

Corso di aggiornamento professionale

Vulnerabilità Sismica ed Adeguamento di Costruzioni Esistenti in Calcestruzzo Armato

7 maggio – 7 giugno 2013

Aula Magna Seminario Vescovile Via Puccini, 36 - Pistoia



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Valutazione e riduzione della vulnerabilità degli elementi strutturali, non strutturali ed impianti.

- La conoscenza del manufatto. Indagini in situ distruttive e non distruttive.
- La valutazione della capacità degli elementi strutturali di calcestruzzo armato.
- Il ruolo del confinamento del calcestruzzo e la verifica della duttilità.
- Esempi applicativi: edificio multipiano di calcestruzzo armato ed edificio prefabbricato.

Rosario Gigliotti

rosario.gigliotti@uniroma1.it



PARTE III

Metodi di analisi



EVOLUZIONE DEI METODI DI ANALISI E TENDENZE A LIVELLO INTERNAZIONALE

Metodi di analisi: background

Una *valutazione* dettagliata di un edificio singolo consente non solo di determinare la necessità o meno di interventi, ma identifica anche le *debolezze* e le *carenze* da correggere attraverso gli interventi di *adeguamento sismico*.

Per queste ragioni negli ultimi anni si è assistito a livello mondiale al passaggio da *valutazioni rapide della vulnerabilità sismica* e metodi di valutazione empirici a *procedure di valutazione basate sul confronto diretto o indiretto delle richieste di deformazione inelastica con le corrispondenti capacità di deformazione*.

Metodi di analisi: background

In **Giappone** il principale strumento di valutazione è stato, ed è ancora, una procedura dettagliata multilivello semi-empirica, pubblicata nel **1977** dalla *Japan Building Prevention Association* e rivista nel 1990.

Il metodo proposto si basa sul **confronto tra domanda e capacità** in termini di **resistenza** (tagli di piano), assumendo, per i livelli 1 e 2, un meccanismo di collasso a “colonne plasticizzate”; nel livello 3 si include anche la possibilità di un meccanismo alternativo a travi plasticizzate.

La procedura prevede l'uso di undici coefficienti correttivi (nove per il livello 1) di derivazione empirica, per tener conto di irregolarità ed altri aspetti non compresi nel metodo di calcolo.

Metodi di analisi: background

Anche le **Linee Guida neozelandesi**, introdotte nel **1996**, adottano un approccio basato sulla resistenza, ma solo allo scopo di individuare gli edifici a rischio maggiore e le priorità di intervento, definendo un **“seismic performance score” (SPS)**. Esso esprime il *rapporto tra l'azione sismica rispetto alla quale l'edificio risulta adeguato e l'azione sismica di progetto.*

In particolare, il valore dell'indice di prestazione sismica SPS è dato dal *rapporto tra il taglio elastico resistente alla base ed il taglio elastico del corrispondente edificio progettato secondo le norme antisismiche.* Per analisi di maggiore dettaglio le **NZS 1996** e le più recenti **NZS 2002** fanno ricorso ai metodi basati sugli spostamenti.

