

Corso

Progetto di strutture in zona sismica

Catania

ottobre - dicembre 2016

03 - Risposta sismica delle strutture (2^a parte)

13 ottobre 2016

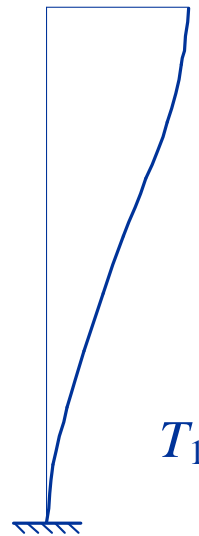
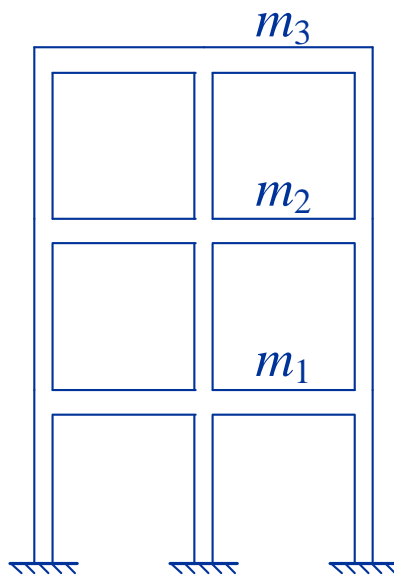
Aurelio Ghersi

Risposta elastica
di schemi a più gradi di libertà
(breve cenni)

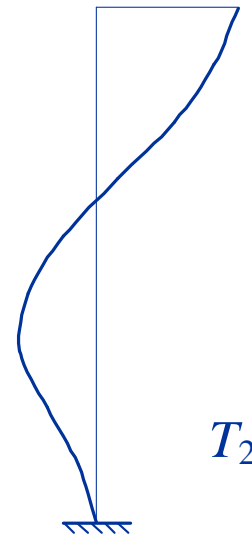
Modi di oscillazione libera

Telaio piano (con traversi inestensibili):

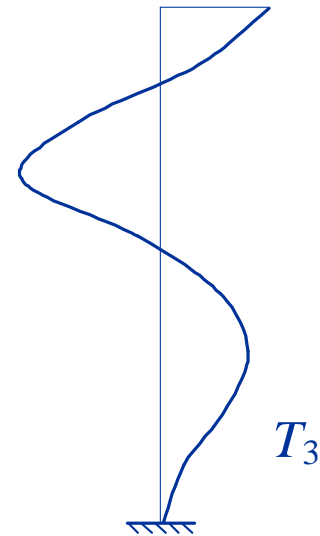
numero di modi di oscillazione libera = numero di piani



Primo modo



Secondo modo



Terzo modo

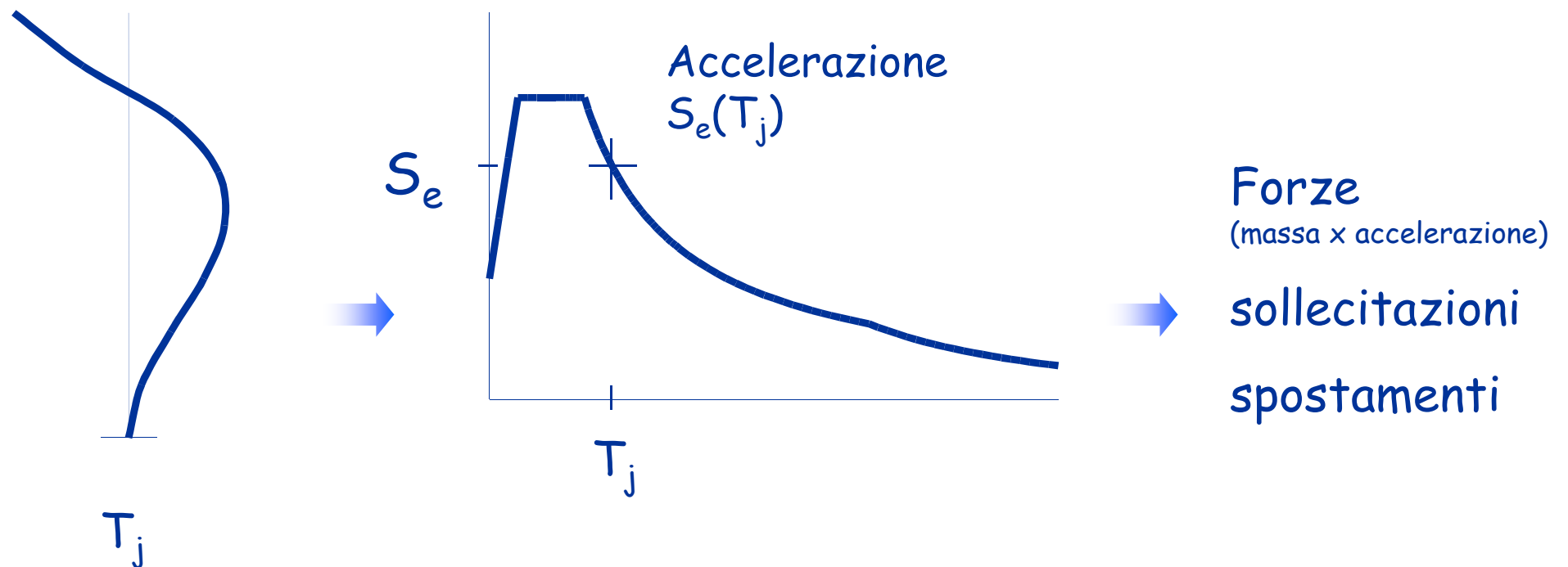
Equazione del moto: risposta ad un accelerogramma

Contributo di un singolo modo:

- La struttura che oscilla secondo uno dei suoi “modi” si comporta come un oscillatore semplice
- È possibile ricavare di conseguenza un insieme di forze e calcolare le sollecitazioni prodotte
- Il contributo di quel “modo” al moto complessivo della struttura è scalato mediante un **coefficiente di partecipazione modale** ϕ - in maniera più chiara - in funzione della massa partecipante

Equazione del moto: contributo di un modo

Per valutare la risposta della struttura vincolata a deformarsi secondo uno dei suoi modi di oscillazione ...



Equazione del moto: contributo di un modo

$S_e(T_j)$ = ordinata spettrale corrispondente al periodo T_j

Il taglio alla base corrispondente al modo j è

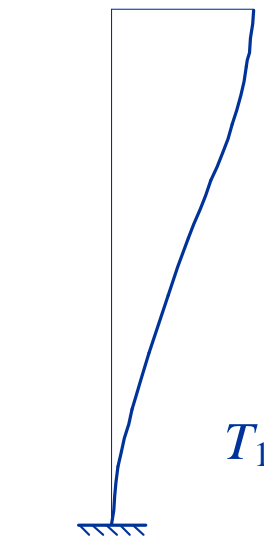
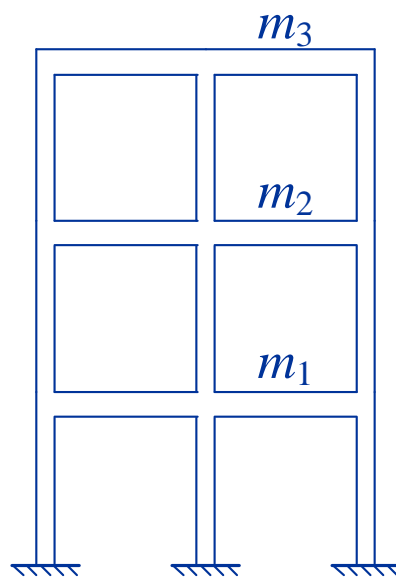
$$V_{b,j} = M_j^* S_e(T_j)$$

M_j^* è detta massa partecipante

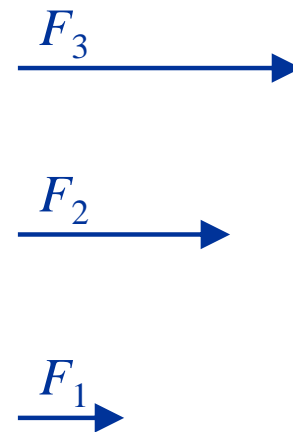
$$M_j^* = \sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j} \Gamma_j = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j} \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j}^2}$$

Equazione del moto: contributo di un modo

Si ritorna in sostanza all'idea di applicare alla struttura un insieme di forze (statiche) orizzontali



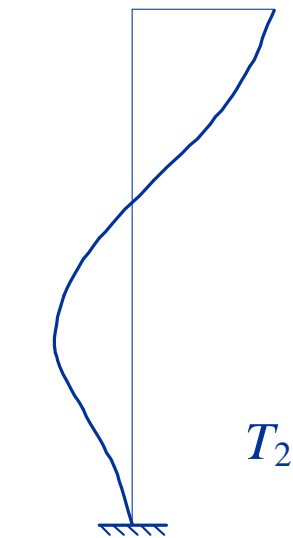
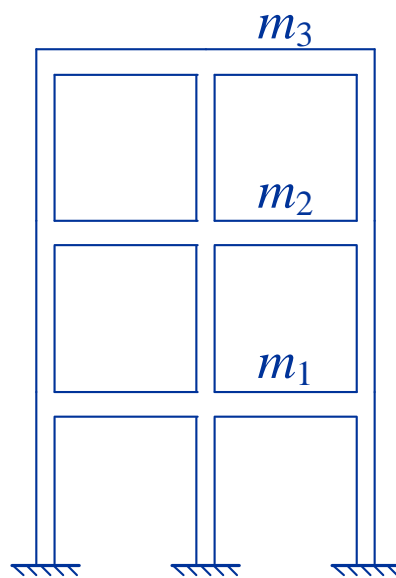
Primo modo



Forze
corrispondenti al
primo modo

Equazione del moto: contributo di un modo

Si ritorna in sostanza all'idea di applicare alla struttura un insieme di forze (statiche) orizzontali



Secondo modo



Forze
corrispondenti al
secondo modo

Analisi modale con spettro di risposta

Se si considerano più modi, ciascuno con la sua deformata reale, si ha l'analisi modale (con spettro di risposta)

- Il contributo di ciascun "modo" al moto complessivo della struttura è scalato mediante un coefficiente di partecipazione modale o - in maniera più chiara - in funzione della massa partecipante
- La somma delle masse partecipanti di tutti i modi è pari alla massa totale della struttura
(per questo motivo si parla in genere di masse partecipanti come percentuale della massa totale)

Analisi modale con spettro di risposta

Consiste nel valutare separatamente la risposta della struttura vincolata a deformarsi secondo ciascuno dei suoi modi di oscillazione . . .

. . . e poi combinare le massime sollecitazioni (o spostamenti) trovati per i singoli modi con criteri statistici

- SRSS = radice quadrata della somma dei quadrati
- CQC = combinazione quadratica completa

Analisi modale con spettro di risposta

Combinazione dei risultati:

- È opportuno usare sempre la CQC

$$E = \left(\sum_j \sum_i \rho_{ij} \cdot E_i \cdot E_j \right)^{1/2}$$

con:

E_j valore dell'effetto relativo al modo j ;

ρ_{ij} coefficiente di correlazione tra il modo i e il modo j , calcolato con formule di comprovata validità quale:

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{\xi_i \cdot \xi_j} (\beta_{ij} \cdot \xi_i + \xi_j) \cdot \beta_{ij}^{3/2}}{(1 - \beta_{ij}^2)^2 + 4 \cdot \xi_i \cdot \xi_j \cdot \beta_{ij} (1 + \beta_{ij}^2) + 4 \cdot (\xi_i^2 + \xi_j^2) \cdot \beta_{ij}^2} \quad [7.3.5a]$$

che, nel caso di uguale smorzamento dei modi i e j , si esprime come:

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2 \beta_{ij}^{3/2}}{(1 + \beta_{ij}) \cdot [(1 - \beta_{ij})^2 + 4\xi^2 \beta_{ij}]} \quad [7.3.5b]$$

ξ_{ij} smorzamento viscoso dei modi i e j ;

β_{ij} è il rapporto tra l'inverso dei periodi di ciascuna coppia i - j di modi ($\beta_{ij} = T_j/T_i$).

Analisi modale con spettro di risposta

Consiste nel valutare separatamente la risposta della struttura vincolata a deformarsi secondo ciascuno dei suoi modi di oscillazione . . .

. . . e poi combinare le massime sollecitazioni (o spostamenti) trovati per i singoli modi con criteri statistici

- SRSS = radice quadrata della somma dei quadrati
- CQC = combinazione quadratica completa

- Attenzione: nel fare la combinazione si perde il segno (che può essere utile);
ma se c'è un modo prevalente si può assegnare a ciascun valore il segno che esso ha nel modo prevalente

Contributo dei singoli modi

Il primo modo è nettamente predominante per entità di massa partecipante. Le forze sono tutte dello stesso verso

Gli altri modi hanno masse partecipanti via via minori. Essi danno forze discordi, che producono un effetto minore rispetto alla base

In generale, è opportuno considerare tanti modi da:

- raggiungere una massa partecipante dell'85%
- non trascurare modi con massa partecipante superiore al 5%

Contributo dei singoli modi

Il primo modo è nettamente predominante per entità di massa partecipante. Le forze sono tutte dello stesso verso.

Gli altri modi hanno entità di massa partecipante minori. Essi danno luogo a minori effetti.

Il primo modo è nettamente predominante



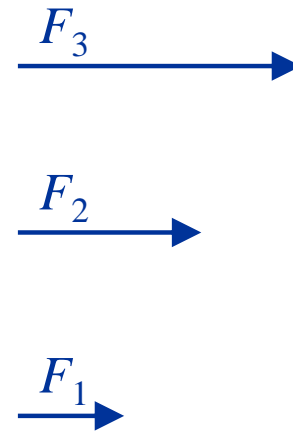
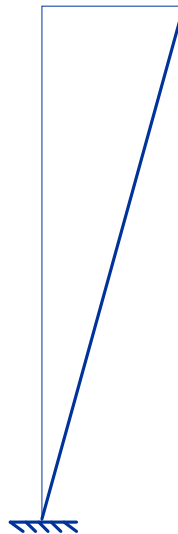
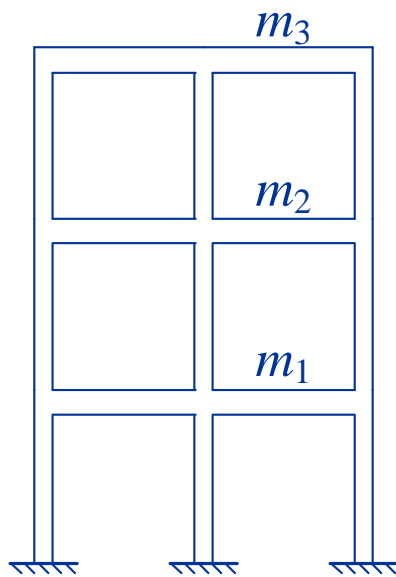
Possiamo fare ulteriori semplificazioni

In generale:

- raggiungere un valore di massa partecipante superiore al 5%
- non trascurare modi con massa partecipante superiore al 5%

Analisi statica

Se si considera solo un modo (il primo), assumendo per esso una deformata lineare, si ha la cosiddetta analisi statica

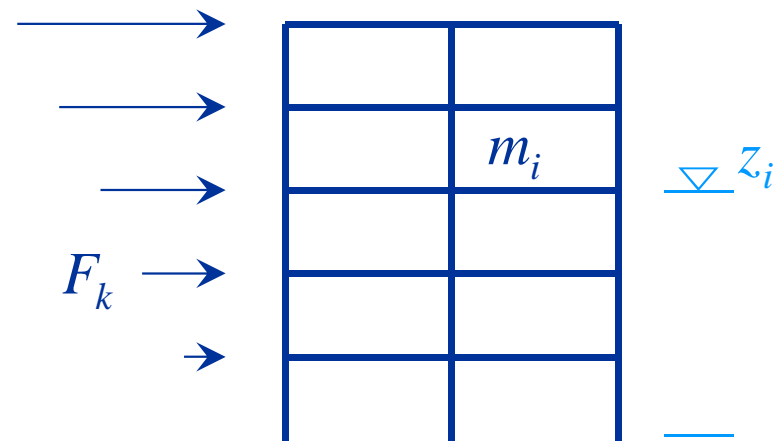


Forze
corrispondenti alla
forma lineare

Analisi statica

Consiste nel considerare un unico insieme di forze, che rappresentano (in modo semplificato) l'effetto del primo modo

$$F_k = m_k z_k \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n m_i z_i} S_e(T_1)$$



Il periodo proprio può essere valutato con formule semplificate

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

Le forze possono essere ridotte con $\lambda=0.85$ se l'edificio ha almeno 3 piani e periodo non troppo alto

Considerazioni: analisi statica o analisi modale?

- L'analisi statica ha un significato fisico facilmente comprensibile (applicare alla struttura un insieme di forze orizzontali)
- In molti casi l'analisi statica fornisce risultati quasi uguali o leggermente cautelativi rispetto all'analisi modale
- L'analisi statica può però presentare seri problemi:
 - per strutture non regolari
 - per strutture molto deformabili

Risposta oltre il limite elastico

È possibile progettare le strutture
in modo che rimangano in campo elastico?

