

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pistoia
Corso sulla Vulnerabilità Sismica



Modelli evolutivi per la verifica del rischio di edifici esistenti

Quaderno 1 Il metodo statico nonlineare

Prof. Enrico Spacone

Dipartimento di Ingegneria e Geologia
Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara

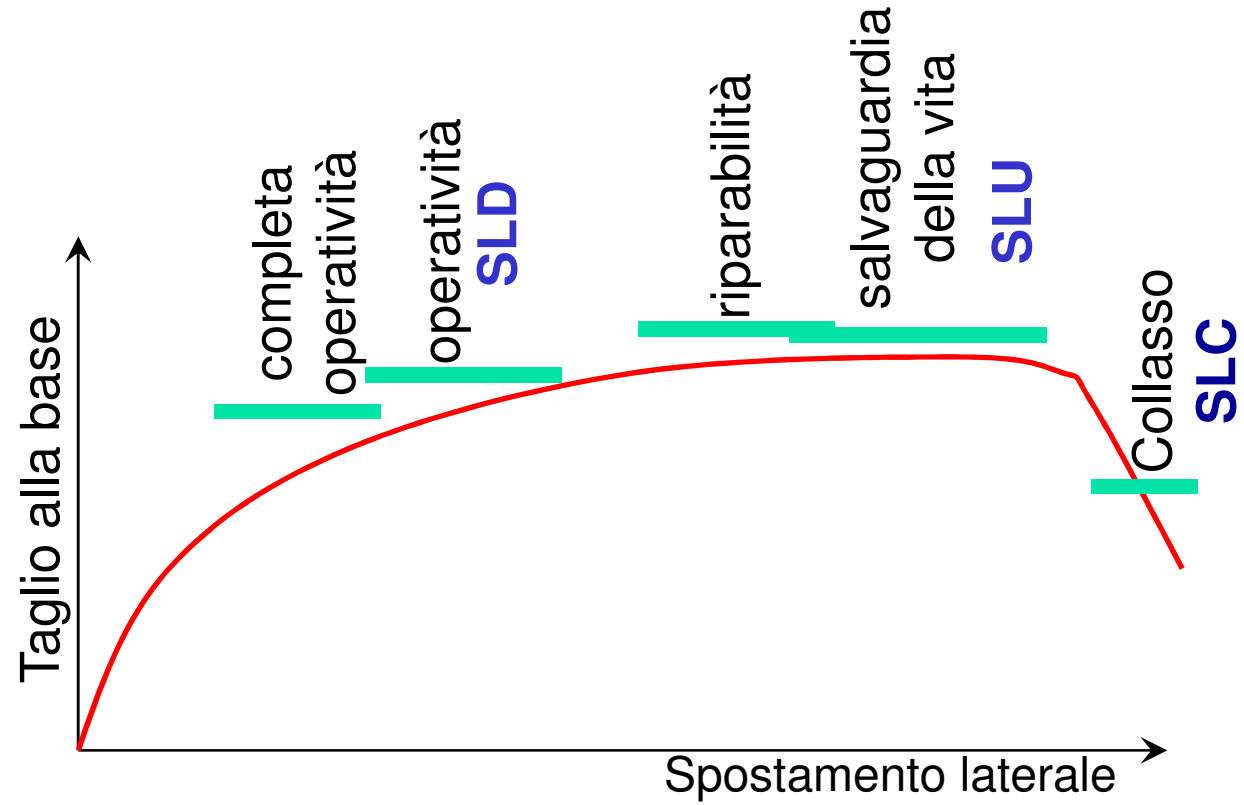
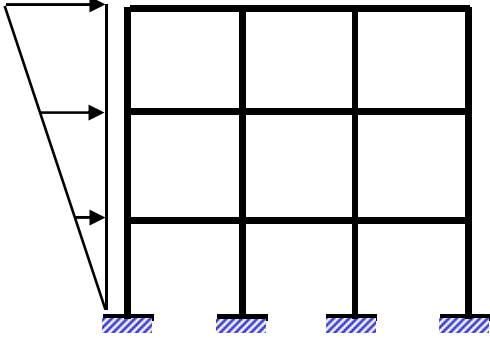
DIPARTIMENTO DI

INGEGNERIA
E GEOLOGIA

31 Maggio 2013



ANALISI STATICA NONLINEARE





ANALISI STATICA NONLINEARE

Metodi di Analisi Statica Nonlineare

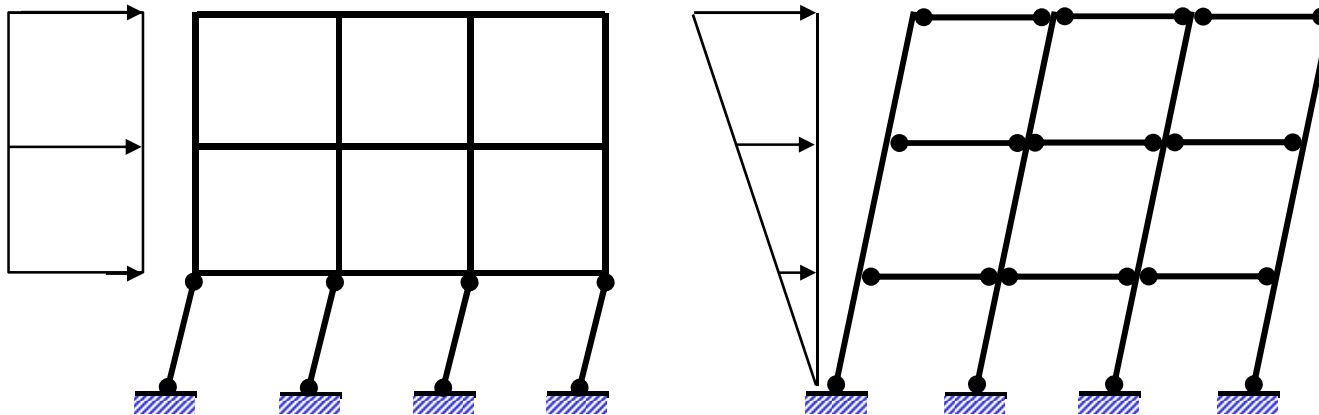
- **Metodo N2 (EC8)**
- **Metodo N2 Modificato**
- **Metodi Adattivi**
- **Metodo Modal Pushover**
- **altri ...**

I metodi + avanzati rispetto all'N2 cercano di meglio cogliere l'effetto dei modi superiori (negli edifici irregolari in altezza e/o alti), e/o gli effetti torsionali e/o il variare delle forme modali con il danneggiamento progressivo della struttura

ANALISI STATICA NONLINEARE

Analisi statica nonlineare

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 fra le forze stesse, vengano tutte scalate in modo da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale di un punto di controllo sulla struttura (es. un punto in sommità dell'edificio), fino al raggiungimento delle condizioni ultime.





ANALISI STATICA NONLINEARE

OBIETTIVI

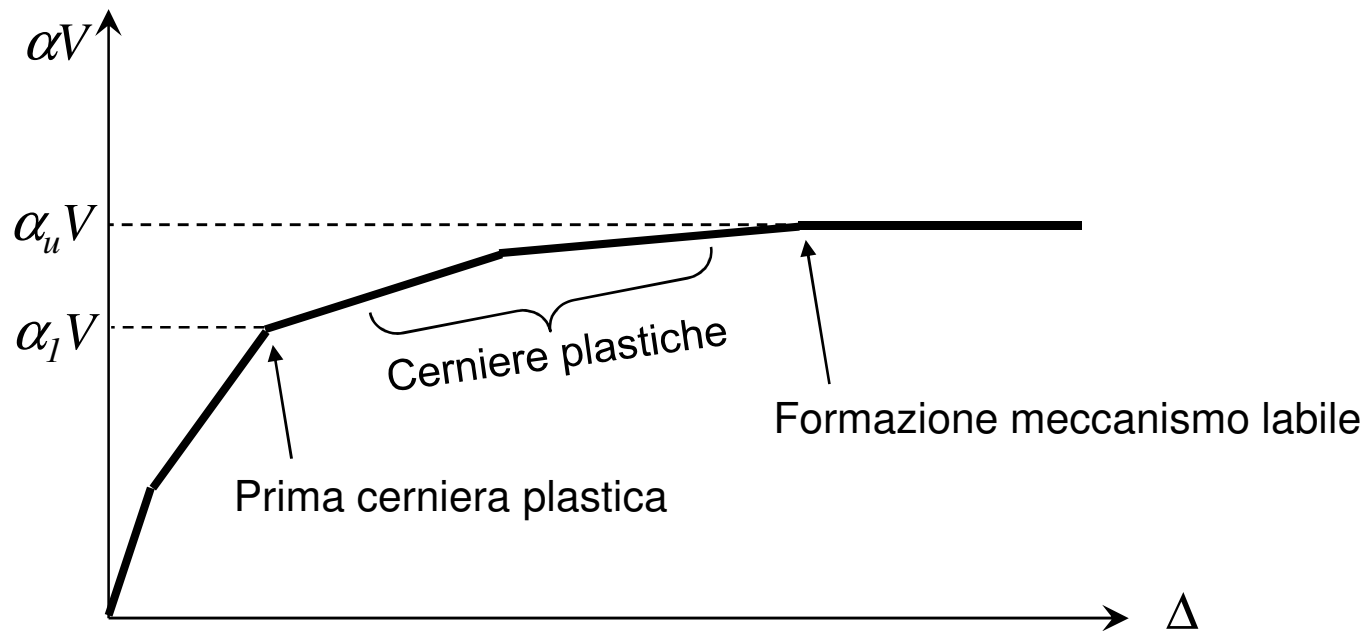
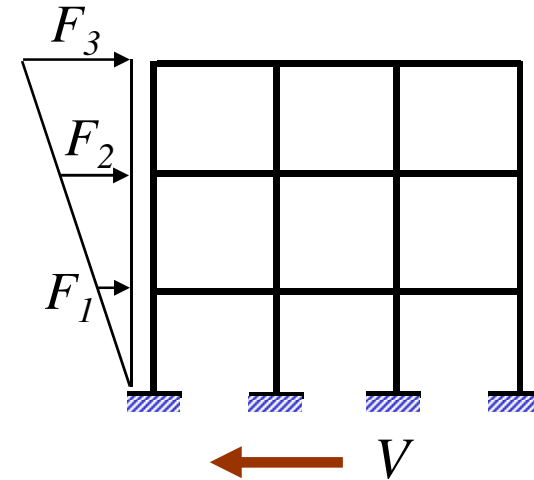
- ✓ valutare i rapporti di sovrarresistenza α_u / α_1
- ✓ verificare l'effettiva distribuzione della domanda inelastica negli edifici progettati con il fattore di riduzione q ;
- ✓ come metodo di progetto per gli edifici di nuova costruzione sostitutivo dei metodi di analisi lineari;
- ✓ **come metodo per la valutazione della capacità di edifici esistenti.**

α_1 : moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la sua resistenza flessionale

α_u : moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile

ANALISI STATICA NONLINEARE

rapporto di sovraresistenza α_u / α_1





ANALISI STATICA NONLINEARE

Il metodo statico nonlineare si articola nei passi seguenti:

1. Modello nonlineare della struttura
2. Applicazione dei carichi nonsismici
3. Analisi di pushover (curva di capacità)
4. Riduzione a sistema 1-GDL
5. Bilinearizzazione della curva di capacità
6. Calcolo del target displacement
7. Conversione a spostamento sistema N-GDL
8. Verifiche agli stati limite di interesse