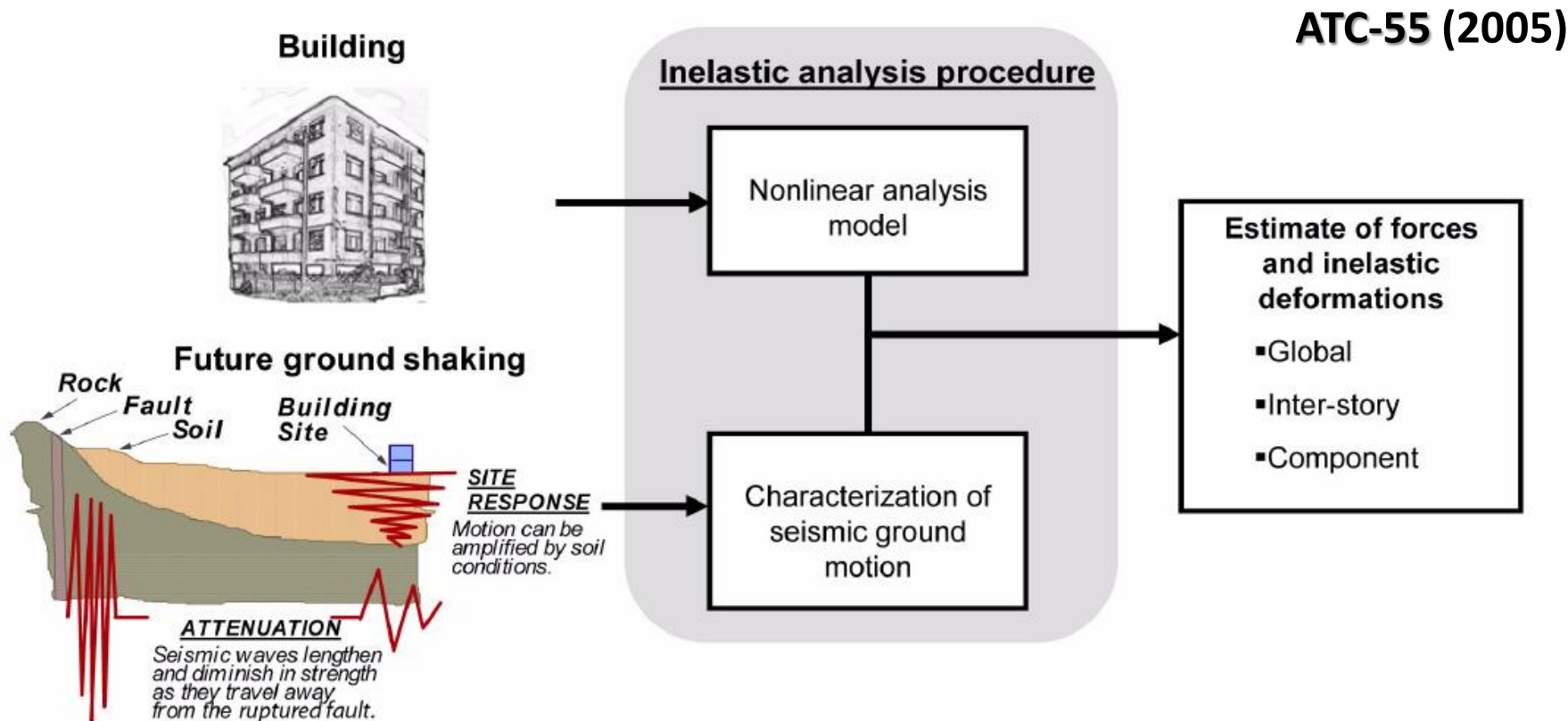
Metodi di analisi: background

Negli **Stati Uniti**, dagli anni '70 ad oggi si sono succeduti diversi documenti redatti dall'**Applied Technology Council ATC**, a partire dalla metà degli anni '80 sotto la guida della **Federal Management Agency – FEMA**.

Allo stato attuale tutte le normative o le linee guida per la valutazione sismica degli edifici esistenti concordano sulla necessità di effettuare analisi non lineari delle strutture.

Il problema della valutazione, in termini generali, è rappresentato nella Figura 1, tratta dalle ATC-55 (2005).

Metodi di analisi: background



Rappresentazione schematica dell'uso delle procedure di analisi non lineari per la valutazione delle forze e delle deformazioni in campo inelastico per un dato input sismico con un modello di analisi non lineare dell'edificio.

Metodi di analisi: background

Gli ultimi approcci proposti per la valutazione sismica degli edifici esistenti (Moehle 1992, Priestley 1993) sono in maniera parziale o totale basati sugli spostamenti (“**displacement-based**”).

Tale scelta è legata al fatto che *il terremoto non rappresenta per la struttura un insieme di forze laterali date a cui resistere, come si considera nella progettazione o nella valutazione sismica basata sulle forze, ma una domanda a cui la struttura deve adattarsi posta da una data energia di ingresso o da spostamenti dinamici (del terreno) imposti.*

Metodi di analisi: background

Il **collasso** delle strutture non è dovuto alle forze laterali per se stesse, ma ai **carichi gravitazionali**, che agiscono attraverso gli **spostamenti laterali** causati dal terremoto (effetti $P-\Delta$).

Quindi gli spostamenti, piuttosto che le forze, rappresentano una base decisamente più razionale per la valutazione delle strutture.

Metodi di analisi: background

Metodologie basate sugli spostamenti sono contenute, oltre che nelle citate **norme neozelandesi (NZS 1996, NZS 2002)** anche nelle **FEMA 273/274** e nelle **ASCE 2000** negli Stati Uniti, mentre in Europa l'approccio agli spostamenti è stato introdotto nel giugno 2002 con il **draft-EN Parte 3 dell'Eurocodice 8**.

Metodi di analisi: background

Le **NTC 2008 (D.M. 14.01.2008)**, in linea con il **draft 7 Parte 3 EC8/2004**, prevedono l'uso di diversi metodi di analisi a complessità crescente, definendo le limitazioni per ciascuno di essi:

- analisi statica lineare
- analisi dinamica modale
- analisi statica non lineare
- analisi dinamica non lineare



Indagine sul patrimonio edilizio

Il DPCM 21.10.2003 e la OPCM 3362 del 8.7.2004 traducono in termini attuativi l'esigenza di avviare sul territorio nazionale italiano un'indagine estesa sul patrimonio edilizio e sul rischio sismico connesso, a partire dagli *edifici pubblici e strategici*.

Metodi semplificati di valutazione della vulnerabilità sismica

Solo nell'ottica di ottenere un quadro generale sugli edifici e di poter stabilire le priorità di intervento è accettabile il ricorso a **metodi di analisi semplici**, a condizione che venga valutato caso per caso l'aderenza delle ipotesi semplificative sui meccanismi attesi alla tipologia strutturale ed alle particolari caratteristiche dell'edificio in esame.

La valutazione della vulnerabilità sismica ha dunque un carattere diverso dalla verifica sismica di un edificio esistente.



METODI DI ANALISI NTC 2008

§ C8.7.2.4 – Metodi di analisi

● Lineari

- Analisi statica lineare
 - Con spettro elastico
 - Con fattore q
- Analisi dinamica modale
 - Con spettro elastico
 - Con fattore q

