



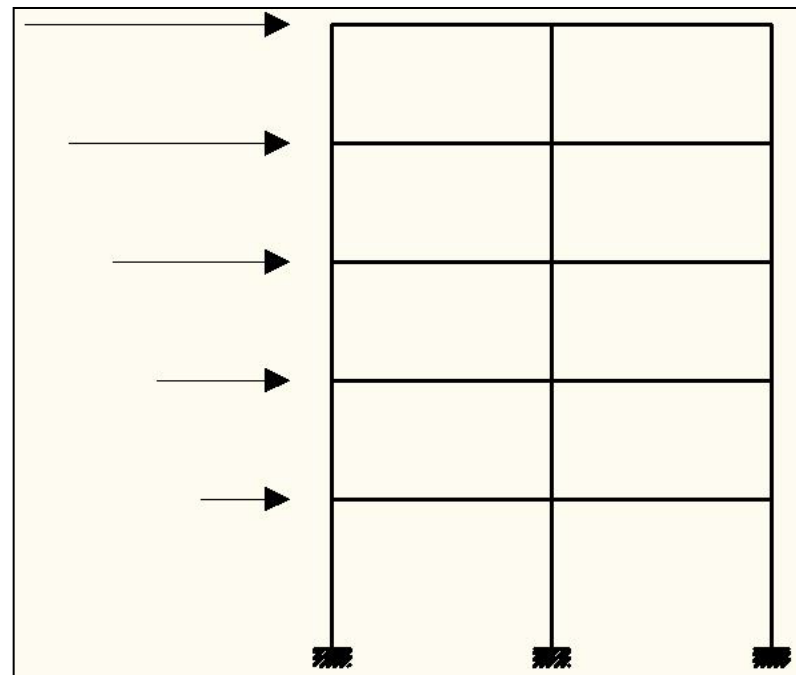
Analisi Push-over

www.angelobiondi.com

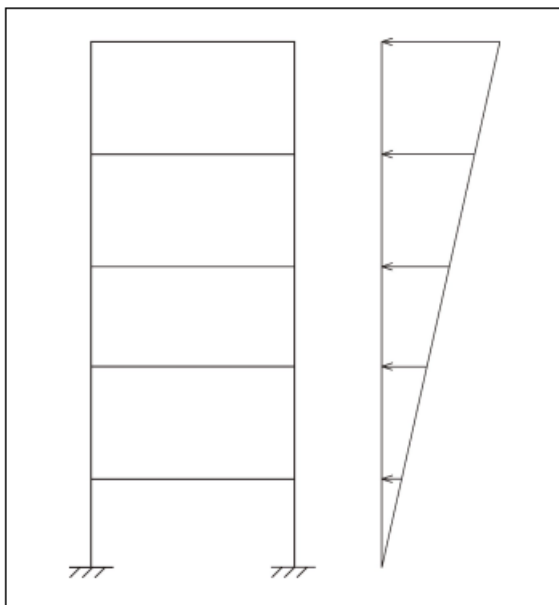
ANALISI SISMICA DELLE STRUTTURE

- Analisi sismica **Statica Lineare**
- Analisi sismica **Dinamica Lineare**
- Analisi sismica **Statica Non Lineare**
- Analisi sismica **Dinamica Non Lineare**

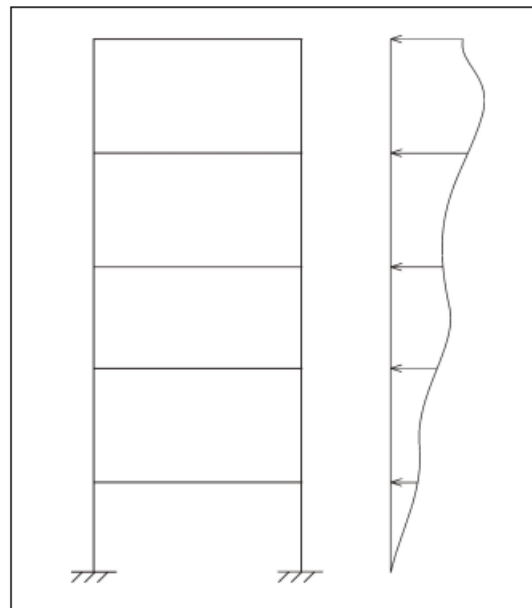
Con il nome di analisi **PUSH-OVER** si indica una analisi statica incrementale NON LINEARE effettuata per forze orizzontali monotonamente crescenti.



ANALISI SISMICA DELLE STRUTTURE



Analisi sismica **Statica**



Analisi sismica **Dinamica**

ANALISI SISMICA STATICA EQUIVALENTE

D.M. 2008

$$F_h = \frac{S_d(T_1) \cdot W \cdot \lambda}{g}$$

$$F_i = F_h \frac{z_i \cdot W_i}{\sum z_j \cdot W_j}$$

z_i, z_j = altezze dei piani i-esimo e j-esimo dalla fondazione

W_i, W_j = pesi delle masse ai piani i-esimo e j-esimo

$S_d(T_1)$ = ordinata dello spettro di progetto in corrispondenza del valore T_1 del periodo

$$T_1 = C_1 \cdot H^{3/4}$$

H = altezza dell'edificio, espressa in metri, a partire dal piano di fondazione

C_1 = coefficiente funzione della tipologia strutturale

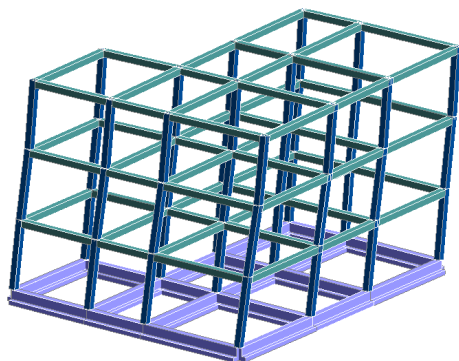
W = peso complessivo della struttura

ANALISI SISMICA DINAMICA MODALE

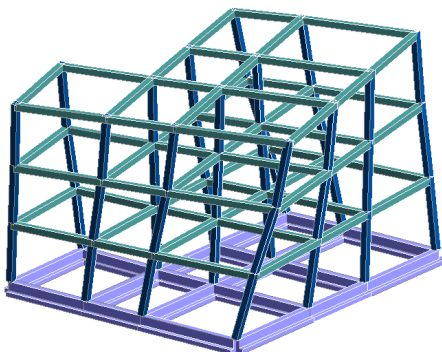
1) Determinazione dei modi di vibrare della costruzione (analisi modale).

2) Calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare individuati.

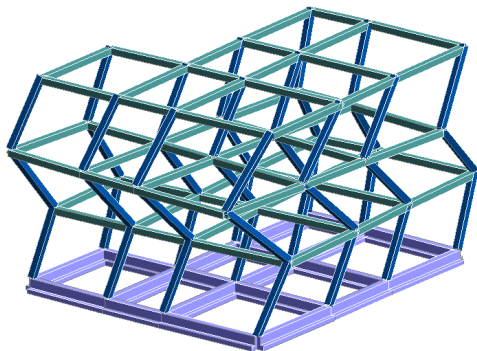
3) Combinazione degli effetti relativi a ciascun modo di vibrare.



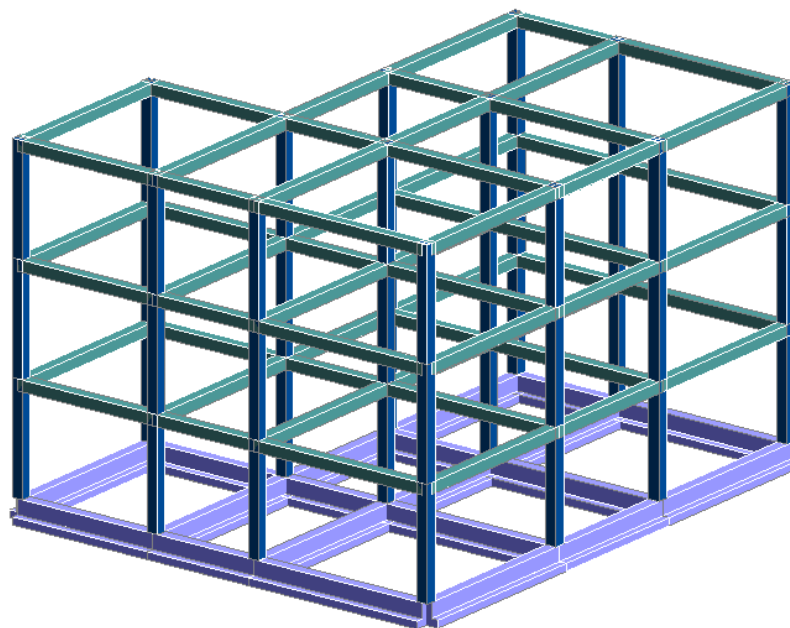
Modo n.1



Modo n.3

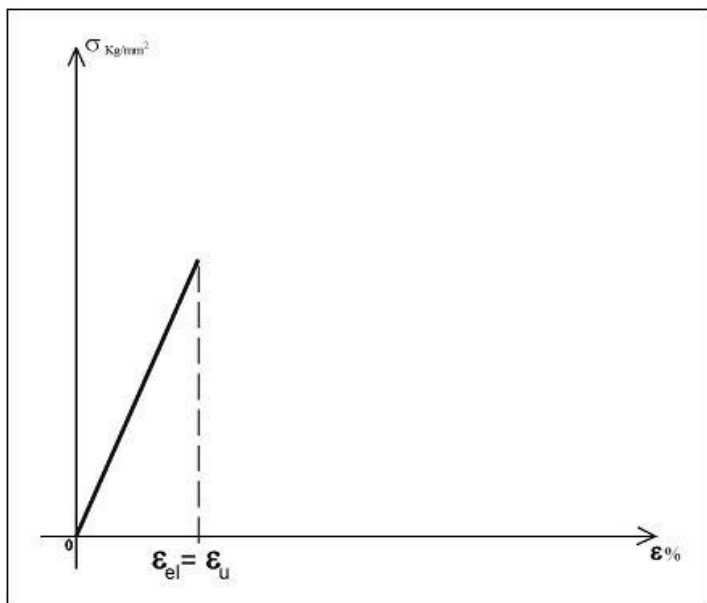


Modo n.7

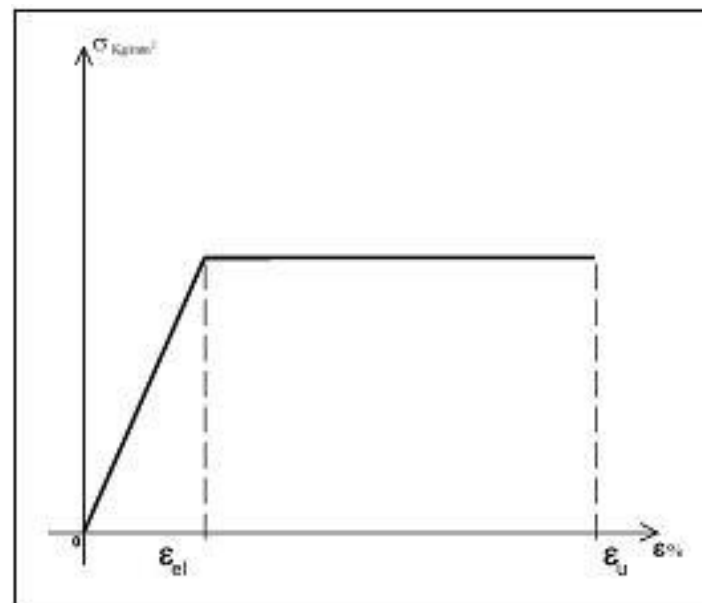


Schema Strutturale

ANALISI SISMICA DELLE STRUTTURE



Analisi sismica **Lineare**



Analisi sismica **Non Lineare**

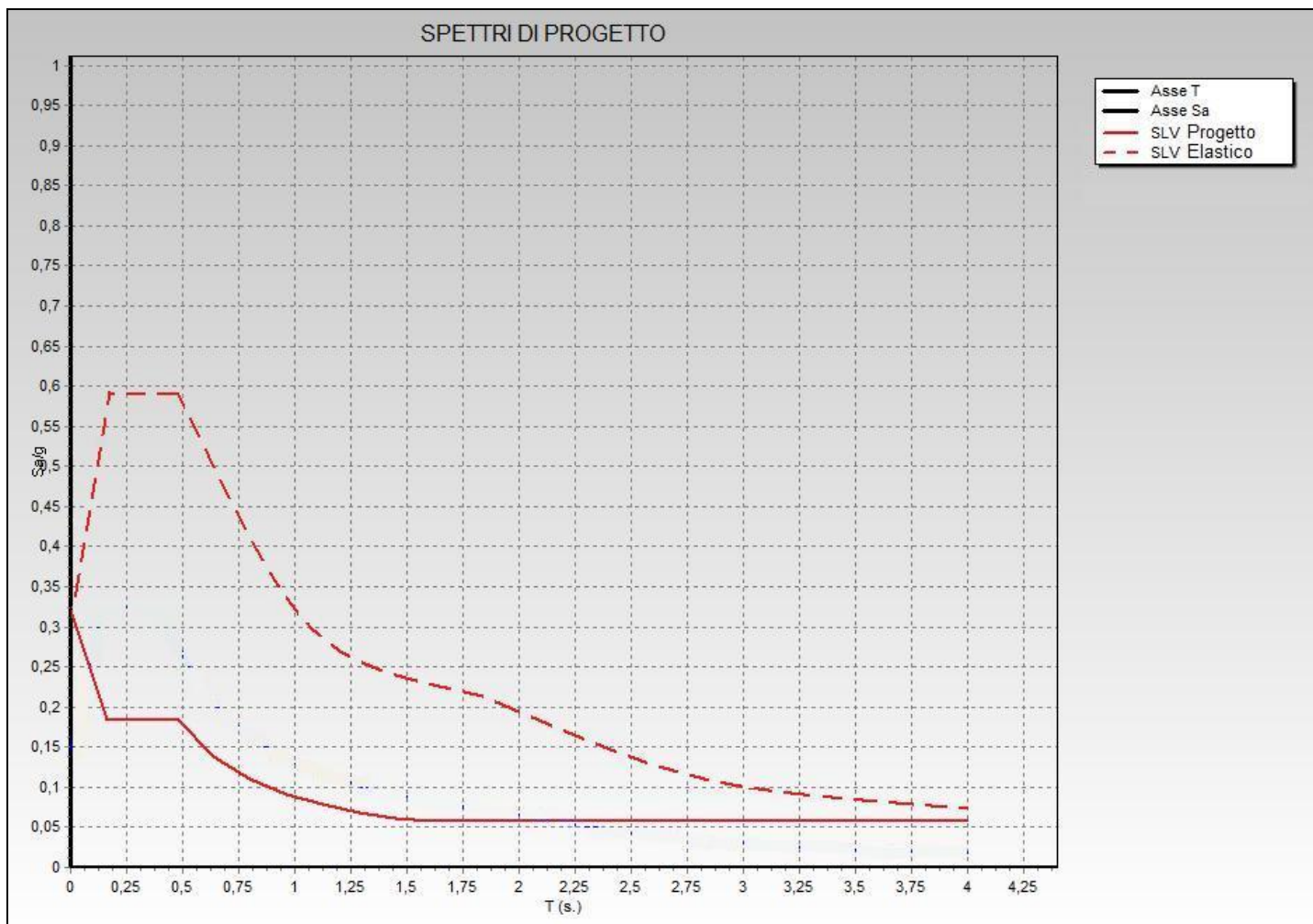
ANALISI SISMICA DELLE STRUTTURE

ANALISI LINEARI: *Statiche o dinamiche. Le analisi lineari non sono mai adatte ai problemi di verifica ma funzionano bene esclusivamente per i problemi di progetto. Questo è vero in particolare per le murature.*

ANALISI NON LINEARI STATICHE: *Sono le analisi più efficienti in ambito tecnico-professionale in quanto sono abbastanza raffinate da modellare la capacità sismica degli edifici tenendo in conto della risposta anelastica e nel contempo robuste dal punto di vista numerico. Hanno inoltre il vantaggio di modellare la domanda in termini di spettri dello spostamento.*

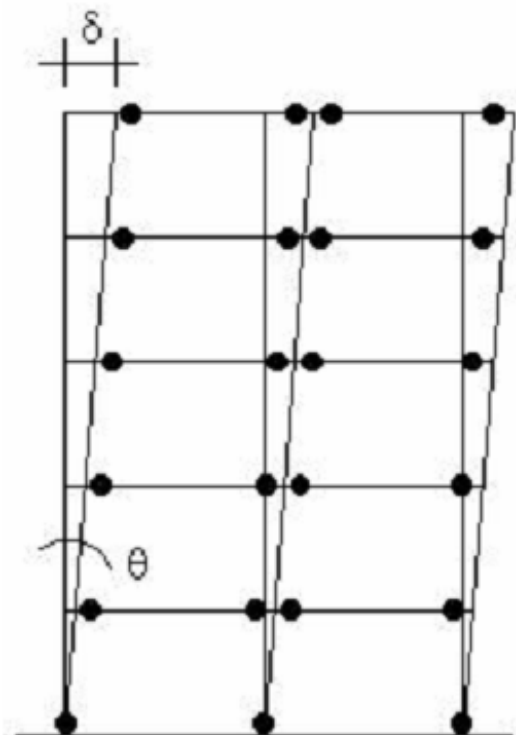
ANALISI NON LINEARI DINAMICHE: *In teoria sono le analisi più corrette ma nella pratica presentano ancora varie difficoltà applicative tra cui: modelli numerici molto complessi, difficoltà di reperire modelli efficienti e realistici per la muratura, modellazione della domanda sismica legata alla scelta degli accelerogrammi. Tali analisi vanno condotte da specialisti.*

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



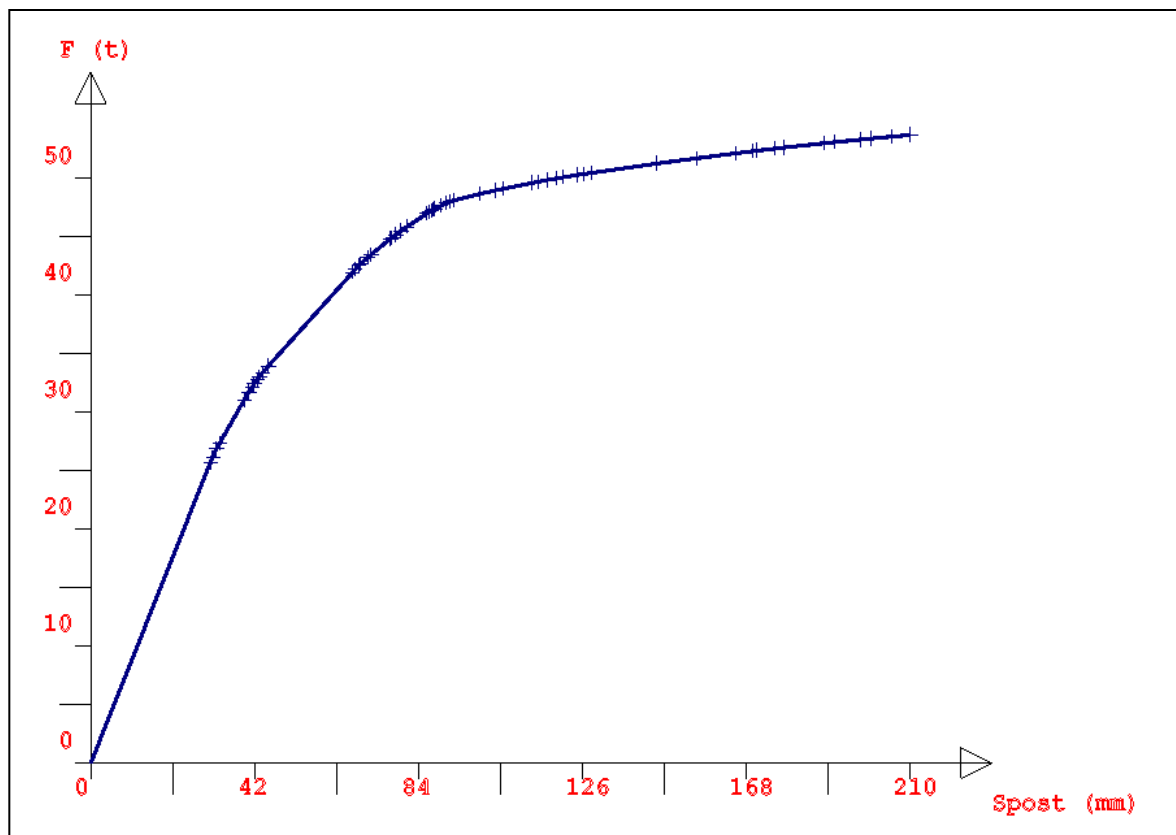
Spettro di risposta elastico e spettro di progetto