L'accelerazione massima del suolo, per terremoti
con elevato periodo di ritorno, è molto forte (0.35 g
in zone ad alta sismicità)

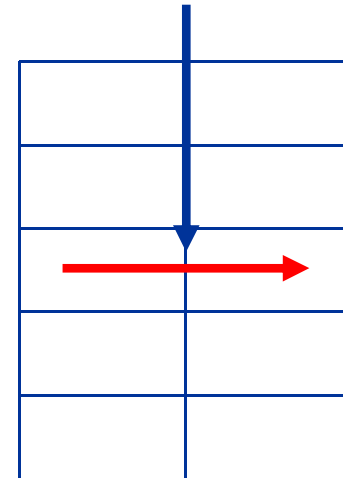
Per strutture con periodo medio-bassi si ha una
notevole amplificazione dell'accelerazione, rispetto
a quella del suolo (circa 2.5 volte)

Le azioni inerziali (forze orizzontali indotte dal
sisma) possono essere comparabili con le azioni
verticali

È possibile progettare le strutture
in modo che rimangano in campo elastico?

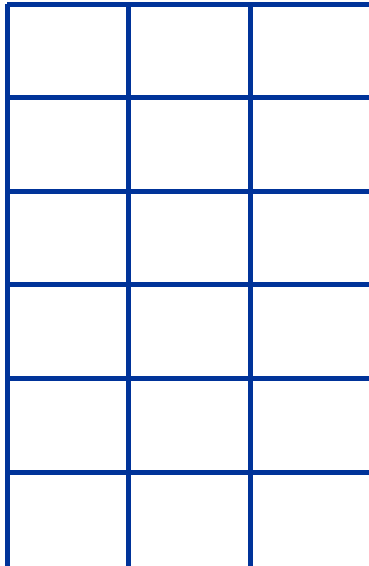
Azioni orizzontali comparabili
con le azioni verticali

Le sollecitazioni provocate
dalle azioni orizzontali sono
molto forti



Non è economicamente conveniente progettare la
struttura in modo che rimanga in campo elastico

Comportamento oltre il limite elastico



Modello per i materiali

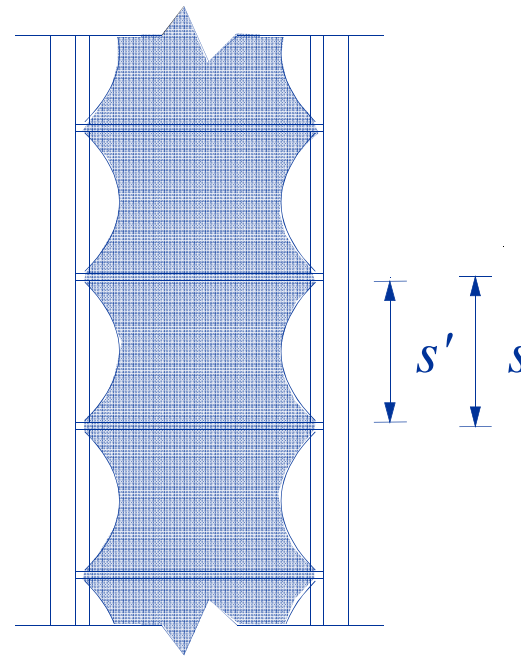
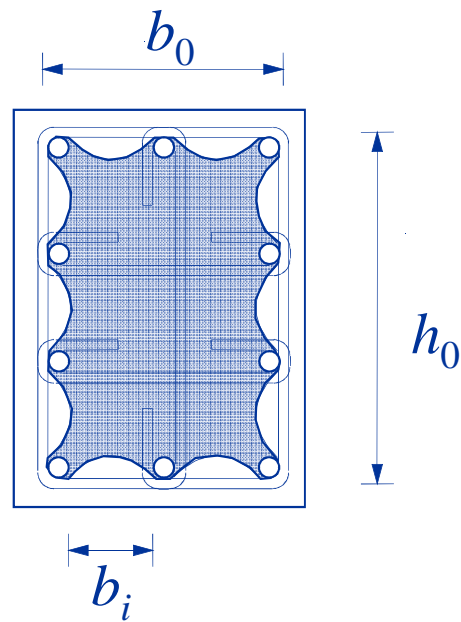


Legame momento-curvatura
($M-\chi$) per la sezione
mediante modello a fibre

Modello per i materiali calcestruzzo

Problemi:

- Distinzione tra ricoprimento e nucleo confinato
- Efficacia del confinamento



Calcestruzzo

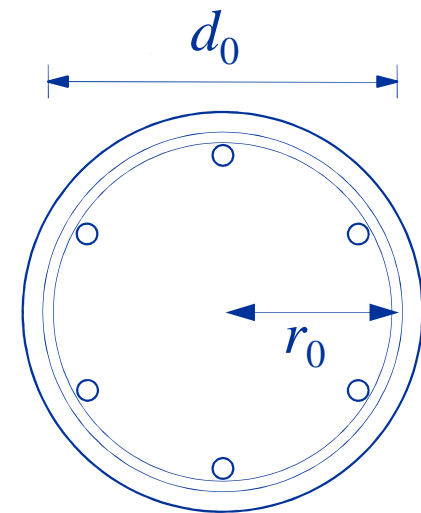
confinamento dovuto alle staffe

Staffe in una sezione circolare

Quando il calcestruzzo compresso si dilata le staffe danno una compressione trasversale

$$\sigma_{c,trasv} = 0.5 \omega_{st} f_c$$

con
$$\omega_{st} = \frac{2 A_{st} f_y}{s r_0 f_c}$$



La compressione trasversale migliora il comportamento del calcestruzzo

Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

Staffe in una sezione circolare

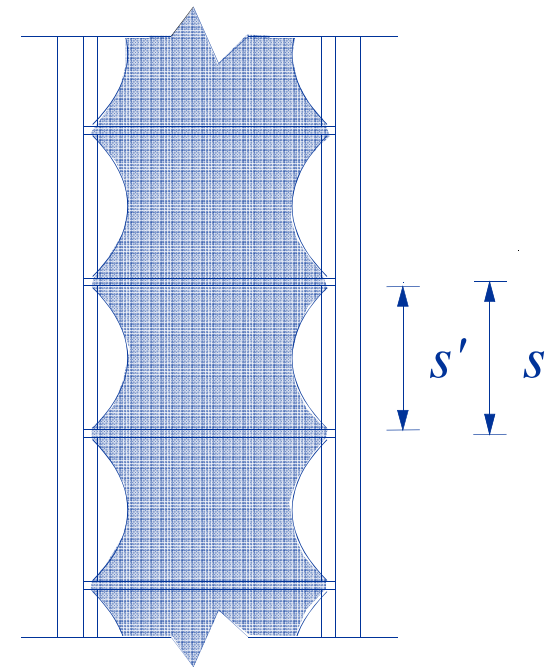
Efficacia del confinamento

Allontanandosi dalla staffa, la zona confinata si riduce

Si considera un coefficiente di efficacia pari al rapporto tra volume effettivamente confinato e volume idealmente racchiuso dalle staffe

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{3 d_0}\right)^2$$

quindi $\sigma_{c,transv} = 0.5 \alpha_s \omega_{st} f_c$



Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

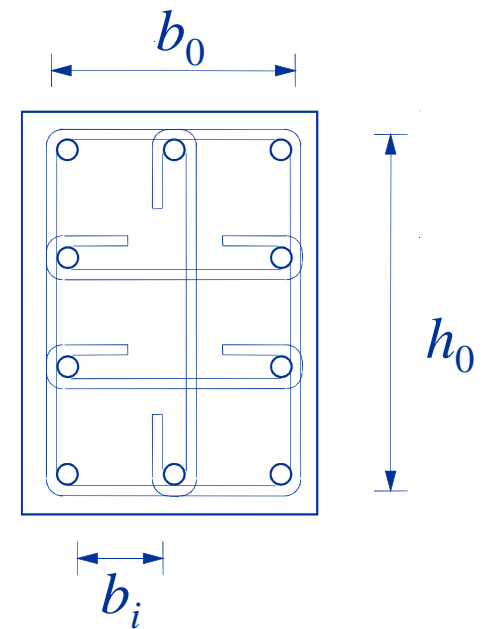
Staffe in una sezione rettangolare

Quando il calcestruzzo compresso si dilata le staffe danno una compressione trasversale

$$\sigma_{c,trasv} = 0.5 \omega_{st} f_c$$

con

$$\omega_{st} = \frac{\sum A_{st} l_{st} f_y}{b_0 h_0 s f_c}$$



Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

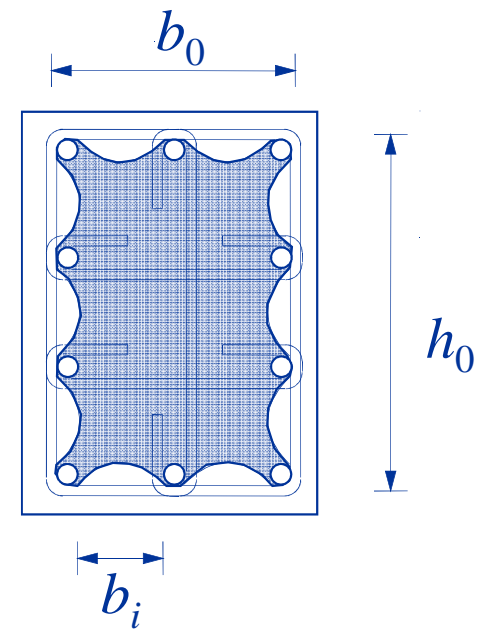
Staffe in una sezione rettangolare

Efficacia del confinamento

Staffe e tirantini sono meno efficaci quando ci si allontana dai punti ben bloccati

Si considera un coefficiente di efficacia

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 b_0 h_0}$$



Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

Staffe in una sezione rettangolare

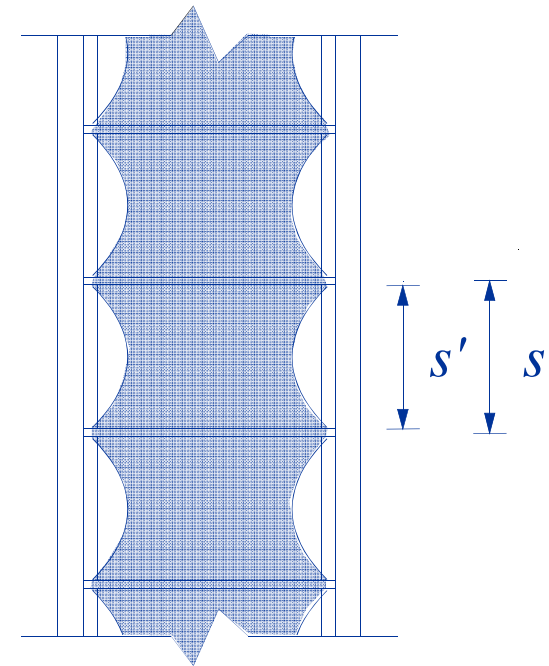
Efficacia del confinamento

Anche in senso longitudinale c'è una riduzione dell'efficacia del confinamento

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{3b_0}\right) \left(1 - \frac{s'}{3h_0}\right)$$

quindi $\sigma_{c,trasv} = 0.5 \alpha \omega_{st} f_c$

con $\alpha = \alpha_s \alpha_n$



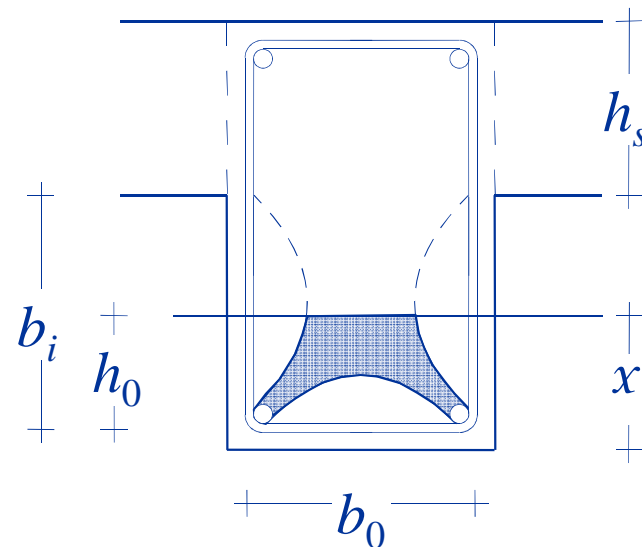
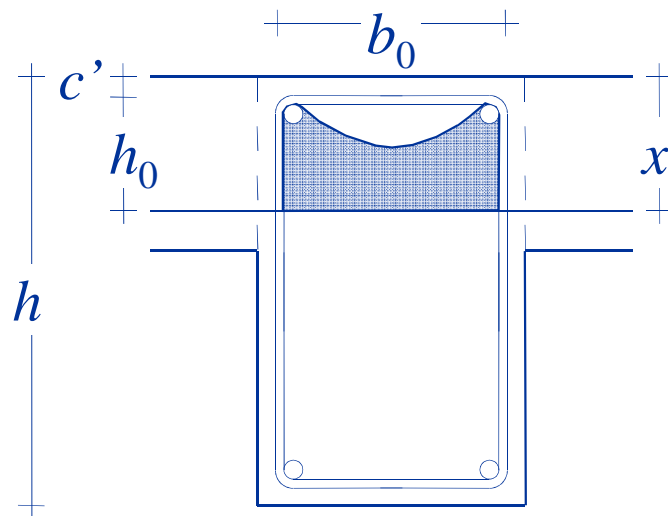
Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

Staffe in una trave a sezione rettangolare

Efficacia del confinamento

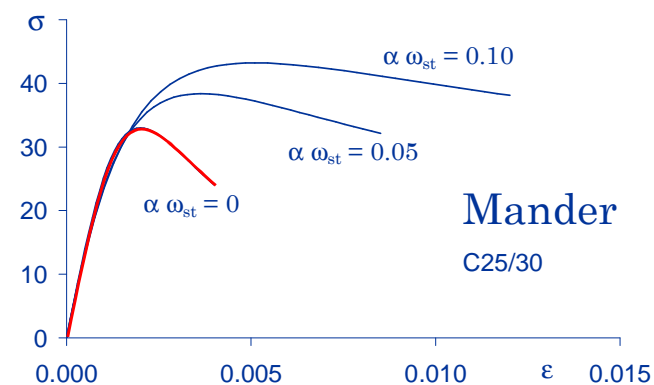
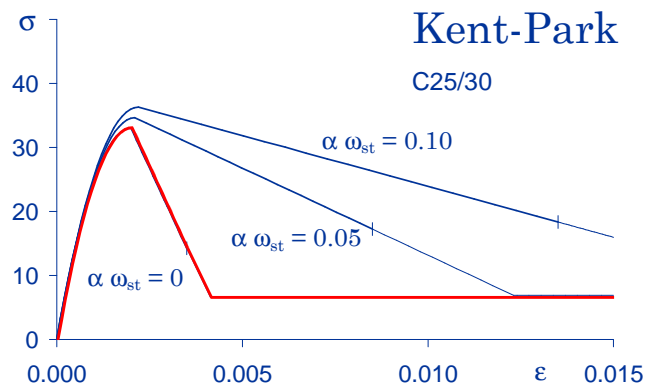
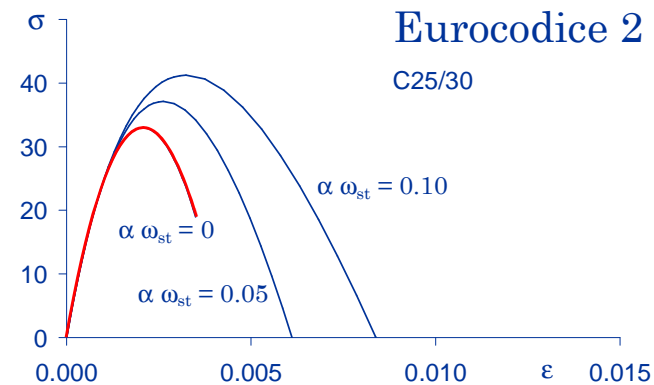
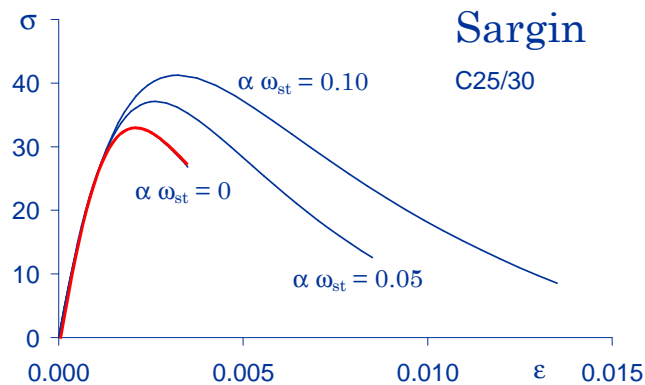
Nel valutare l'efficacia del confinamento bisogna tener conto di qual è la parte compressa e come viene confinata



Modello per i materiali calcestruzzo

Modelli:

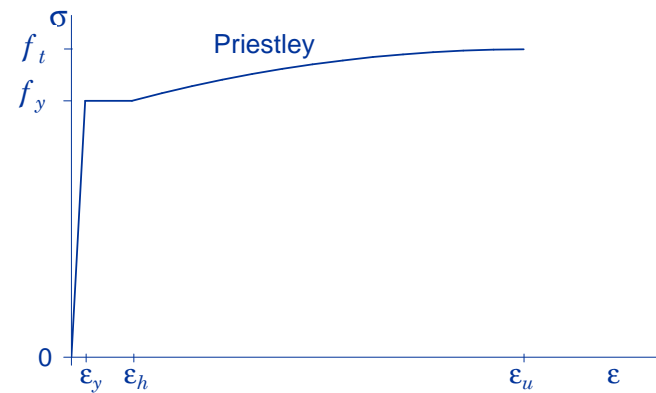
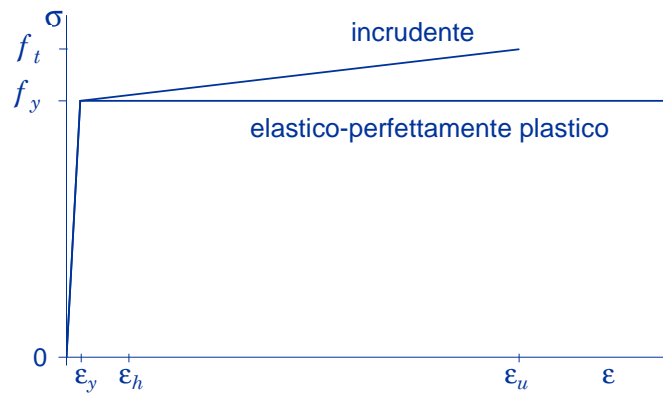
- Esistono numerose proposte, molto diverse



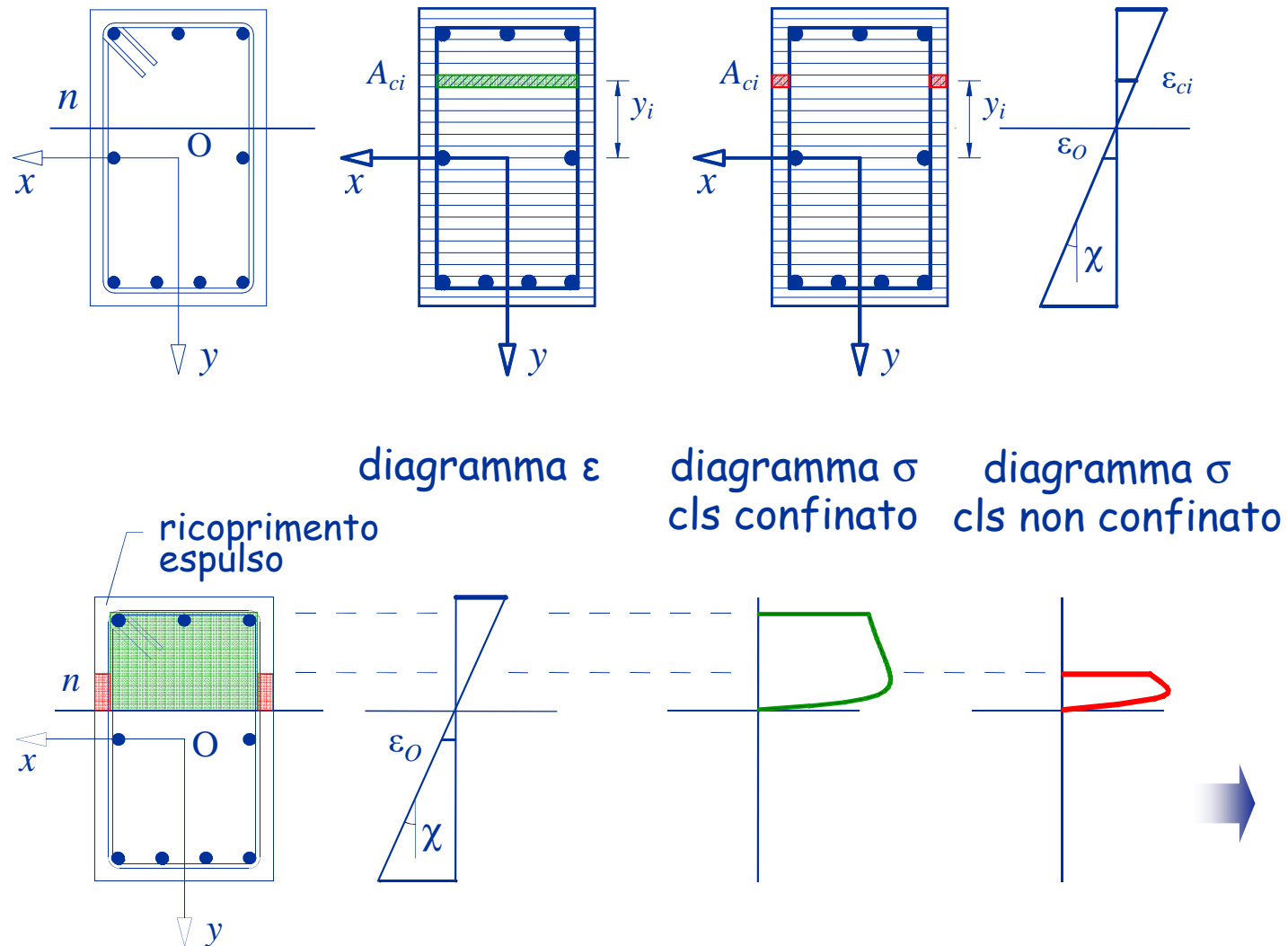
Modello per i materiali acciaio

Modelli:

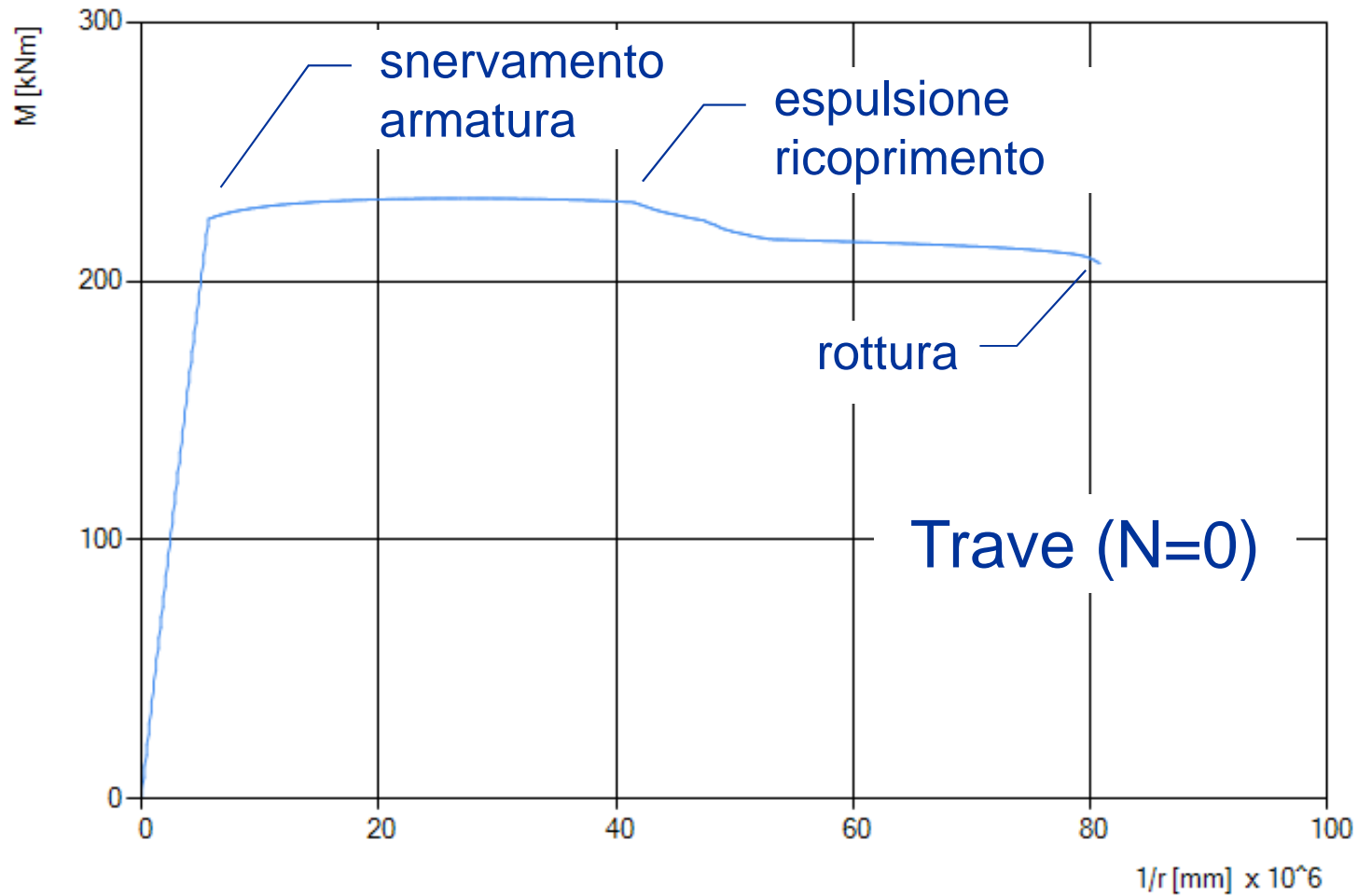
- Esistono alcune proposte, leggermente diverse



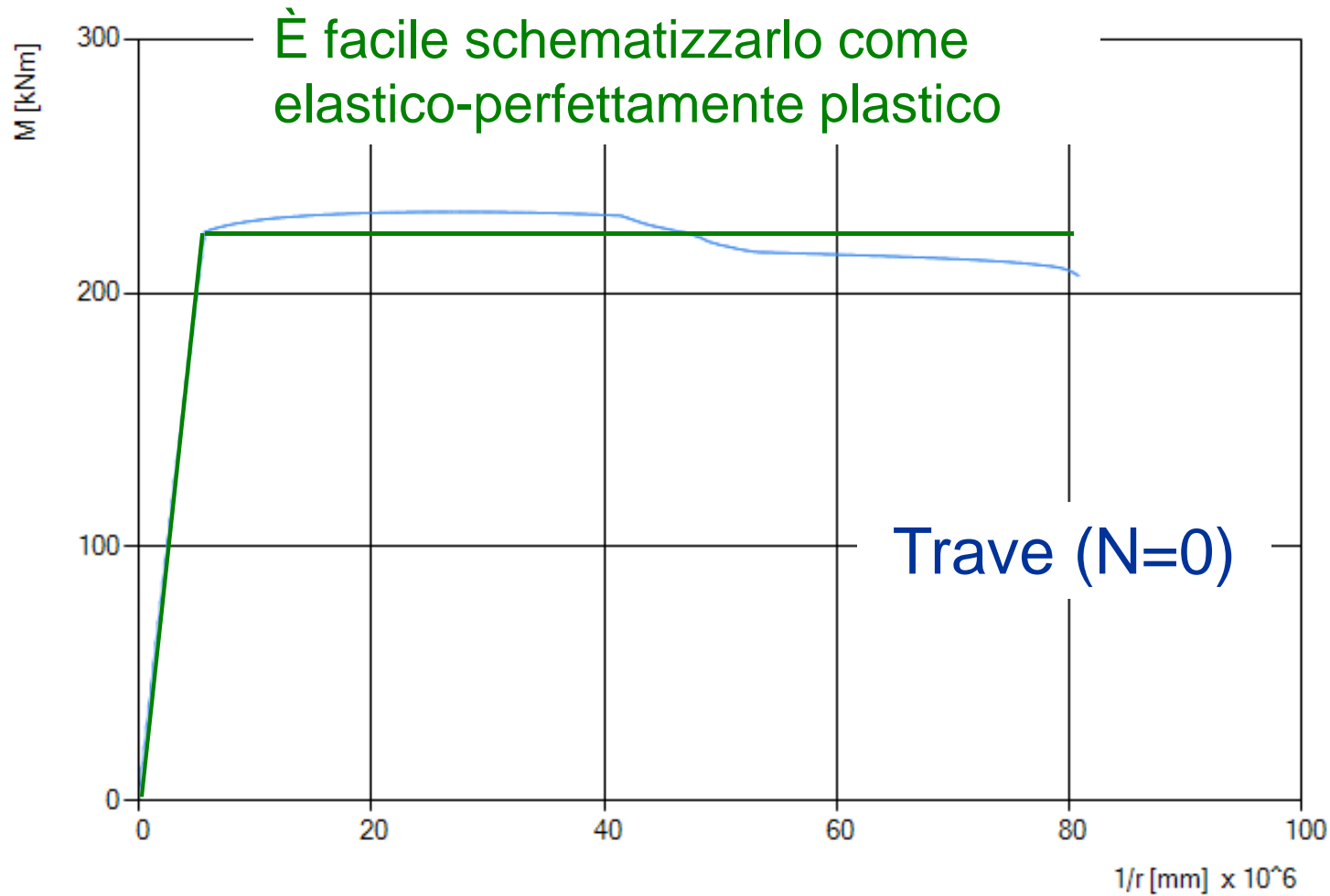
Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



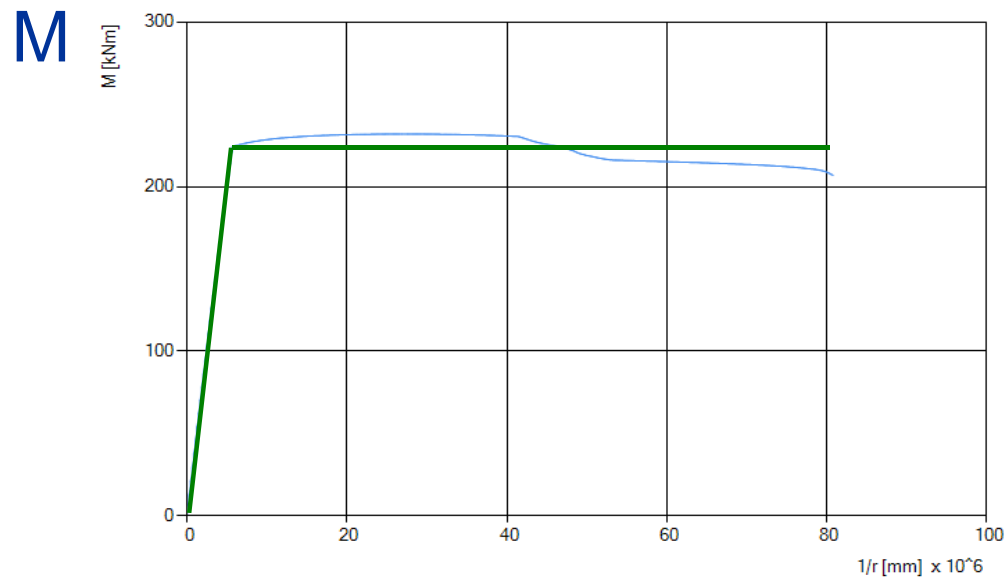
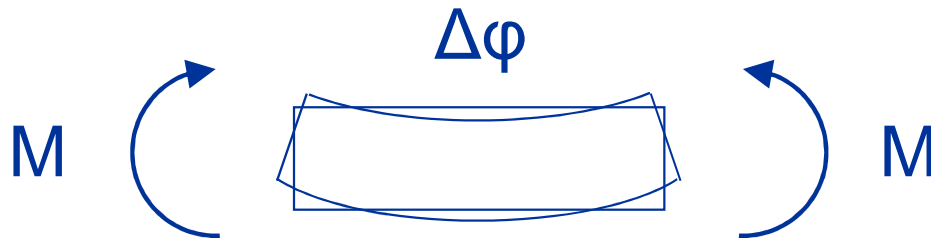
Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