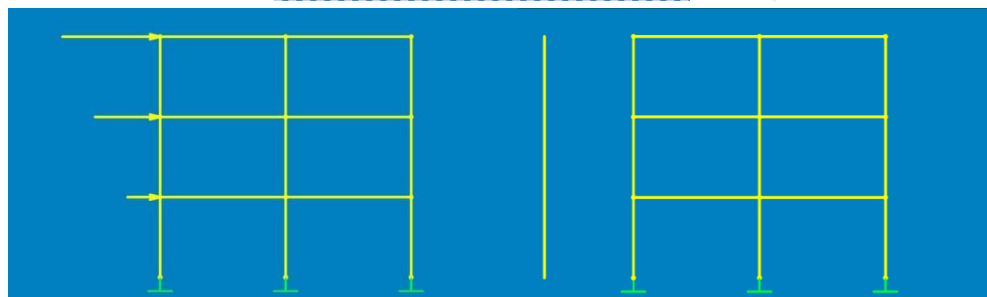
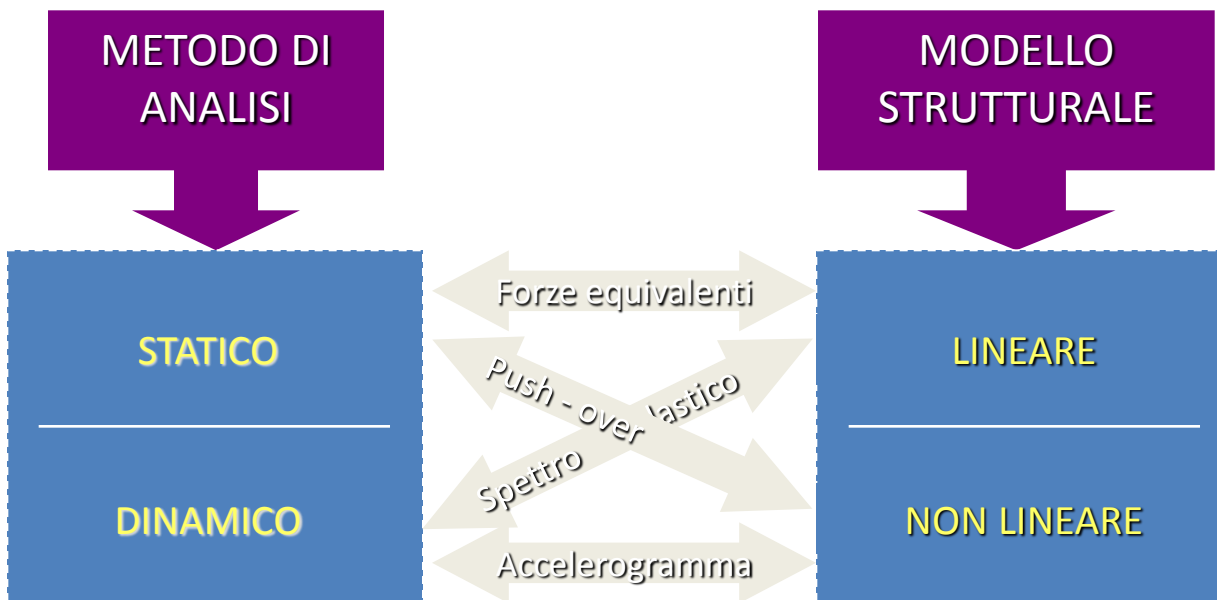
● Non-Linearari

- Analisi statica incrementale (Pushover)
- Analisi dinamica al passo (Time history in campo NL)