30

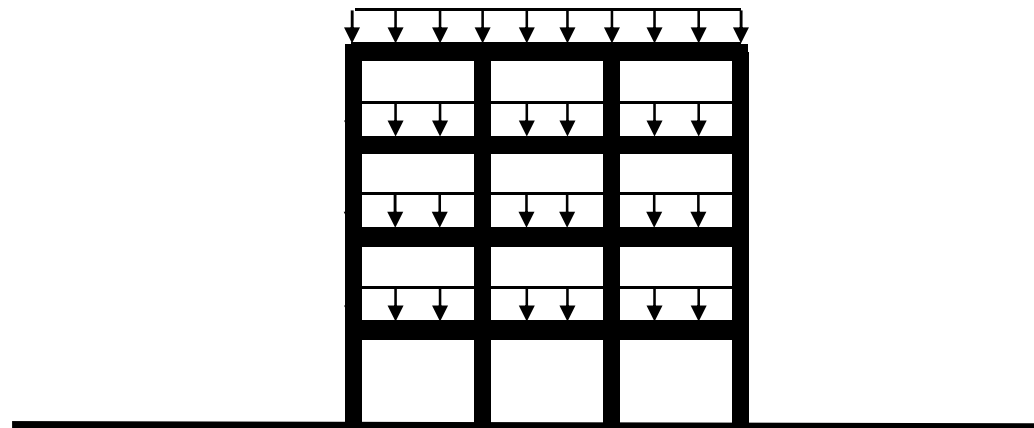


ANALISI STATICA NONLINEARE

1. e 2. Modello nonlineare della struttura e carichi verticali

Vengono applicati i carichi della combinazione sismica

$$G_k + P_k + \sum_i (\psi_{2i} Q_{ki})$$

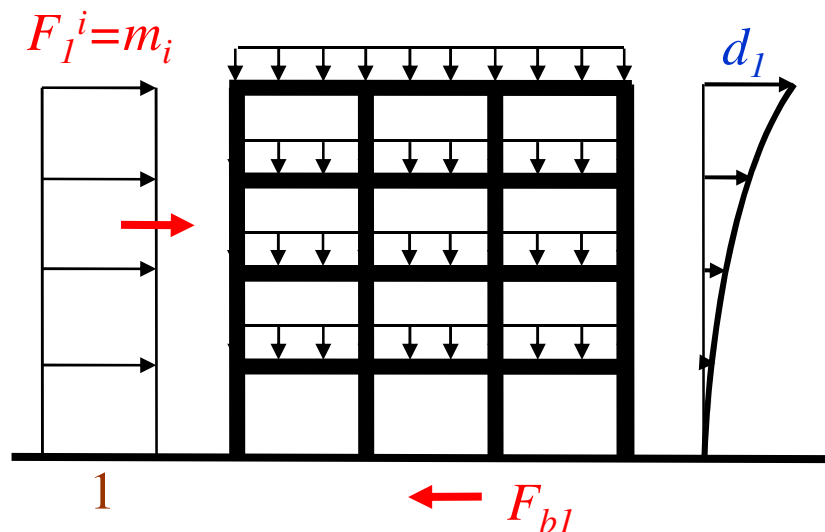


ANALISI STATICA NONLINEARE

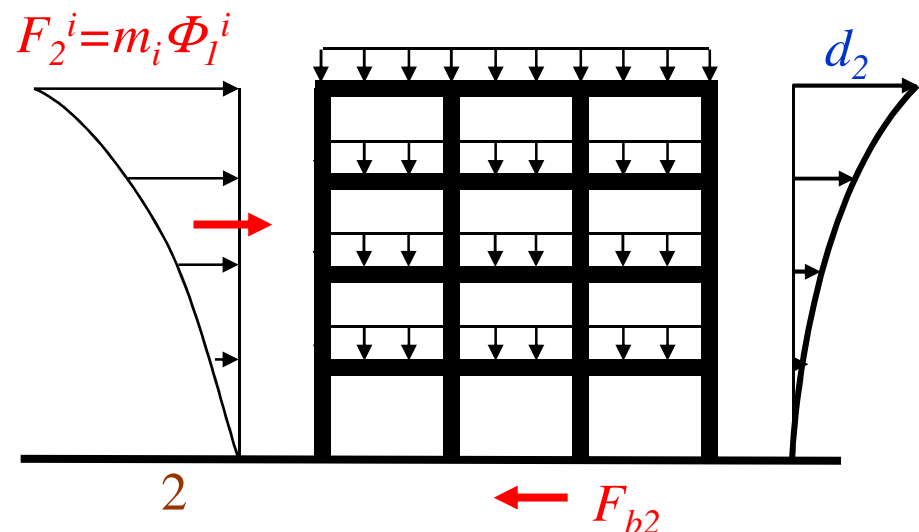
3. Analisi di pushover e curva di capacità

Sono richieste **almeno 2** distribuzioni di forze orizzontali:

- forze proporzionali alle masse;
- forze proporzionali alle masse per la deformata del Modo 1

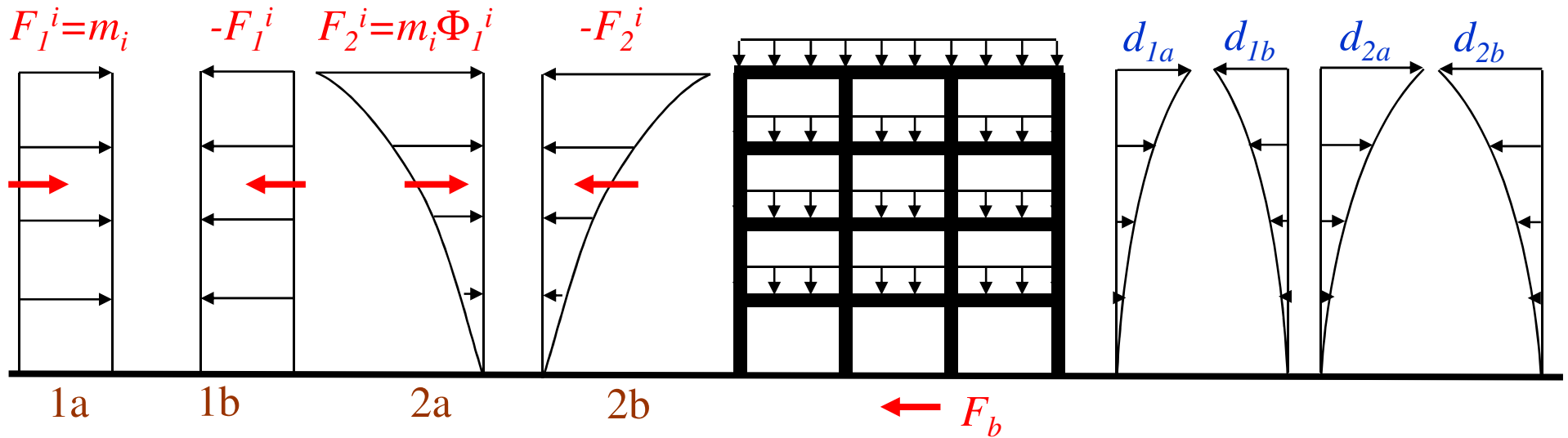


“Uniform” load distribution 1

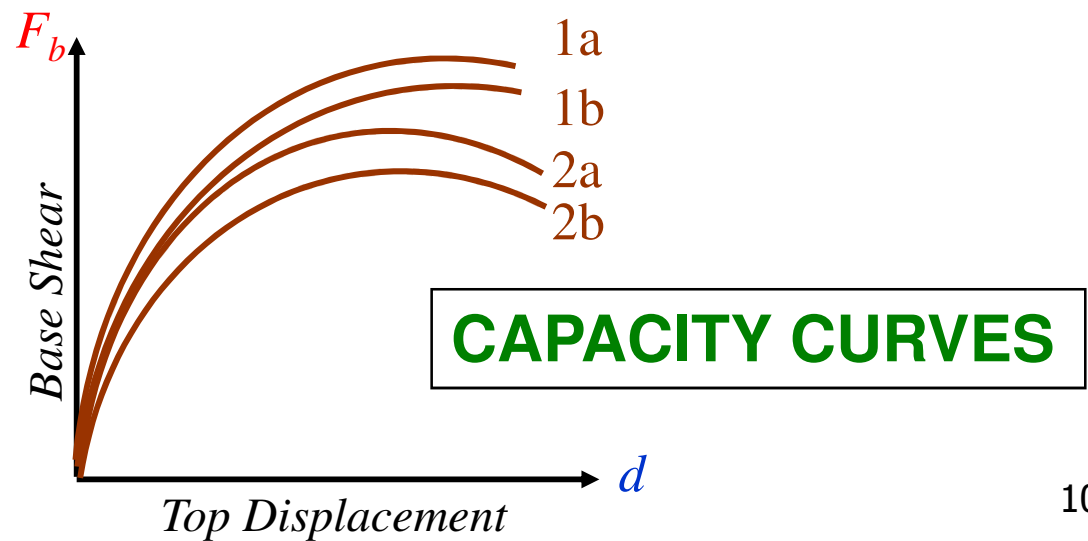


“Modal” load distribution 2

ANALISI STATICA NONLINEARE



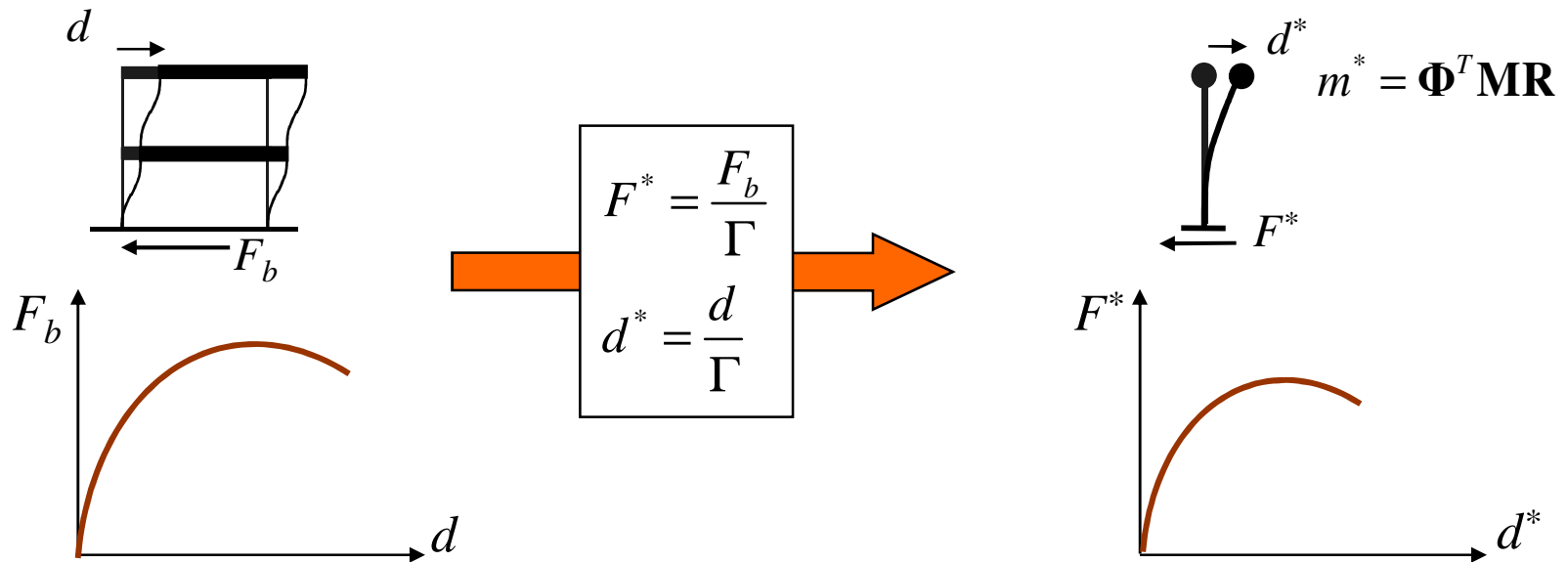
Le curve devono spingersi fino al raggiungimento dello SL in questione (non facile!).