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Gerarchia delle Resistenze

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Curva di Capacità della struttura

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

- **VERIFICA EDIFICI ESISTENTI**

- Questo tipo di analisi è in pratica la via obbligata nel caso di verifiche di edifici esistenti progettati solo per i carichi verticali, in questo caso una verifica elastica risulta troppo penalizzante e di scarso interesse tecnico, solo un'analisi non lineare è in grado di valutare in maniera realistica il grado di sicurezza della struttura nei confronti del sisma

- **VERIFICA NUOVI EDIFICI**

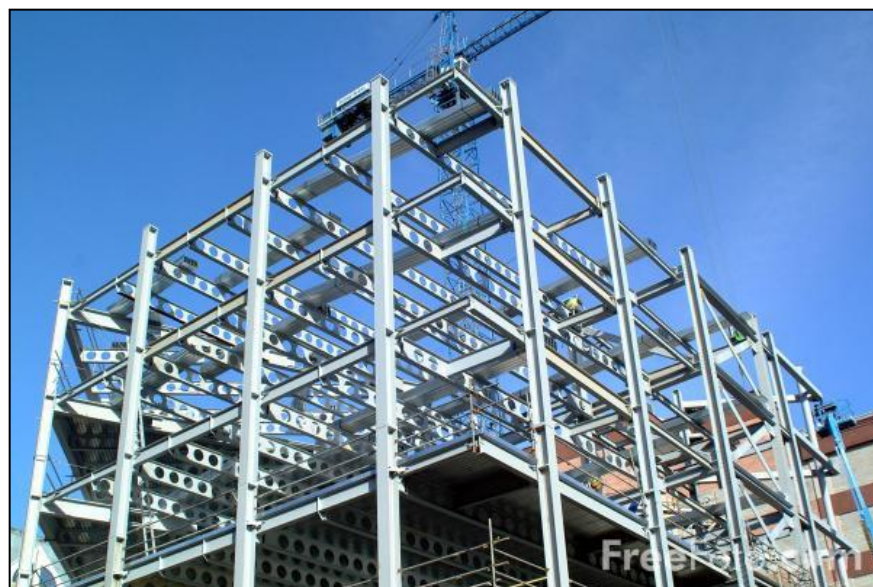
La nuova normativa sismica prevede esplicitamente tale tipo di analisi per :

- valutare i rapporti di sovrarresistenza
- valutare il reale fattore di struttura dell'edificio;
- come metodo di progetto per gli edifici di nuova costruzione sostitutivo dei metodi di analisi lineari

DATI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE

fonti	• documenti di progetto • documentazione successiva al progetto • rilievo strutturale • prove in-situ e laboratorio
Dati richiesti	• identificazione organismo strutturale e valutazione regolarità • identificazione fondazione • categoria suolo • dati geometrici elementi strutturali, armature, materiali, collegamenti • difetti in particolari costruttivi (eccentricità, armature, collegamenti) • normativa dell'epoca e fattore q adottato (se possibile) • destinazione d'uso e fattore di importanza • rivalutazione carichi variabili in funzione della destinazione d'uso • valutazione eventuali danni subiti in precedenza

VERIFICA DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A. ED IN ACCIAIO



LIVELLI DI CONOSCENZA (C.A. E ACCIAIO)

conoscenza		Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	limitata	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione o ex- novo completo	Progetto simulato in accordo norma dell'epoca e limitate verifiche in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e limitate prove in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2	adeguata		Disegni costruttivi incompleti con limitate verifiche in situ oppure estese verifica in-situ	Specifiche originali di progetto o certificati di prova con limitate prove in- situ oppure estese prove in-situ	tutti	1.20
LC3	accurata		Disegni costruttivi completi con limitate verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Specifiche originali di progetto o certificati di prova con estese prove in- situ oppure esaustive prove in- situ	tutti	1.00

LC1: Conoscenza limitata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso viene effettuato un rilievo visivo a campione per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli non sono disponibili da disegni costruttivi e sono ricavati sulla base di un progetto simulato eseguito secondo la pratica dell'epoca della costruzione. È richiesta una limitata verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire verifiche locali di resistenza.

Proprietà dei materiali: non sono disponibili informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali, né da disegni costruttivi né da certificati di prova. Si adottano valori usuali della pratica costruttiva dell'epoca convalidati da limitate prove in-situ sugli elementi più importanti.

LC2: Conoscenza adeguata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un **rilievo** o dai **disegni originali**. In quest'ultimo caso viene effettuato un **rilievo visivo a campione** per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti da **un'estesa verifica in-situ** oppure parzialmente noti dai **disegni costruttivi originali incompleti**. In quest'ultimo caso viene effettuata una limitata verifica in situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai **disegni costruttivi o ai certificati originali di prova, o da estese verifiche in-situ**. Nel primo caso sono anche eseguite limitate prove in-situ; se i valori ottenuti dalle prove in-situ sono minori di quelli disponibili dai disegni o dai certificati originali, sono eseguite estese prove in-situ. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

LC3: Conoscenza accurata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a [un rilievo o dai disegni originali](#). In quest'ultimo caso è effettuato un [rilievo visivo a campione](#) per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti o da [un'esaustiva verifica in-situ oppure dai disegni costruttivi originali](#). In quest'ultimo caso è effettuata una limitata verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai [disegni costruttivi o ai certificati originali, o da esaustive verifiche in-situ](#). Nel primo caso sono anche eseguite estese prove in-situ; se i valori ottenuti dalle prove in-situ sono minori di quelli disponibili dai disegni o dai certificati originali, sono eseguite esaustive prove in-situ. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in c.a. e in acciaio – **Dettagli Costruttivi**

Progetto simulato: serve, in mancanza dei disegni costruttivi originali, a definire la quantità e la disposizione dell'armatura in tutti gli elementi con funzione strutturale o le caratteristiche dei collegamenti. E' eseguito sulla base delle norme tecniche in vigore e della pratica costruttiva caratteristica all'epoca della costruzione.

Verifiche in-situ limitate: servono per verificare la corrispondenza tra le armature o le caratteristiche dei collegamenti effettivamente presenti e quelle riportate nei disegni costruttivi, oppure ottenute mediante il progetto simulato.

Verifiche in-situ estese: servono quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali come alternativa al progetto simulato seguito da verifiche limitate, oppure quando i disegni costruttivi originali sono incompleti.

Verifiche in-situ esaustive: servono quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali e si desidera un livello di conoscenza accurata (LC3).

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in c.a. e in acciaio – **Proprietà dei Materiali**

Calcestruzzo: la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura.

Acciaio: la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima, salvo nel caso in cui siano disponibili certificati di prova di entità conforme a quanto richiesto per le nuove costruzioni, nella normativa dell'epoca.

Unioni di elementi in acciaio: la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima.

Metodi di prova non distruttivi: Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità, che non possono essere impiegati in completa sostituzione di quelli sopra descritti, ma sono consigliati a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti con prove distruttive. Nel caso del calcestruzzo, è importante adottare metodi di prova che limitino l'influenza della carbonatazione degli strati superficiali sui valori di resistenza.

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in c.a. e in acciaio – *Proprietà dei Materiali*

Prove in-situ limitate: servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali ottenute o dalle normative in vigore all'epoca della costruzione, o dalle caratteristiche nominali riportate sui disegni costruttivi, o da certificati originali di prova.

Prove in-situ estese: servono per ottenere informazioni in mancanza sia dei disegni costruttivi, che dei certificati originali di prova, oppure quando i valori ottenuti dalle prove limitate risultano inferiori a quelli riportati nei disegni o certificati originali.

Prove in-situ esaustive: servono per ottenere informazioni in mancanza sia dei disegni costruttivi, che dei certificati originali di prova, oppure quando i valori ottenuti dalle prove limitate risultano inferiori a quelli riportati nei disegni o certificati originali, e si desidera un livello di conoscenza accurata (LC3).

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in c.a.

	dettagli costruttivi	materiali
limitate	almeno 15% degli elementi strutturali primari per ogni tipologia strutturale	1 provino cls per 300 m ² di piano, 1 campione di armatura per piano
estese	almeno 35% degli elementi strutturali primari per ogni tipologia strutturale	2 provino cls per 300 m ² di piano, 2 campione di armatura per piano
esaustive	almeno 50% degli elementi strutturali primari per ogni tipologia strutturale	3 provino cls per 300 m ² di piano, 3 campione di armatura per piano

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in acciaio

	Rilievo collegamenti	materiali
limitate	caratteristiche verificate per almeno il 15% degli elementi	1 provino acciaio per piano, 1 campione di bullone o chiodo per piano
estese	caratteristiche verificate per almeno il 35% degli elementi	2 provino acciaio per piano, 2 campione di bullone o chiodo per piano
esaustive	caratteristiche verificate per almeno il 50% degli elementi	3 provino acciaio per piano, 3 campione di bullone o chiodo per piano

VERIFICA DI EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA



LIVELLI DI CONOSCENZA (MURATURA)

conoscenza		Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	limitata	Da rilievo strutturale	Limitate verifiche in situ	Limitate indagini in situ	tutti	1.35
LC2	adeguata		Estese ed esaustive verifiche in situ	Estese indagini in situ		1.20
LC3	accurata			Esaustive indagini in situ		1.00

LIVELLI DI CONOSCENZA (MURATURA)

Conoscenza		Proprietà materiali
LC1	limitata	Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1
LC2	adeguata	Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1
LC3	accurata	-caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 -caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a). -caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a).

STRUTTURE IN MURATURA

- EDIFICI ESISTENTI: Caratterizzazione Meccanica dei Materiali -

Tabella C.8A.2.1 delle N.T.C. 2008

Tipologia di muratura	f_m (N/cm ²)	τ_0 (N/cm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura $< 45\%$)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura $< 45\%$)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura $< 45\%$)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

STRUTTURE IN MURATURA

- EDIFICI ESISTENTI: Caratterizzazione Meccanica dei Materiali -

Tabella C8A.2.2 - Coefficienti correttivi dei parametri meccanici (indicati in Tabella C8A.2.1) da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone o ottime; giunti sottili; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; nucleo interno particolarmente scadente e/o ampio; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato.

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessioni trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

* Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in muratura – **Dettagli Costruttivi**

I dettagli costruttivi da esaminare sono relativi ai seguenti elementi:

- a) qualità del **collegamento tra pareti** verticali;
- b) qualità del **collegamento tra orizzontamenti e pareti** ed eventuale presenza di cordoli di piano o di altri dispositivi di collegamento;
- c) esistenza di **architravi strutturalmente efficienti** al di sopra delle aperture;
- d) presenza di **elementi** strutturalmente **efficienti atti ad eliminare le spinte** eventualmente presenti;
- e) presenza di **elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità**;
- f) **tipologia della muratura** (a un paramento, a due o più paramenti, con o senza riempimento a sacco, con o senza collegamenti trasversali, etc.), e sue **caratteristiche costruttive** (eseguita in mattoni o in pietra, regolare, irregolare, etc.).

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in muratura – **Dettagli Costruttivi**

- **Verifiche in-situ limitate:** sono basate su rilievi di tipo visivo effettuati ricorrendo, generalmente, a rimozione dell'intonaco e saggi nella muratura che consentano di esaminarne le caratteristiche sia in superficie che nello spessore murario, e di ammorsamento tra muri ortogonali e dei solai nelle pareti. I dettagli costruttivi di cui ai punti a) e b) possono essere valutati anche sulla base di una conoscenza appropriata delle tipologie dei solai e della muratura. In assenza di un rilievo diretto, o di dati sufficientemente attendibili, è opportuno assumere, nelle successive fasi di modellazione, analisi e verifiche, le ipotesi più cautelative.

- **Verifiche in-situ estese ed esaustive:** sono basate su rilievi di tipo visivo, effettuati ricorrendo, generalmente, a saggi nella muratura che consentano di esaminarne le caratteristiche sia in superficie che nello spessore murario, e di ammorsamento tra muri ortogonali e dei solai nelle pareti. L'esame degli elementi di cui ai punti da a) ad f) è opportuno sia esteso in modo sistematico all'intero edificio.

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in muratura – **Proprietà dei Materiali**

- **Verifiche in-situ limitate:** servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali ottenute dalla letteratura, o dalle regole in vigore all'epoca della costruzione, e per individuare la tipologia della muratura (in Tabella C8A.2.1 sono riportate alcune tipologie più ricorrenti). **Sono basate su esami visivi della superficie muraria.** Tali esami visivi sono condotti dopo la rimozione di una zona di intonaco di almeno 1m x 1m, al fine di individuare forma e dimensione dei blocchi di cui è costituita, eseguita preferibilmente in corrispondenza degli angoli, al fine di verificare anche le ammorsature tra le pareti murarie. **E' da valutare, anche in maniera approssimata, la compattezza della malta.** Importante è anche valutare la capacità degli elementi murari di assumere un comportamento monolitico in presenza delle azioni, tenendo conto della qualità della connessione interna e trasversale attraverso saggi localizzati, che interessino lo spessore murario.

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in muratura – **Proprietà dei Materiali**

- Verifiche in-situ estese: *le indagini di cui al punto precedente sono effettuate in maniera estesa e sistematica, con saggi superficiali ed interni per ogni tipo di muratura presente. Prove con martinetto piatto doppio e prove di caratterizzazione della malta (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato, etc.), e eventualmente di pietre e/o mattoni (caratteristiche fisiche e meccaniche) consentono di individuare la tipologia della muratura (si veda la Tabella C8A.2.1 per le tipologie più ricorrenti). È opportuna una prova per ogni tipo di muratura presente. **Metodi di prova non distruttivi** (prove soniche, prove sclerometriche, penetrometriche per la malta, etc.) **possono essere impiegati a complemento delle prove richieste.** Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sulla costruzione oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altre costruzioni presenti nella stessa zona. Le Regioni potranno, tenendo conto delle specificità costruttive del proprio territorio, definire zone omogenee a cui riferirsi a tal fine.*

LIVELLI DI CONOSCENZA

Strutture in muratura – **Proprietà dei Materiali**

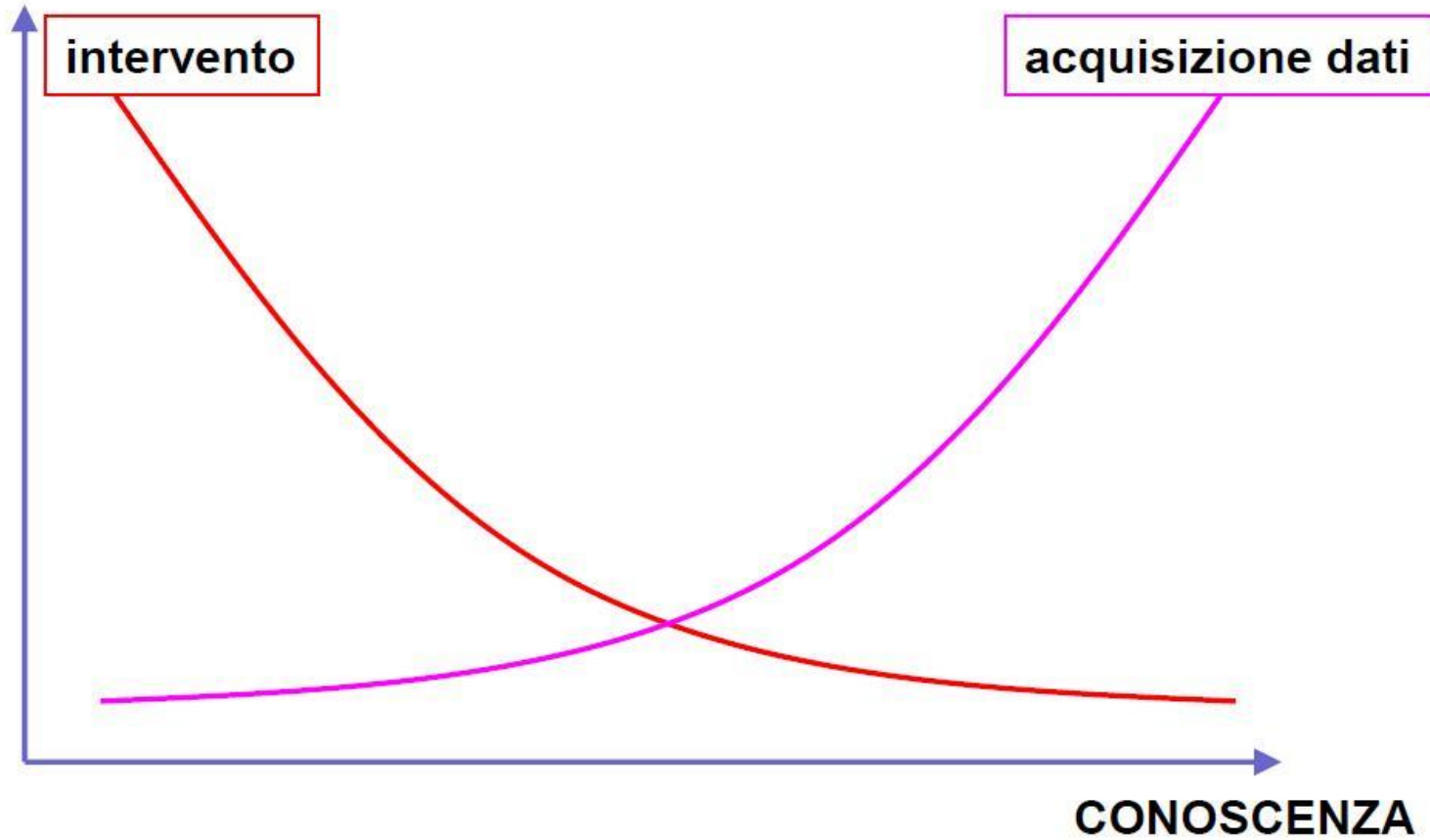
- **Verifiche in-situ esaustive:** servono per ottenere informazioni quantitative sulla resistenza del materiale. *In aggiunta alle verifiche visive, ai saggi interni ed alle prove di cui ai punti precedenti, si effettua una ulteriore serie di prove sperimentali che, per numero e qualità, siano tali da consentire di valutare le caratteristiche meccaniche della muratura.* La misura delle caratteristiche meccaniche della muratura si ottiene mediante esecuzione di *prove, in situ o in laboratorio* (su elementi non disturbati prelevati dalle strutture dell'edificio). Le prove possono in generale comprendere prove di compressione diagonale su pannelli o prove combinate di compressione verticale e taglio. Metodi di prova non distruttivi possono essere impiegati in combinazione, ma non in completa sostituzione di quelli sopra descritti. Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sulla costruzione oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altre costruzioni presenti nella stessa zona. Le Regioni potranno, tenendo conto delle specificità costruttive del proprio territorio, definire zone omogenee a cui riferirsi a tal fine.