§ C8.7.2.4 – Metodi di analisi

METODO DI ANALISI

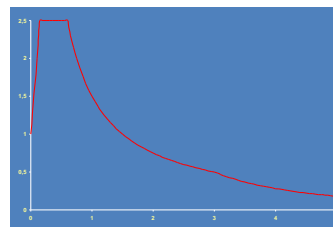
MODELLO STRUTTURALE



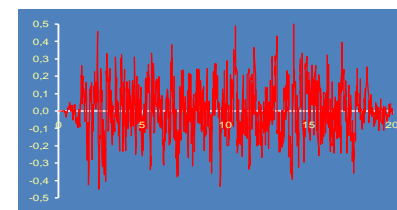
Forze equivalenti

Push-over

Spettro

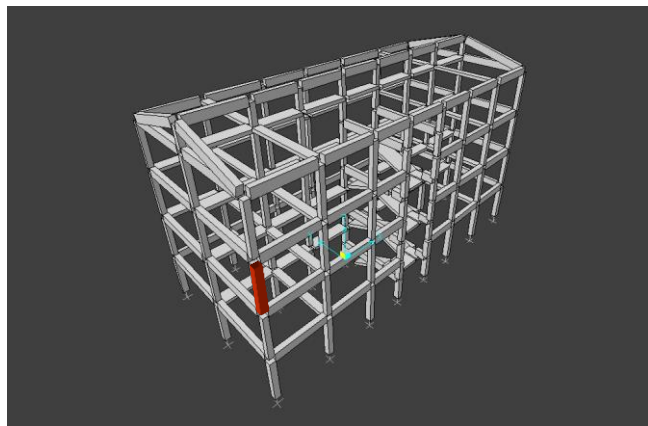


Accelerogramma



Analisi non lineare

Modellazione con cerniere plastiche



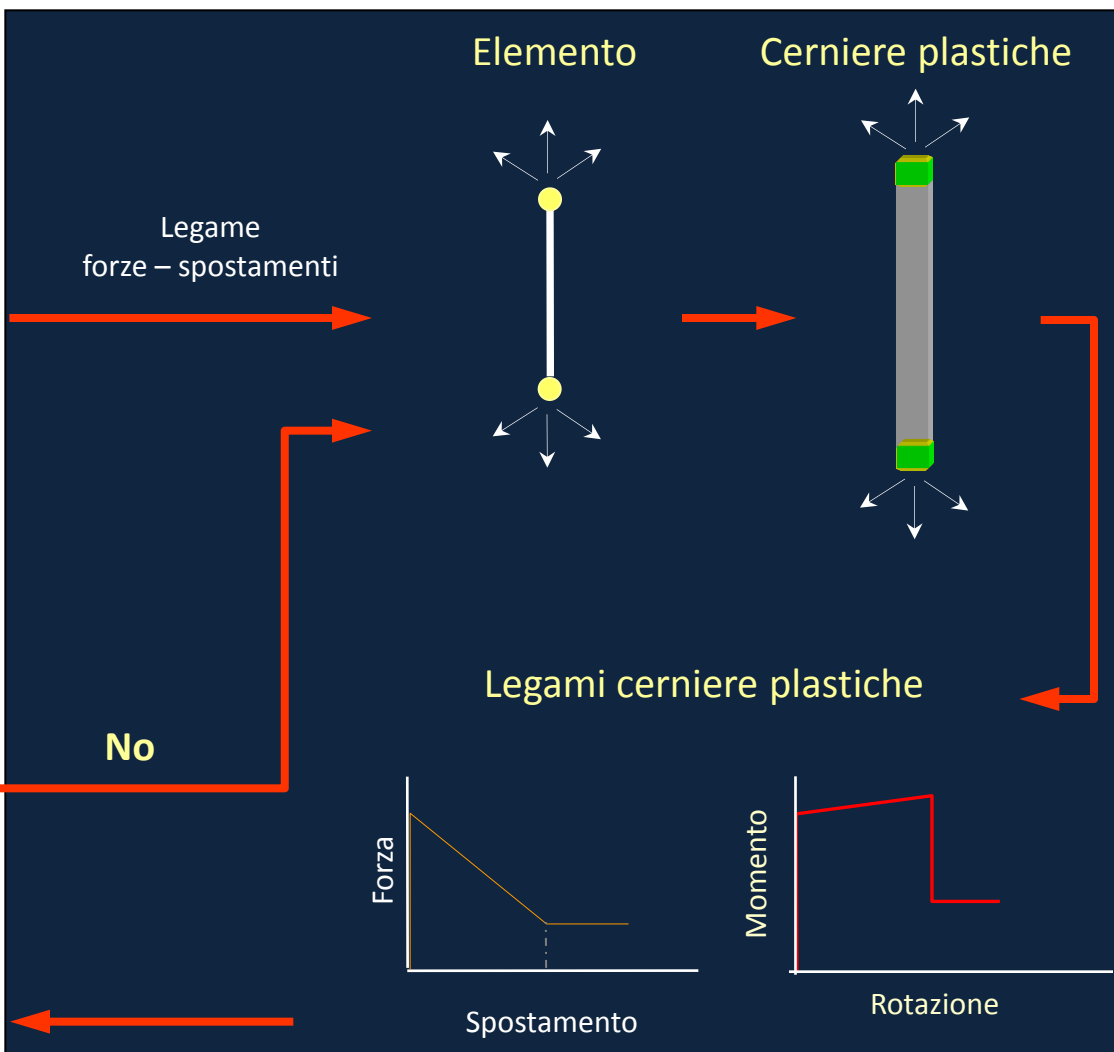
Istante successivo

si

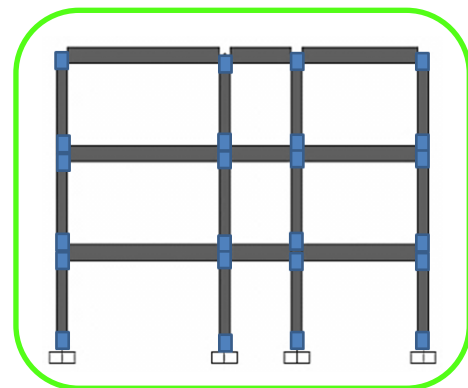
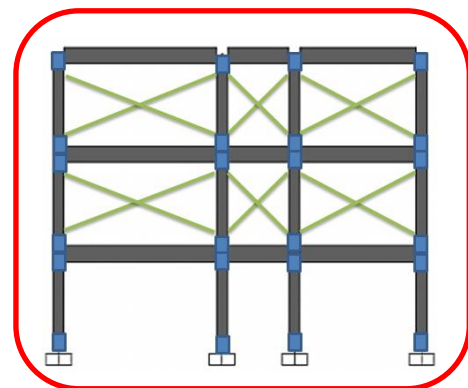
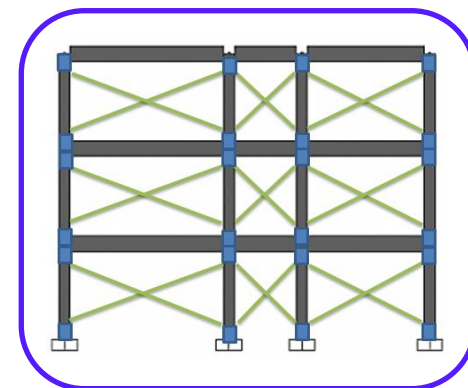
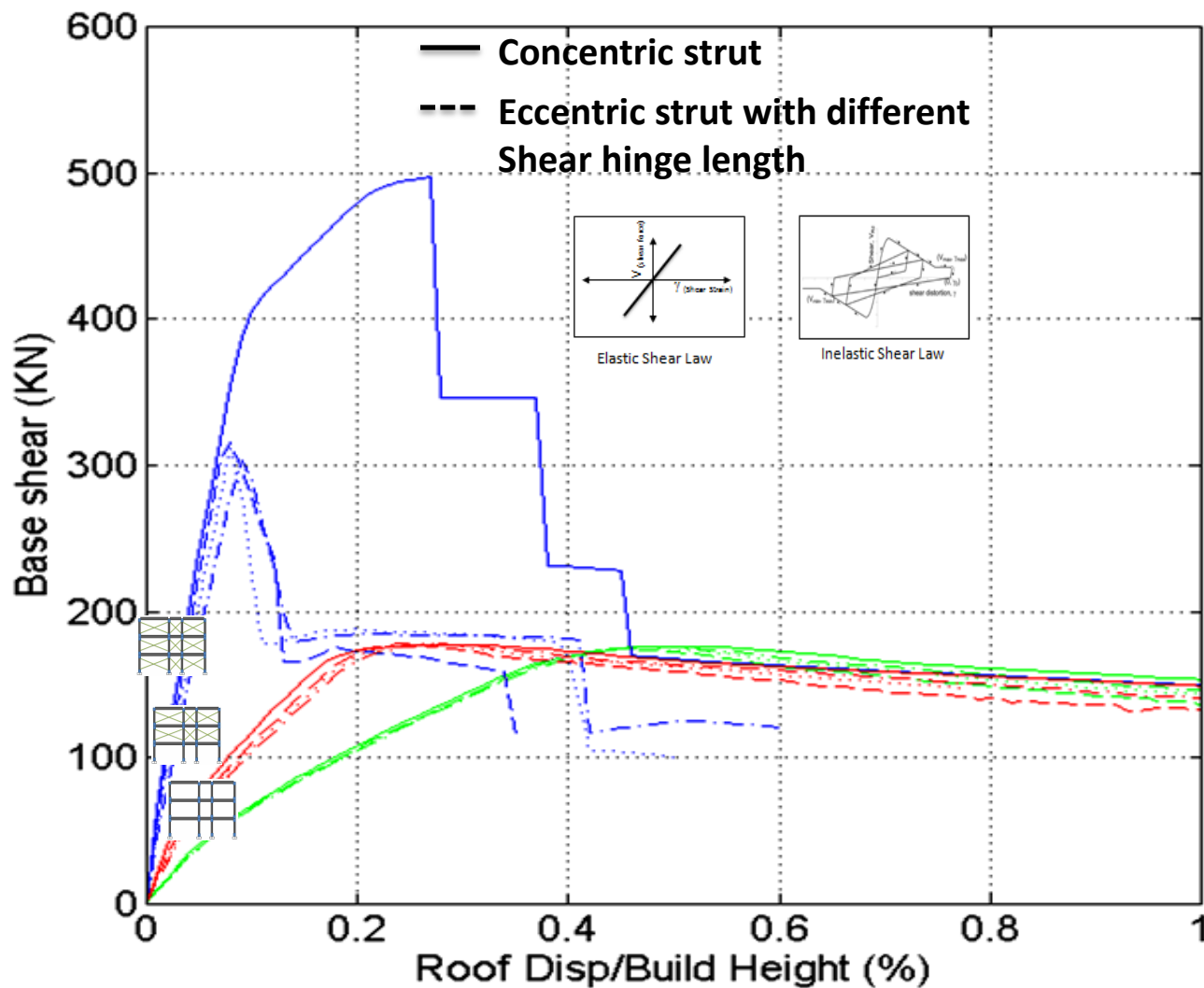
Verifica dell'equilibrio della struttura