ANALISI STATICA NONLINEARE

4. Riduzione ad un sistema a 1-GDL e bilinearizzazione

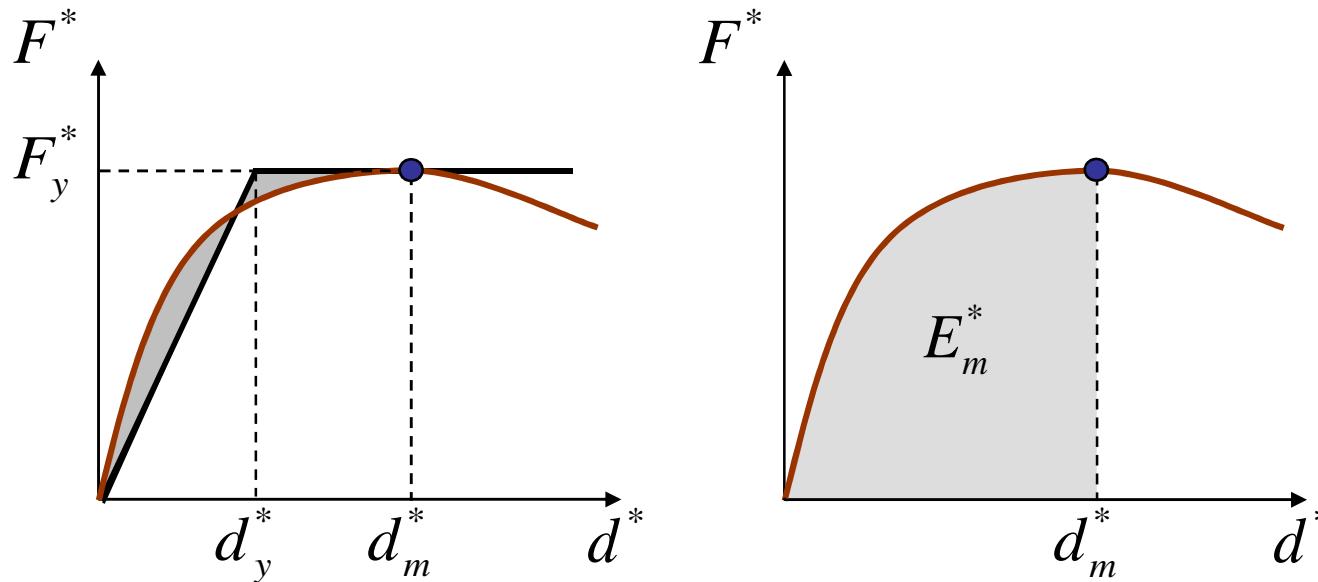
Φ = valore rappresentativo del primo modo di vibrazione nella direzione considerata normalizzato al valore unitario della componente relativa al punto di controllo



$$\Gamma = \frac{\Phi^t \mathbf{M} \mathbf{R}}{\Phi^t \mathbf{M} \Phi} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{F}_i}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\bar{F}_i^2}{m_i} \right)} = \frac{m^*}{\sum_{i=1}^N m_i \Phi_i^2} = \text{coefficiente di partecipazione}$$

ANALISI STATICA NONLINEARE

5. Bilinearizzazione della curva di capacità (EC8)



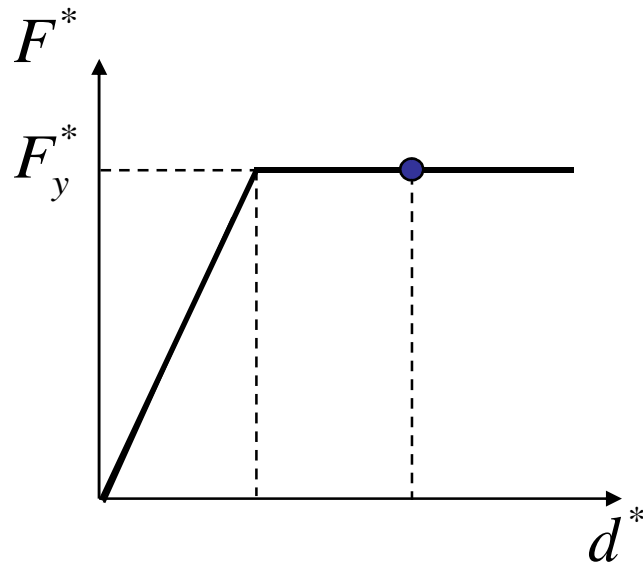
Ipotesi di uguale energia

d_m^* Target displacement (stimato a questo punto)

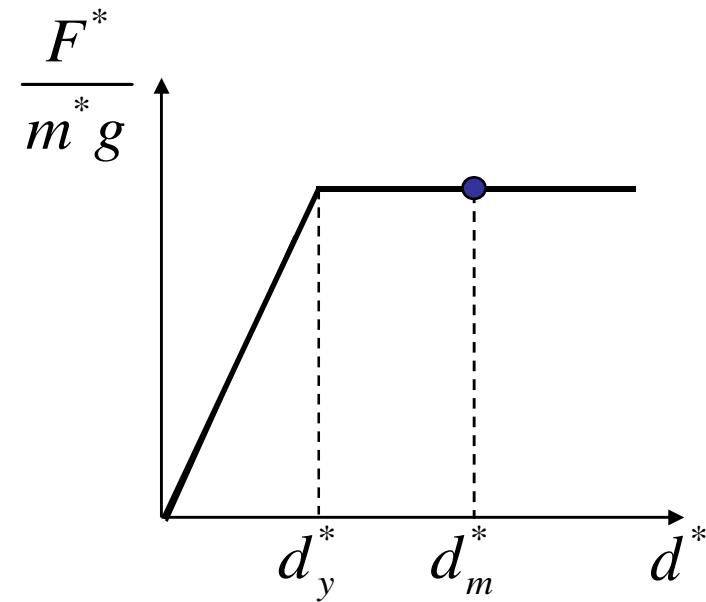
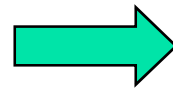
$$d_y^* = 2 \left(d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right)$$

