione di queste forze gli elementi strutturali dovevano rimanere in campo elastico. L'intento era di fornire all'edificio una certa resistenza alle azioni orizzontali.

È importante sottolineare (i) che una verifica di questo tipo somiglia a quella che oggi viene svolta nei confronti degli Stati Limite di Esercizio e (ii) che le vecchie norme non contenevano nessuna prescrizione nei confronti degli Stati Limite Ultimi.

Ci si domanda: “Cosa succede a un edificio progettato secondo le vecchie norme se le forze sismiche sono maggiori di quelle di progetto? Cosa succede, cioè, se l’accelerazione al suolo è maggiore del 10% di quella di gravità?”

Non esiste una risposta univoca a questa domanda. In certi casi l’edificio può essere dotato di una certa sovrarresistenza, dovuta anche all’azione di elementi non strutturali, che gli consente di *sopravvivere* a un forte terremoto. In altri casi, invece, può subire estesi danni di tipo fragile, che lo possono condurre anche al collasso.

In Italia, purtroppo, la maggior parte degli edifici esistenti è **vulnerabile** nei confronti degli Stati Limite Ultimi, come è testimoniato dagli estesi danni e dai troppo numerosi collassi strutturali che sono avvenuti in occasione dei recenti terremoti, anche di media intensità, che si sono verificati nel nostro Paese.

Le cause della vulnerabilità sismica sono molteplici, ma la progettazione strutturale inadeguata è forse la più rilevante. Tutto questo rende estremamente importante l’argomento dell’**adeguamento sismico** del patrimonio edilizio esistente.



# Riferimenti bibliografici

---

1. D.M. 17 gennaio 2018. *Norme tecniche per le costruzioni*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8, 2018, (NTC18)
1. Circolare 21 gennaio 2019 n. 7. Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018.
1. D.M. 14 gennaio 2008. *Norme tecniche per le costruzioni*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, 2008, (NTC08).
2. Circolare 2 febbraio 2009 n. 617. *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni* di cui al D.M. 14 gennaio 2008, approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.
5. Charleson Andrew, *Seismic Design for Architects*, Elsevier, 2008
6. FEMA 454, *Designing for Earthquakes, A Manual for Architects*, EERI, 2006