No

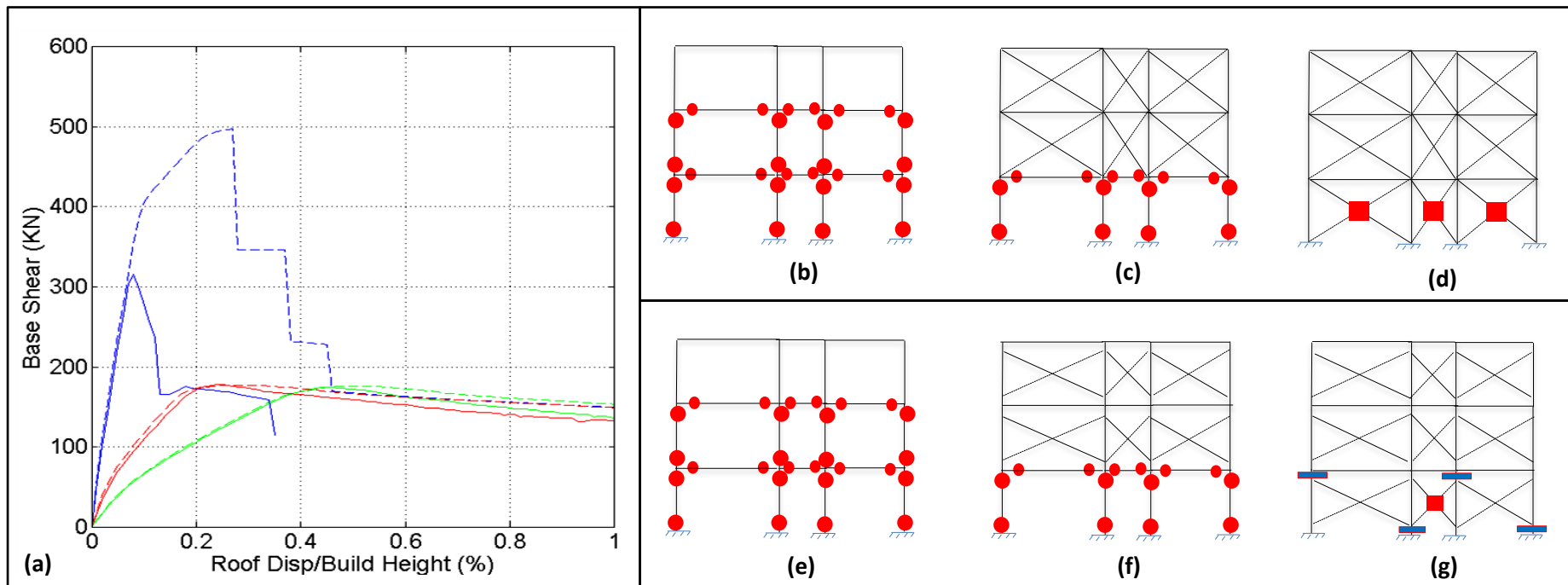
Aggiornamento
forze e rigidezze di elemento