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}}$$

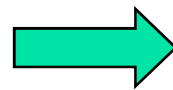
ANALISI STATICA NONLINEARE



curva di capacità



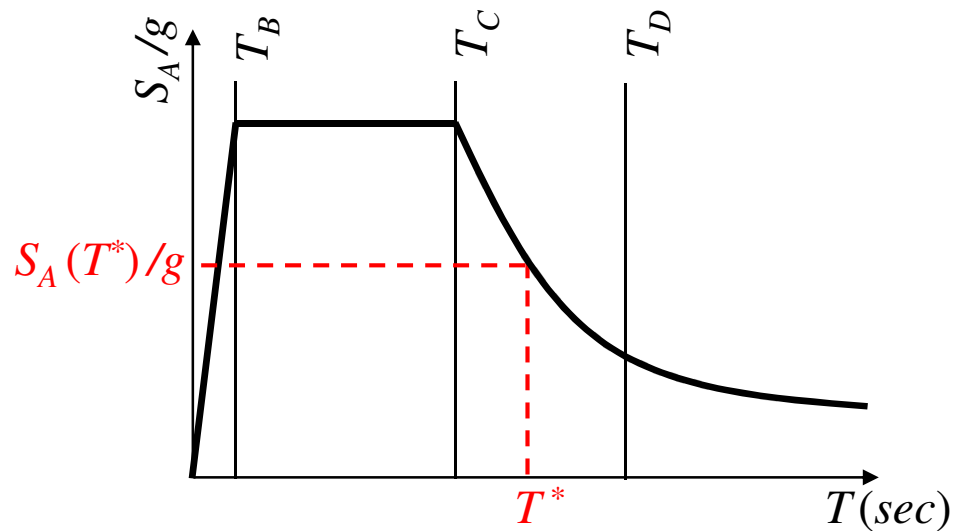
spettro di capacità



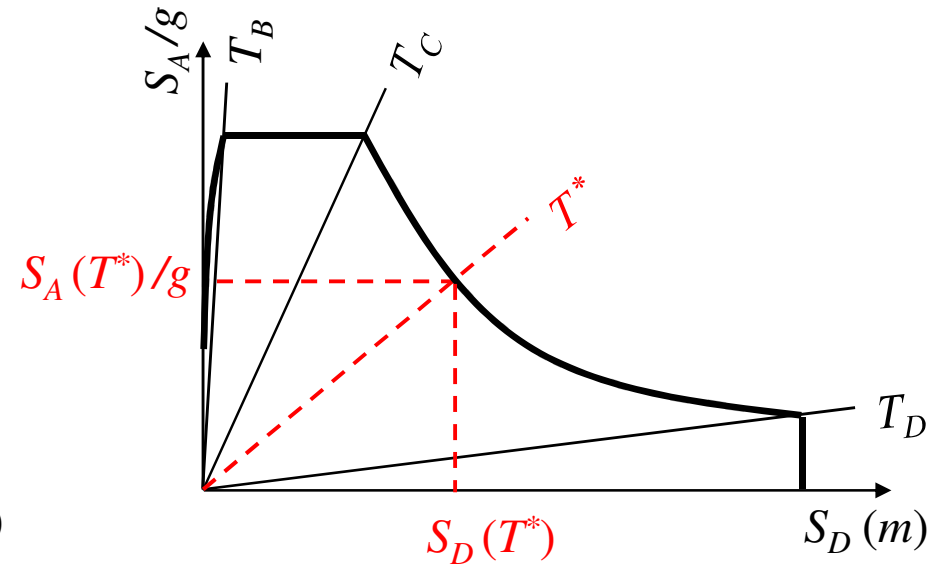
ANALISI STATICA NONLINEARE

6. Calcolo del target displacement

E' conveniente cambiare rappresentazione dello spettro



Spettro di progetto elastico

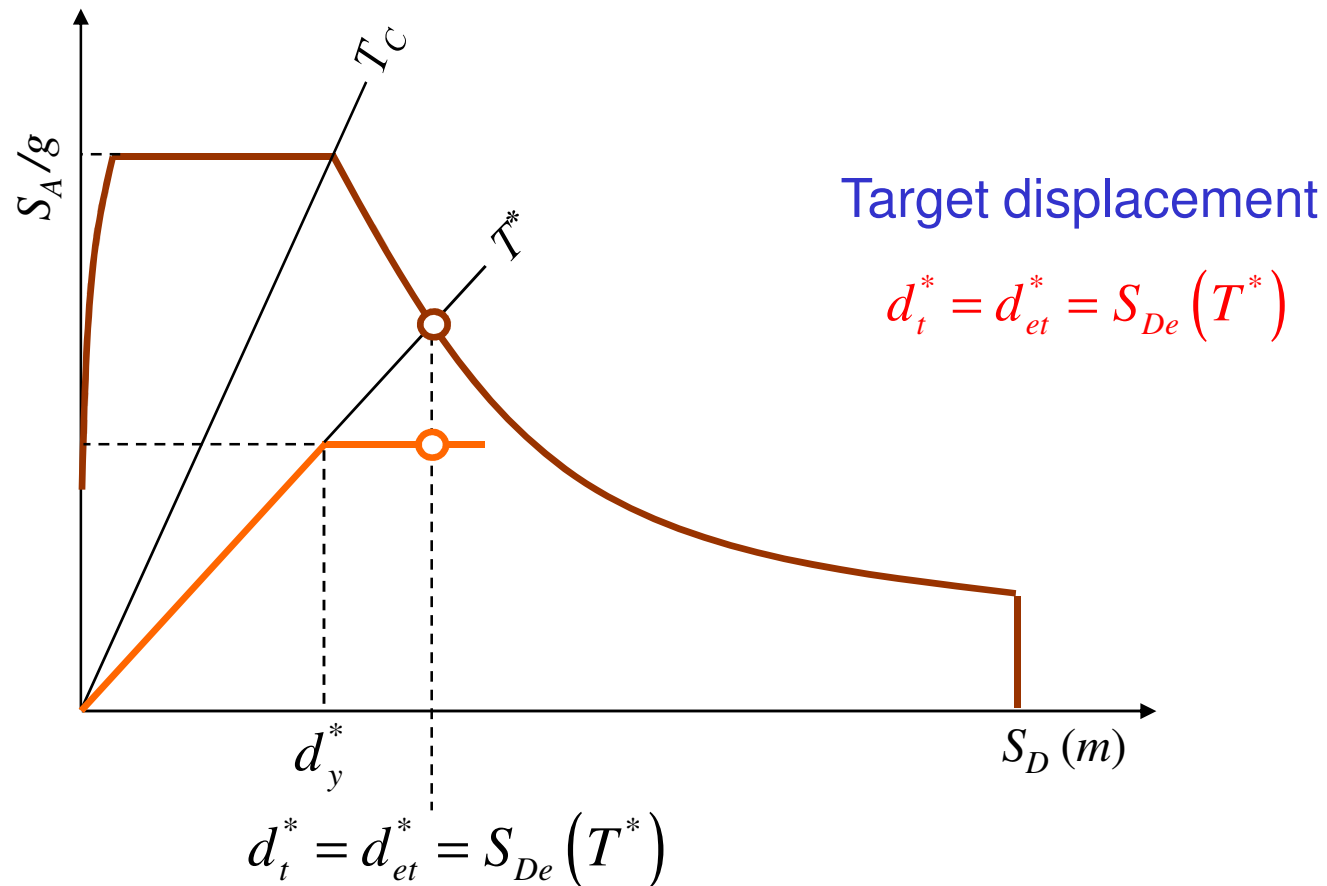


Spettro ADRS

ANALISI STATICA NONLINEARE

Per periodo T^* medio e lungo

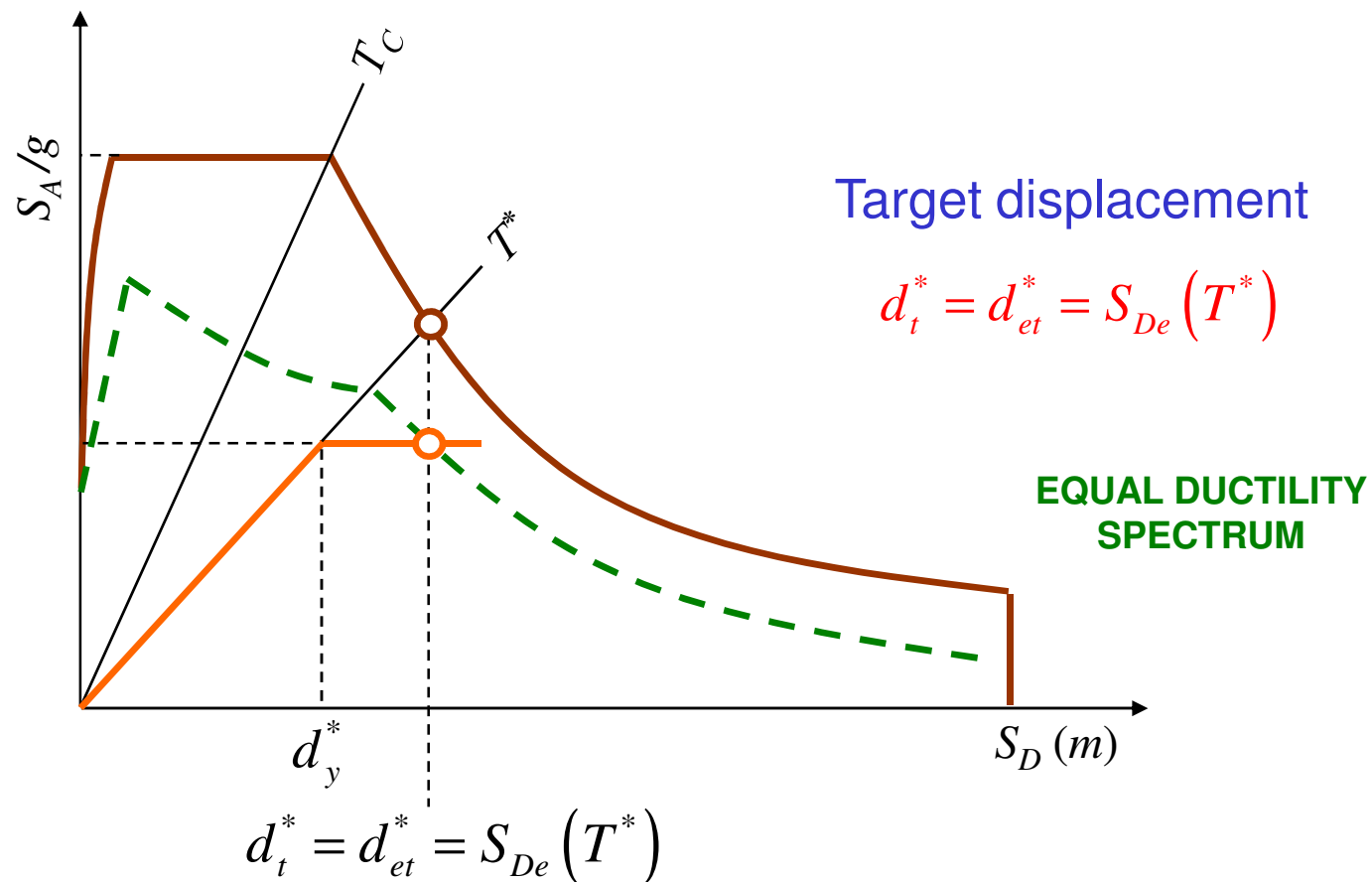
$$T^* > T_C$$



ANALISI STATICA NONLINEARE

Per periodo T^* medio e lungo

$$T^* > T_C$$

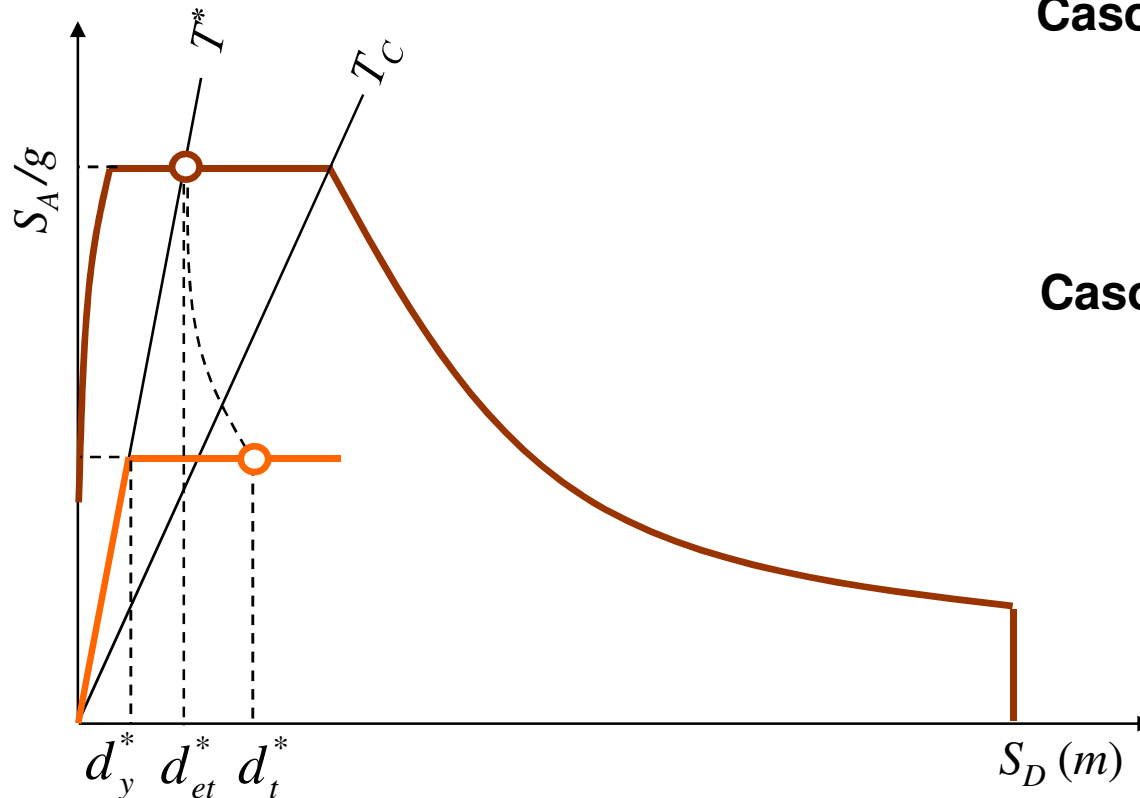


ANALISI STATICA NONLINEARE

Per periodo T^* corto

$$T^* < T_C$$

Target displacement



Caso 1 $F_y^*/m^* \geq S_e(T^*)$

$$d_t^* = d_{et}^*$$

Caso 2 $F_y^*/m^* < S_e(T^*)$

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left(1 + (q_u - 1) \frac{T_C}{T^*} \right)$$