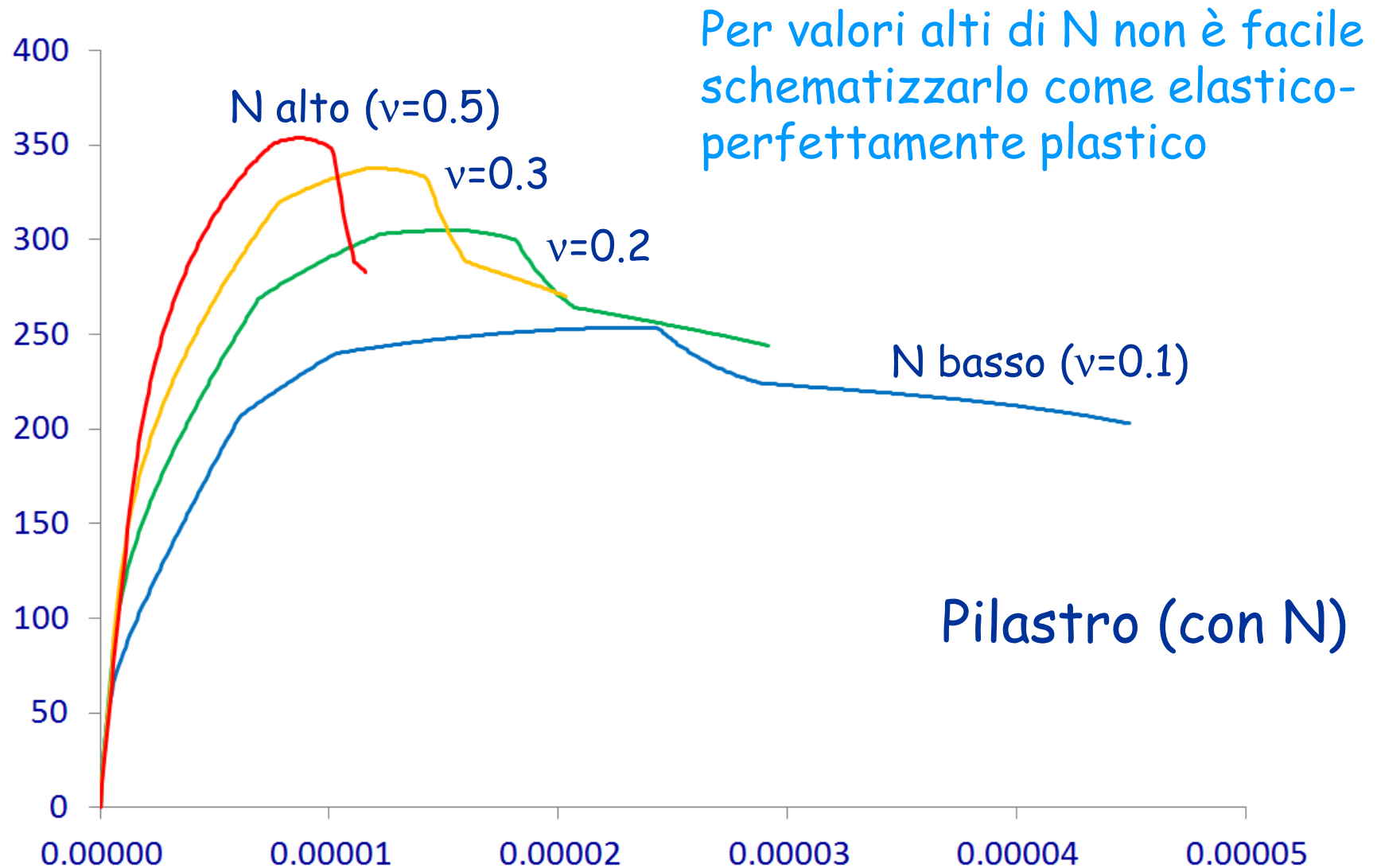
Cerniera plastica concio di trave



$$1/r \Rightarrow \Delta\varphi$$

Trave ($N=0$)

Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



Legame momento-curvatura

Applicazioni

Per applicazioni numeriche è messo a disposizione il programma RC_NL (versione 2.5a), che determina il legame momento curvatura per una qualsiasi sezione

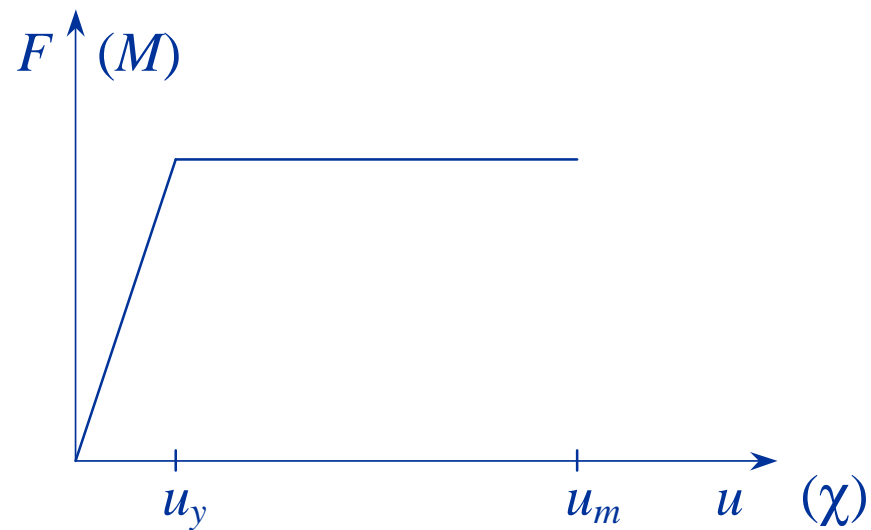
- È fornito il programma di installazione (cartella RC_NL-25a_setup): eseguire il file Setup per installare il programma
- È fornita una documentazione con istruzioni per l'uso e alcuni esempi (cartella RC_NL-25a_documentazione)

Risposta sismica

Schemi a un grado di libertà
in campo plastico

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico

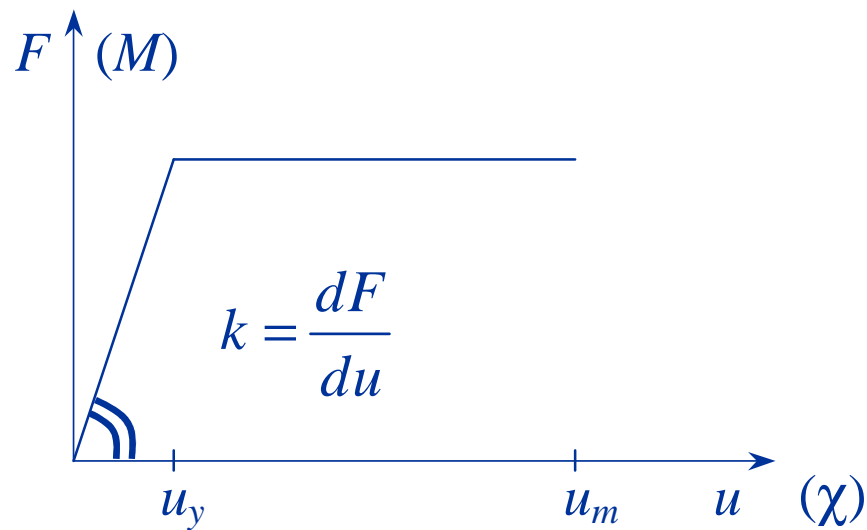


È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



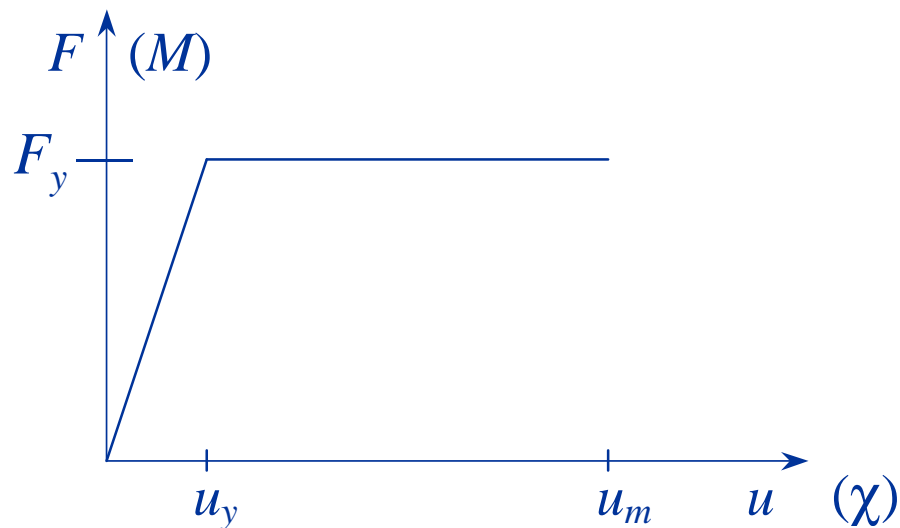
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Rigidezza = inclinazione del diagramma

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



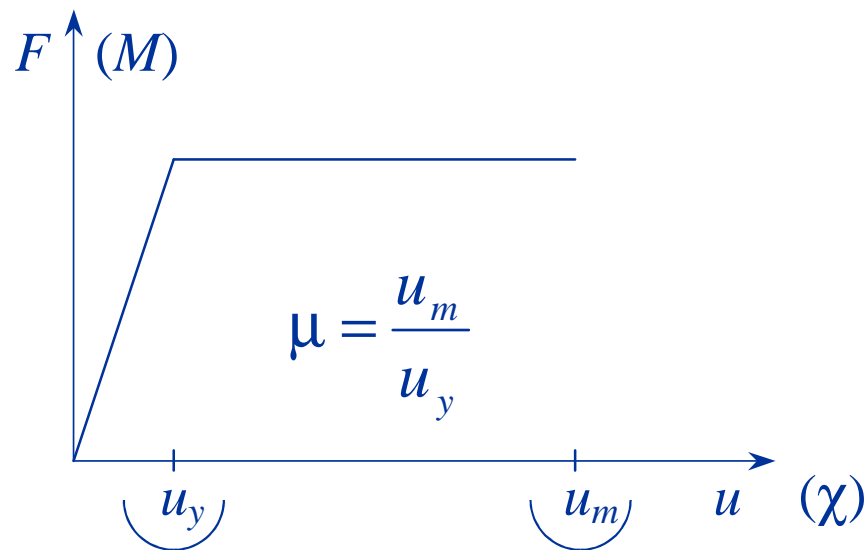
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Resistenza = soglia di plasticizzazione

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



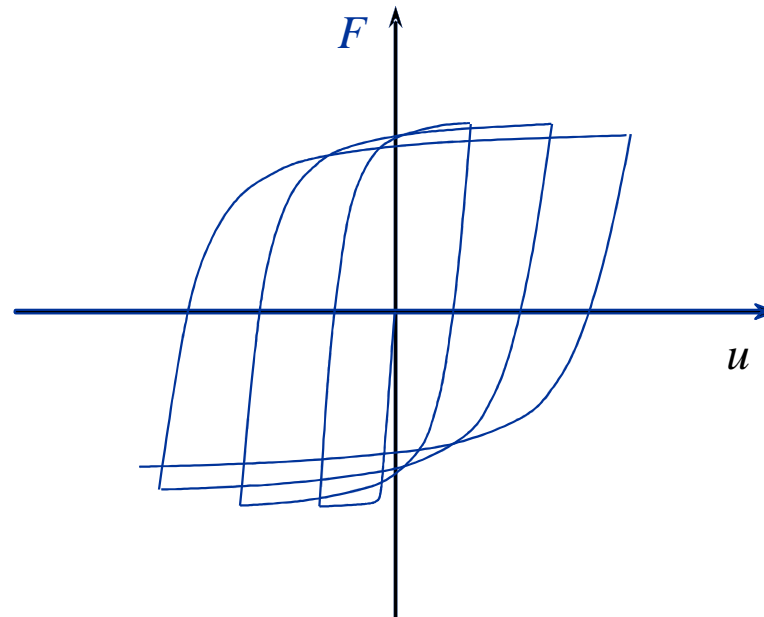
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente

Comportamento oltre il limite elastico

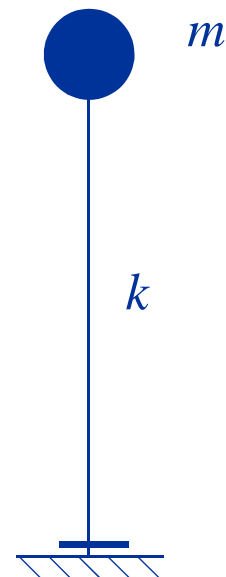
Per una valutazione della risposta sismica, occorre anche tener conto del comportamento ciclico, con i possibili degradi di rigidezza e resistenza



Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

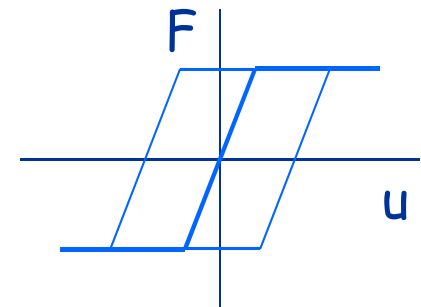


Foto

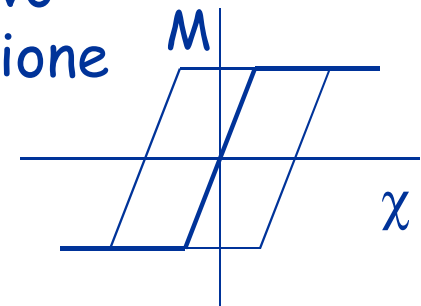


Modello
di calcolo

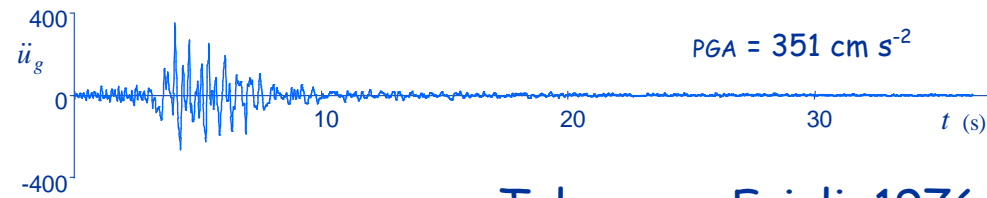
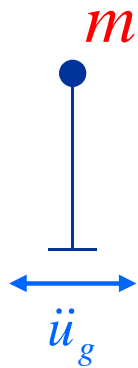
Legame costitutivo
della struttura



Legame
costitutivo
della sezione



Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico



Tolmezzo, Friuli, 1976

È possibile
determinare
numericamente
la risposta ad un
accelerogramma

Noti i valori di u, \dot{u}, \ddot{u} in un certo
istante t_1 ed il valore di \ddot{u}_g tra t_1 e
 $t_1 + \Delta t$ si possono ricavare i valori di
 u, \dot{u}, \ddot{u} nell'istante $t_1 + \Delta t$

Si tiene conto della rigidezza in quel
 Δt (pari a k oppure nulla)

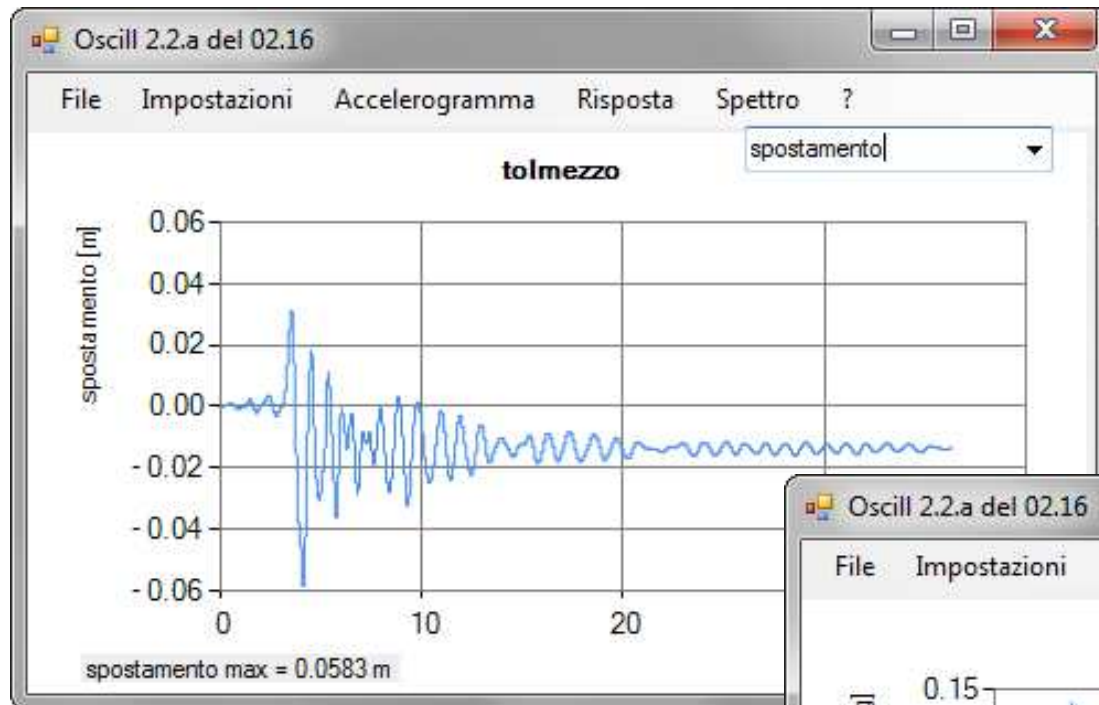
Si ottiene la risposta nel tempo (time history)