Analisi statiche non lineari



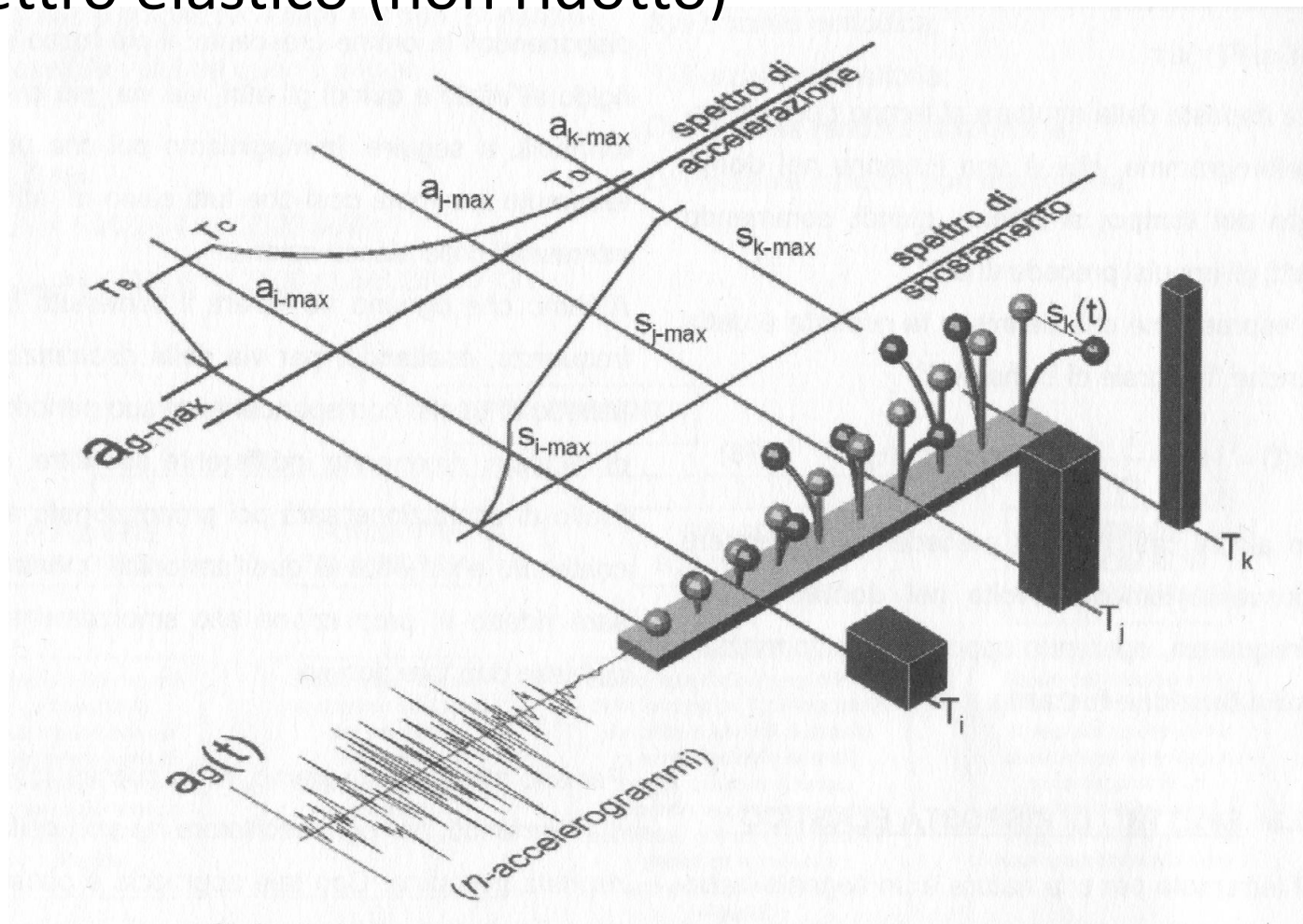
Analisi statiche non lineari



(a) Curve di Pushover (b) telaio non tamponato, senza rottura a taglio nei pilastri (c) telaio parzialmente tamponato, senza rottura a taglio nei pilastri (d) telaio interamente tamponato, senza rottura a taglio nei pilastri (e) Telaio non tamponato, con cerniere inelastiche a taglio nei pilastri (f) Telaio parzialmente tamponato, con cerniere inelastiche a taglio nei pilastri (g) Telaio interamente tamponato, con cerniere inelastiche a taglio nei pilastri

§ C8.7.2.4 – Analisi con spettro elastico

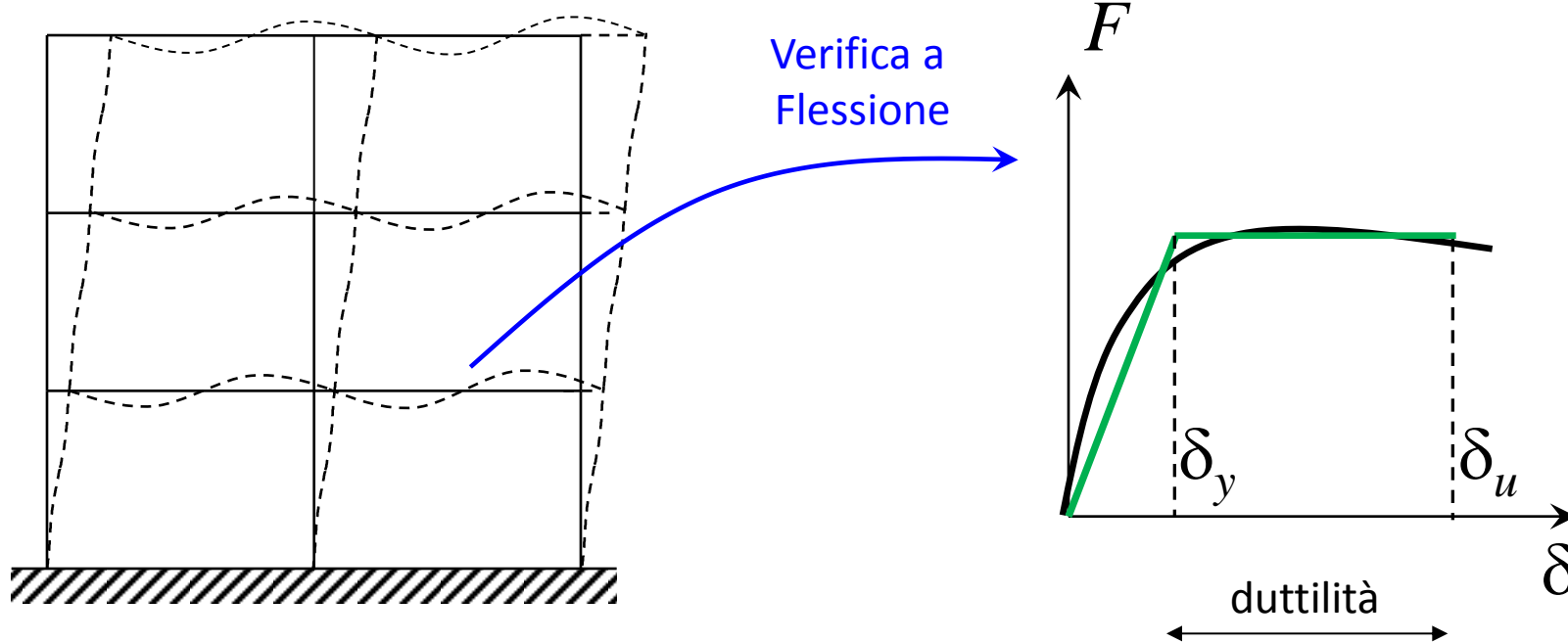
- Si usa lo spettro elastico (non ridotto)