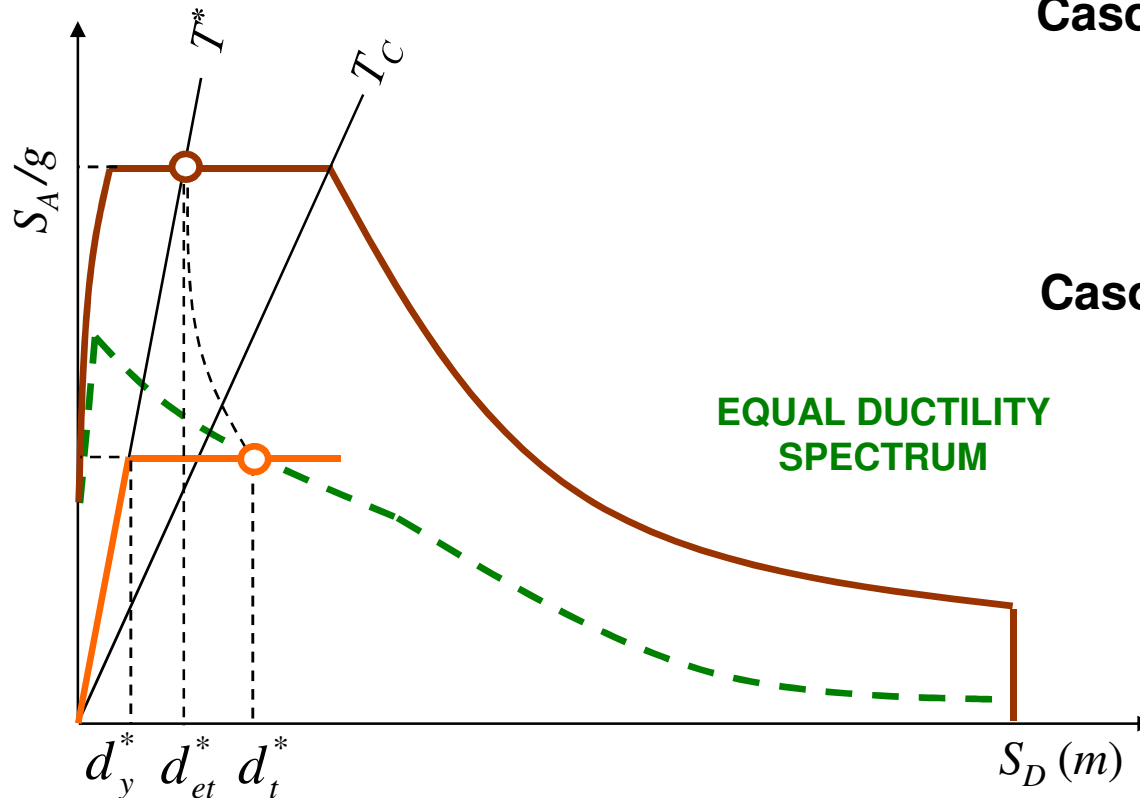
$$q_u = \frac{S_e(T^*)}{F_y^*/m^*}$$

ANALISI STATICA NONLINEARE

Per periodo T^* corto

$$T^* < T_C$$

Target displacement



Caso 1 $F_y^*/m^* \geq S_e(T^*)$

$$d_t^* = d_{et}^*$$

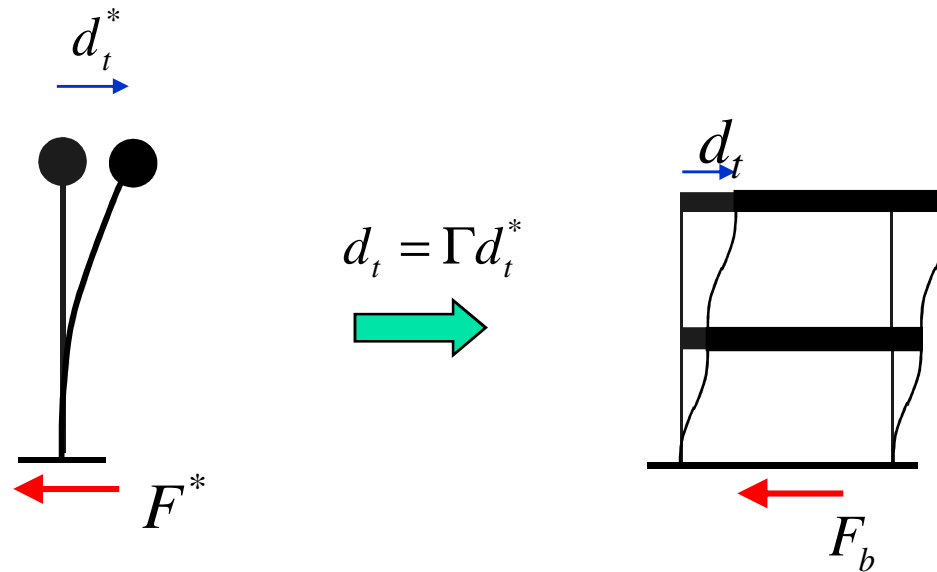
Caso 2 $F_y^*/m^* < S_e(T^*)$

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left(1 + (q_u - 1) \frac{T_C}{T^*} \right)$$

$$q_u = \frac{S_e(T^*)}{F_y^*/m^*}$$

ANALISI STATICA NONLINEARE

7. Conversione a spostamento sistema a N-GDL



8. Verifiche agli Stati Limite di interesse

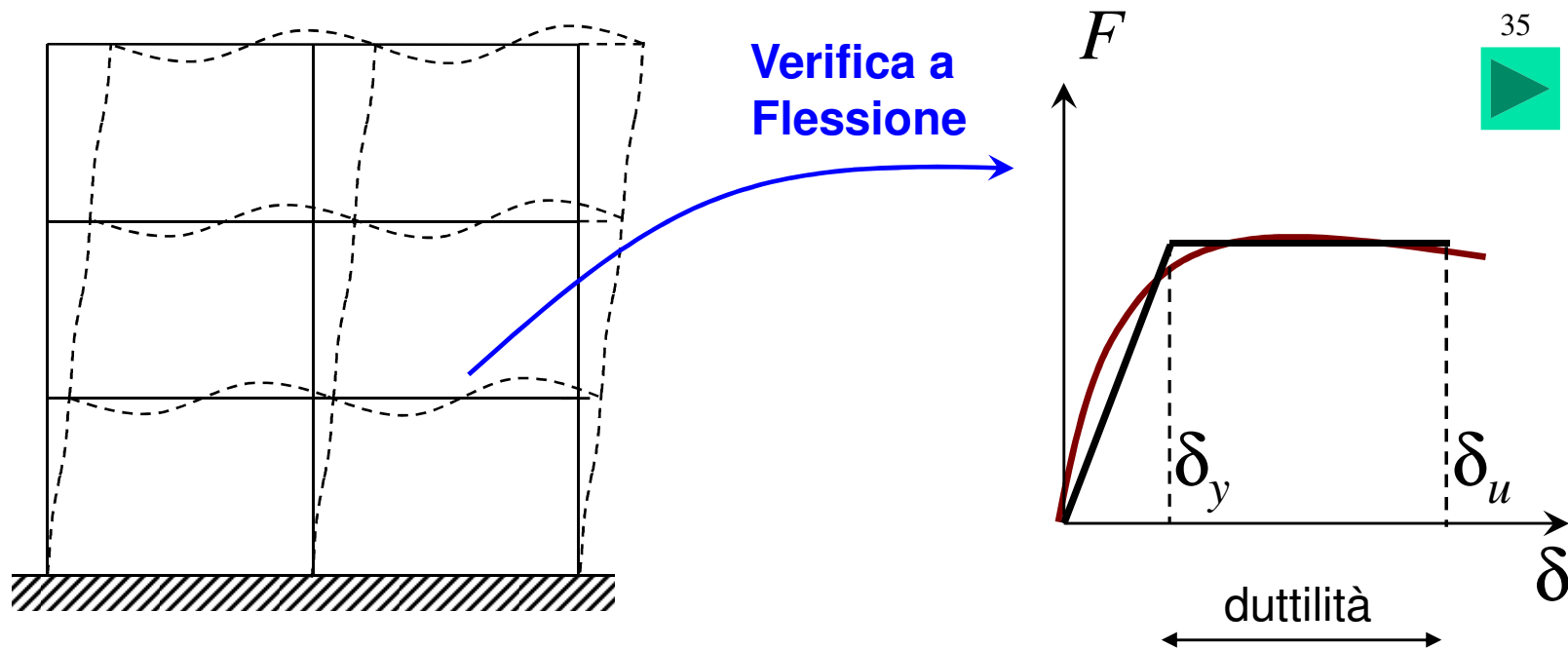
“[...] trovato lo spostamento effettivo di risposta per lo SL in studio, si procede alla verifica della compatibilità degli spostamenti per gli elementi/meccanismi duttili e delle resistenze per gli elementi/meccanismi fragili.”

ANALISI STATICA NONLINEARE

8. Verifiche agli Stati Limite di interesse

Meccanismi DUTTILI

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

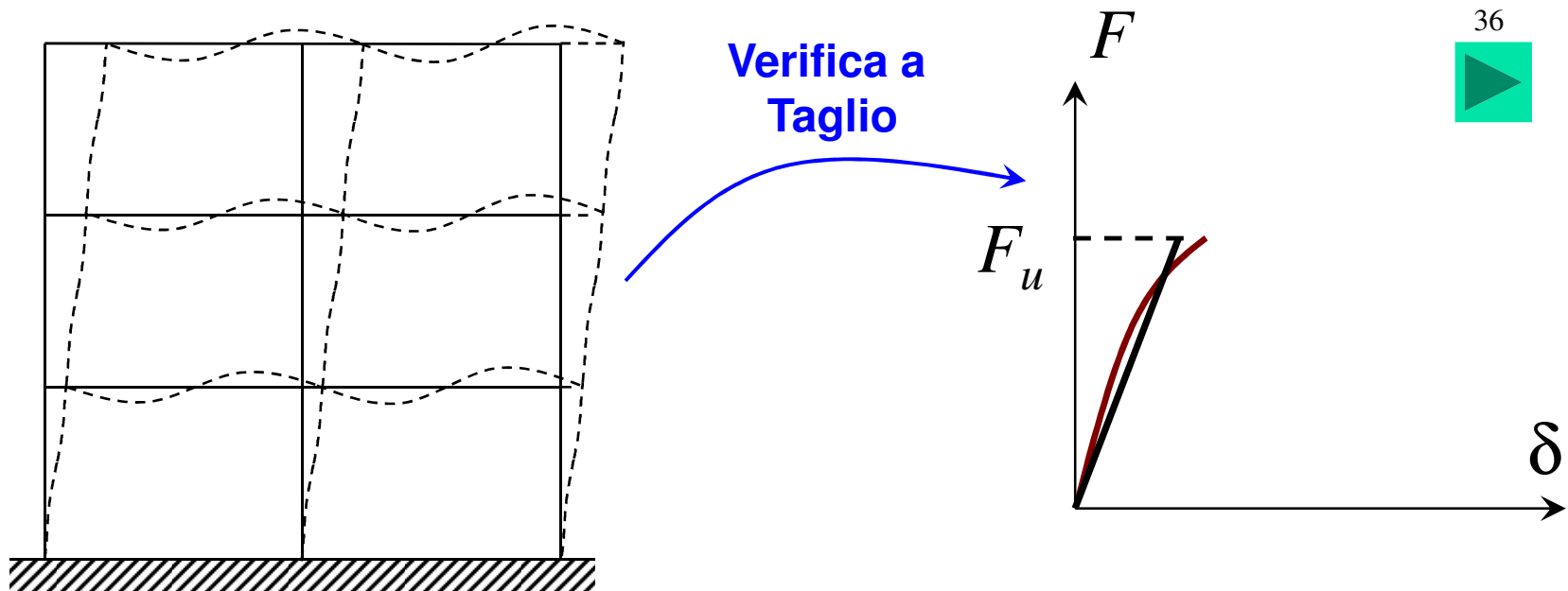


ANALISI STATICA NONLINEARE

8. Verifiche agli Stati Limite di interesse

Meccanismi FRAGILI

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

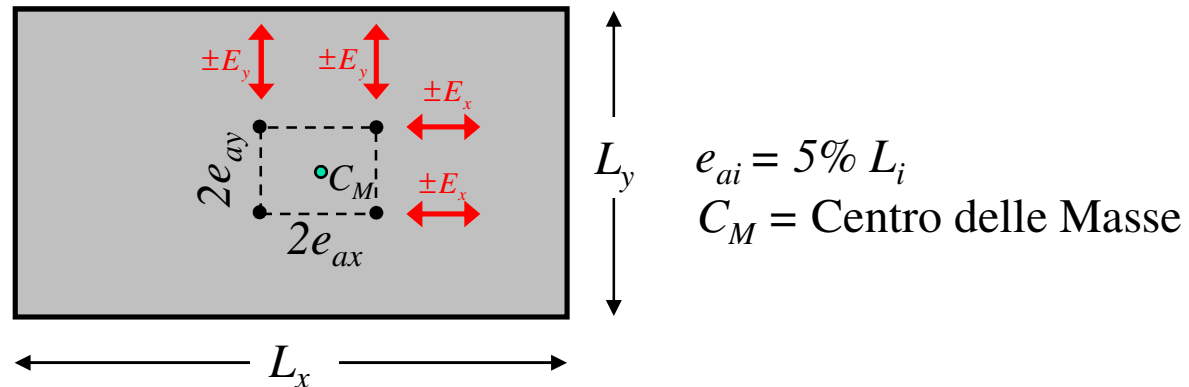


ANALISI STATICA NONLINEARE

Pianta irregolare - Effetti di pianta (EC8)