Determinazione della time history

Metodo di Newmark

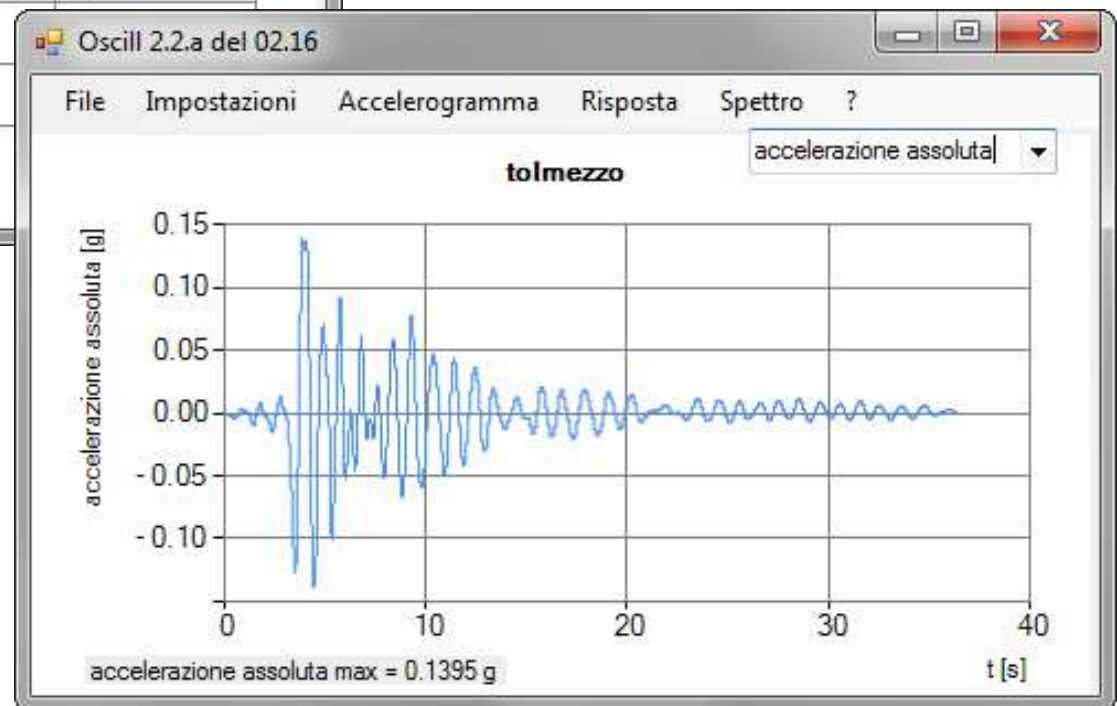
- Analoga a quanto visto per oscillatore lineare
- Nell'equazione di equilibrio dinamico la forza di richiamo f_s non è elastica, quindi non è proporzionale allo spostamento u
- L'equazione di equilibrio dinamico è
$$m \Delta \ddot{u} + c \Delta \dot{u} + \Delta f_s = -m \Delta \ddot{u}_g$$
- La si deve risolvere con procedimento iterativo, perché $f_{s,2}$ è legata a u_2 in maniera non lineare

Risposta sismica non lineare programma Oscill

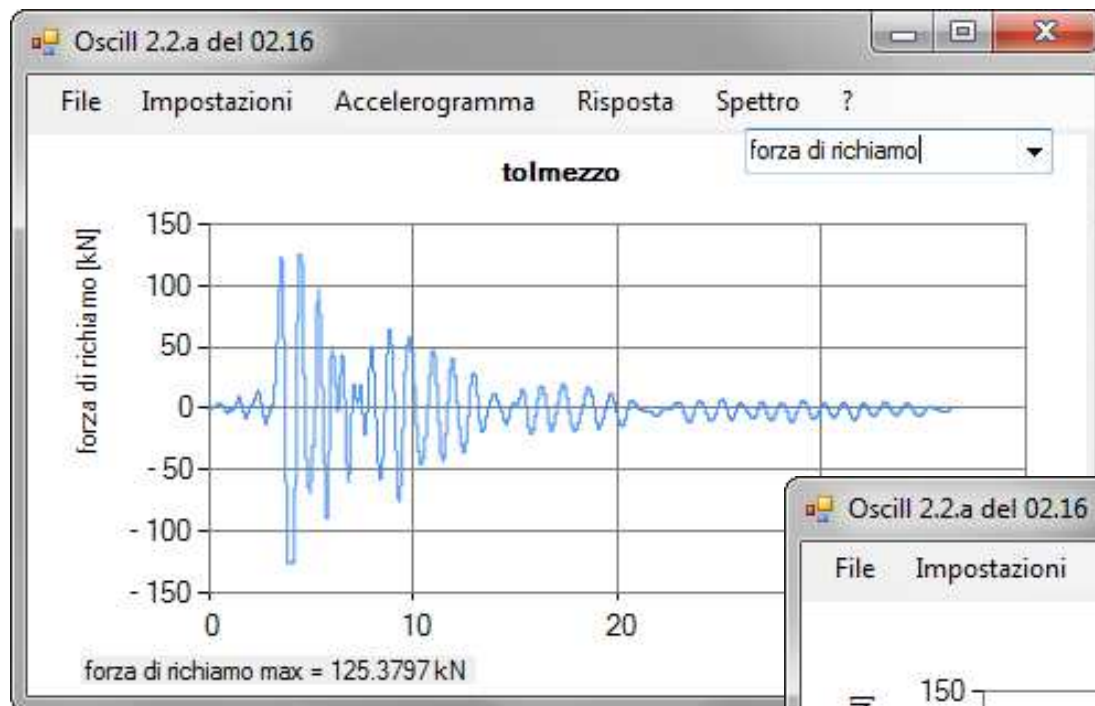


spostamento:
rimane uno spostamento
residuo al termine del
sisma

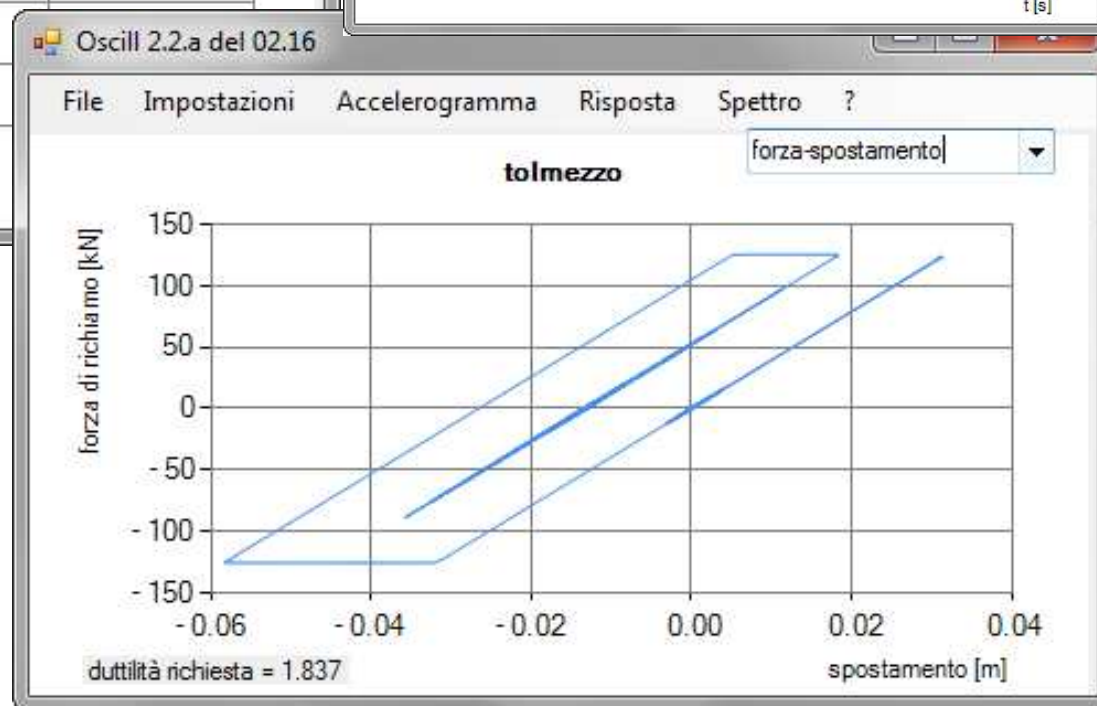
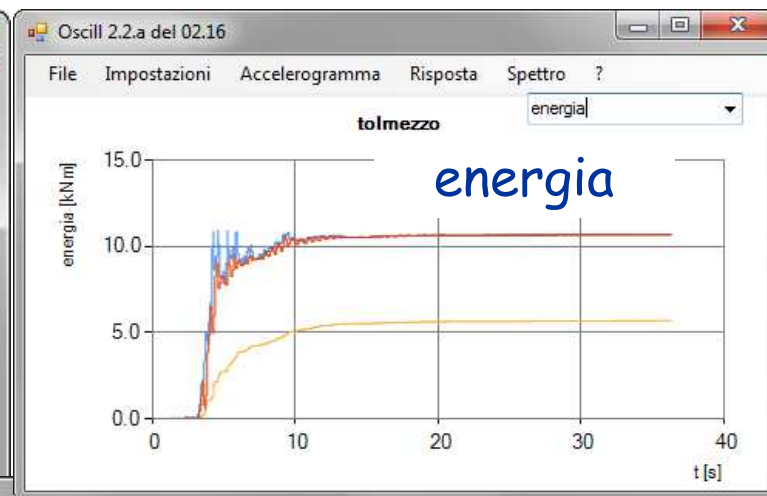
accelerazione



Risposta sismica non lineare programma Oscill



forza di richiamo:
non supera il valore di
resistenza assegnato

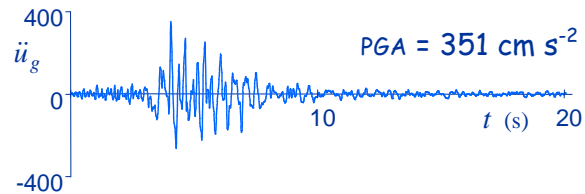


legame forza-spostamento

Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

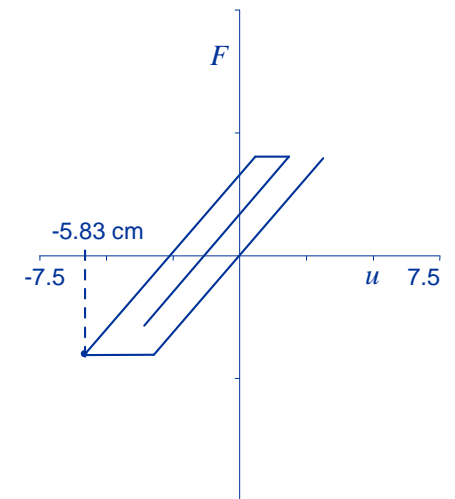
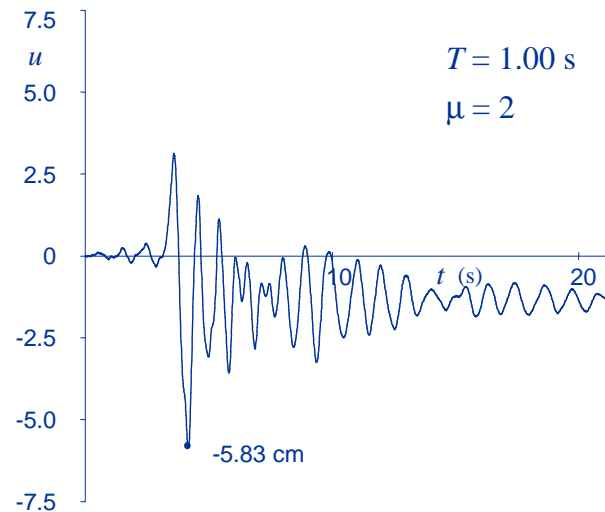
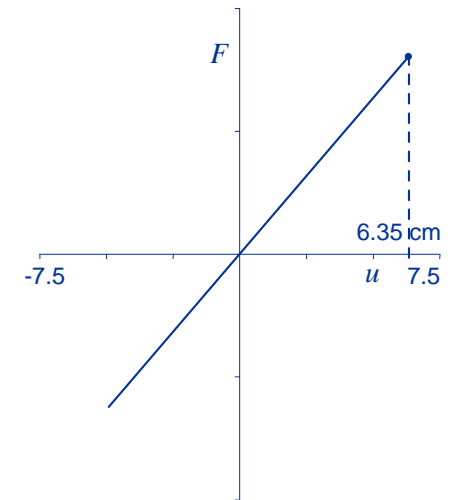
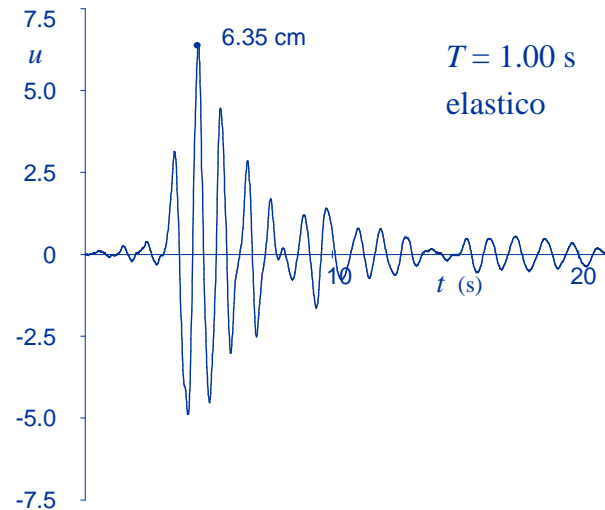
Risposta
elastica

Input sismico



Tolmezzo, Friuli, 1976

Risposta
elasto-plastica

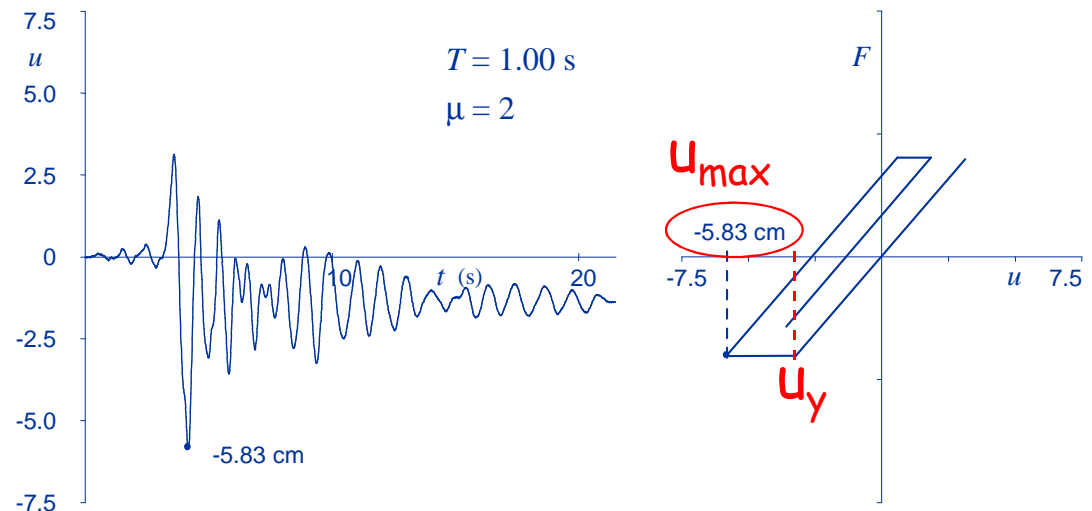


Richiesta di duttilità

Il rapporto tra lo spostamento massimo u_{\max} ottenuto come risposta al sisma e lo spostamento u_y di plasticizzazione è la duttilità necessaria al sistema per non collassare (richiesta di duttilità)

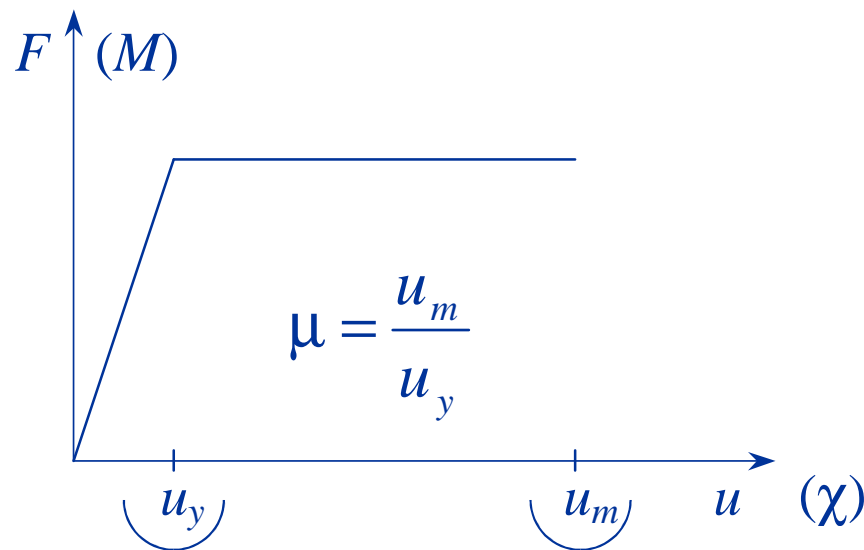
In genere,
tanto minore è la
resistenza
tanto maggiore è la
richiesta di duttilità

Risposta
elasto-plastica



Duttilità disponibile

Legame elastico-perfettamente plastico



La duttilità che una sezione possiede può essere indicata come **duttilità disponibile**

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente

Progettazione di strutture elasto-plastiche

- Una struttura dovrebbe essere progettata con forze elevate se la si vuole mantenere in campo elastico
- Una struttura progettata con forze minori va in campo plastico, ma può superare il terremoto se la duttilità disponibile delle singole sezioni è maggiore della richiesta di duttilità
- Per giudicare se la struttura, pur andando in campo plastico, è in grado di superare il terremoto occorre esprimere un giudizio sulla duttilità e quindi su deformazioni, spostamenti

Displacement based design

Progettazione di strutture elasto-plastiche

- Una struttura dovrebbe essere progettata con forze elevate se la si vuole mantenere in campo elastico
- Una struttura progettata con forze minori va in campo plastico, ma può superare il terremoto se la duttilità disponibile delle singole sezioni è maggiore della richiesta di duttilità

Idea base della progettazione sismica:

- Progettare le strutture con forze più basse, facendo affidamento sulla duttilità

Force based design

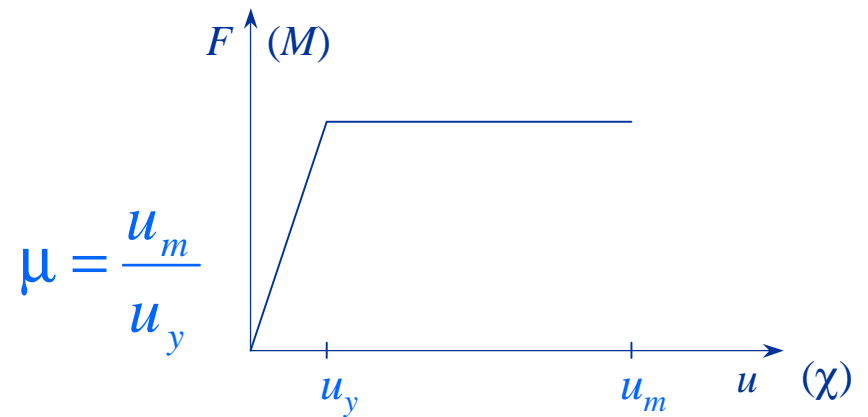
Progettazione a duttilità assegnata

- Nota la duttilità, si può ricavare l'accelerazione (e quindi le forze) di progetto dagli spettri di risposta a duttilità assegnata.
- Risolvendo lo schema strutturale soggetto a queste forze (con analisi lineare) si verificano le sezioni.
- Se la struttura sopporta queste azioni ed ha la duttilità prevista, può sopportare (in campo inelastico) il terremoto.