§ C8.7.2.4 – Analisi con spettro elastico

Elementi DUTTILI

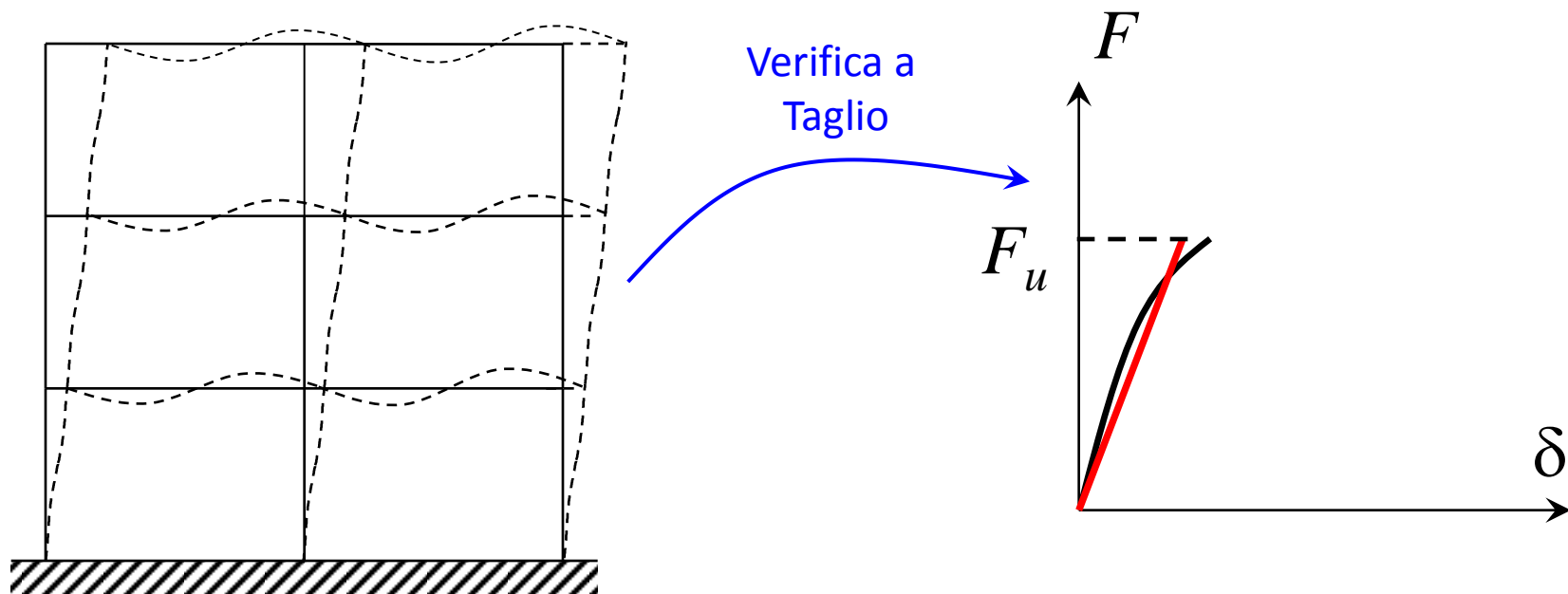
La capacità va definita in termini di deformazioni
deformazioni indotte vs. limiti di deformabilità



§ C8.7.2.4 – Analisi con spettro elastico

Elementi FRAGILI

La capacità va definita in termini di resistenza
forza indotta vs. resistenza



§ C8.7.2.4 – Analisi con spettro elastico

- Indicazioni aggiuntive nel caso di uso dello spettro elastico non scalato
 - Indicando con $\rho_i = D_i/C_i$ il rapporto tra il momento flettente D_i fornito dall'analisi della struttura soggetta alla combinazione di carico sismica, e il corrispondente momento resistente C_i (valutato con lo sforzo normale relativo alle condizioni di carico gravitazionali) dell' i -esimo elemento primario della struttura, e con ρ_{\max} e ρ_{\min} rispettivamente i valori massimo e minimo di tutti i $\rho_i \geq 2$ considerando tutti gli elementi primari della struttura, il rapporto ρ_{\max}/ρ_{\min} non deve superare il valore 2.5

§ C8.7.2.4 – Analisi con spettro elastico

- Indicazioni aggiuntive nel caso di uso dello spettro elastico non scalato
 - La capacità C_i degli elementi/meccanismi fragili deve essere maggiore della corrispondente domanda D_i
 - D_i è calcolata:
 - Se $\rho_i > 1$ sulla base della resistenza degli elementi duttili adiacenti
 - Se $\rho_i < 1$ sulla base dei risultati dell'analisi

§ C8.7.2.4 – Analisi con fattore q

- Nella seconda modalità è possibile utilizzare lo **spettro di progetto**, definito in § 3.2.3 delle NTC, che si ottiene dallo spettro elastico riducendone le ordinate con l'uso del fattore di struttura q , il cui valore è scelto **nel campo fra 1,5 e 3,0** sulla base della regolarità nonché dei tassi di lavoro dei materiali sotto le azioni statiche
- Valori superiori a quelli indicati devono essere adeguatamente giustificati con riferimento alla duttilità disponibile a livello locale e globale

§ C8.7.2.4 – Analisi con fattore q

- In particolare, nel caso in cui il sistema strutturale resistente all'azione orizzontale sia **integralmente** costituito da nuovi elementi strutturali, si possono adottare i valori dei fattori di struttura validi per le **nuove costruzioni**, fatta salva la verifica della compatibilità degli spostamenti delle strutture esistenti.