Le forze orizzontali vengono applicate alle masse del modello 3D tenendo conto delle eccentricità accidentali e_i

In teoria!



L'analisi Pushover può sottostimare fortemente le deformazioni di una struttura con modi prevalentemente torsionali

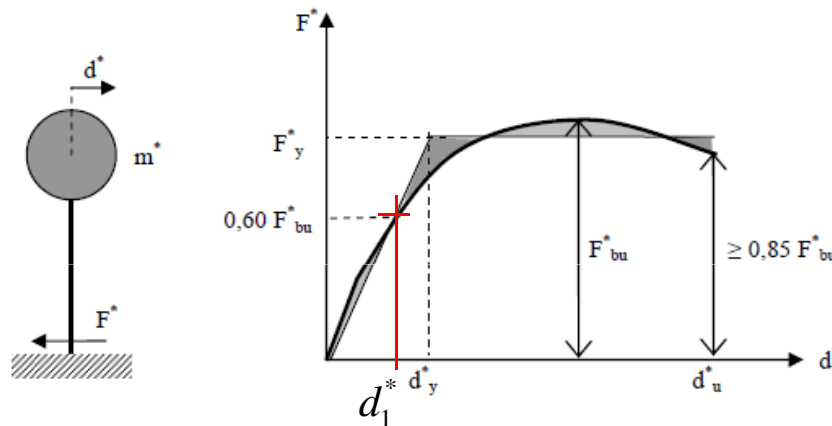
In tal caso lo spostamento derivante dal pushover sulla struttura torsionalmente "bilanciata" va amplificato

Il coefficiente di amplificazione può esser ricavato da una analisi elastica modale sulla struttura 3D

ANALISI STATICA NONLINEARE

Ricerca del Punto di Funzionamento con NTC08

Il procedimento è analogo a quello mostrato, valido per l'EC8, con unica differenza allo step 6 – Bilinearizzazione curva di capacità



$$\frac{d_1^*}{0,6 F_{bu}^*} = \frac{d_y^*}{0,6 F_y^*}$$
$$E_m^* = F_y^* \left(d_u^* - d_y^* / 2 \right)$$

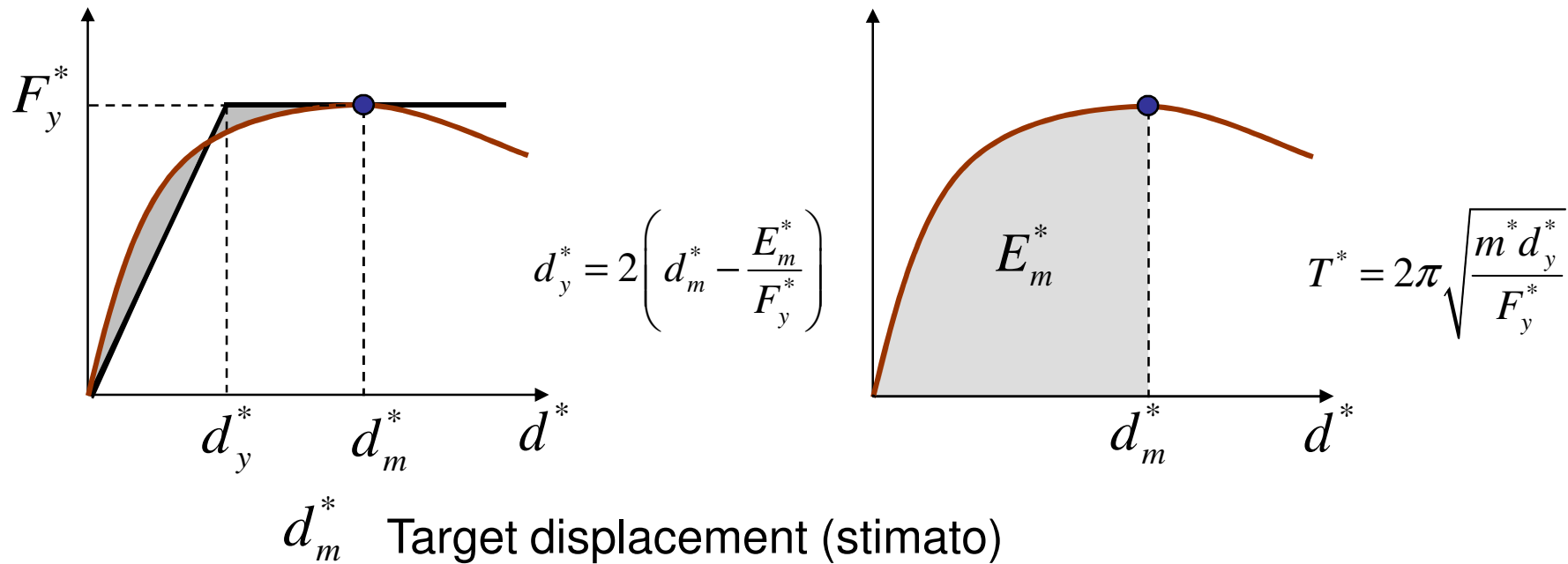
Figura C7.3.1 – Sistema e diagramma bilineare equivalente

1. Si assume d_u^* tale che il taglio corrispondente sia superiore a $0,85 F_{bu}^*$
2. L'energia sottesa dalla curva è automaticamente determinata;
3. Si impone passaggio del tratto elastico dal punto $0,6 F_{bu}^*$
4. Si risolve un'equazione di 2° grado per determinare d_y^* o F_y^*

ANALISI STATICA NONLINEARE

Differenze NTC08 – EC8

- Per EC8 l'energia da prendere in considerazione nella fase di bilinearizzazione della curva di capacità è quella ottenuta integrando la relazione taglio alla base – spostamento del punto di controllo dalla condizione di spostamento iniziale nel piano corrispondente ad un carico orizzontale nullo fino allo spostamento target atteso.



ANALISI STATICA NONLINEARE

Differenze NTC08 – EC8

- Per EC8 lo spostamento target atteso non deve valere più del 150% dello spostamento target trovato dall'applicazione della procedura di determinazione del punto di funzionamento. In tal caso è opportuna una nuova ipotesi di spostamento target atteso. E' possibile adottare la strategia ricorsiva indicata in appendice all'Eurocodice 8.

$$\boxed{d_m^* \leq 150\% d_t^*}$$

$d_t^* = d_{et}^*$ se $T^* > T_c$

se $T^* < T_c$ e $F_y^*/m^* \geq S_e(T^*)$

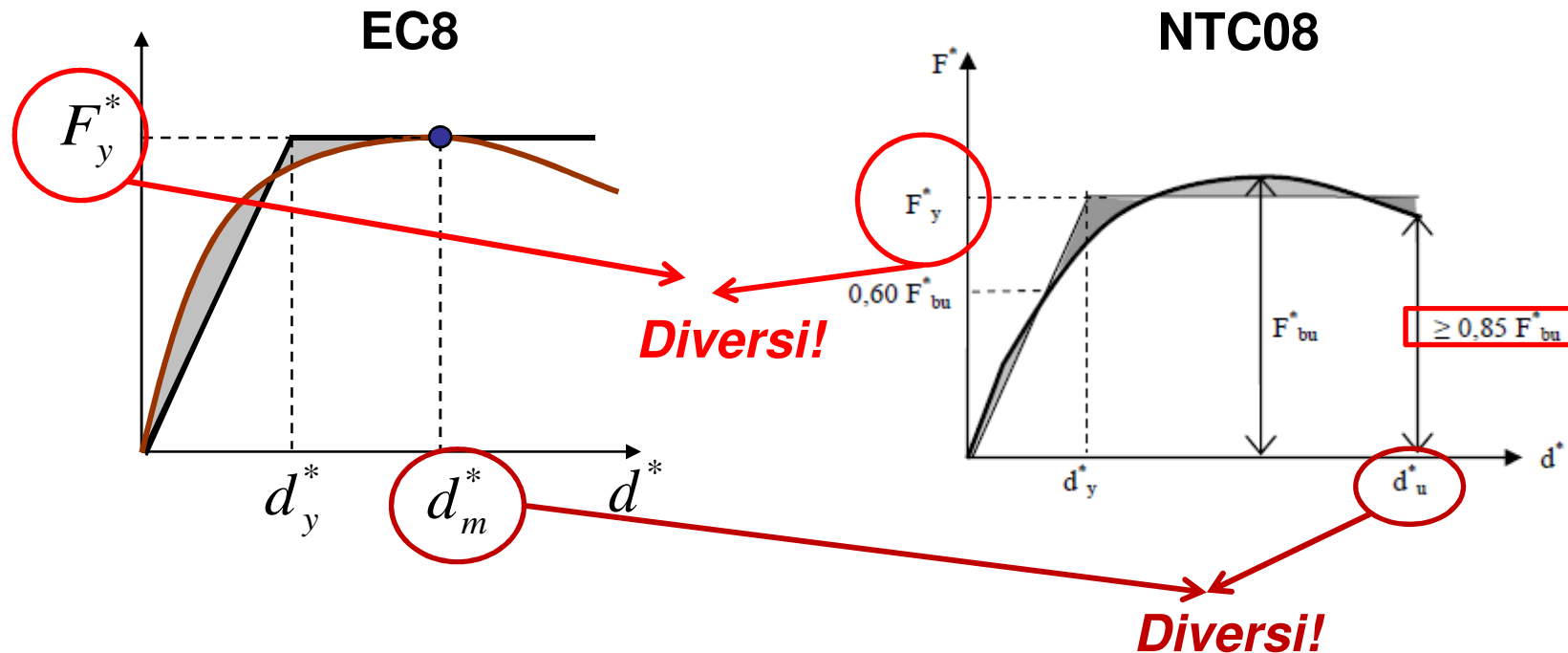
$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left(1 + (q_u - 1) \frac{T_c}{T^*} \right)$ con $q_u = \frac{S_e(T^*)}{F_y^*/m^*}$

se $T^* < T_c$ e $F_y^*/m^* < S_e(T^*)$

ANALISI STATICA NONLINEARE

Differenze NTC08 – EC8

- Il valore di taglio alla base allo snervamento nella bilinearizzazione della curva di capacità è pari al valore massimo corrispondente allo spostamento target atteso. Questa condizione implica che l'unica incognita sia il valore dello spostamento allo snervamento. Di conseguenza nessuna condizione di intersezione è imposta.