Force based design

Progettazione a duttilità assegnata

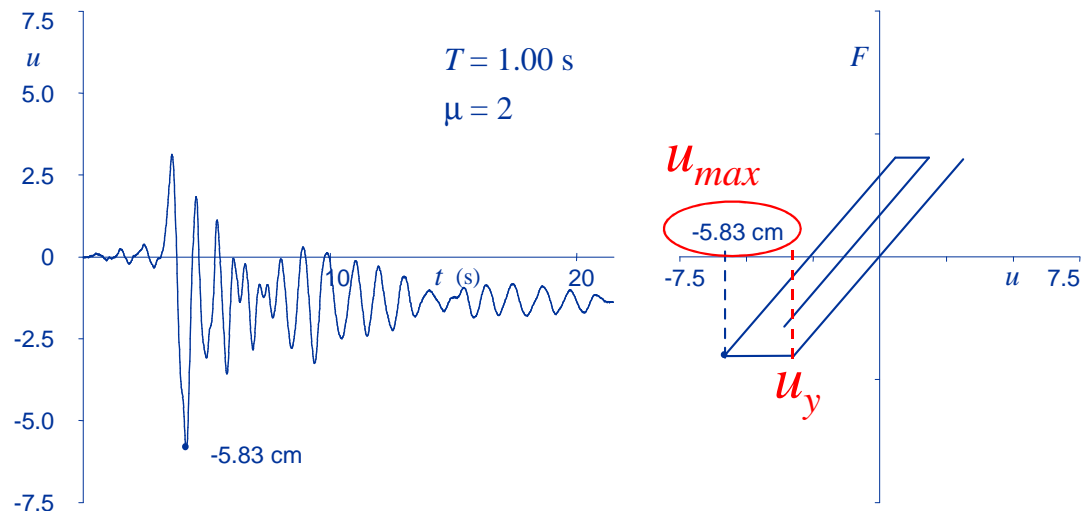
È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile



sia maggiore di
quella richiesta

$$\mu = \frac{u_{\max}}{u_y}$$

Risposta
elasto-plastica



Progettazione a duttilità assegnata

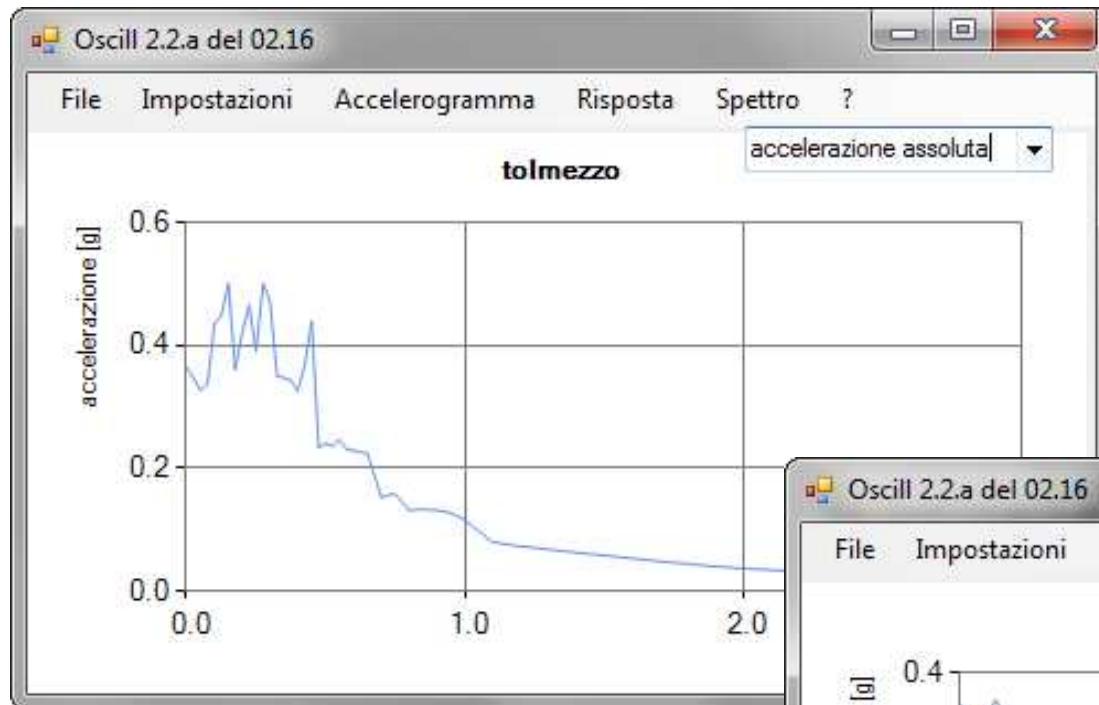
La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta



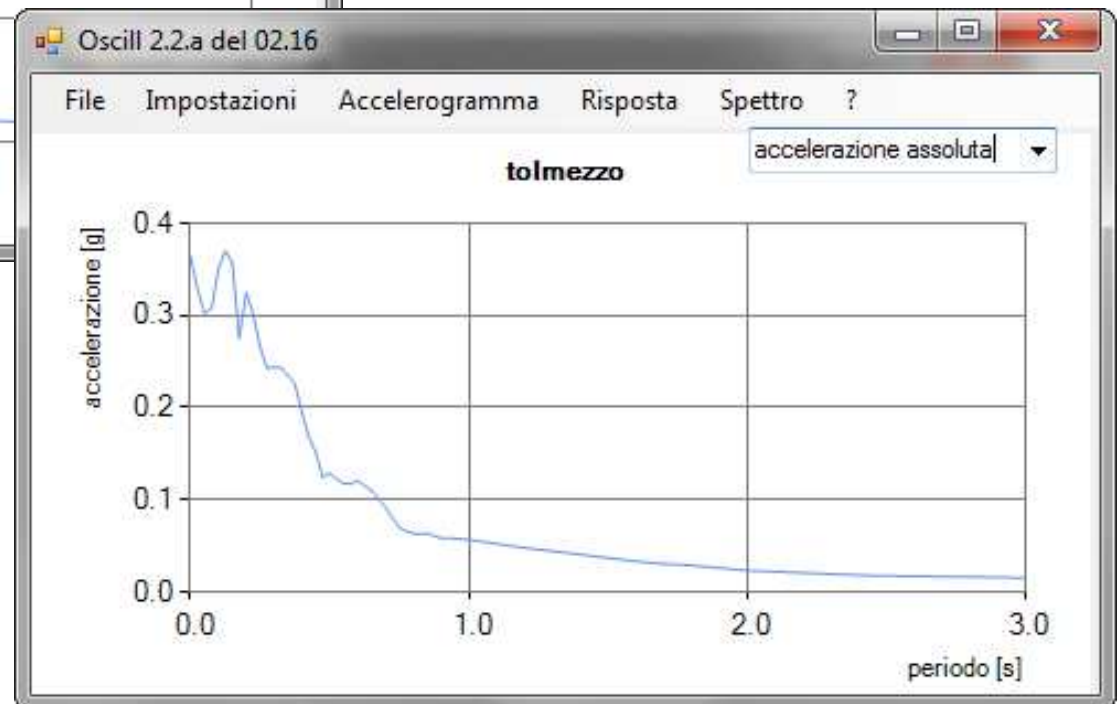
Ricordando che $F = m a$,
si può diagrammare in
funzione del periodo
l'accelerazione da usare
nel progetto,
per assegnati valori
della duttilità μ

Spettro di risposta a duttilità assegnata

Spettro di risposta a duttilità assegnata (programma Oscill)



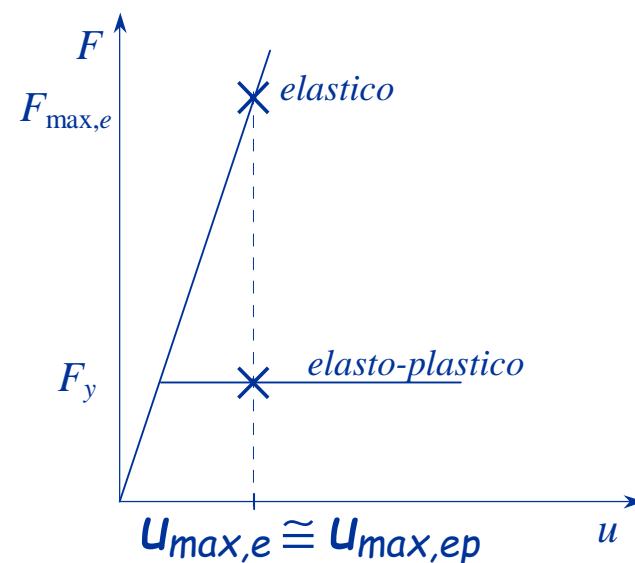
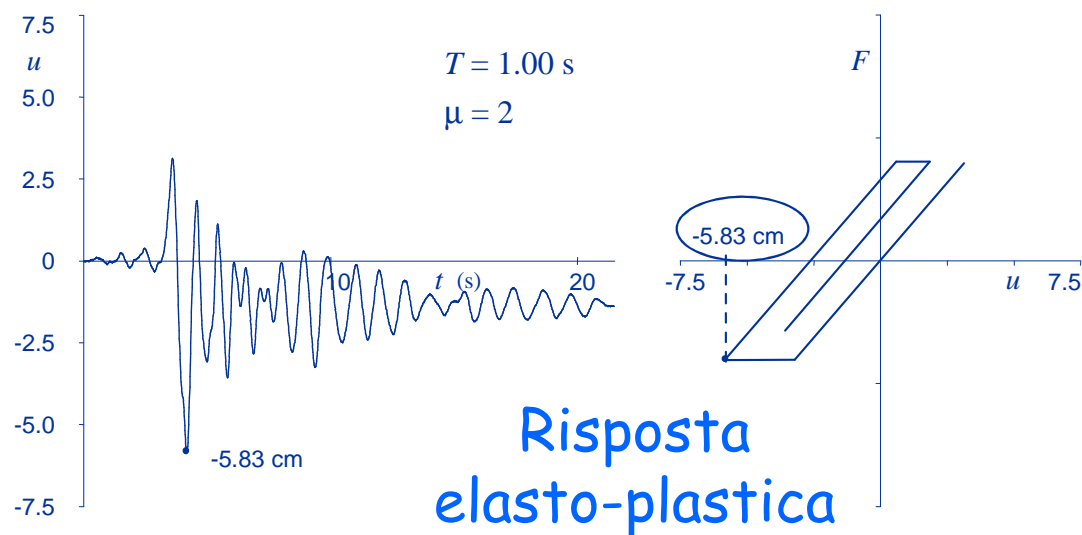
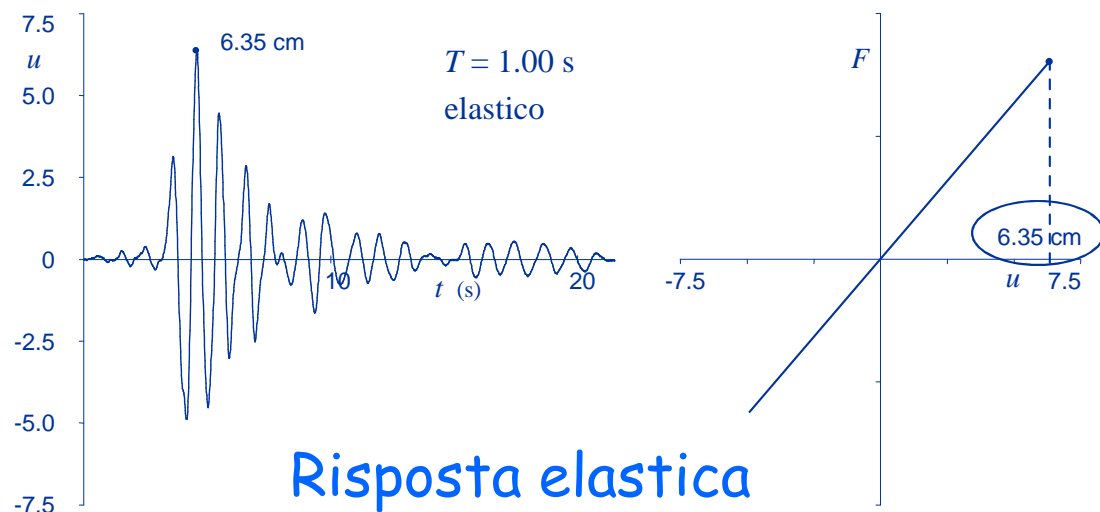
duttilità 2