§ C8.7.2.4 – Analisi con fattore q

- Nel caso di uso del fattore di struttura, tutti gli **elementi strutturali duttili** devono soddisfare la condizione che la **sollecitazione** indotta dall'azione sismica **ridotta** (per q !) sia inferiore o uguale alla corrispondente **resistenza**
- **Tutti gli elementi strutturali "fragili"** devono, invece, soddisfare la condizione che la **sollecitazione** indotta dall'azione sismica **ridotta per $q = 1,5$** sia inferiore o uguale alla corrispondente **resistenza**.

§ C8.7.2.4 – Analisi statica non lineare

● Passi del metodo

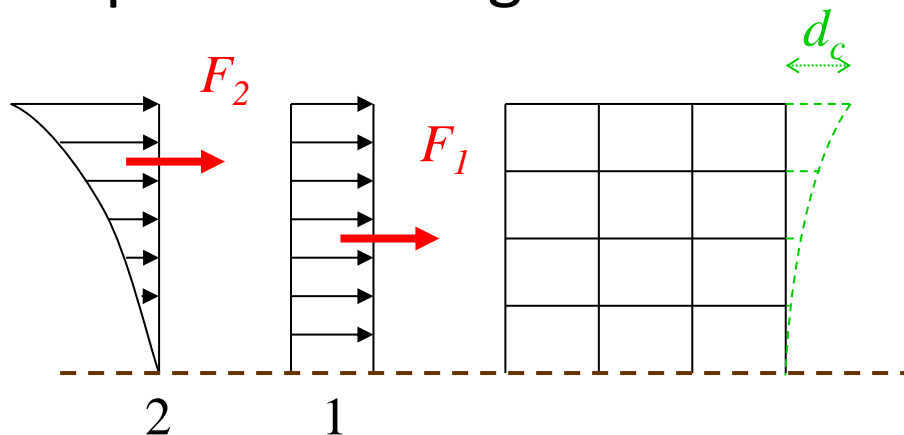
- Determinazione del legame tra risultante delle forze applicate (distribuite secondo forme prescritte) e spostamento di un nodo di riferimento (**push-over**)
- Determinazione delle caratteristiche di un **oscillatore anelastico equivalente**
- Determinazione dello **spostamento massimo** dell'oscillatore con impiego dello spettro di risposta elastico
- Conversione dello spostamento dell'oscillatore in quello della struttura e **verifica delle deformazioni e delle resistenze** degli elementi

§ C8.7.2.4 – Analisi statica non lineare

- Per gli edifici in muratura il metodo prevede solo una verifica globale in spostamento, e non le verifiche nei singoli elementi
- Le proprietà degli elementi possono essere basate, salvo diversa indicazione, sui valori medi delle proprietà dei materiali

§ C8.7.2.4 – Analisi statica non lineare

Legame forza-spostamento generalizzato



- Si devono usare almeno due sistemi di forze orizzontali
 - *distribuzione proporzionale alle masse (risultante F_1)*
 - *distribuzione proporzionale alle masse per la deformata del 1° modo (risultante F_2)*

§ C8.7.2.4 – Analisi statica non lineare

- Tutti i passi successivi devono essere eseguiti per entrambe le distribuzioni di forze eseguendo le verifiche di duttilità e di resistenza di ciascun elemento/meccanismo per la distribuzione più sfavorevole
- L'analisi deve essere spinta fino al superamento dello SL oggetto della verifica.
- Il diagramma risultante ha nelle ascisse lo spostamento del nodo di controllo e nelle ordinate il taglio alla base.

§ C8.7.2.4 – Analisi statica non lineare

- Sistema bilineare equivalente

- Trasformazione delle forze e degli spostamenti

$$F^* = F_{1,2} / \Gamma \quad \left(\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2}, \phi_i = \text{forma modale} \right)$$

$$d^* = d / \Gamma$$

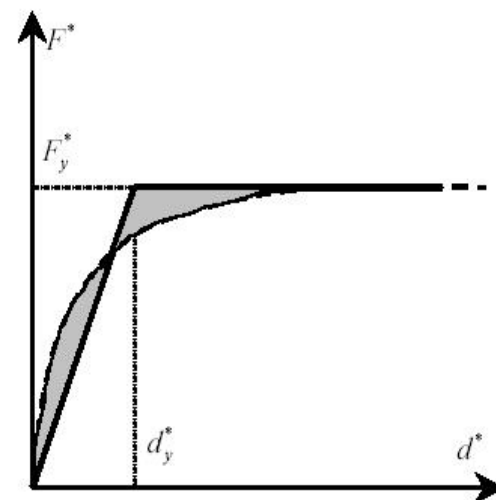
- Periodo equivalente della struttura

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m_i \phi_i}{F_y / d_y}}$$

- Risposta massima in spostamento del sistema equivalente

$$d_{max}^* = S_{De}(T^*) \quad \text{oppure} \quad d_{max}^* = S_{De}(T^*) \cdot \alpha \quad (\alpha \equiv \text{fattore correttivo} \geq 1)$$

$$\left(T^* \geq T_c \right) \quad \left(T^* < T_c \right)$$



§ C8.7.2.4 – Sintesi metodi di analisi e verifica

		Modello Lineare		Modello Non Lineare	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo o (e/m)	Duttile/ Fragile	Accettazione del Modello Lineare (ML) (per il controllo dei valori di $\rho = D_i/C_i$)		Dall'analisi. Usare i valori medi nel modello.	In termini di deformazione. Usare i valori medi divisi per il FC.
		Dall'analisi. Usare i valori medi dei moduli nel modello.	In termini di resistenza. Usare i valori medi.		
		Verifiche (se il ML è accettato)			
	Duttile	Dall'analisi.	In termini di deformazione. Usare i valori medi divisi per il FC.		
		Verifiche (se il ML è accettato)			
		Se $\rho \leq 1$, dall'analisi.			
Fragile	Se $\rho > 1$, dall'equilibrio con la resistenza degli e/m duttili. Usare i valori medi moltiplicati per FC.	In termini di resistenza. Usare i valori medi divisi per il FC e per il coefficiente parziale.	In termini di resistenza. Usare i valori medi <u>divisi</u> per il FC e per il coefficiente parziale.		