ANALISI STATICA NONLINEARE

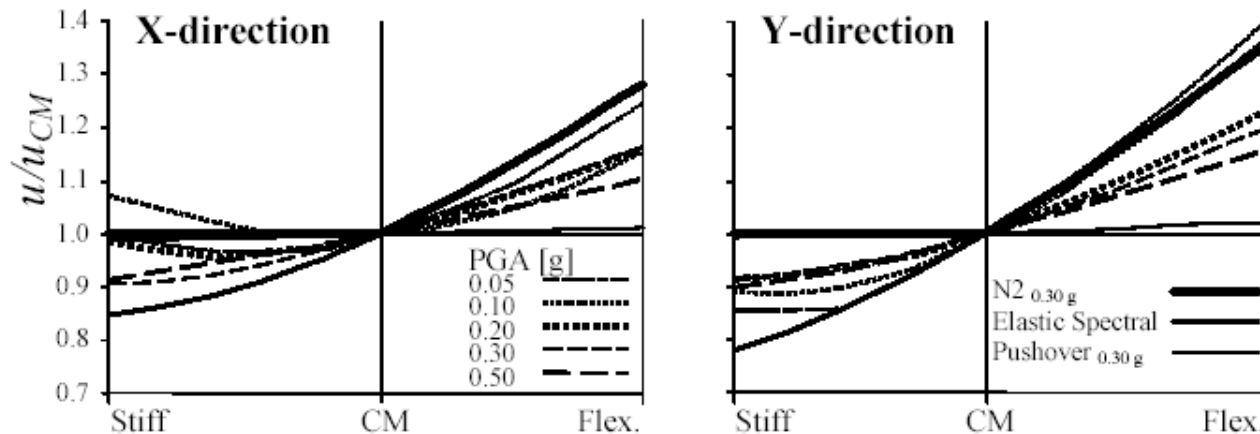
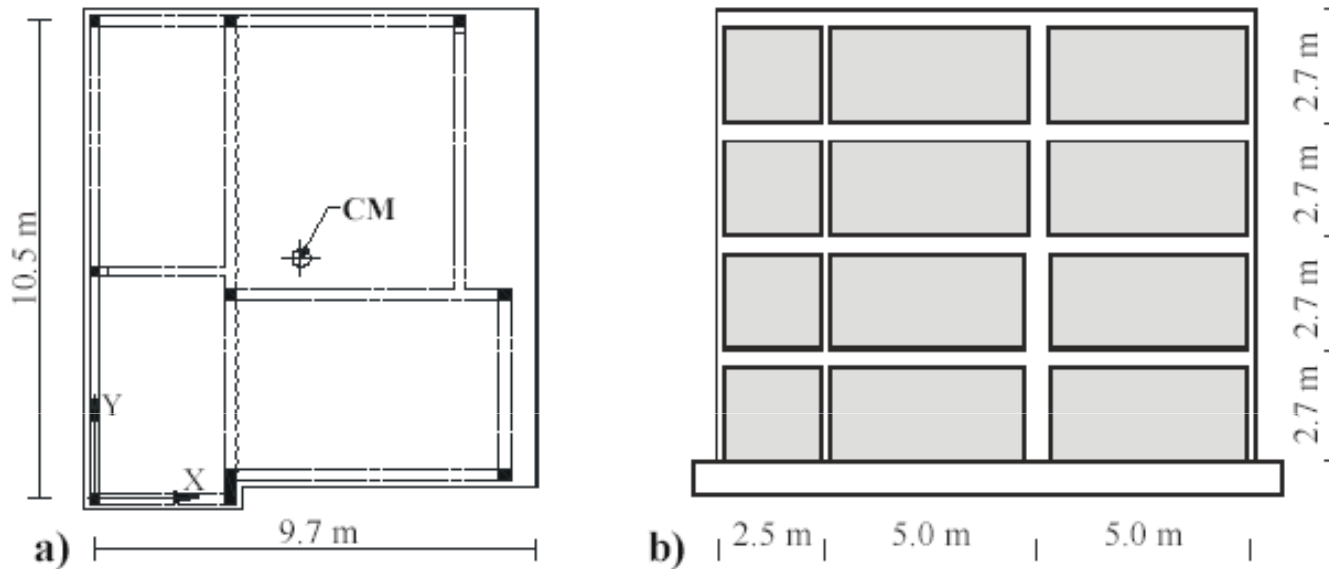
Osservazioni al metodo NTC08

- Gli *effetti torsionali accidentali* sono considerati nel modo previsto al § 7.2.6 delle NTC.
- Una volta trovata la domanda in spostamento d_{max} per lo stato limite in esame si *verifica* che sia $d_{max} < d_u$ e si procede alla verifica della *compatibilità degli spostamenti per gli elementi/meccanismi duttili e delle resistenze per gli elementi/meccanismi fragili*.
- *L'analisi non lineare statica condotta nei modi previsti dalle NTC può sottostimare significativamente le deformazioni sui lati più rigidi e resistenti di strutture flessibili torsionalmente*, cioè strutture in cui il modo di vibrare torsionale abbia un periodo superiore ad almeno uno dei modi di vibrare principali traslazionali. Per tener conto di questo effetto, tra le distribuzioni secondarie delle forze occorre scegliere la distribuzione adattiva. L'azione sismica deve essere applicata, per ciascuna direzione, in entrambi i possibili versi e si devono considerare gli effetti più sfavorevoli derivanti dalle due analisi.

(Non) combinazione effetti azione sismica - § 7.3.5

Se la risposta viene valutata mediante analisi statica in campo non lineare, ciascuna delle due componenti orizzontali (insieme a quella verticale, ove necessario, e agli spostamenti relativi prodotti dalla variabilità spaziale del moto, ove necessario) è applicata separatamente. Come effetti massimi si assumono i valori più sfavorevoli così ottenuti.

ANALISI STATICA NONLINEARE



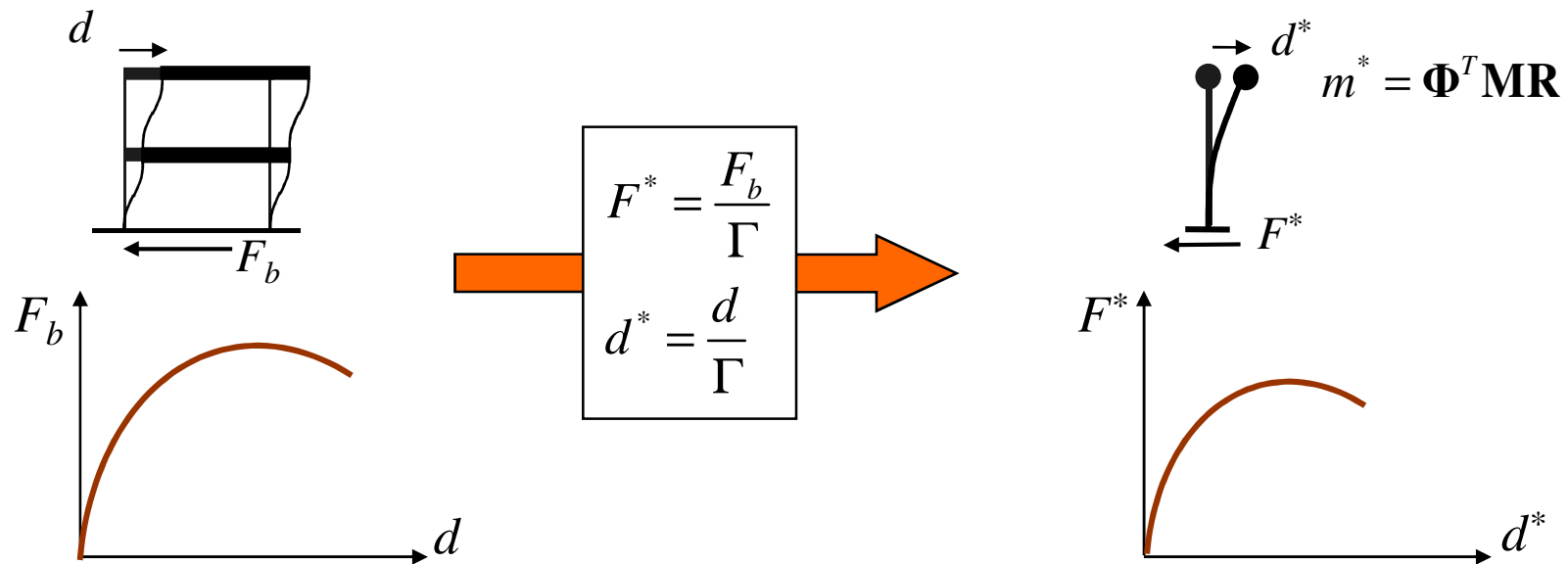
Fajfar P, Kilar V, Marusic D, Perus I, Magliulo G. "The extension of the N2 method to asymmetric buildings." Proceedings of the Fourth Forum on Implications of Recent Earthquakes on Seismic Risk, Technical Report TIT/EERG, 02/1. Tokyo Institute of Technology: Tokyo, 2002; 291–308.



FINE

ANALISI STATICA NONLINEARE

PROCEDURA METODO PUSHOVER N2 - 1



E' importante capire come si riduce la risposta di un telaio MDOF alla risposta di un oscillatore semplice SDOF **per poter valutare le approssimazioni e quindi i limiti dell'approccio**



ANALISI STATICA NONLINEARE

PROCEDURA METODO PUSHOVER N2 - 2

Le trasformazioni soprariportate seguono il metodo N2 dal Prof. Fajfar dell'Università di Ljubljana, Slovenia (Fajfar, 2002). Le due ipotesi di base sono:

1) la forzante pseudo-statica sulla struttura ha la forma:

$$\mathbf{P} = \mathbf{M}\Phi p(t)$$

dove $p(t)$ = intensità della forzante e Φ è una possibile configurazione deformata

2) la risposta della struttura in termini di spostamento è espressa nella forma:

$$\mathbf{U} \approx \Phi z(t)$$

dove $z(t)$ indica la coordinata generalizzata della risposta.

Si tratta ovviamente di **ipotesi molto grossolane**, in quanto si assume che la forzante e la deformata abbiano la stessa forma.

E' questa però la tappa iniziale del metodo



ANALISI STATICA NONLINEARE

PROCEDURA METODO PUSHOVER N2 - 3

Analisi statiche nonlineari

$$\mathbf{F}(\mathbf{U})=\mathbf{P}$$

Analisi dinamiche

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{F}(\mathbf{U}) = -\mathbf{M}\mathbf{R}\ddot{u}_g$$

Si potrebbe osservare che la prima espressione non vale nel caso dinamico ma solo in quello statico, e quindi la prima espressione in teoria non può essere usata nel contesto della seconda equazione. Bisogna però considerare che lo scopo di questa procedura è quello di determinare (per l'analisi pseudo-statica di pushover) la relazione che regola il passaggio fra risposta del sistema MDOF a quella di un sistema equivalente SDOF, allo scopo di poter poi utilizzare gli spettri di progetto dati dalle normative.