LIVELLI DI CONOSCENZA



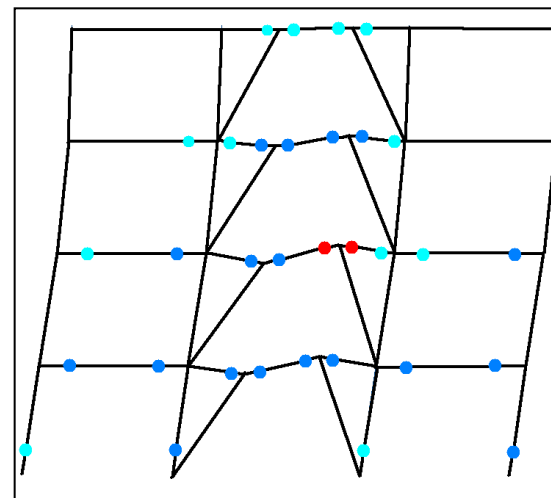
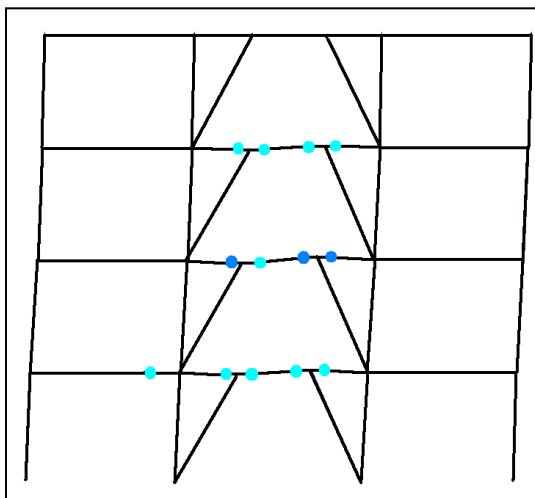
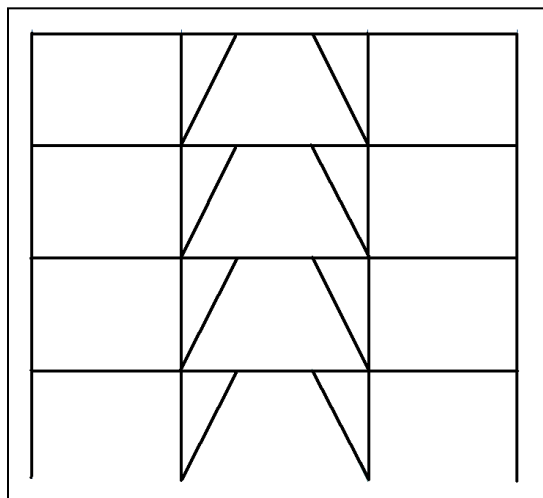
LIVELLI DI CONOSCENZA

COSTO



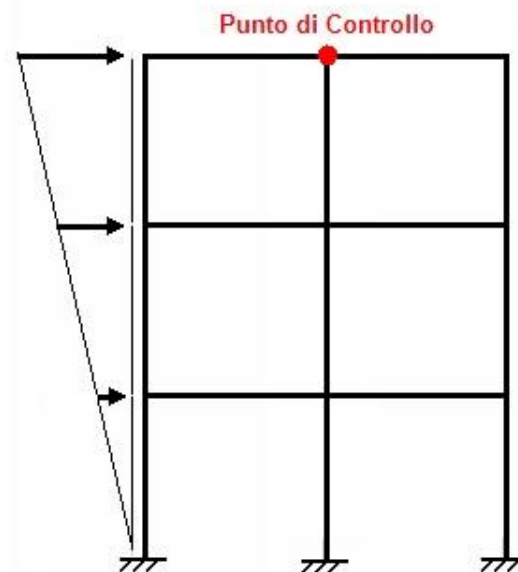
ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

L'analisi viene condotta utilizzando tecniche di tipo statiche incrementali quali ad esempio la tecnica **event by event** (passo passo). In pratica si tratta di caricare la struttura con forze orizzontali via via crescenti e di determinare per ogni incremento di carico la risposta della struttura prendendo in considerazione eventuali plasticizzazioni, rotture fragili, effetti P-Delta, rotture locali dei nodi ed aggiornando di conseguenza il modello strutturale.

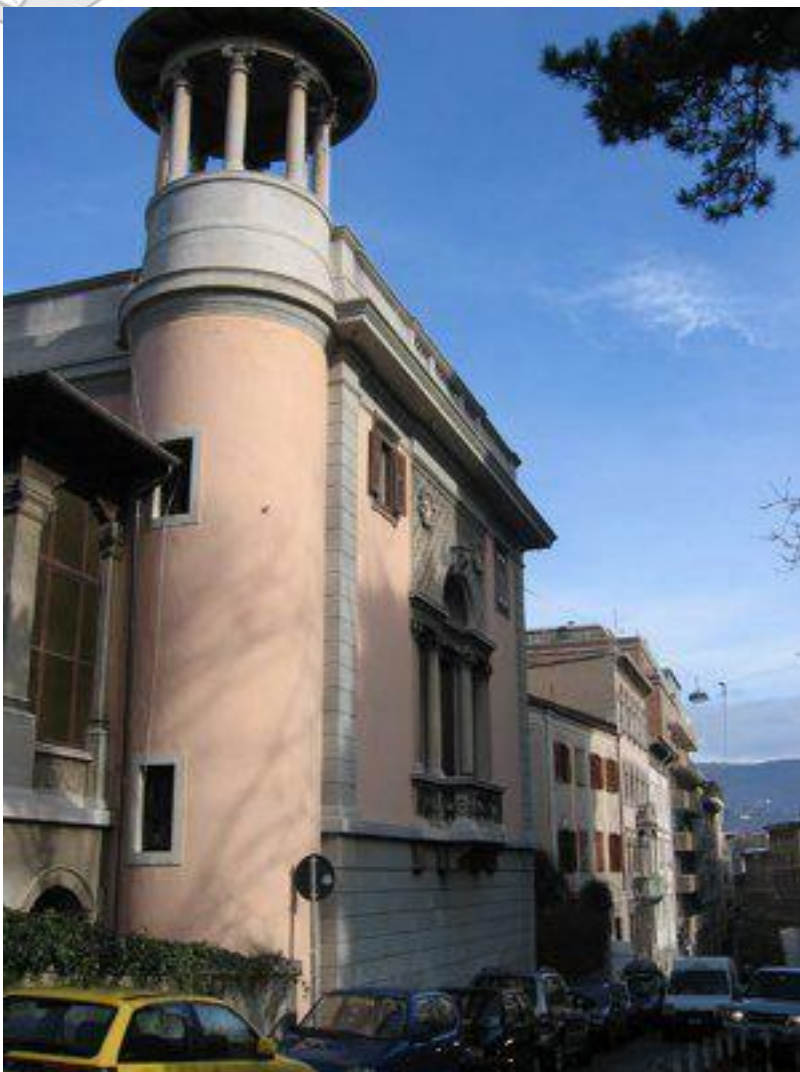


ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

L'analisi statica non lineare consiste nell'applicare all'edificio i carichi gravitazionali ed un sistema di forze orizzontali che, mantenendo invariati i rapporti relativi tra le forze stesse, vengano tutte scalate in modo da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale di un **punto di controllo** (ad esempio in sommità dell'edificio, a livello della copertura) sulla struttura fino al raggiungimento delle condizioni ultime. Il risultato dell'analisi consisterà in un diagramma riportante in ascissa lo spostamento orizzontale del punto di controllo, in ordinata la forza orizzontale totale applicata (taglio alla base).



ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

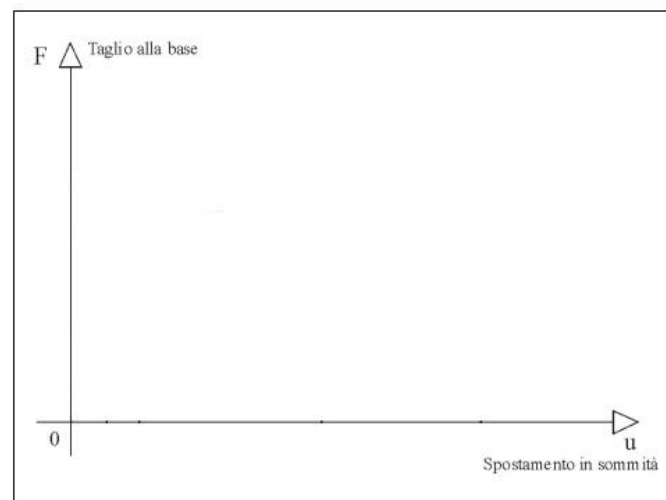
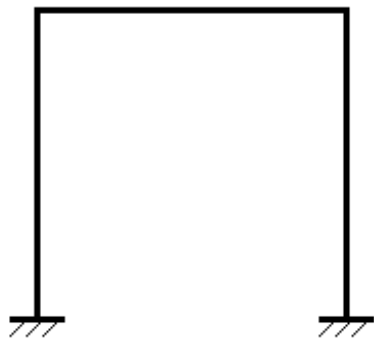


[...]

*Tali forze sono scalate in modo da far crescere monotonamente, sia in direzione positiva che negativa e fino al raggiungimento delle condizioni di collasso locale o globale, lo spostamento orizzontale dc di un **punto di controllo coincidente con il centro di massa dell'ultimo livello della costruzione** (sono esclusi eventuali **torrini**).*

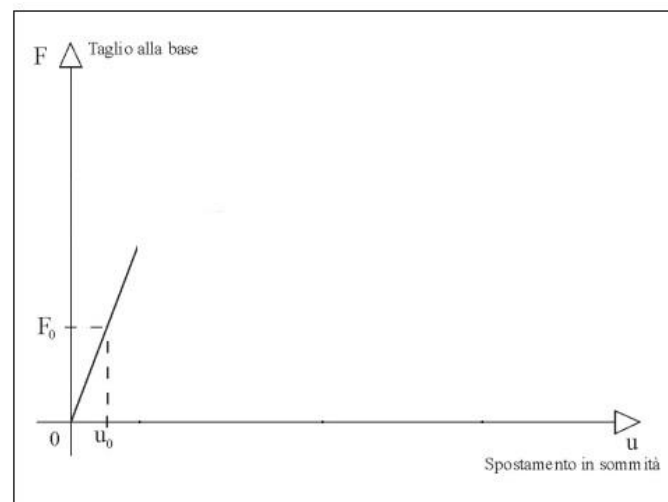
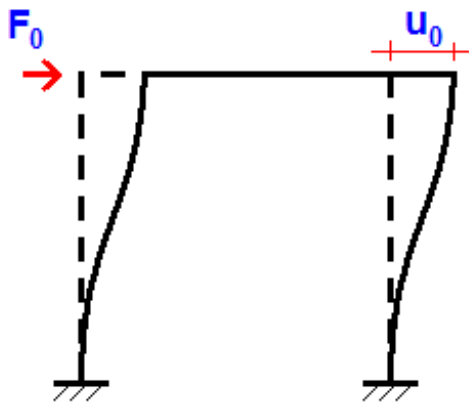
[...]

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



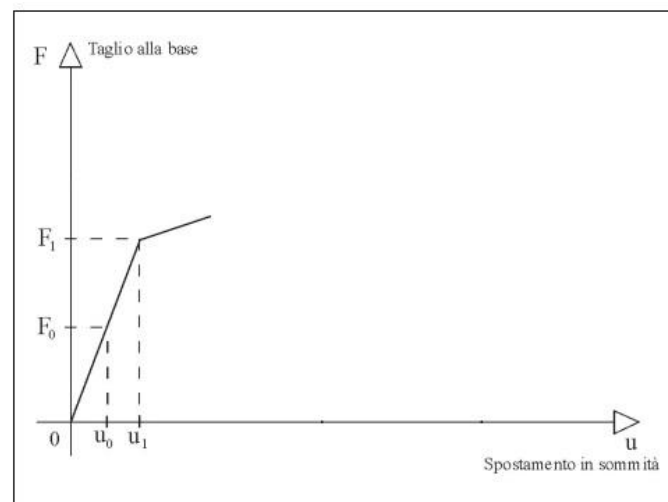
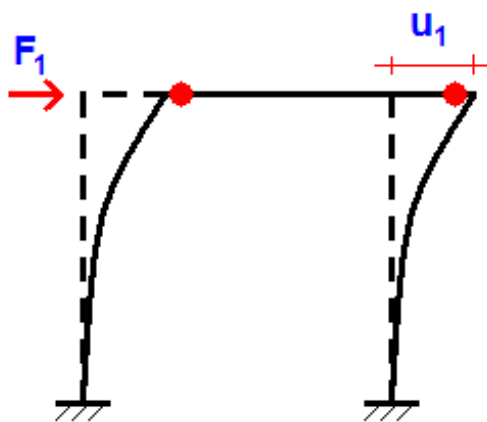
Condizione iniziale - Fase 1

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



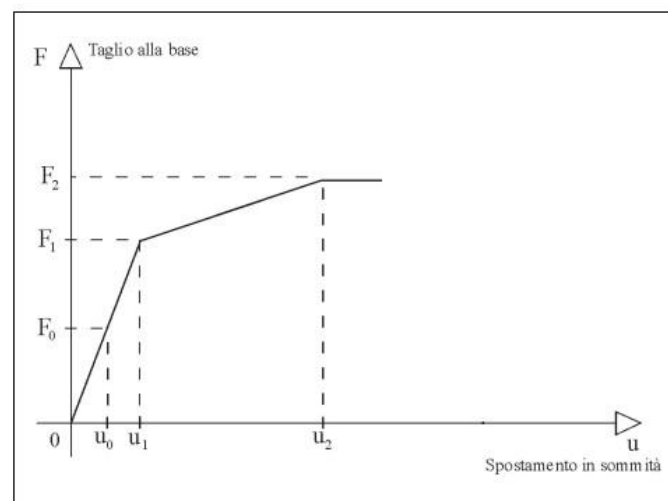
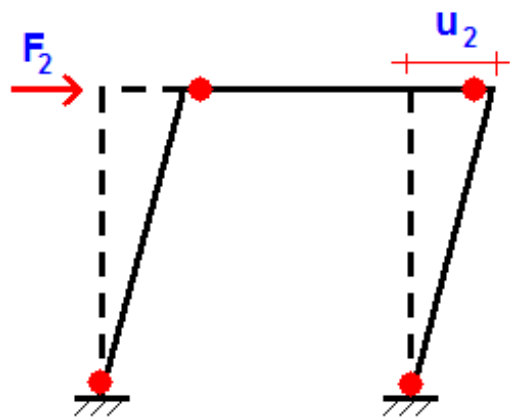
Fase 2

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



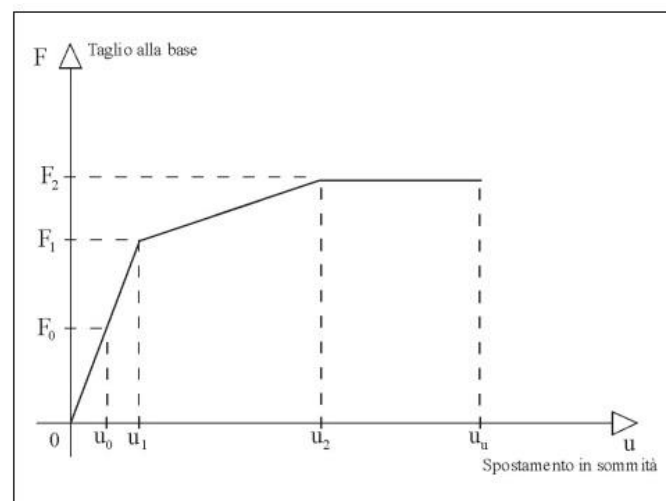
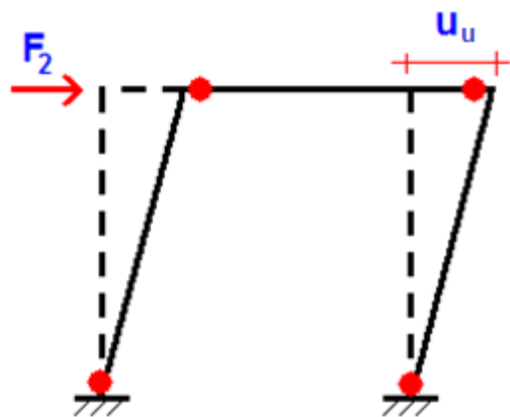
Fase 3

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Fase 4

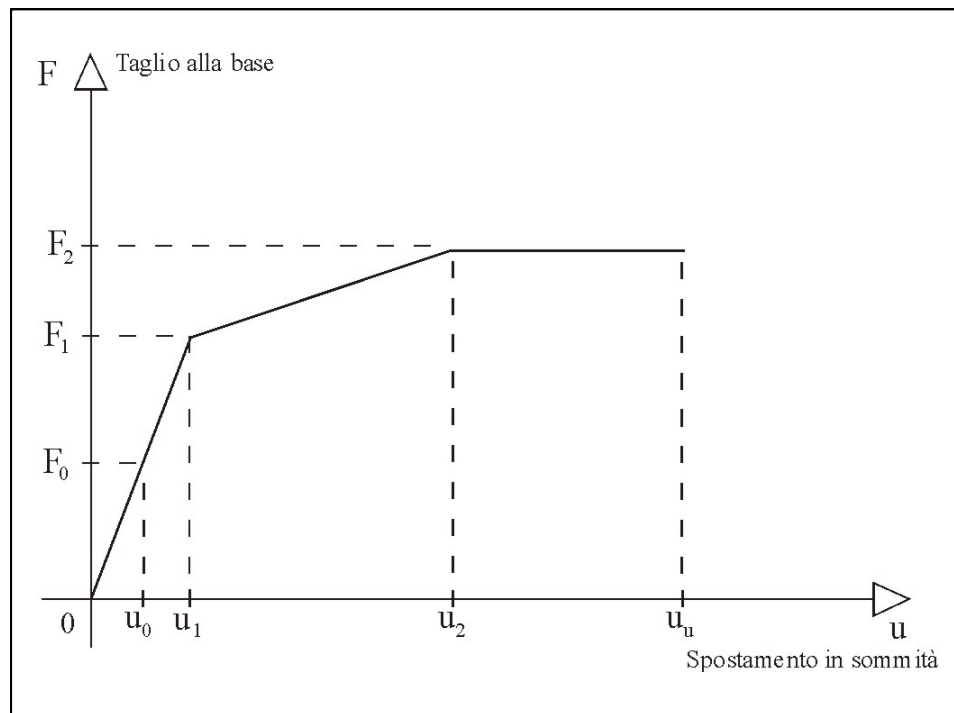
ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Fase 5