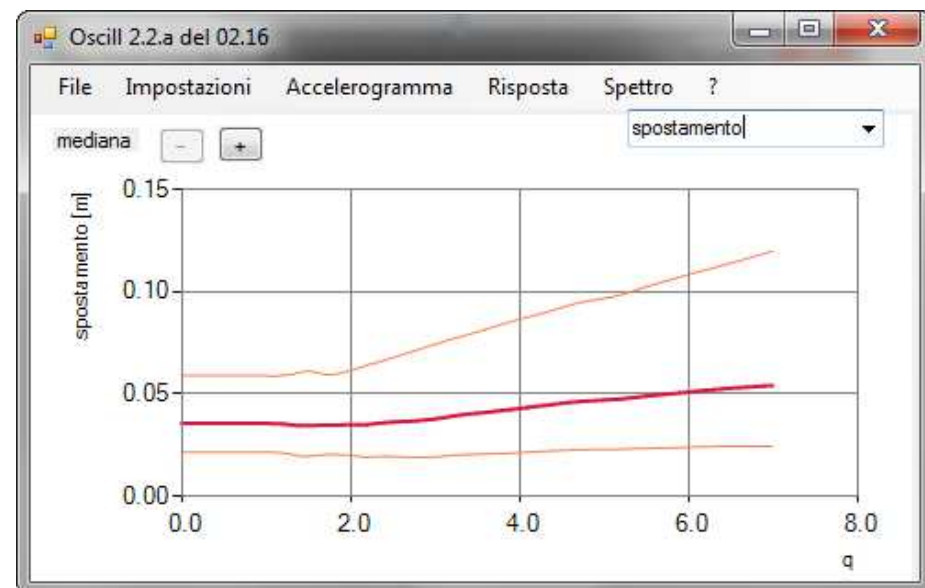
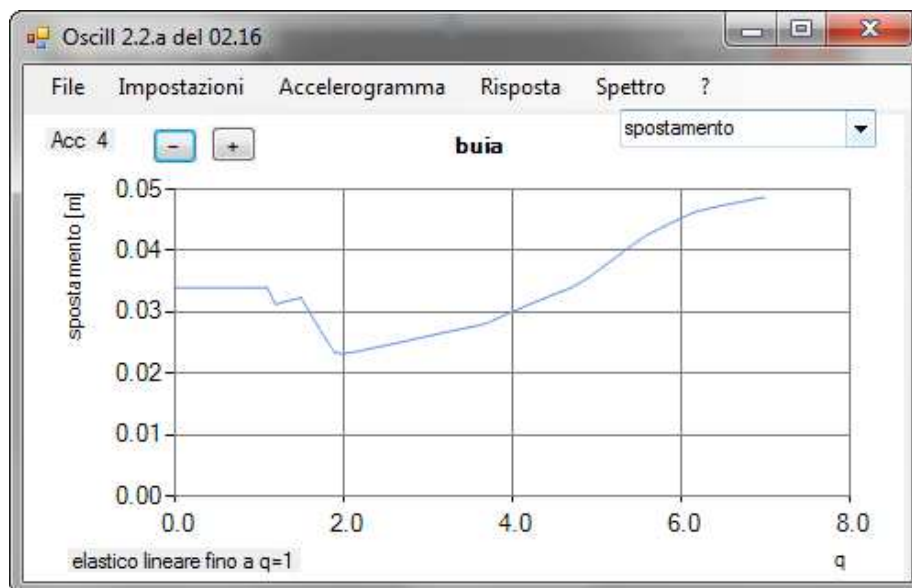
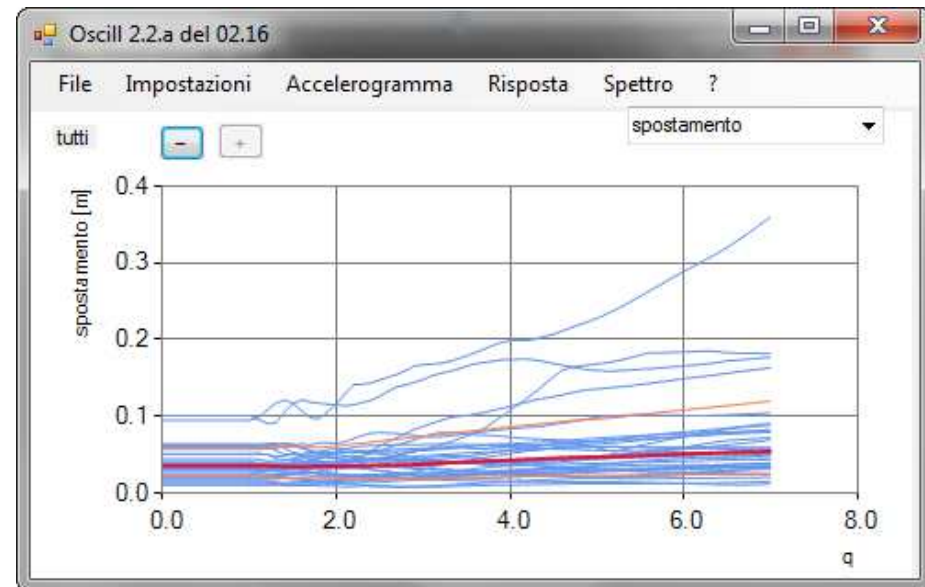
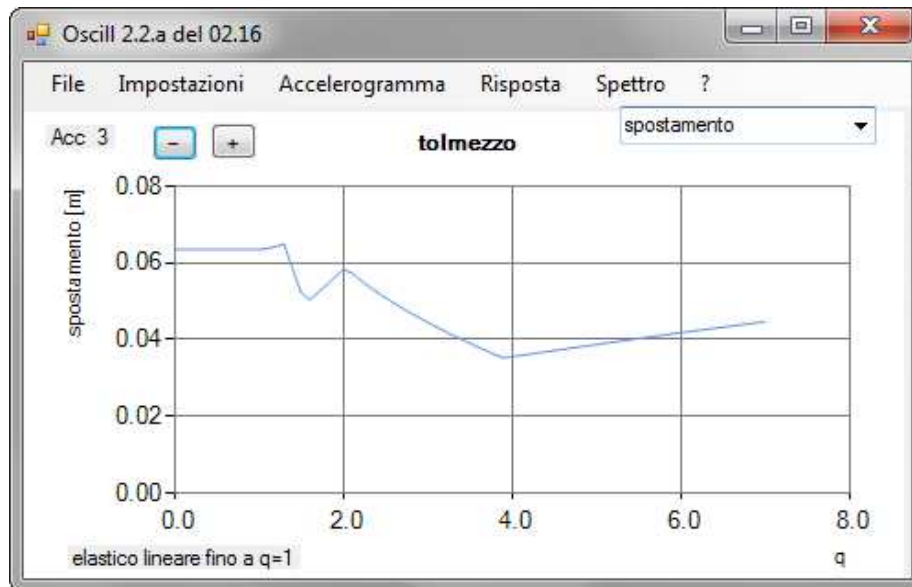
duttilità 4

Progettazione a duttilità assegnata

Le analisi numeriche mostrano che lo spostamento di schemi elastici ed elasto-plastici è più o meno lo stesso



Spostamento al variare della resistenza (programma Oscill)



Progettazione a duttilità assegnata

La forza di progetto
può essere ottenuta
dividendo

 F_d

la forza necessaria
per mantenere la
struttura in campo
elastico

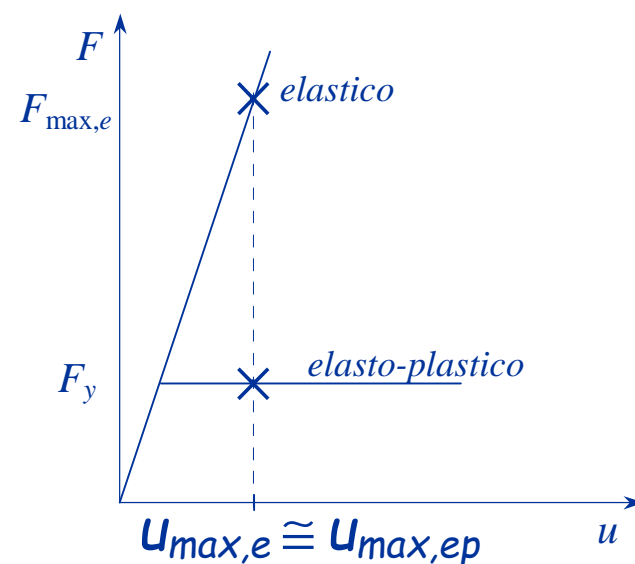
 $F_{\max,e}$

per la duttilità

 μ

$$F_d = F_y = \frac{F_{\max,e}}{\mu}$$

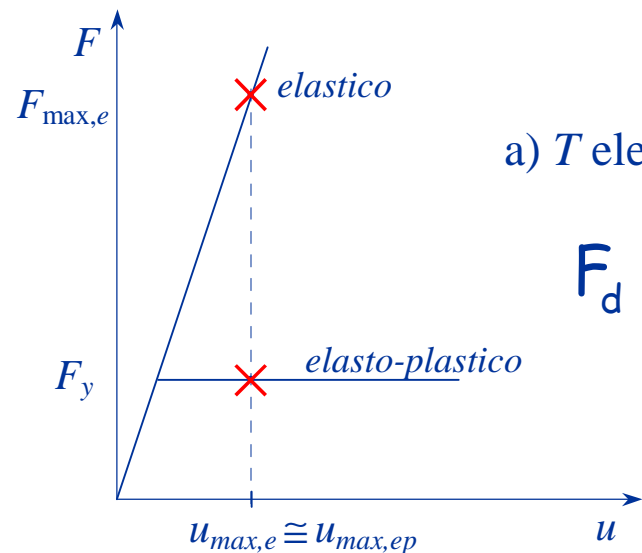
Le analisi numeriche
mostrano che lo
spostamento di
schemi elastici ed
elasto-plastici è più
o meno lo stesso



Progettazione a duttilità assegnata

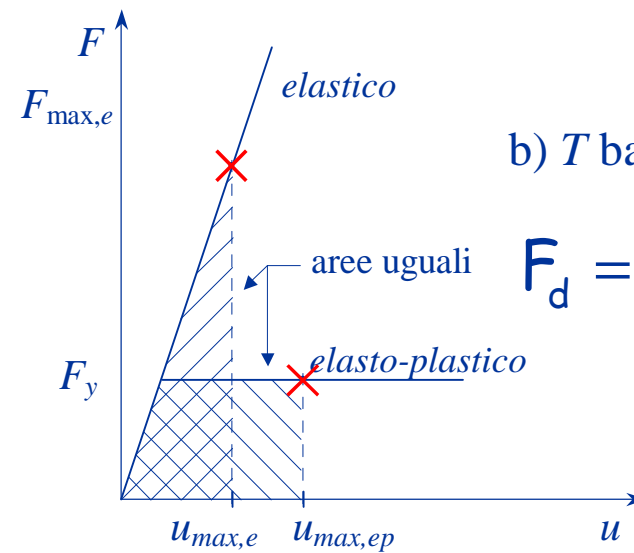
Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo
per strutture con periodo medio-alto

Per strutture con periodo basso si può pensare ad
una uguaglianza in termini energetici



a) T elevato

$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\mu}$$



b) T basso

$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\sqrt{2\mu - 1}}$$

Progettazione a duttilità assegnata

Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo per strutture con periodo medio-alto

Per strutture con periodo basso si può pensare ad una uguaglianza in termini energetici

Le attuali normative indicano:

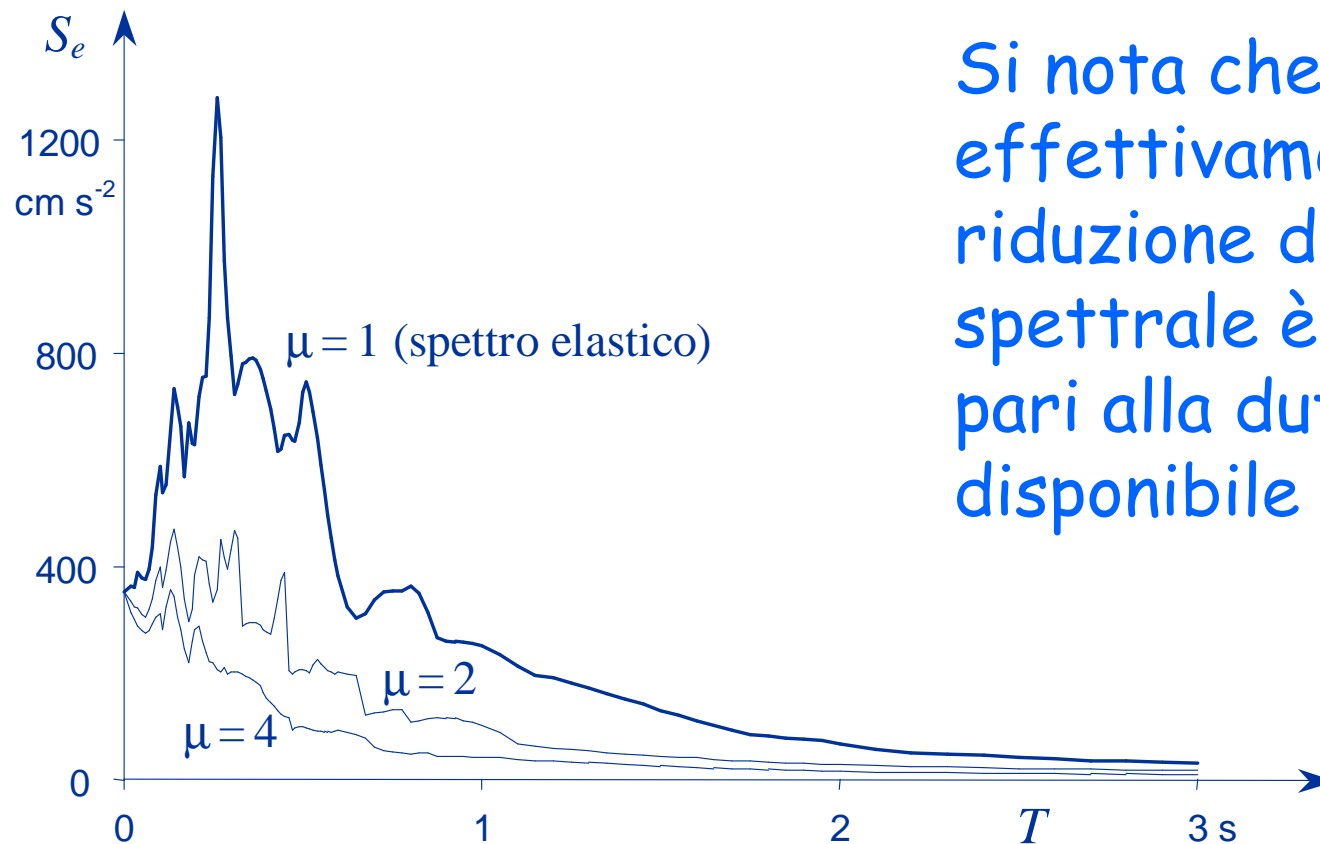
$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\mu} \quad \text{per } T_1 \geq T_c$$

$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{1 + (\mu - 1) T_1 / T_c} \quad \text{per } T_1 < T_c$$

Nota:
queste espressioni
sono in genere
usate all'inverso,
per ricavare μ

Progettazione a duttilità assegnata

La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta

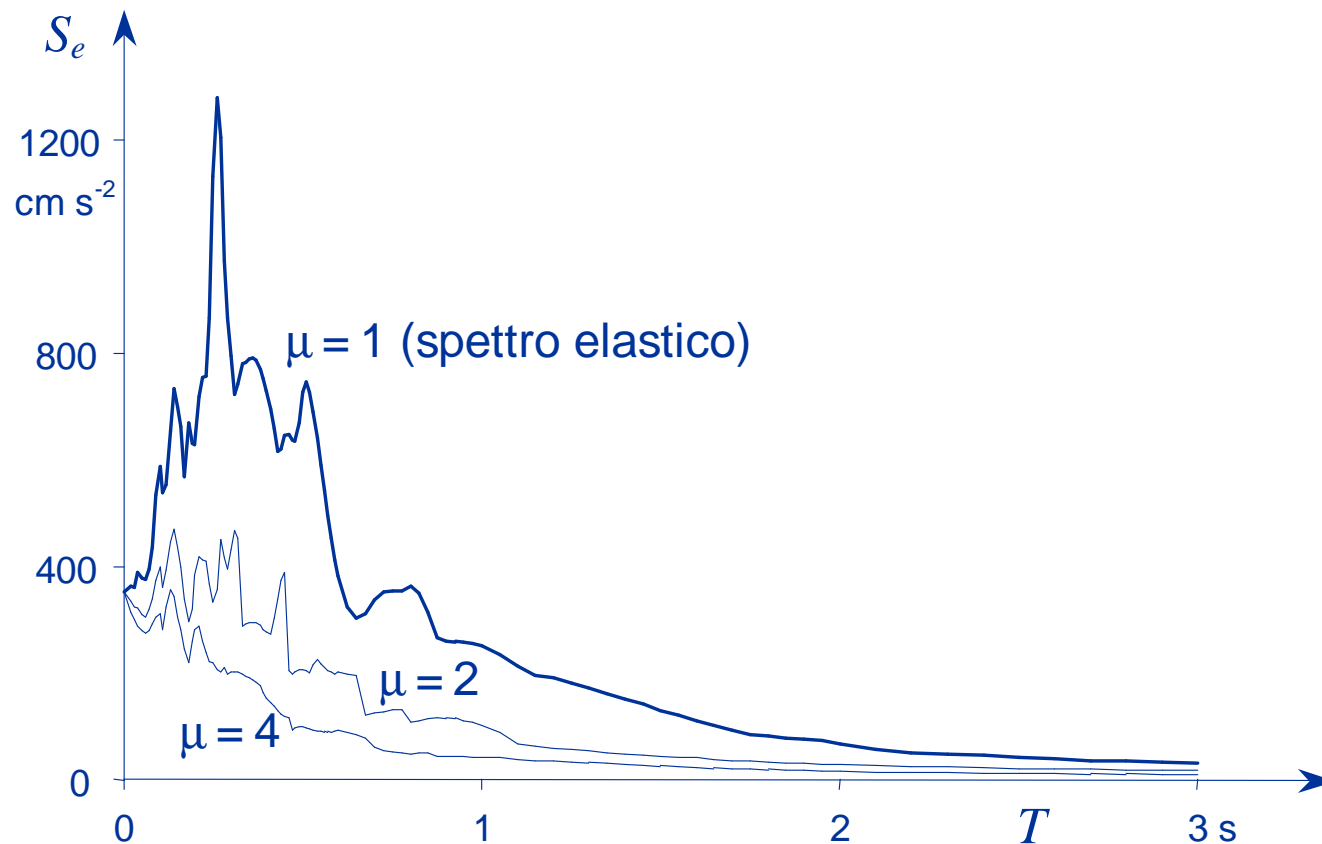


Si nota che
effettivamente la
riduzione dell'ordinata
spettrale è, più o meno,
pari alla duttilità
disponibile