ANALISI STATICA NONLINEARE

PROCEDURA METODO PUSHOVER N2 - 4

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{P} = -\mathbf{M}\mathbf{R}\ddot{u}_g$$

Questa equazione viene premoltiplicata per Φ^T , e le espressioni $\mathbf{U}=\Phi z(t)$ $\mathbf{P}=\mathbf{M}\Phi p(t)$ vengono sostituite, per ottenere:

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi \ddot{z} + \Phi^T \mathbf{M} \Phi p = -\Phi^T \mathbf{M} \mathbf{R} \ddot{u}_g$$

oppure

$$m^* \ddot{d}^* + F^* = -m^* \ddot{u}_g \quad \rightarrow \quad m^* \frac{\ddot{z}}{\Gamma} + \frac{V_b}{\Gamma} = -m^* \ddot{u}_g$$

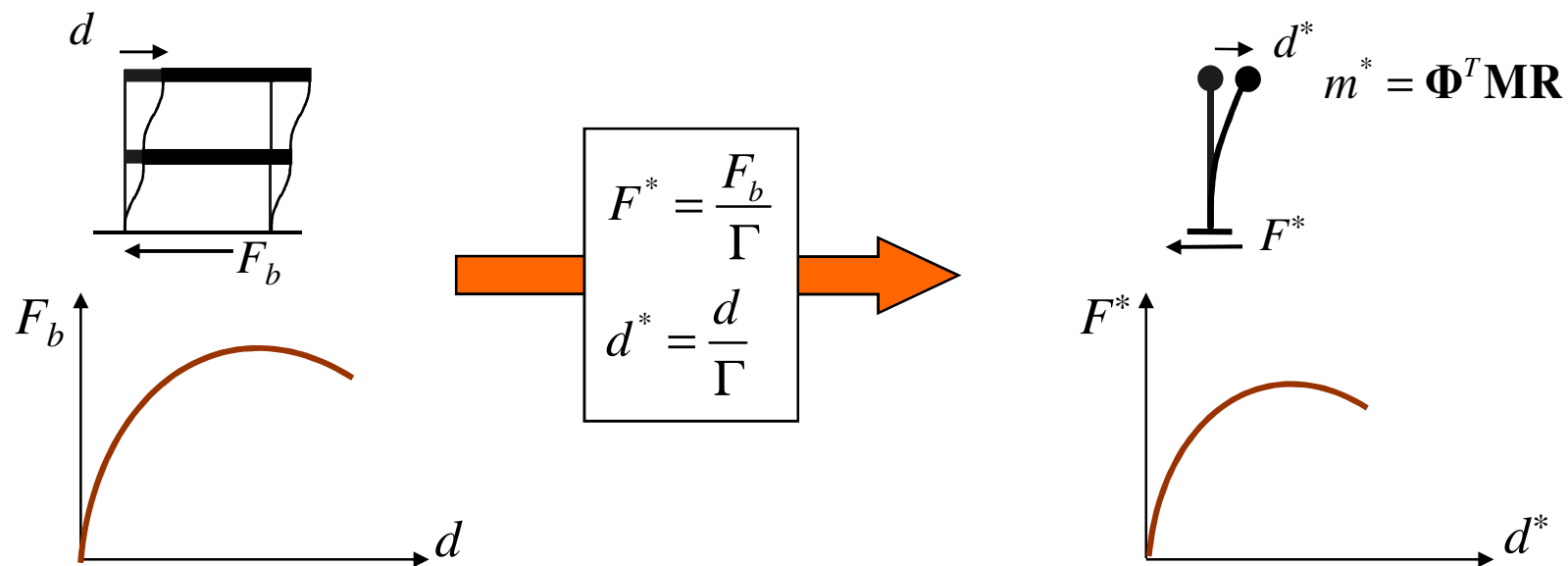
dove

$$m^* = \Phi^T \mathbf{M} \mathbf{R} \quad d^* = \frac{\Phi^T \mathbf{M} \Phi}{\Phi^T \mathbf{M} \mathbf{R}} z = \frac{z}{\Gamma} \quad F^* = \Phi^T \mathbf{M} \Phi p = \frac{1}{\Gamma} (\Phi^T \mathbf{M} \mathbf{R}) p = \frac{V_b}{\Gamma}$$

ANALISI STATICA NONLINEARE

PROCEDURA METODO PUSHOVER N2 - 5

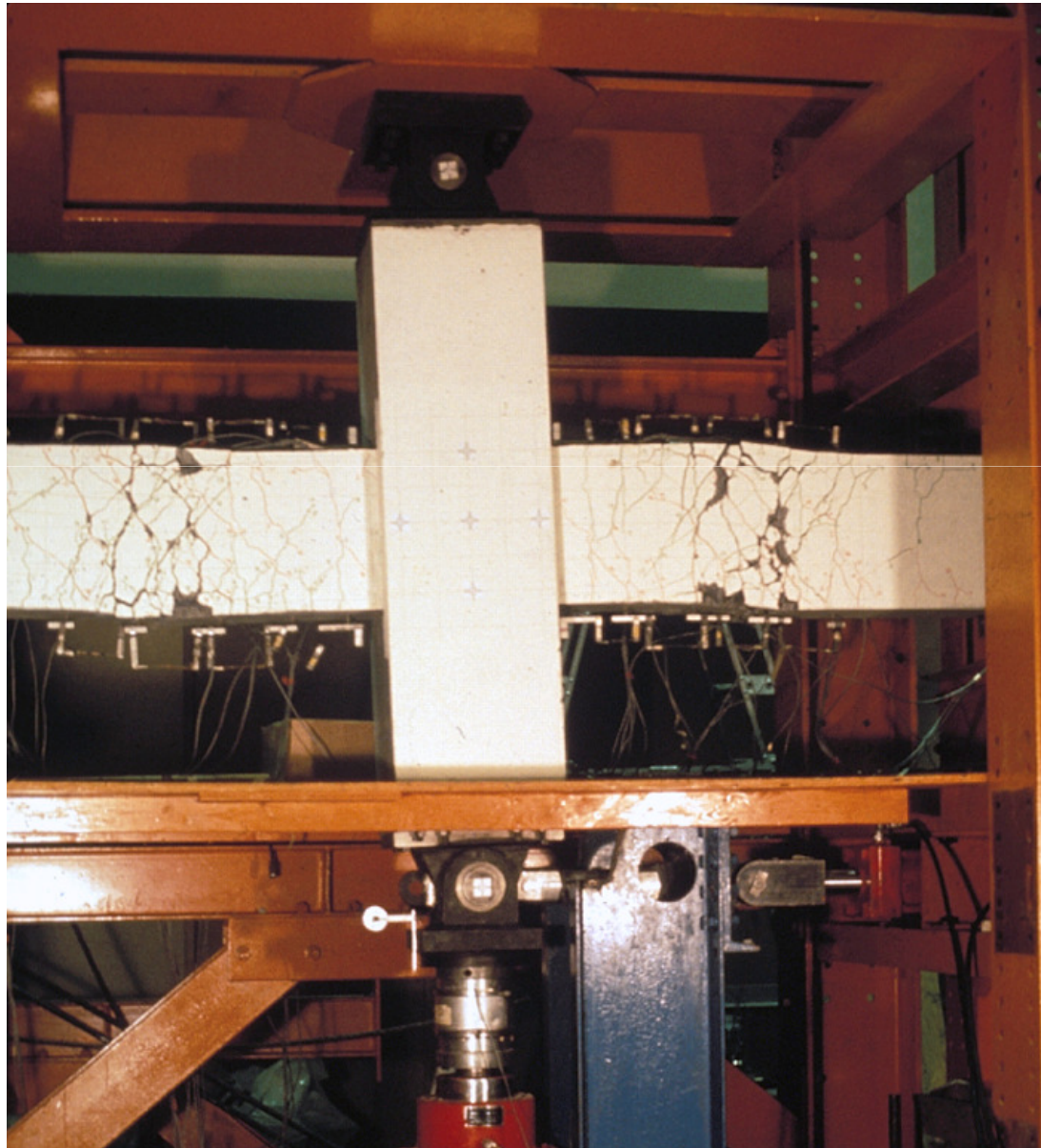
$$m^* \ddot{d}^* + F^* = -m^* \ddot{u}_g \quad \text{oppure} \quad m^* \frac{\ddot{z}}{\Gamma} + \frac{F_b}{\Gamma} = -m^* \ddot{u}_g$$



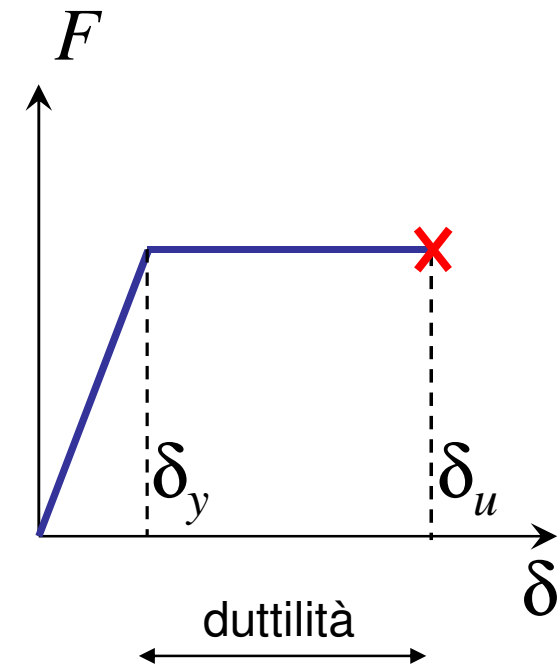
La risposta del telaio è riportata in forma approssimata a quella di un oscillatore nonlineare a 1GDL di massa m^* e spostamento d^* , soggetto al terremoto di progetto \ddot{u}_g



ROTTURA DUTTILE

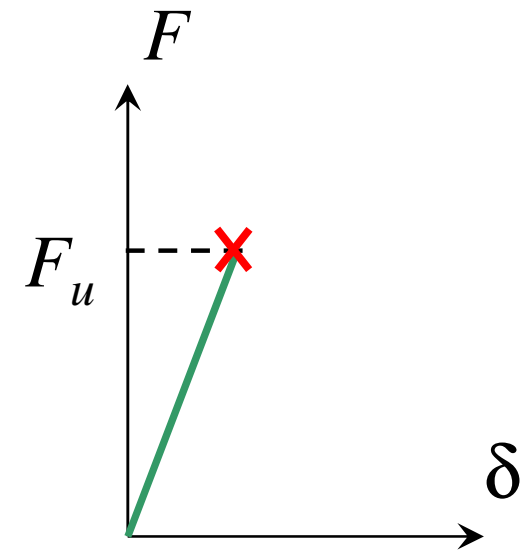


20



Rottura duttile della trave

ROTTURA FRAGILE



Rottura fragile a taglio prima del raggiungimento della capacità flessionale

ROTTURA FRAGILE

21



Cerniera plastica (?) concentrata (non ci sono fessure diffuse), probabilmente a causa dello sfilamento delle barre, espulsione cls e rottura barre a compressione

37