DUTTILITA' DELLA STRUTTURA

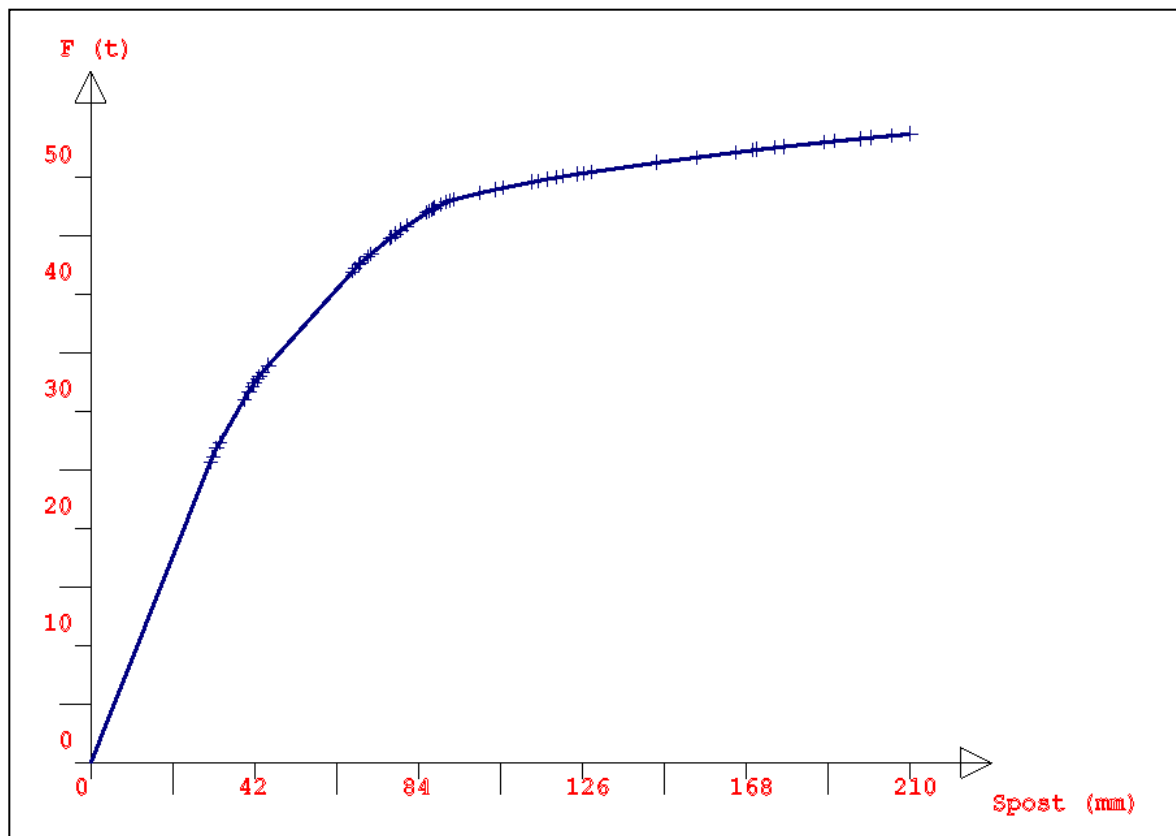
CURVA DI CAPACITA'



Curva di capacità

- Curva di Capacità -

- Per avere una rappresentazione sintetica molto efficace della risposta della struttura sotto l'azione di forze orizzontali via via crescenti si costruisce la *curva di capacità* con in ascissa riportato lo spostamento del baricentro del solaio di copertura (Punto di Controllo) ed in ordinata il tagliante alla base, ovvero la risultante delle forze orizzontali applicate:

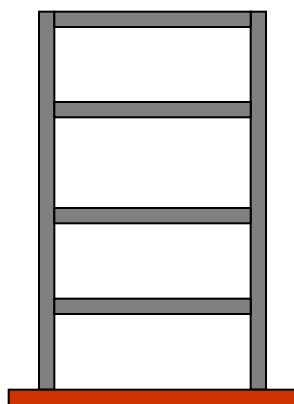


ANALISI NON LINEARE PUSH-OVER

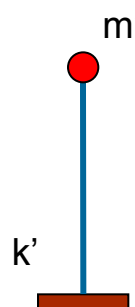
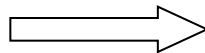
- Curva A.D.S.R. (Attack Decay Sustain Release) -

- Si indichi con ϕ il vettore rappresentativo del primo modo di vibrazione della struttura di interesse per la direzione considerata dell'azione sismica, normalizzato al valore unitario della componente relativa al punto di controllo.
- Si indichi con Γ il "coefficiente di partecipazione", e con m^* la massa del sistema equivalente
- Si riscali la curva di capacità dividendo ascisse ed ordinate per Γ ottenendo così la curva caratteristica. Se al posto del taglio riportiamo in ordinata il taglio diviso la massa cioè un'accelerazione si ha lo spettro ADSR.

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \cdot \phi_i}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} \quad F^* = F_b / \Gamma \quad d^* = d_c / \Gamma \quad m^* = \sum m_i \cdot \phi_i \quad S_{ad} = \frac{F^*}{m^*}$$



Sistema M.D.O.F.

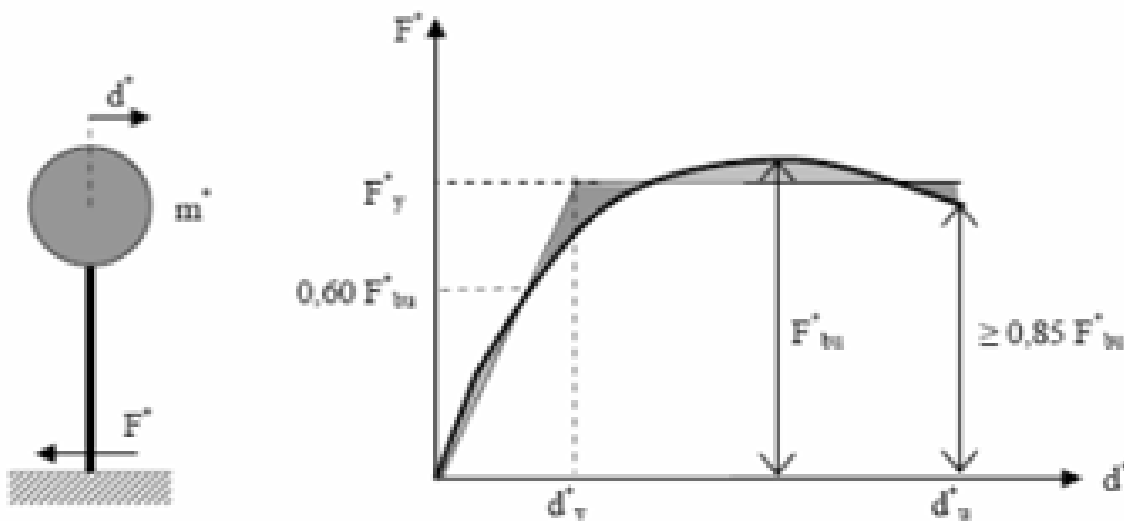


Sistema S.D.O.F.

ANALISI NON LINEARE PUSH-OVER

- Curva A.D.S.R. (Attack Decay Sustain Release) -

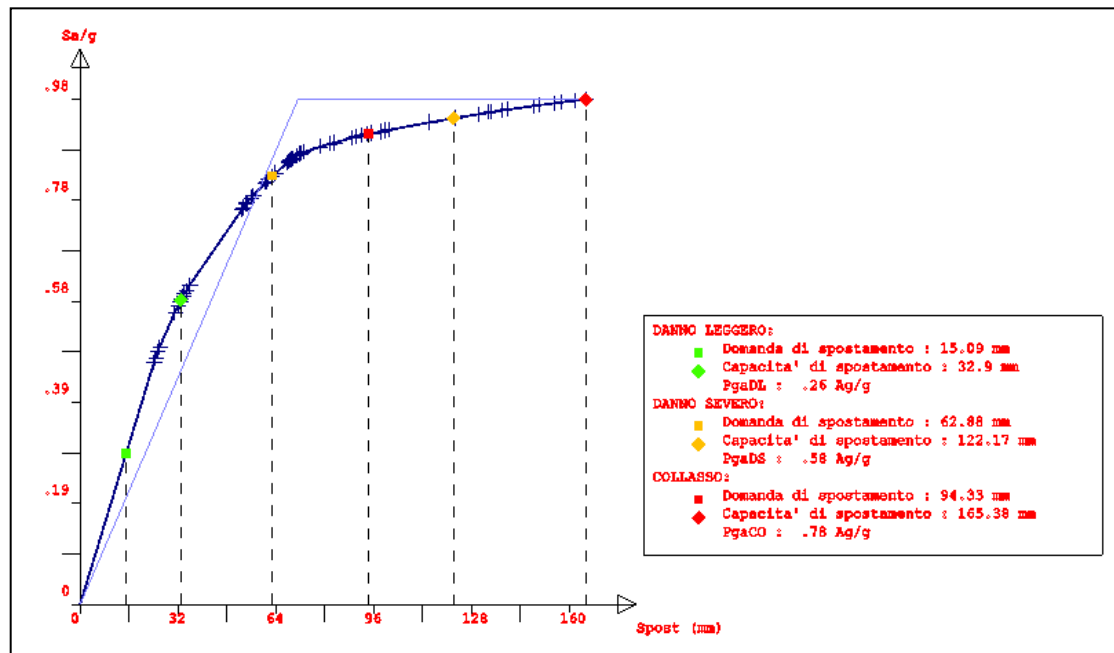
- Si indichi con ϕ il vettore rappresentativo del primo modo di vibrazione della struttura di interesse per la direzione considerata dell'azione sismica, normalizzato al valore unitario della componente relativa al punto di controllo.
- Si indichi con Γ il "coefficiente di partecipazione", e con m^* la massa del sistema equivalente
- Si riscali la curva di capacità dividendo ascisse ed ordinate per Γ ottenendo così la curva caratteristica. Se al posto del taglio riportiamo in ordinata il taglio diviso la massa cioè un'accelerazione si ha lo spettro ADSR.



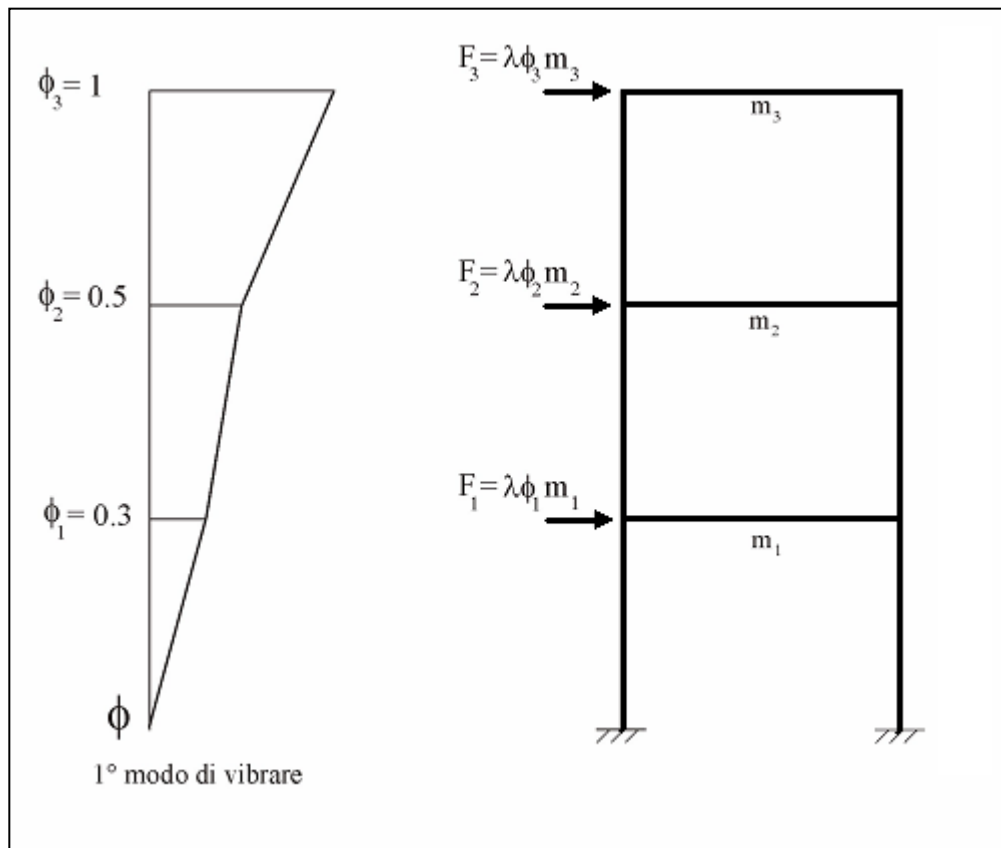
ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

L'esperienza fatta negli USA dal FEMA (la protezione civile americana) ha ormai consolidata l'utilizzo nel campo dell'ingegneria civile della **pushover analysis** ovvero la più semplice delle analisi non lineari possibili in quanto di tipo statica e con percorsi di carico di tipo monotonamente crescente.

- **Domanda:** moto sismico del terreno
- **Capacità:** abilità della struttura di resistere alla domanda sismica
- **Prestazione:** misura in cui la capacità assorbe la domanda



ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



$$F_i = \lambda * m_i * \Phi_i$$

λ = fattore di forma

m_i = massa del piano i-esimo

Φ_i = componente relativa al piano i-esimo del modo di vibrare Φ

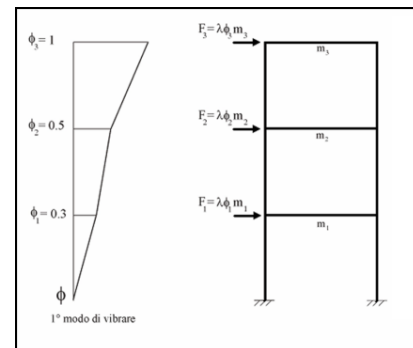
ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

Sistema di Forze n.1 – Forze proporzionali alla massa ed alla forma modale più significativa per la direzione considerata di ingresso del sisma; questa distribuzione è rappresentativa delle forze di inerzia della struttura integra ovvero elastica (distribuzione triangolare)

F_x (+) **F_x (-)**

F_y (+) **F_y (-)**

- Comportamento della struttura intatta -

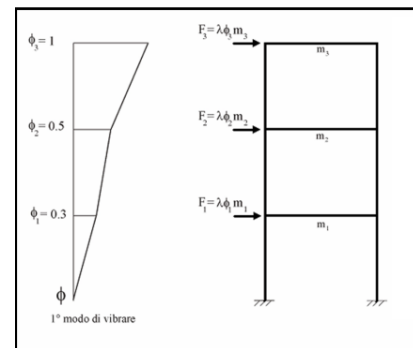


Sistema di Forze n.2 - Forze proporzionali alla massa; questa distribuzione è rappresentativa delle forze di inerzia della struttura fortemente degradata ovvero quando si sono sviluppate importanti deformazioni anelastiche. (distribuzione rettangolare)

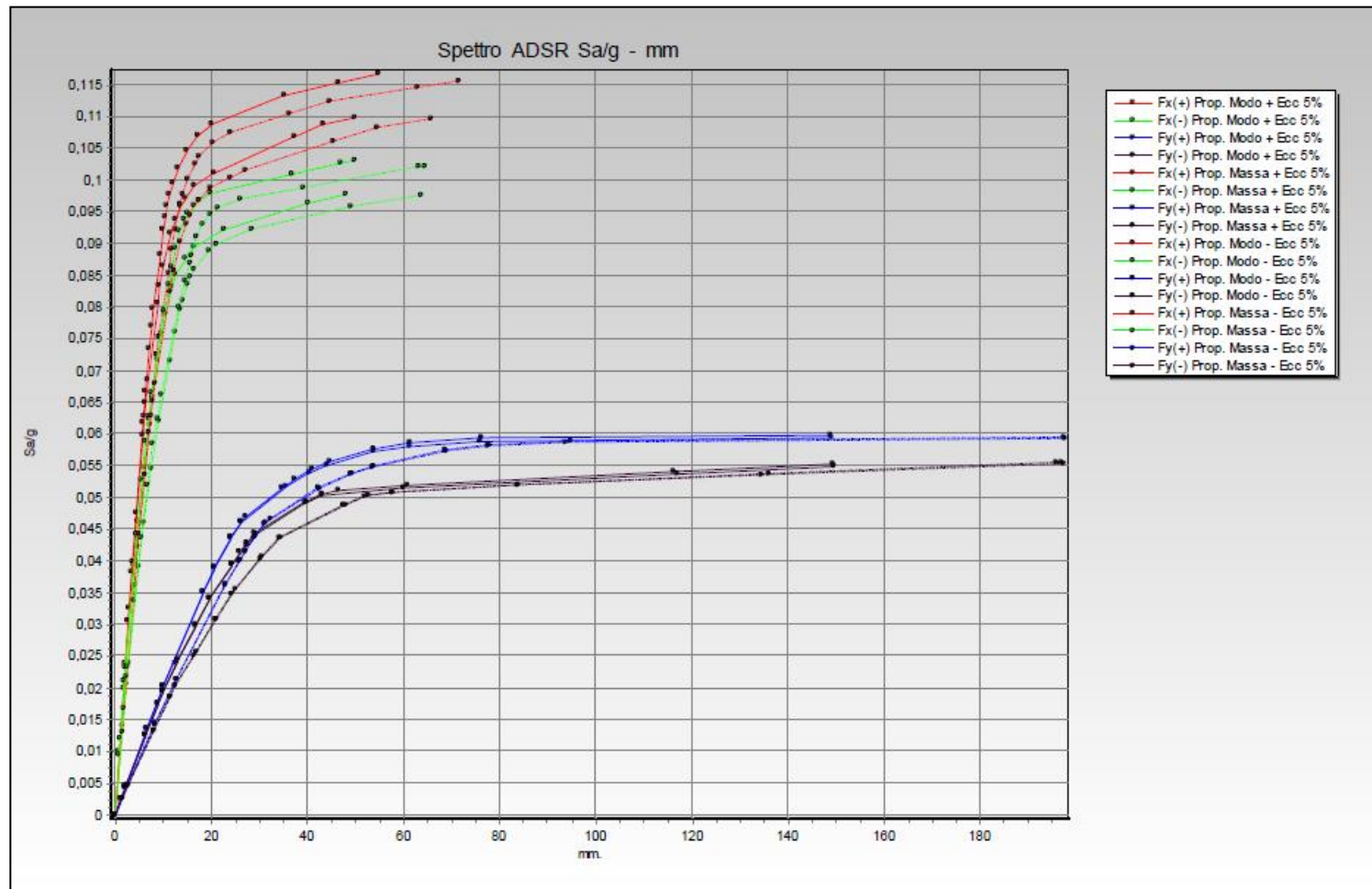
F_x (+) **F_x (-)**

F_y (+) **F_y (-)**

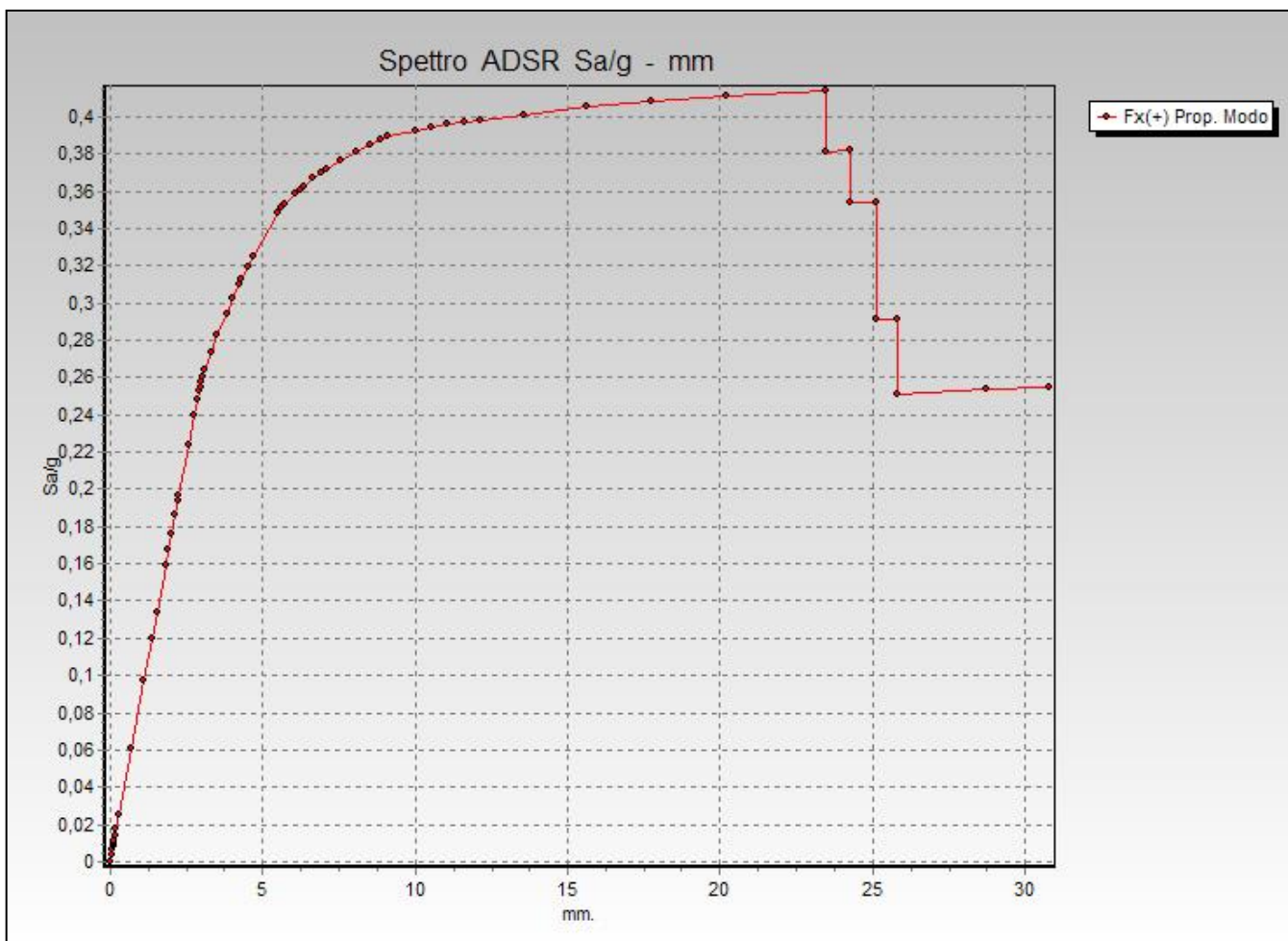
- Comportamento della struttura danneggiata -



ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

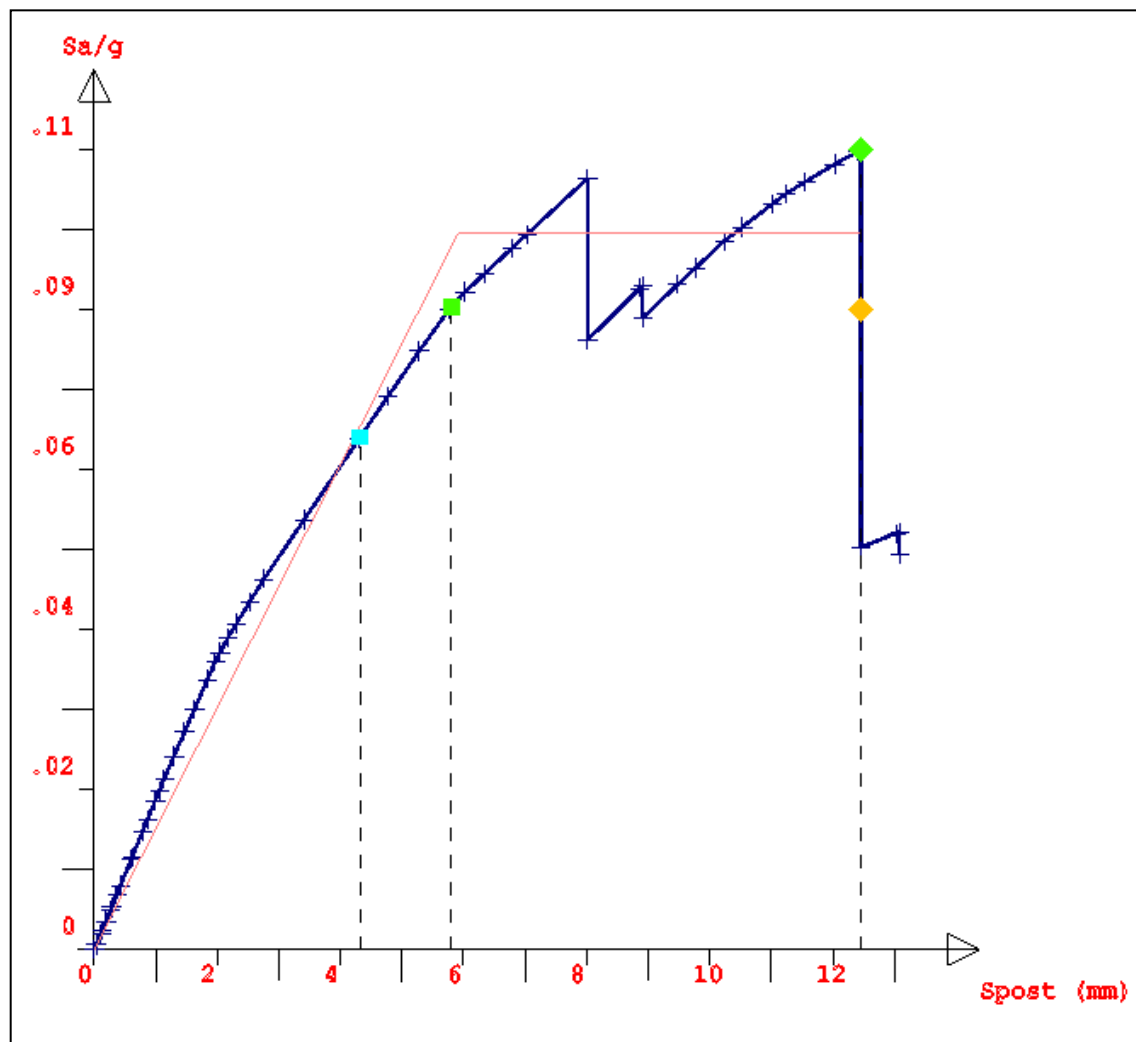


ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Curva di capacità multicollasso per gli edifici in muratura

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



“Softening” del 20% della resistenza per gli edifici in muratura

- Cerniere Plastiche -



- Modello a **plasticità concentrata** e duttilità limitata;
- Modello a **plasticità diffusa** o modello a fibre.

- Cerniere Plastiche -

Nel modello a **PLASTICITA' CONCENTRATA** tutti gli elementi che costituiscono la struttura rimangono in campo elastico, e laddove si prevede la formazione di una cerniera plastica, vengono introdotti elementi cerniera con comportamento anelastico. La **non linearità** della struttura rimane quindi **concentrata in pochi elementi**, appunto le cerniere plastiche, il cui legame costitutivo dipende dalla loro posizione all'interno della struttura e dal comportamento del singolo elemento strutturale, oltre che da quello globale del fabbricato.

Questa schematizzazione risulta essere meno onerosa dal punto di vista matematico-computazionale e più facilmente gestibile. Inoltre **permette di descrivere fenomeni** differenti, quali il **comportamento flessionale**, la **deformabilità a taglio**, lo **scorrimento dell'armatura** e la **flessibilità del nodo** trave-colonna. Il modello a plasticità concentrata è particolarmente adatta per modellare il comportamento di strutture esistenti

Il principale svantaggio di questa schematizzazione consiste nel fatto che il suo impiego richiede una certa esperienza per stabilire dove posizionare gli elementi non lineari (cerniere plastiche). Essa inoltre presenta qualche difficoltà nella stima del diagramma momento-curvatura in presenza di azione assiale e degrado dovuto alle azioni cicliche, ed a prevedere una lunghezza di cerniera plastica equivalente tale per cui il prodotto di tale lunghezza per la curvatura definisca una rotazione realistica.

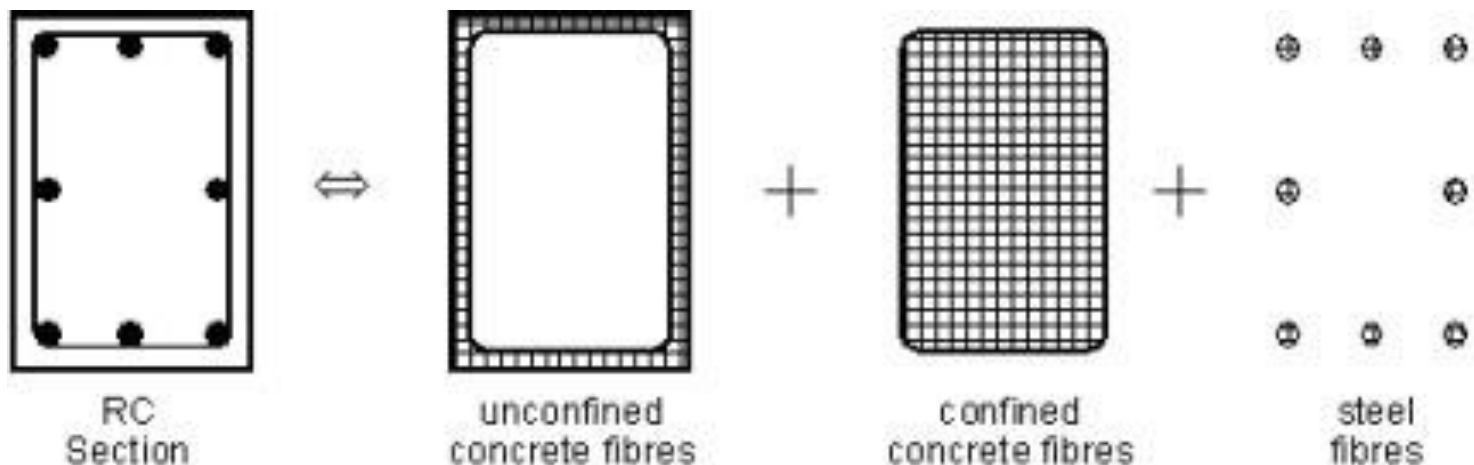


- Cerniere Plastiche -

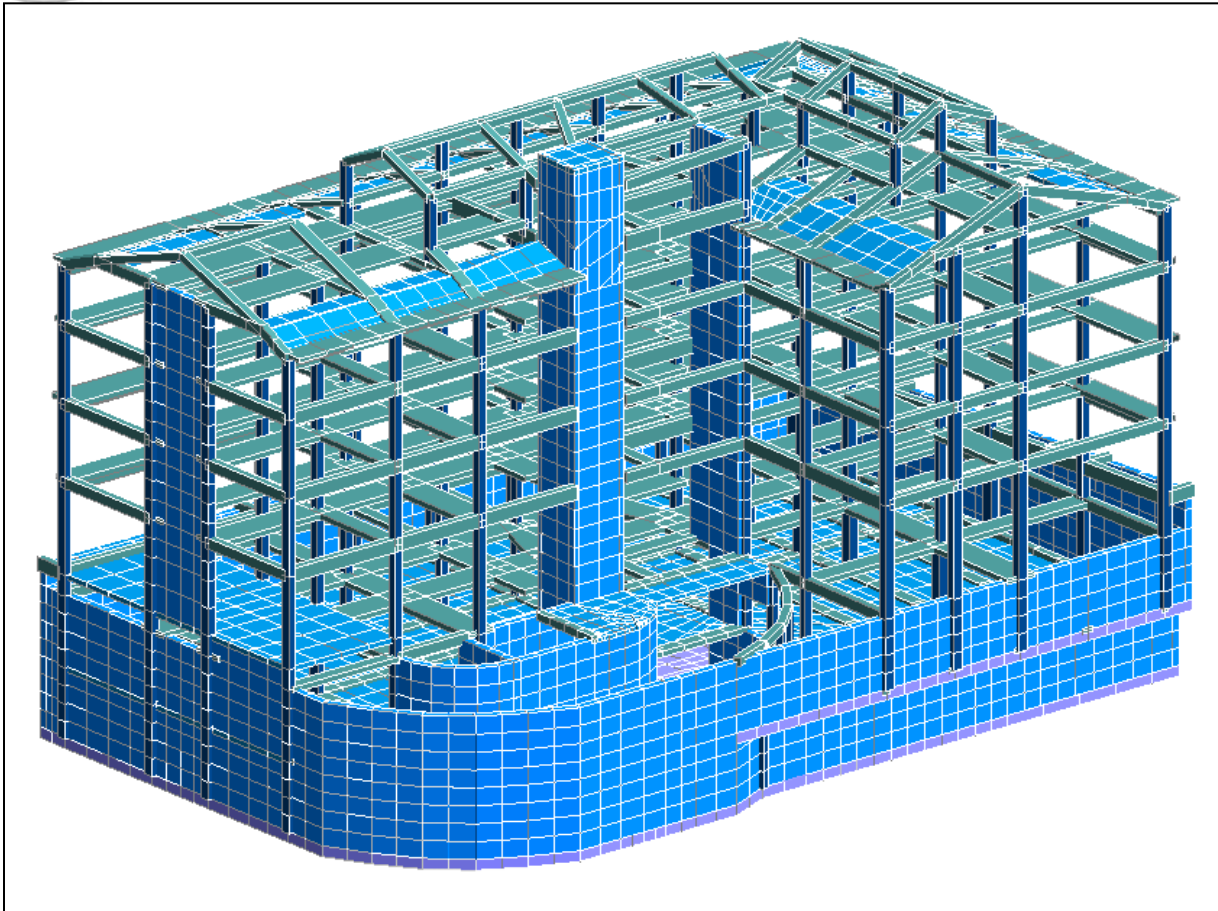
Utilizzando il modello a **PLASTICITA' DIFFUSA** si considerano elementi con comportamento anelastico. L'anelasticità è diffusa in tutto l'elemento strutturale, sia longitudinalmente che trasversalmente attraverso l'utilizzo di elementi a fibre.

Lo stato di sforzo e lo stato di deformazione di una sezione generica dell'elemento è ottenuto tramite integrazione della risposta uniassiale non lineare sforzo-deformazione di ciascuna delle fibre in cui è suddivisa la sezione. Utilizzando un numero di fibre da 100 a 300, si può modellare la distribuzione delle non linearità del materiale anche in condizioni di elevata anelasticità. La sezione di una trave in C.A. è rappresentata come somma delle fibre rispettivamente del calcestruzzo non confinato, del calcestruzzo confinato e delle armature longitudinali.

Il modello a plasticità diffusa presenta però il limite di riuscire a **descrivere solo la componente flessionale della deformazione**: per rappresentare altri fenomeni (taglio, scorrimento delle barre, deformabilità del nodo trave-pilastro, ecc..) è necessario introdurre ulteriori elementi (cerniere parziali, bielle, ecc..).



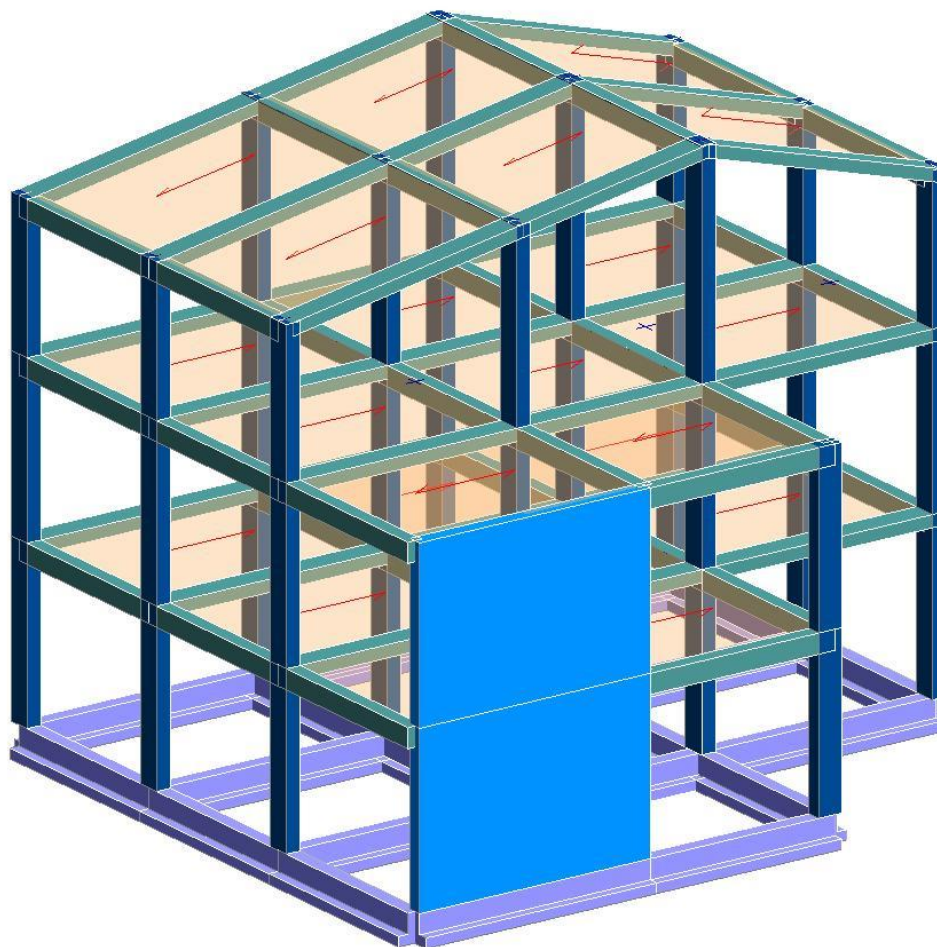
ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Presenza di setti e pareti armate nella struttura in esame.

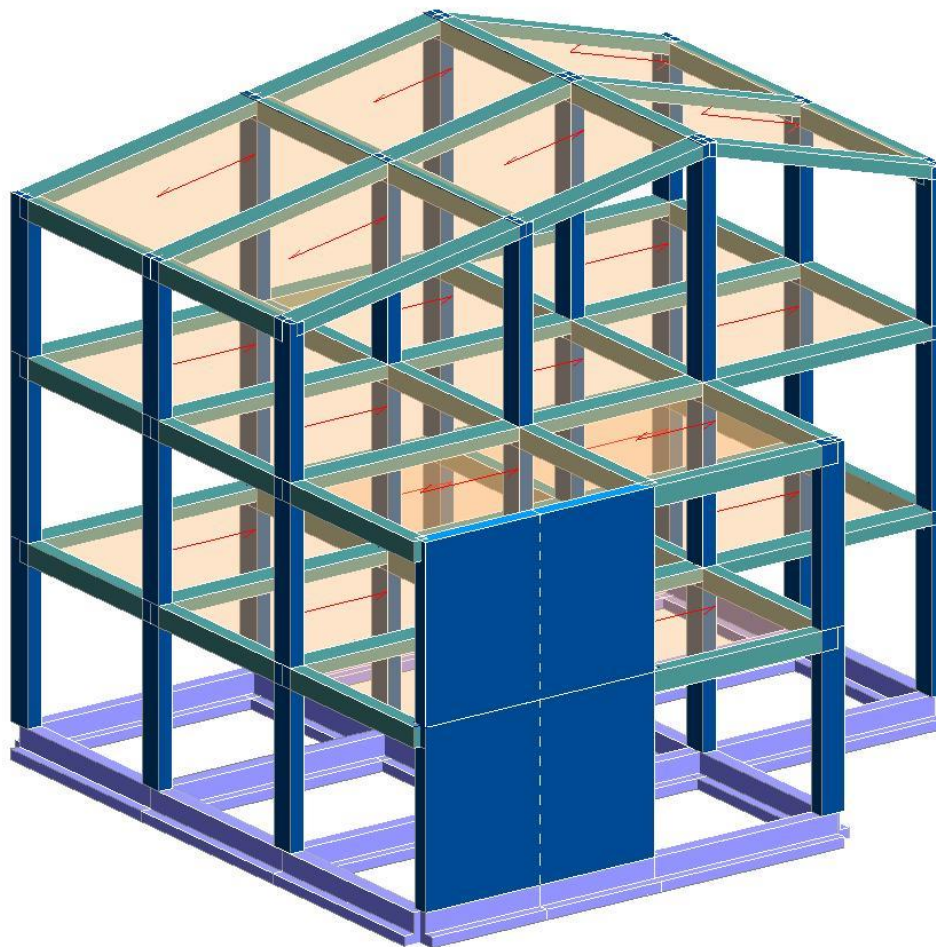
Bisogna valutare quando le pareti in c.a. possono essere inserite nel modello di calcolo per la push-over e quando invece devono essere sostituite con elementi strutturali di tipo monodimensionale (**pilastri + link rigidi**)

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



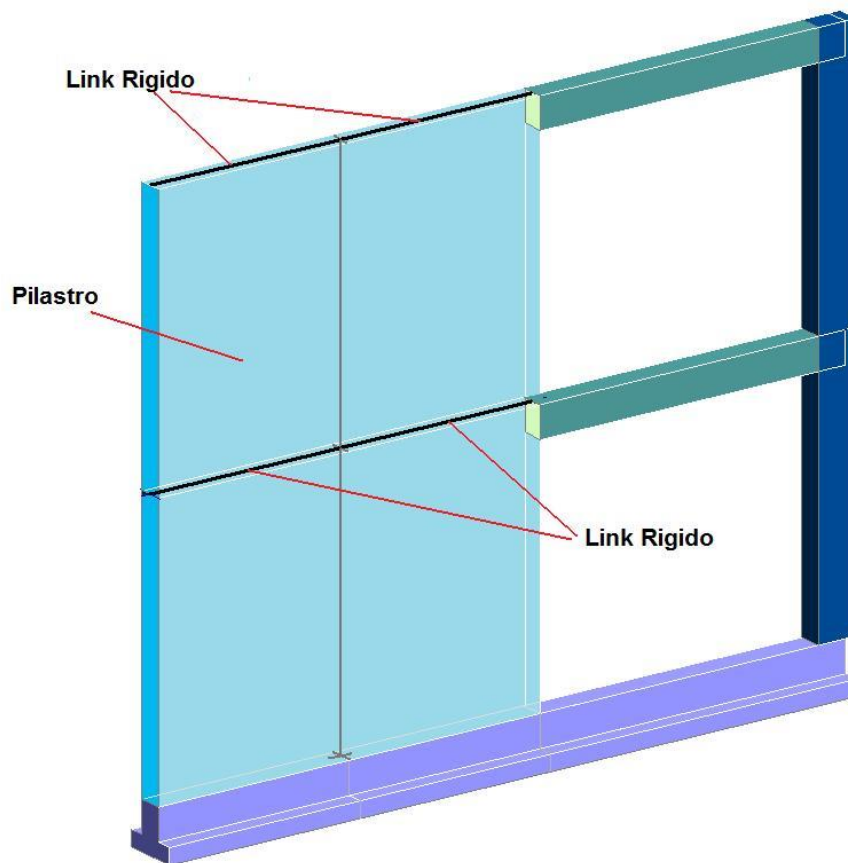
Modello con parete in c.a.

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



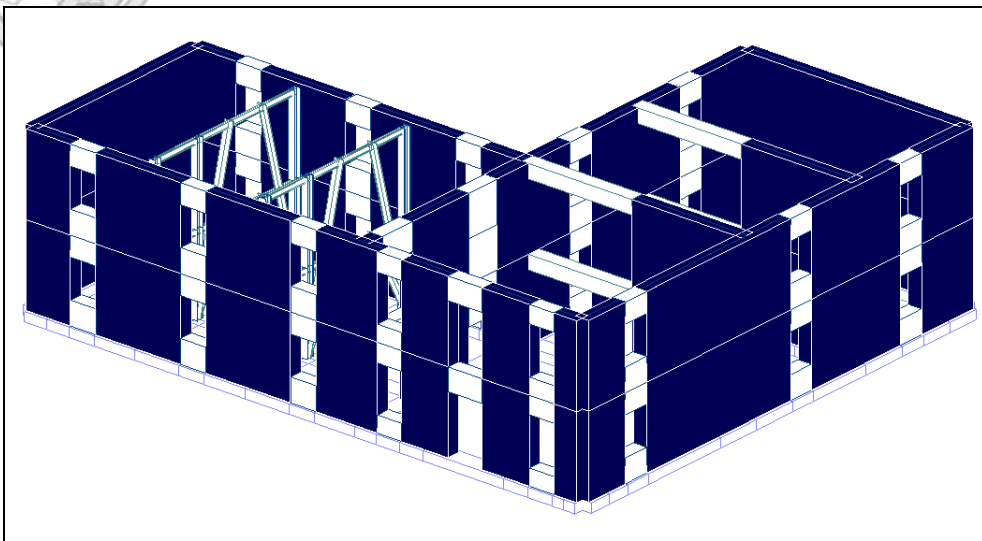
Modello equivalente ad aste

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

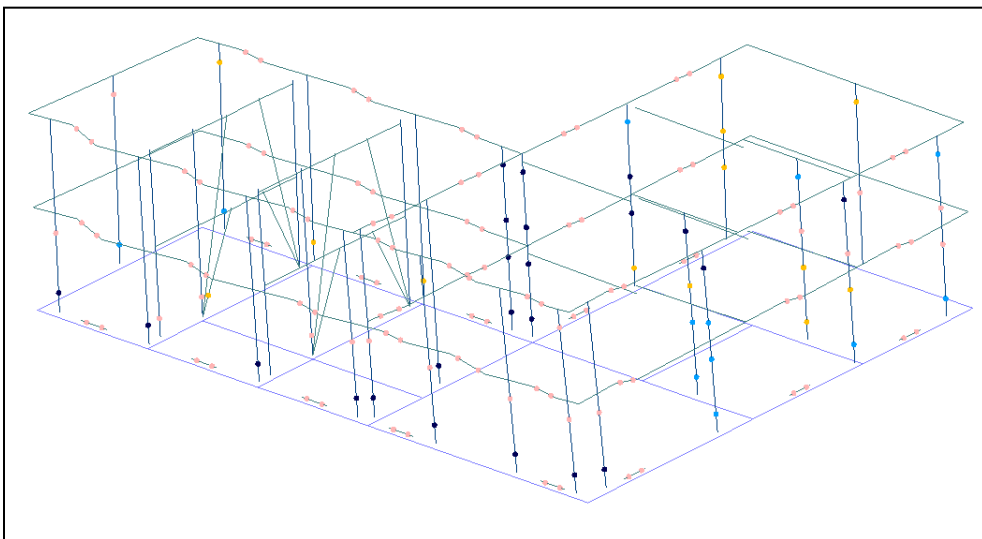


Modello equivalente ad aste

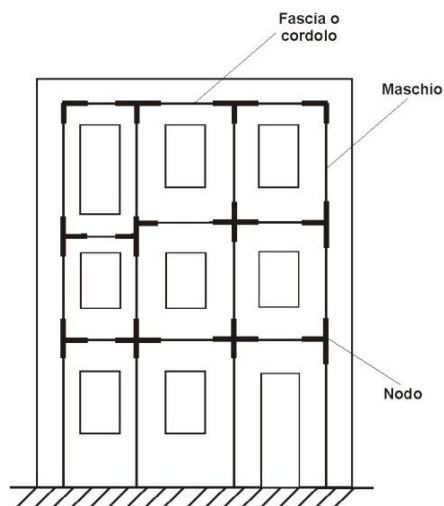
ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Schematizzazione del modello di calcolo per l'analisi Push-Over di un edificio in muratura



ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Schematizzazione strutturale tramite il

Metodo SAM (Simplified Analysis Method)

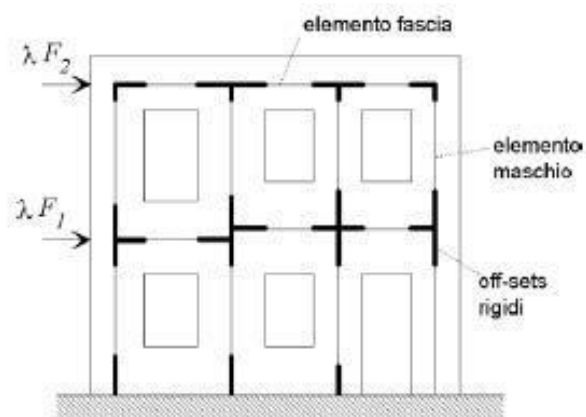


Fig. 13 - Schematizzazione a telaio equivalente di una parete caricata nel piano.

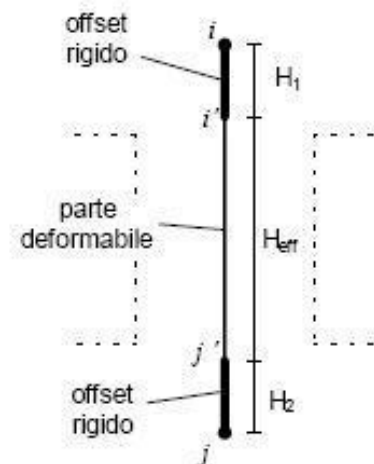


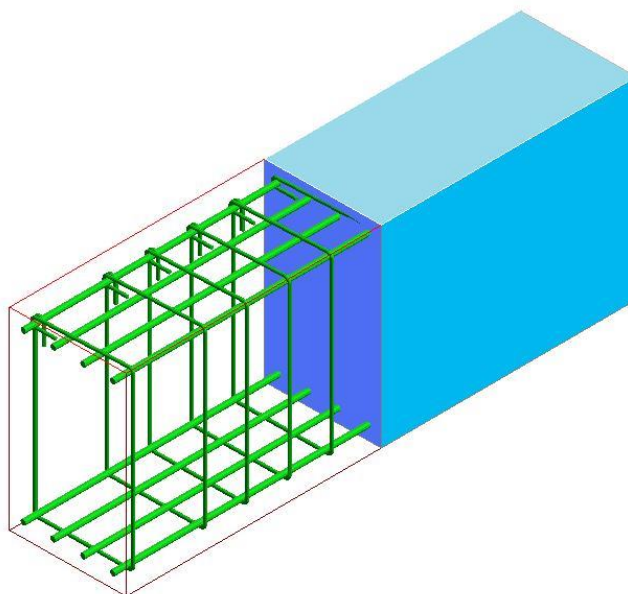
Fig. 14 - L'elemento maschio murario.

- Cerniere Plastiche -

Nel modello non lineare la valutazione della capacità rotazionale ultima delle cerniere plastiche ha una importanza cruciale in quanto questa determinerà la capacità di spostamento ultimo dell'intera struttura e quindi la capacità di rispondere in maniera adeguata all'azione sismica.

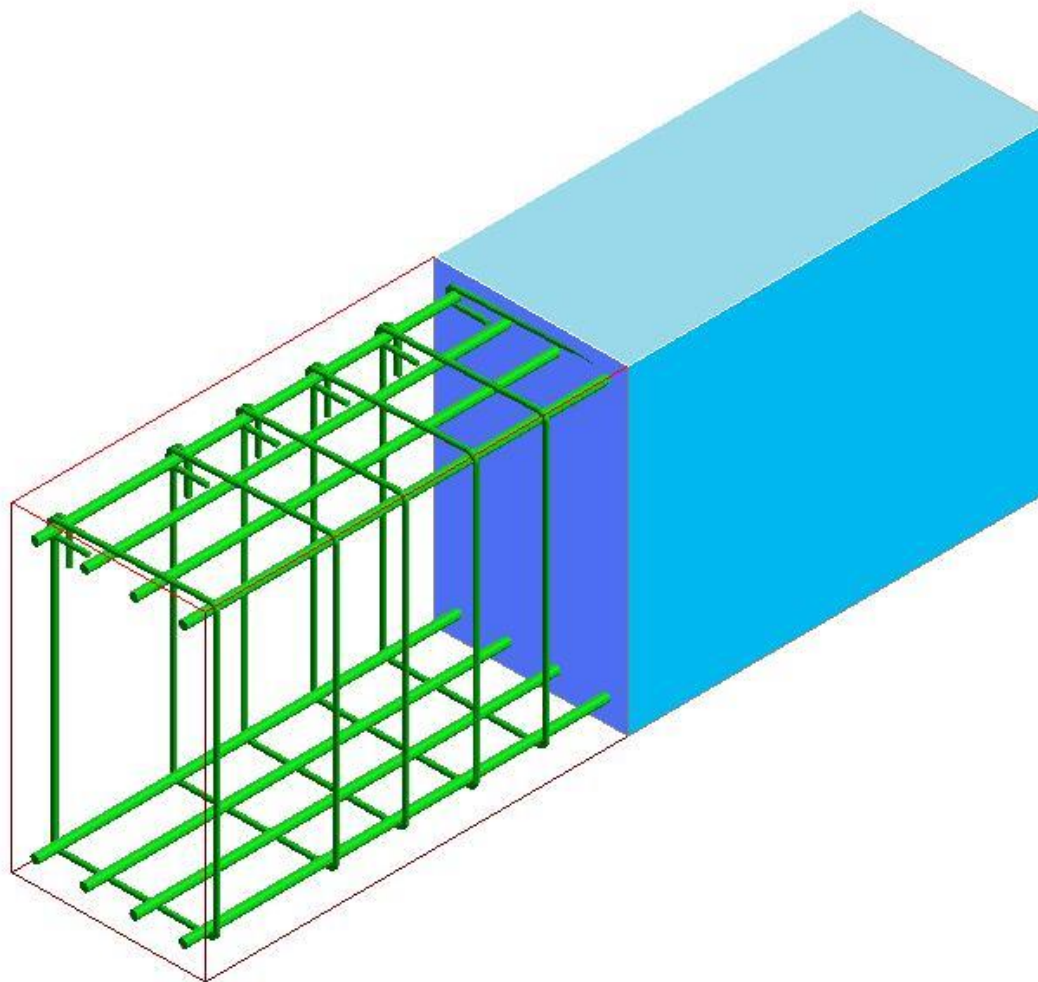
La capacità rotazionale dipende da:

- GEOMETRIA SEZIONE
- MATERIALE SEZIONE
- ARMATURE LONGITUDINALI per C.A.
- STAFFE - CONFINAMENTO per C.A.
- DETTAGLI COSTRUTTIVI (ancoraggio, legature, etc..)
- NODI STRUTTURALI SIA PER C.A. che CARPENTERIE IN ACCIAIO
- LOCALIZZAZIONE ED ESTENSIONE DELLA ZONA PLASTICA
- TIPO DI SOLLECITAZIONE PREVALENTE



ANALISI NON LINEARE PUSH-OVER

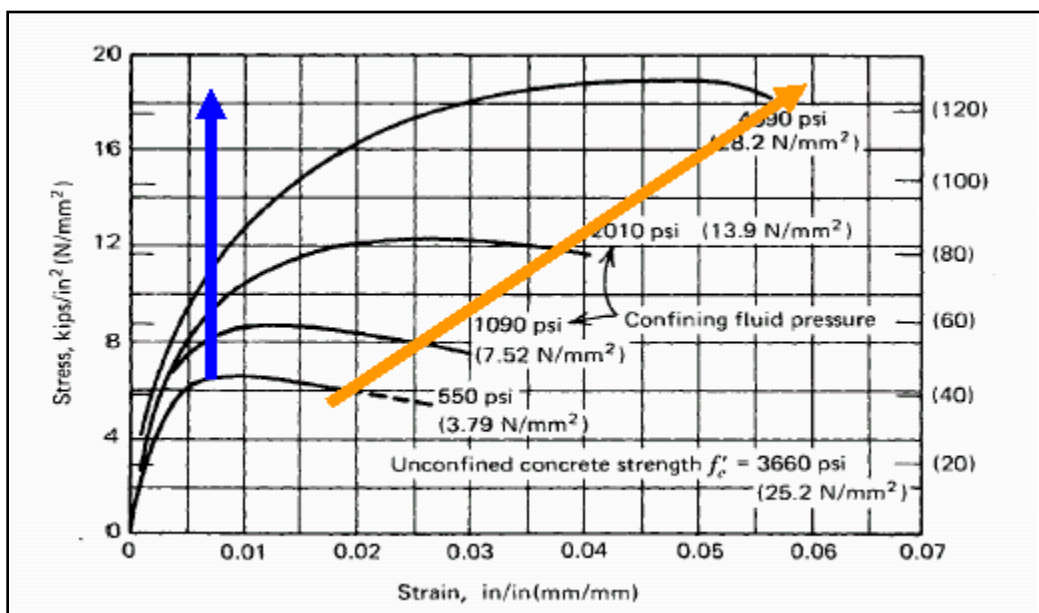
- Cerniere Plastiche -



Staffe Confinanti

- Sezioni in c.a. Confinare -

In genere per la progettazione delle sezione in c.a. si assume un valore di deformazione ultima del calcestruzzo $\epsilon_{cu} = 0.35 \%$ pari a quello del calcestruzzo non confinato. Nel caso del calcolo delle curvature ultime ai fini della valutazione della capacità rotazionale da usare nelle analisi non lineari questa ipotesi risulta troppo lontana dalla realtà fisica ed è necessario valutare in maniera più raffinata la reale capacità deformativa del calcestruzzo in funzione del grado di confinamento.



CONFINAMENTO DELLE SEZIONI IN C.A.



Rottura diagonale per taglio di un nodo trave-pilastro non confinato.

CONFINAMENTO DELLE SEZIONI IN C.A.



Rottura diagonale per taglio di un nodo trave-pilastro non confinato.

CONFINAMENTO DELLE SEZIONI IN C.A.



Espulsione del copriferro e deformazione delle armature longitudinali di un nodo trave-pilastro non confinato.

CONFINAMENTO DELLE SEZIONI IN C.A.



Esplosione del pilastro e deformazione delle armature longitudinali.

CONFINAMENTO DELLE SEZIONI IN C.A.



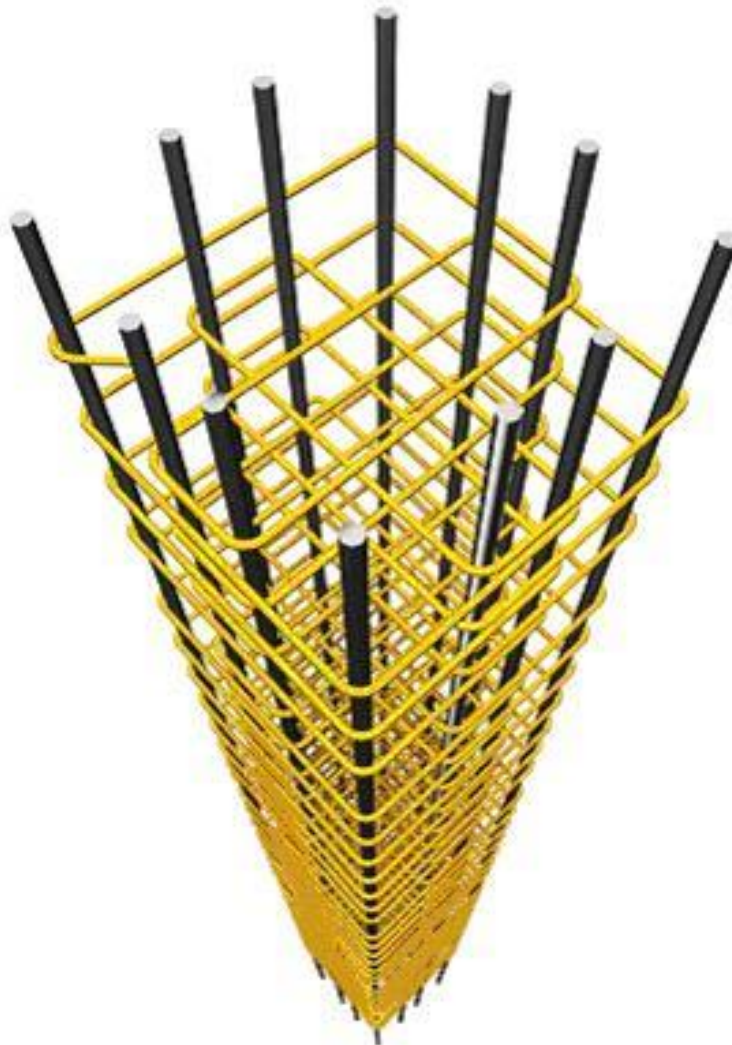
Esplosione del pilastro e deformazione delle armature longitudinali.

CONFINAMENTO DELLE SEZIONI IN C.A.



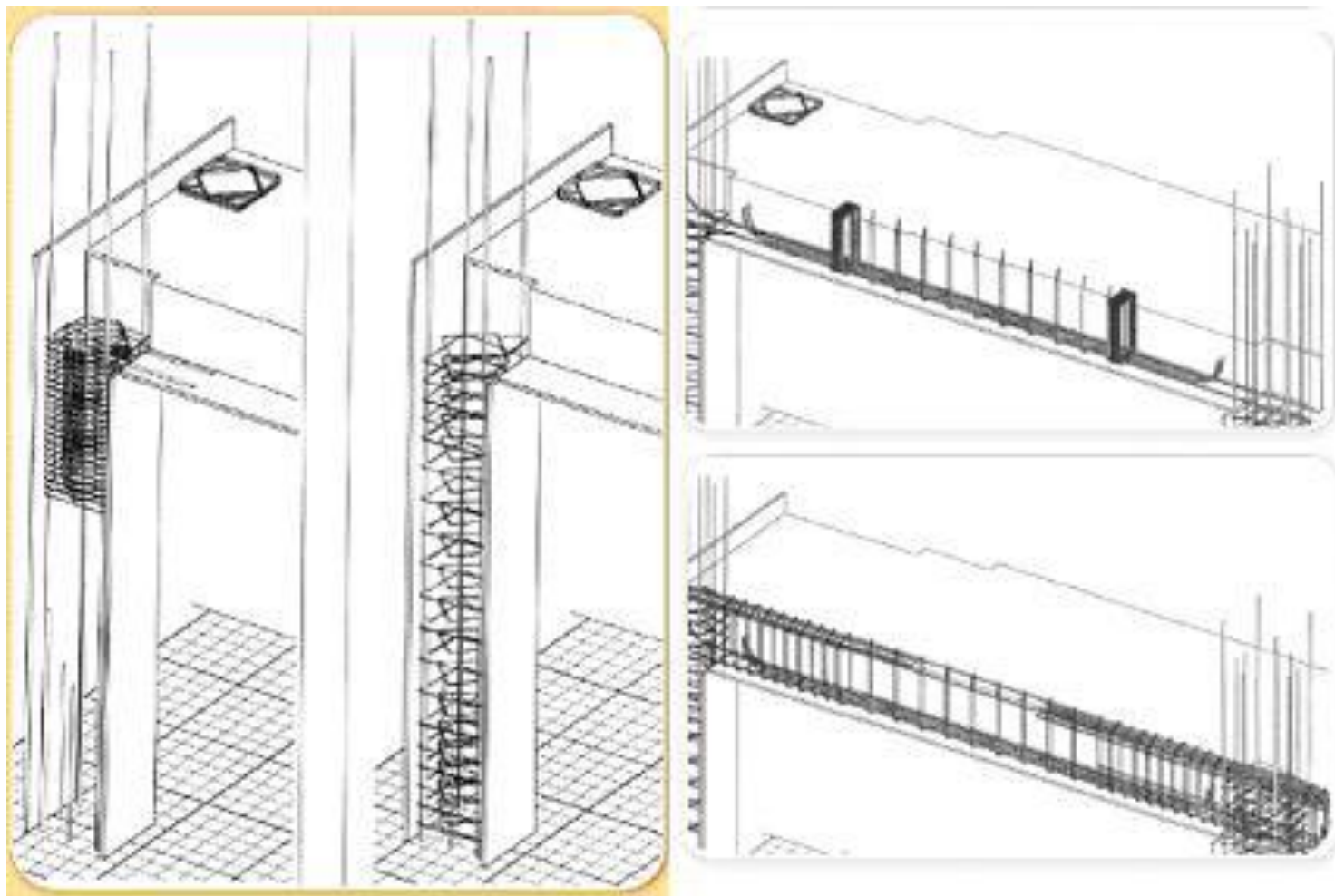
Corretta staffatura di un pilastro in c.a..

CONFINAMENTO DELLE SEZIONI IN C.A.



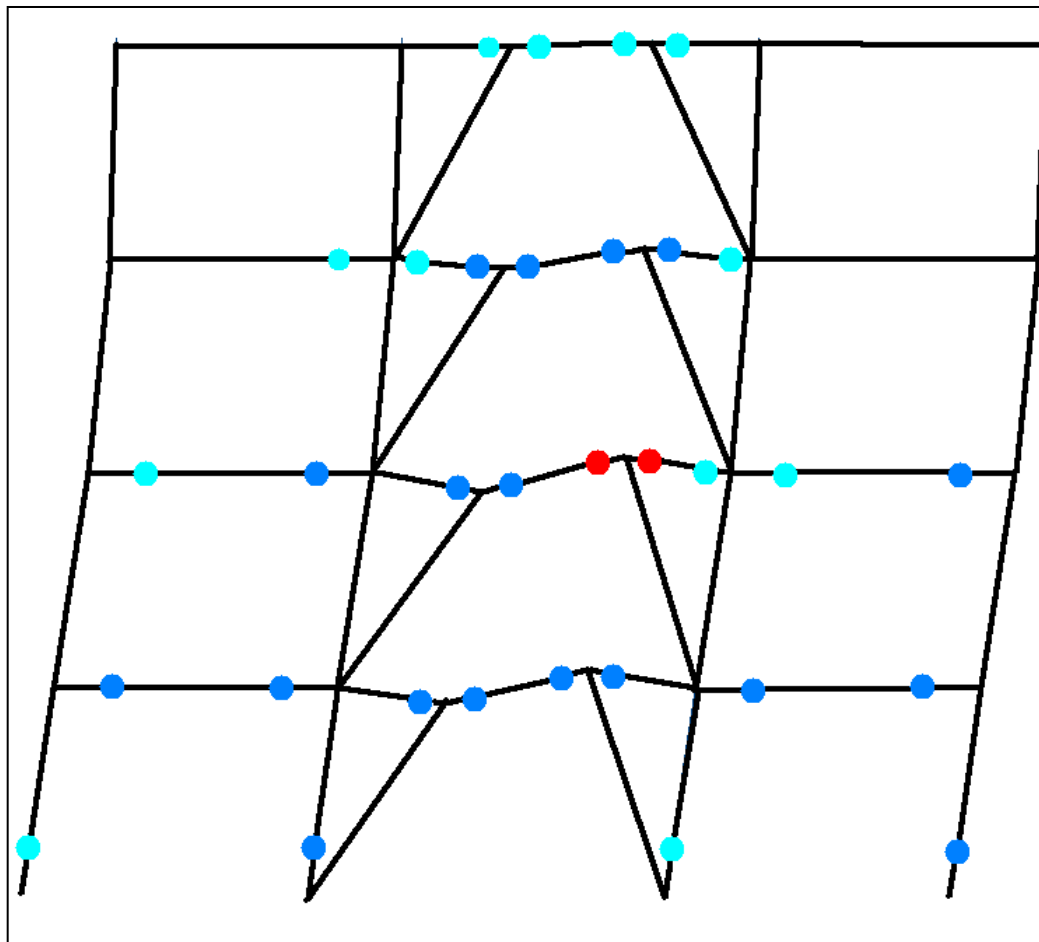
Sistema a spirale Thorax.

CONFINAMENTO DELLE SEZIONI IN C.A.



Sistema a spirale Thorax.

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



Formazione di cerniere plastiche sulla struttura e valutazione del **fattore di struttura "q"**.

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

- D.M. 14 Gennaio 2008 –

[...]

7.3.6.2. VERIFICHE DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI IN TERMINI DI DUTTILITA' E CAPACITA' DI DEFORMAZIONE

Dovrà essere verificato che i singoli elementi strutturali e la struttura nel suo insieme possiedano una duttilità coerente con il fattore di struttura q adottato. Questa condizione si può ritenere soddisfatta applicando le regole di progetto specifiche e di gerarchia delle resistenze indicate per le diverse tipologie costruttive.

Alternativamente, e coerentemente con modello e metodo di analisi utilizzato, si deve verificare che la struttura possieda una capacità di spostamento superiore alla domanda.

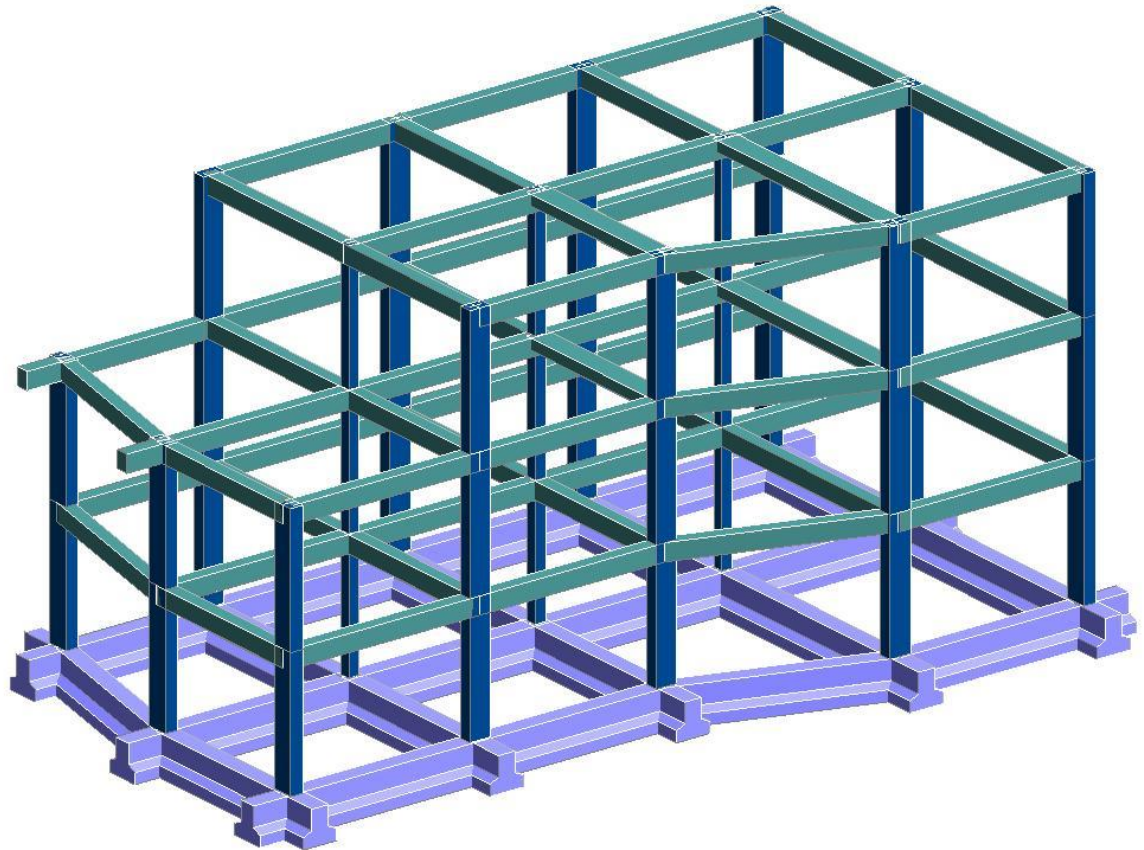
[...]

ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

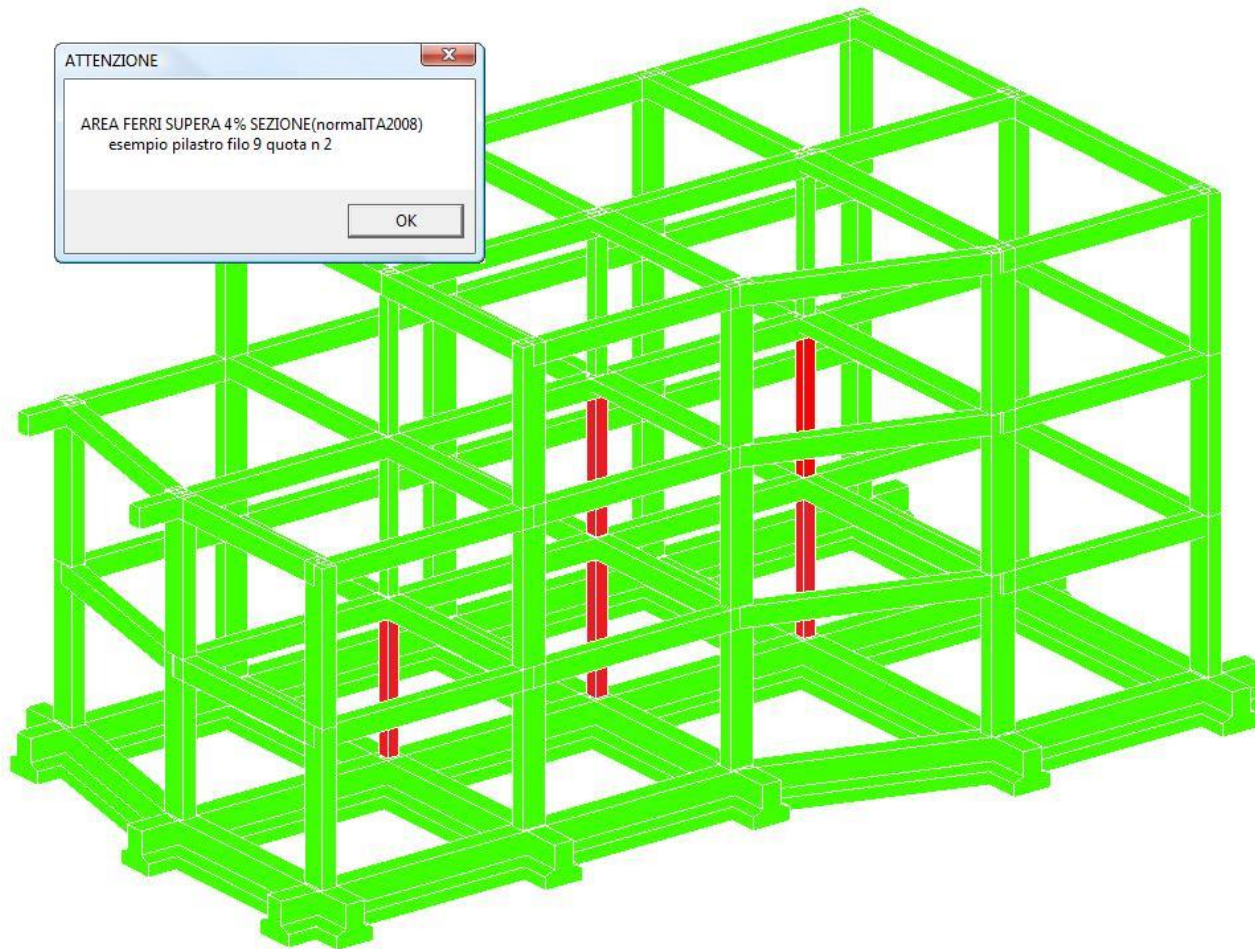


$$1\% \leq \frac{A}{A_c} \leq 4\%$$

**Limite Area Armature
Longitudinali Pilastri**



ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER



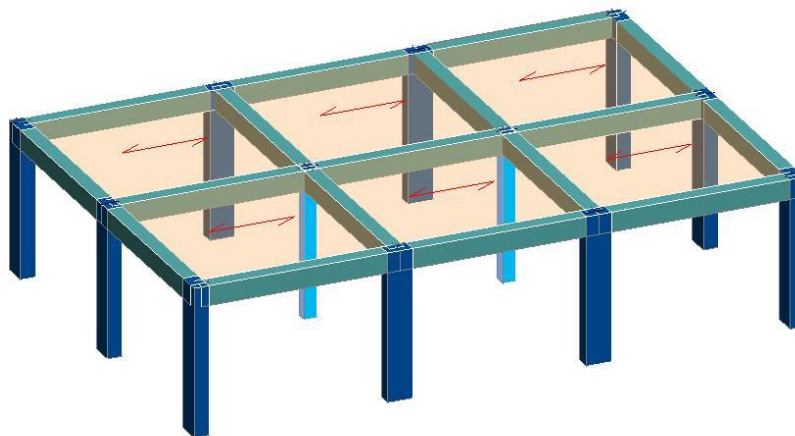
ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

7.2.3 CRITERI DI PROGETTAZIONE DI ELEMENTI STRUTTURALI “SECONDARI” ED ELEMENTI NON STRUTTURALI

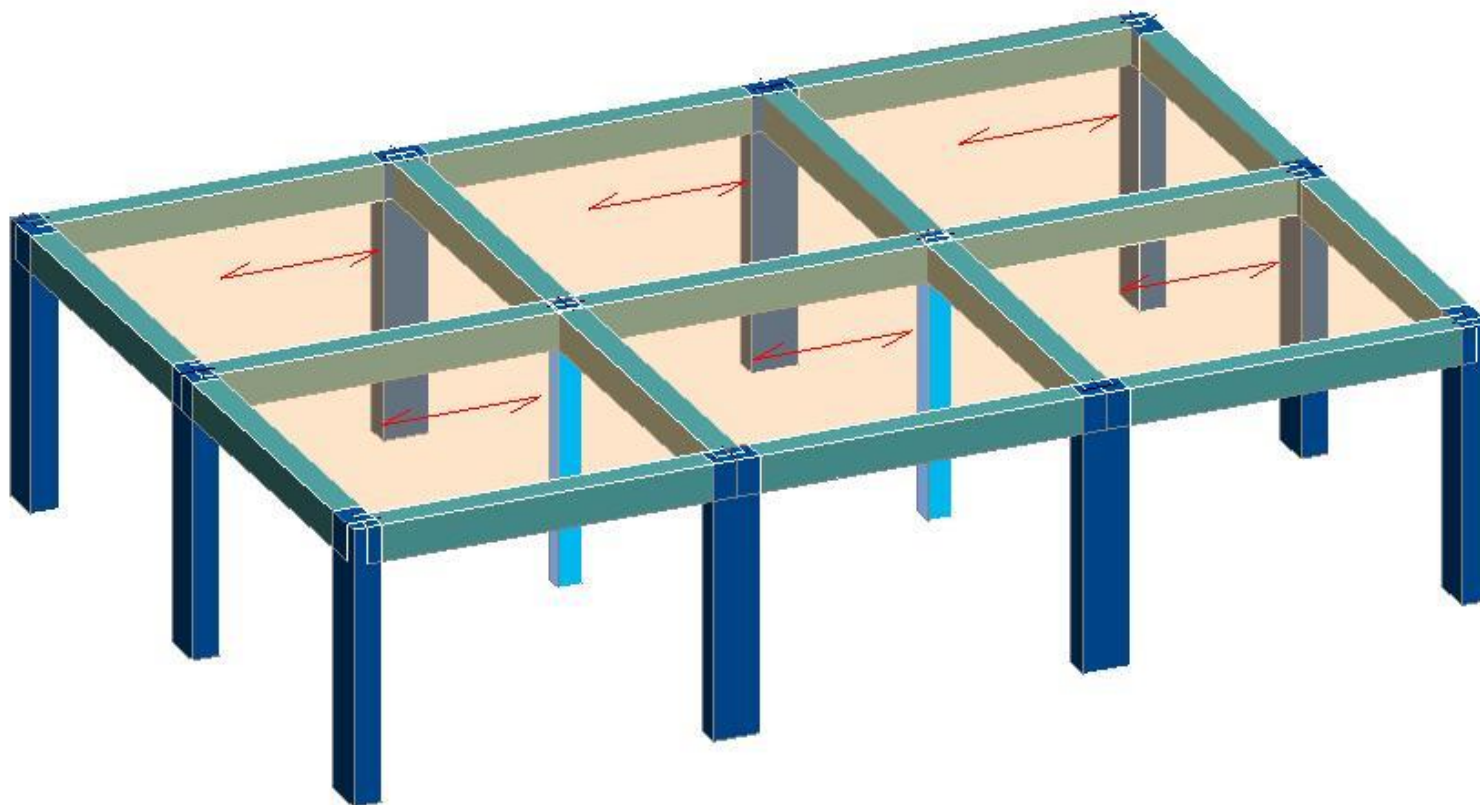
Alcuni elementi strutturali possono venire considerati “secondari”. Sia la rigidezza che la resistenza di tali elementi vengono ignorate nell’analisi della risposta e tali elementi vengono progettati per resistere ai soli carichi verticali. Tali elementi tuttavia devono essere in grado di assorbire le deformazioni della struttura soggetta all’azione sismica di progetto, mantenendo la capacità portante nei confronti dei carichi verticali; pertanto, limitatamente al soddisfacimento di tale requisito, agli elementi “secondari” si applicano i particolari costruttivi definiti per gli elementi strutturali.

In nessun caso la scelta degli elementi da considerare secondari può determinare il passaggio da struttura “irregolare” a struttura “regolare”, né il contributo alla rigidezza totale sotto azioni orizzontali degli elementi secondari può superare il 15% della analoga rigidezza degli elementi principali.

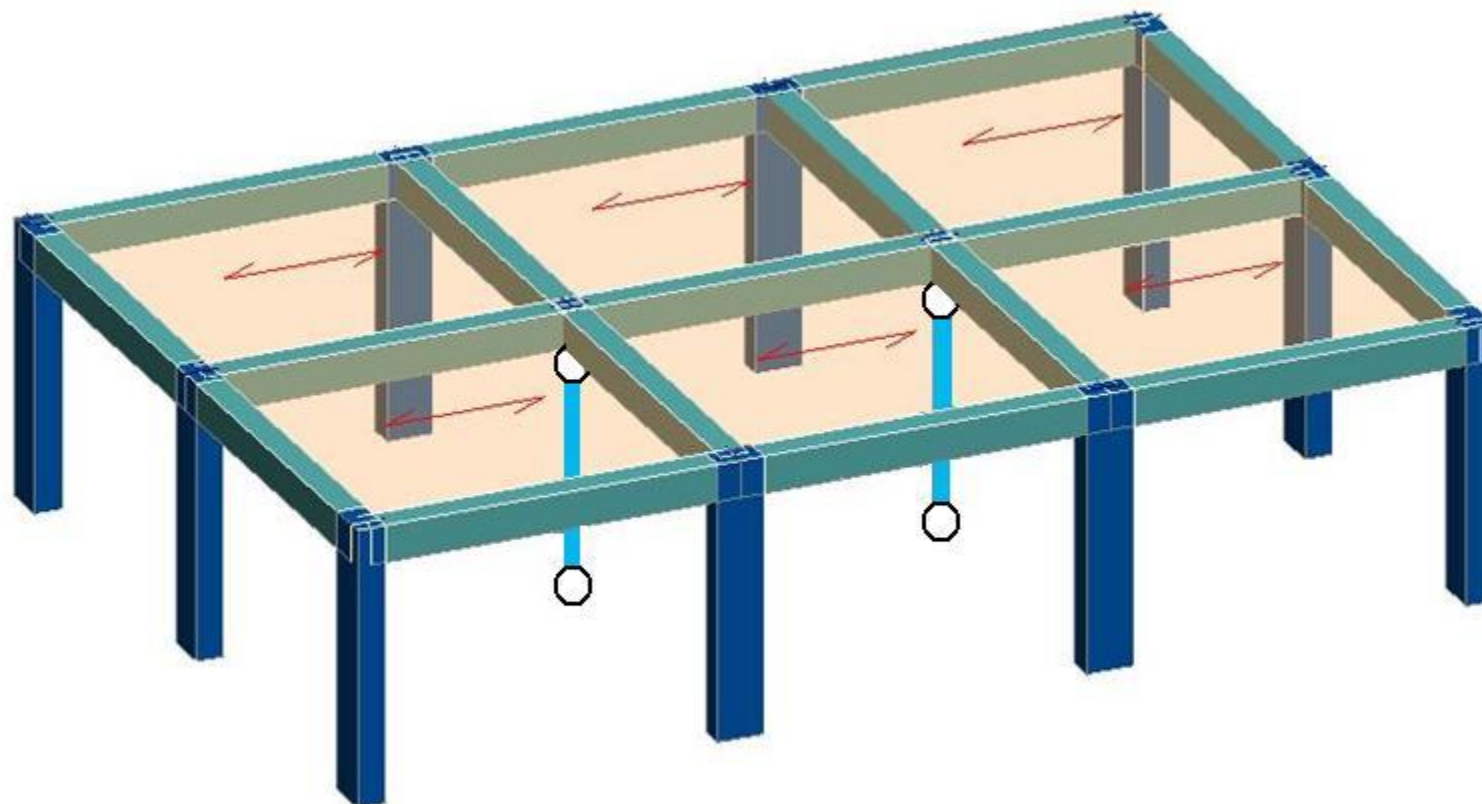
[...]



ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

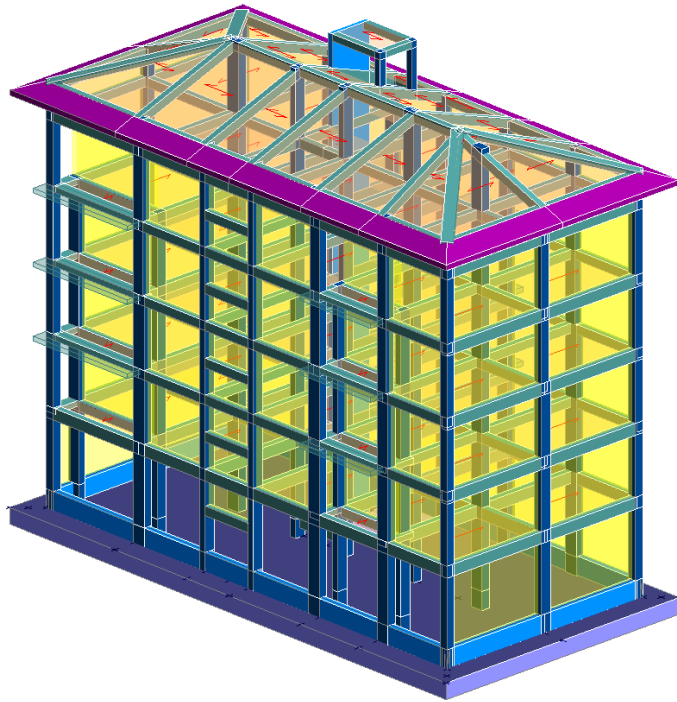


ANALISI SISMICA STATICA NON LINEARE PUSH-OVER

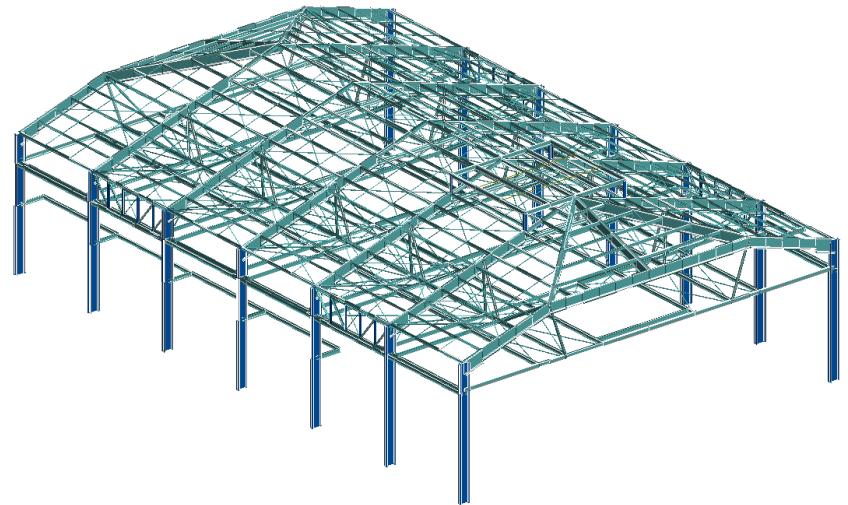


LIMITI DI APPLICABILITA' DELL'ANALISI PUSH-OVER

1 - La struttura deve avere almeno un piano sismico (rigido).



Analisi Push-over applicabile



Analisi Push-over NON applicabile

ANALISI PUSH-OVER per strutture senza impalcati rigidi

Soluzione proposta da Chopra e Goel [2002], riportata in ***Development and application of Nonlinear Static Procedures for plan-asymmetric buildings*** - G. Adhikari, R. Pinho-IUSS press Dicembre 2010.

La soluzione proposta prevede di definire lo spostamento del sistema SDOF come uno spostamento generalizzato che copie sul tagliante totale lo stesso lavoro del sistema reale.

Tale equivalenza va definita a livello incrementale per cui lo spostamento cumulato al passo kl è lo spostamento che compie sul tagliante lo stesso lavoro del sistema reale nel passo considerato:

$$Sd_n^k = \sum_{k=1}^{kl} \Delta D_n^k = \sum_{k=1}^{kl} \frac{\{\Delta \delta_n^k\}^T \cdot \{f_n^k\}}{V_{b,n}^k}$$

LIMITI DI APPLICABILITA' DELL'ANALISI PUSH-OVER

2 - Il Livello di Conoscenza deve essere LC2 oppure LC3 (solo per gli edifici in c.a. o acciaio).



LIVELLI DI CONOSCENZA (C.A. E ACCIAIO)

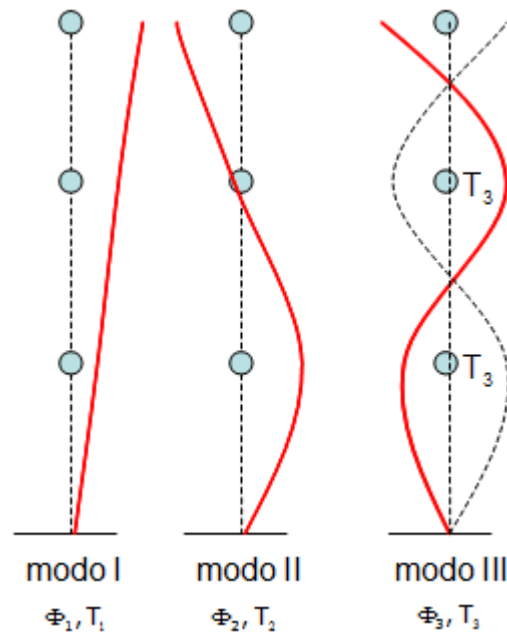
conoscenza		Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	limitata	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione o ex- novo completo	Progetto simulato in accordo norma dell'epoca e limitate verifiche in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e limitate prove in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2	adeguata		Disegni costruttivi incompleti con limitate verifiche in situ oppure estese verifica in-situ	Specifiche originali di progetto o certificati di prova con limitate prove in- situ oppure estese prove in-situ	tutti	1.20
LC3	accurata		Disegni costruttivi completi con limitate verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Specifiche originali di progetto o certificati di prova con estese prove in- situ oppure esaustive prove in- situ	tutti	1.00

LIVELLI DI CONOSCENZA (MURATURA)

conoscenza		Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	limitata	Da rilievo strutturale	Limitate verifiche in situ	Limitate indagini in situ	tutti	1.35
LC2	adeguata		Estese ed esaustive verifiche in situ	Estese indagini in situ		1.20
LC3	accurata			Esaustive indagini in situ		1.00

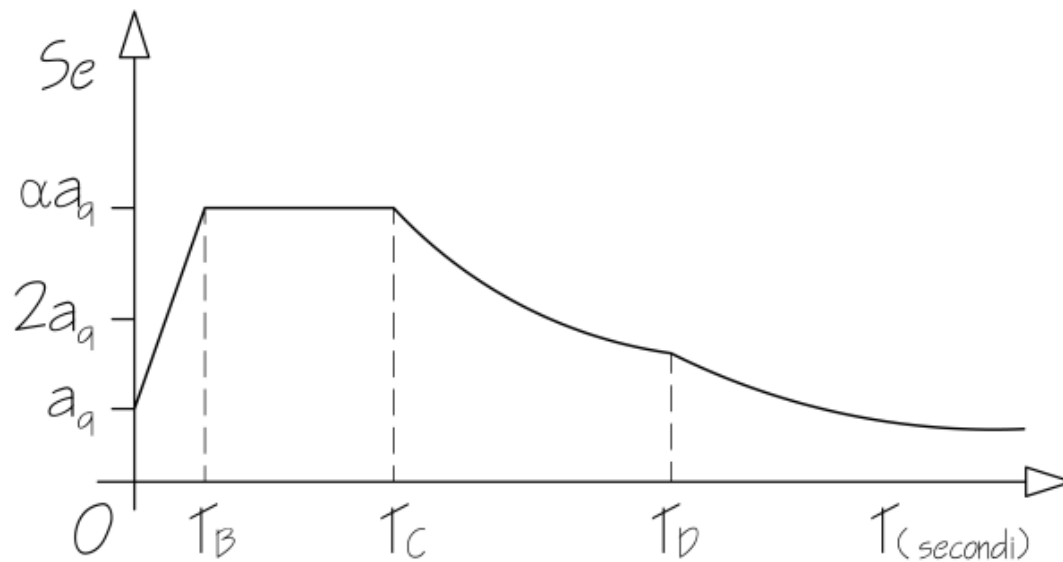
LIMITI DI APPLICABILITA' DELL'ANALISI PUSH-OVER

3 - La massa eccitata dalla forma modale principale deve essere almeno il 75% di quella totale per gli edifici in c.a. o acciaio, ed il 60% per quelli in muratura.



LIMITI DI APPLICABILITA' DELL'ANALISI PUSH-OVER

4 – Il periodo fondamentale della struttura, che deve essere superiore al valore T_c .



Alternative all'analisi Pushover

Analisi Dinamica Non Lineare

In teoria le analisi di tipo dinamico non lineare sono **le più corrette** ed anche quelle che presentano **meno limiti di applicabilità**, ma nella pratica operativa presentano ancora varie **difficoltà applicative** tra cui:

- definizione di modelli numerici molto complessi
- difficoltà nel reperire modelli efficienti e realistici per gli edifici in muratura
- modellazione della domanda sismica legata alla scelta degli accelerogrammi
- ecc...

La stessa normativa suggerisce che tali analisi vengano condotte esclusivamente da **specialisti**. Ovviamente non è intento di questa pubblicazione trattare, neppure a livello generale, un argomento così complesso ed articolato.

Alternative all'analisi Pushover

I.D.A. – Incremental Dynamic Analysis

Al fine di tracciare un quadro “continuo” della risposta dinamica della struttura si è ricorso al metodo della “analisi dinamica incrementale” (I.D.A.) presentato da Vamvatsikos e Cornell. Dal punto di vista operativo si tratta di **una serie di analisi dinamiche non lineari, eseguite con accelerogrammi** scalati secondo accelerazioni di picco via via crescenti. Attraverso questo semplice metodo di analisi, si possono raggiungere obiettivi diversi:

- Migliorare la comprensione dell'andamento del rapporto risposta/domanda sismica ai vari livelli di sollecitazione;
- Interpretazione più accurata delle implicazioni strutturali di terremoti di grande intensità;
- Valutazione dei cambiamenti di comportamento degli edifici in termini di deformabilità, indotti dal degrado di resistenza e rigidità della struttura;
- Determinazione della sollecitazione sismica che induce il raggiungimento dei diversi livelli prestazionali della struttura.

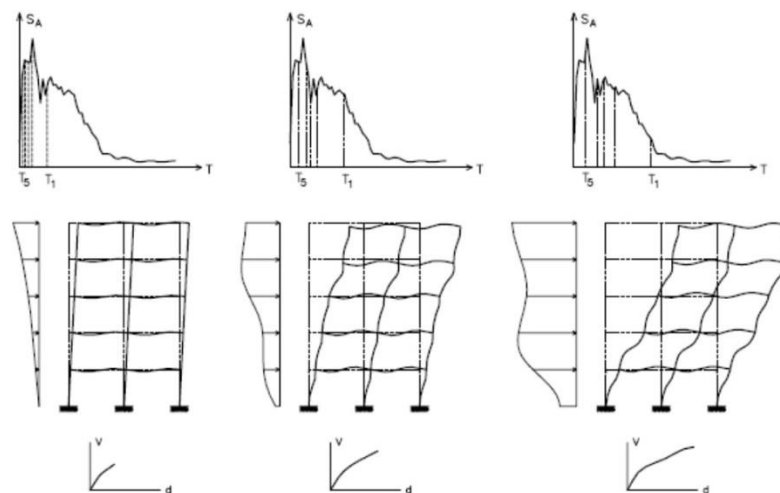
L'efficacia dell'I.D.A. è confermata anche dalla **F.E.M.A.**, che la indica come strumento principale per determinare la capacità globale di collasso di una struttura.

Alternative all'analisi Pushover

Analisi Pushover Adattiva

Un limite della analisi Pushover classica è legato al fatto che gli effetti dell'accumulazione dei danni indotti dal crescente livello di deformazione non vengono presi in considerazione. Cioè **non vengono valutati i probabili cambiamenti del comportamento strutturale indotti dalle riduzioni delle rigidezze di ciascun elemento e dai conseguenti incrementi del valore dei periodi** relativi ai diversi modi di vibrare.

Con la **Pushover di tipo adattivo**, il **vettore dei carichi viene aggiornato** durante lo svolgimento della stessa, in modo da riflettere i cambiamenti nella rigidezza complessiva dell'edificio, causati dal fatto che la struttura viene spinta, in modo crescente, nella sua fase di comportamento non lineare.



www.angelobiondi.com