Spettro di risposta a duttilità assegnata

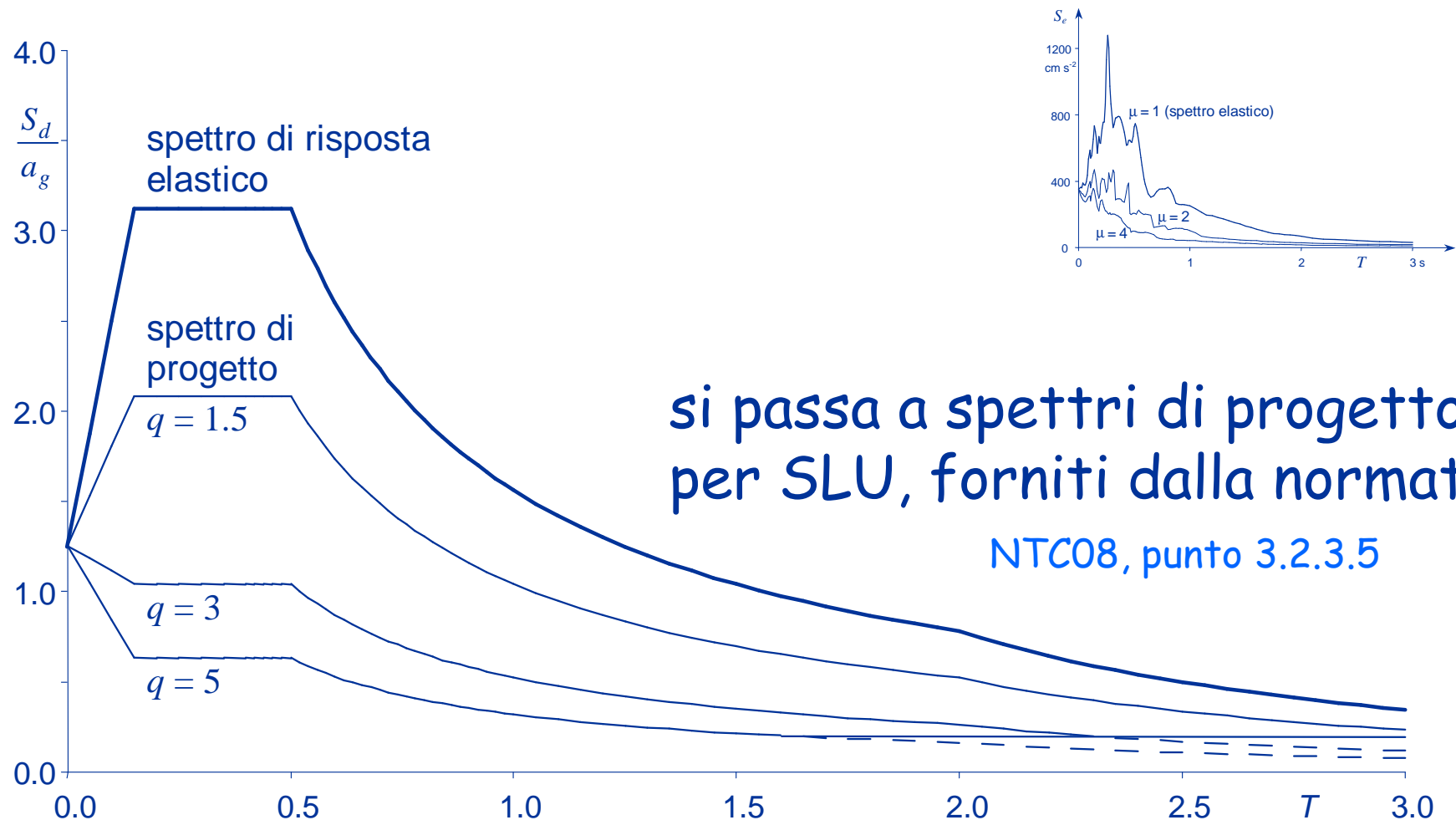
Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



In definitiva

- Massa, rigidezza (e smorzamento) caratterizzano il comportamento elastico, ma ovviamente incidono anche sul comportamento non lineare
- Resistenza e duttilità, insieme, consentono di superare indenni un sisma oltre il limite elastico
 - La struttura può avere una resistenza tale da rimanere in campo elastico (ma spesso costa troppo)
 - La struttura può avere una resistenza minore e quindi danneggiarsi, ma supererà l'evento sismico se ha una adeguata duttilità (ma anche questo ha un costo)
 - Si deve scegliere se puntare più sulla resistenza o più sulla duttilità

Progetto delle strutture

a) basarsi sulle forze

- Decidere quanto si vuol fare affidamento sulla duttilità e in base a questo scegliere le forze di progetto
- Dimensionare la struttura in modo che sopporti queste forze (progetto della **resistenza**)
- Controllare, anche solo qualitativamente o col rispetto di regole predefinite, che la struttura abbia la duttilità necessaria

Questo è il criterio normalmente seguito

Progetto delle strutture

b) basarsi sugli spostamenti

- Valutare gli spostamenti che la struttura dovrà subire durante il terremoto
- Progettare gli elementi strutturali in modo da garantire che essi siano in grado di sopportare questi spostamenti (progetto della duttilità)
- Controllare che la struttura abbia comunque una resistenza tale da evitare danneggiamenti precoci

Questo è il cosiddetto “displacement based design”

Verifica delle strutture

- Se si sono seguiti i criteri di progetto ed i relativi controlli sono soddisfatti, si può ritenere che la struttura sia in grado di sopportare l'evento sismico
- Se si ha a che fare con una struttura che non è stata progettata secondo i criteri citati (o che per qualche motivo non li soddisfa a pieno) occorre valutare il comportamento non lineare della struttura ed esprimere un giudizio sulla sua capacità deformativa ancor più che sulla sua resistenza

Risposta sismica

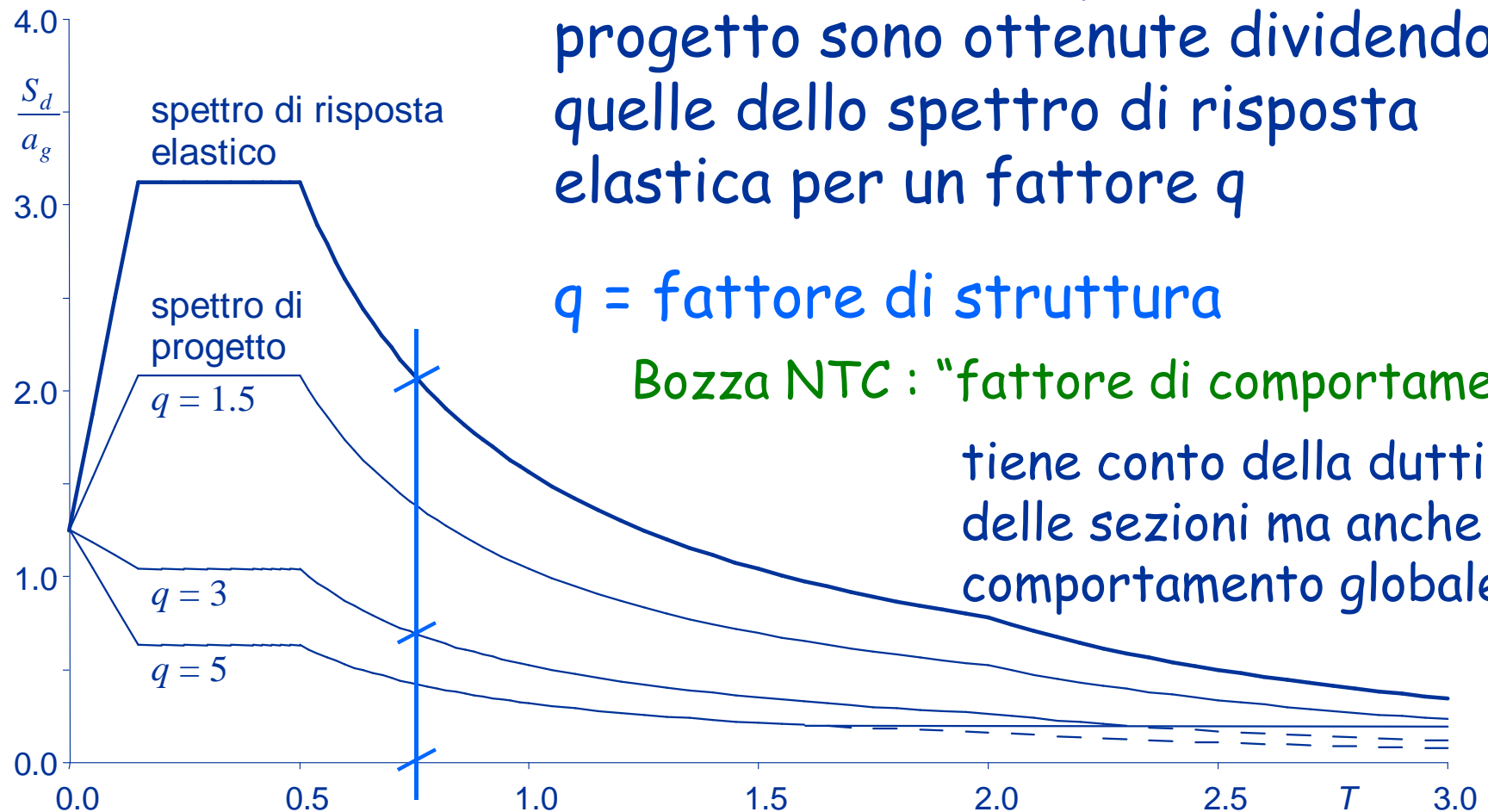
Schemi a più gradi di libertà
in campo plastico

Progettazione basata sulle forze

1. Scegliere a priori se fare un affidamento maggiore o minore sulla duttilità
2. In base a ciò e tenendo conto della tipologia strutturale scegliere il valore del coefficiente col quale ridurre lo spettro di risposta elastico per ottenere lo spettro di progetto
3. Determinare l'accelerazione (e quindi le forze) con cui progettare la struttura
4. Progettare la struttura in modo da sopportare tale accelerazione o tali forze
5. Garantire una duttilità globale e locale coerente con la scelta fatta a priori

Spettri di progetto di normativa

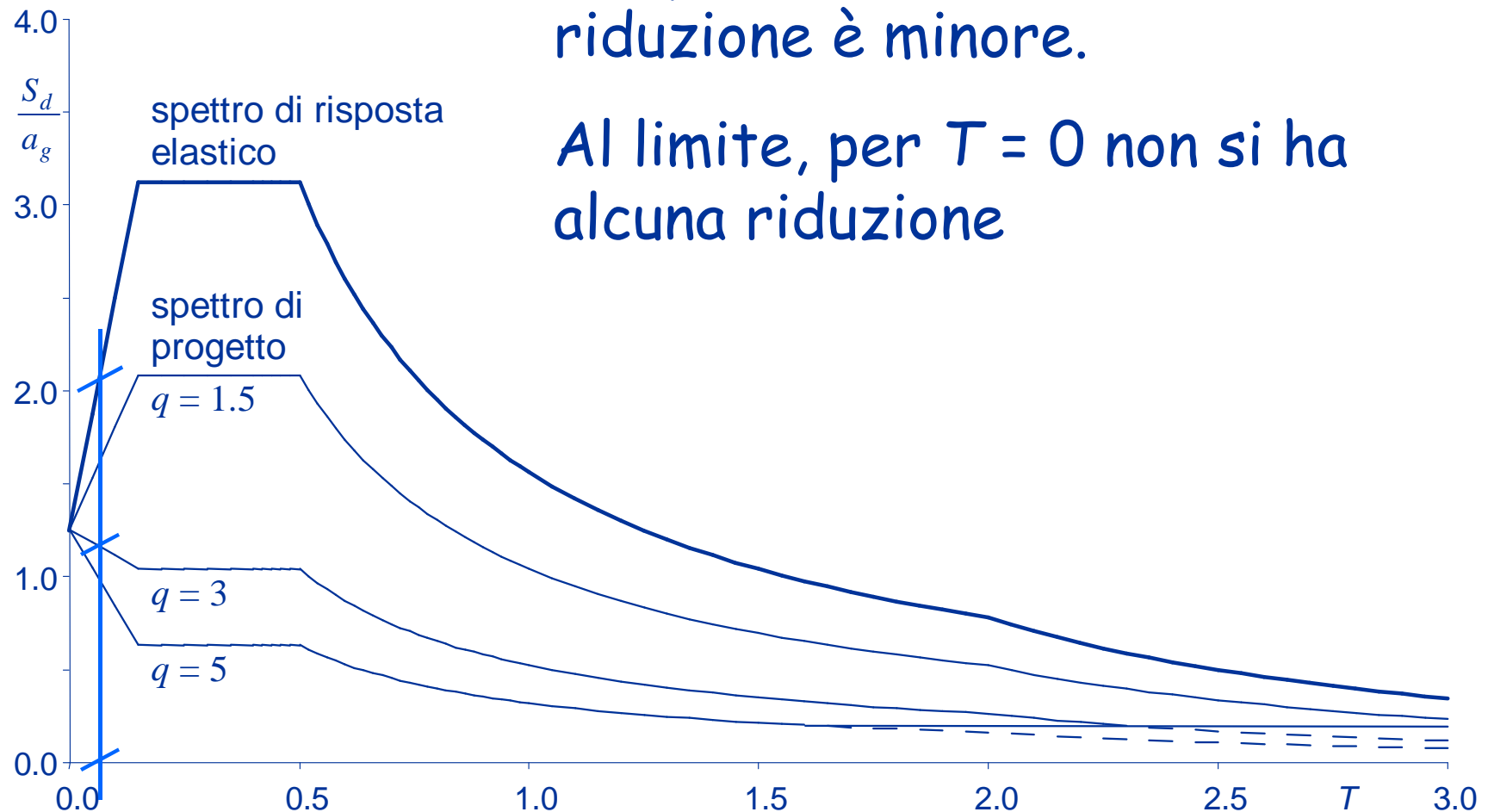
NTC 08 (D.M. 14/1/2008)



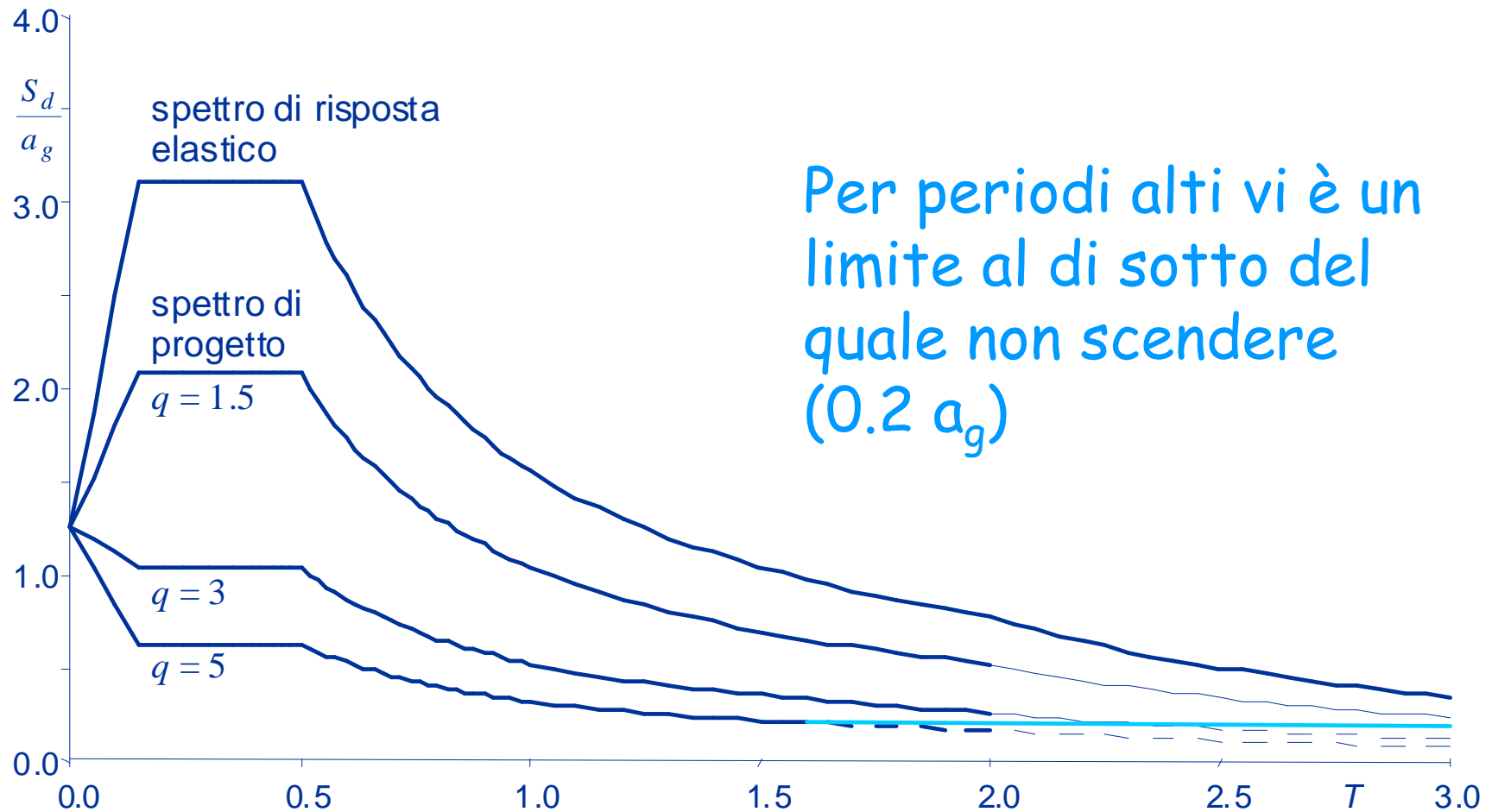
Spettri di progetto di normativa

Per periodi molto bassi la riduzione è minore.

Al limite, per $T = 0$ non si ha alcuna riduzione

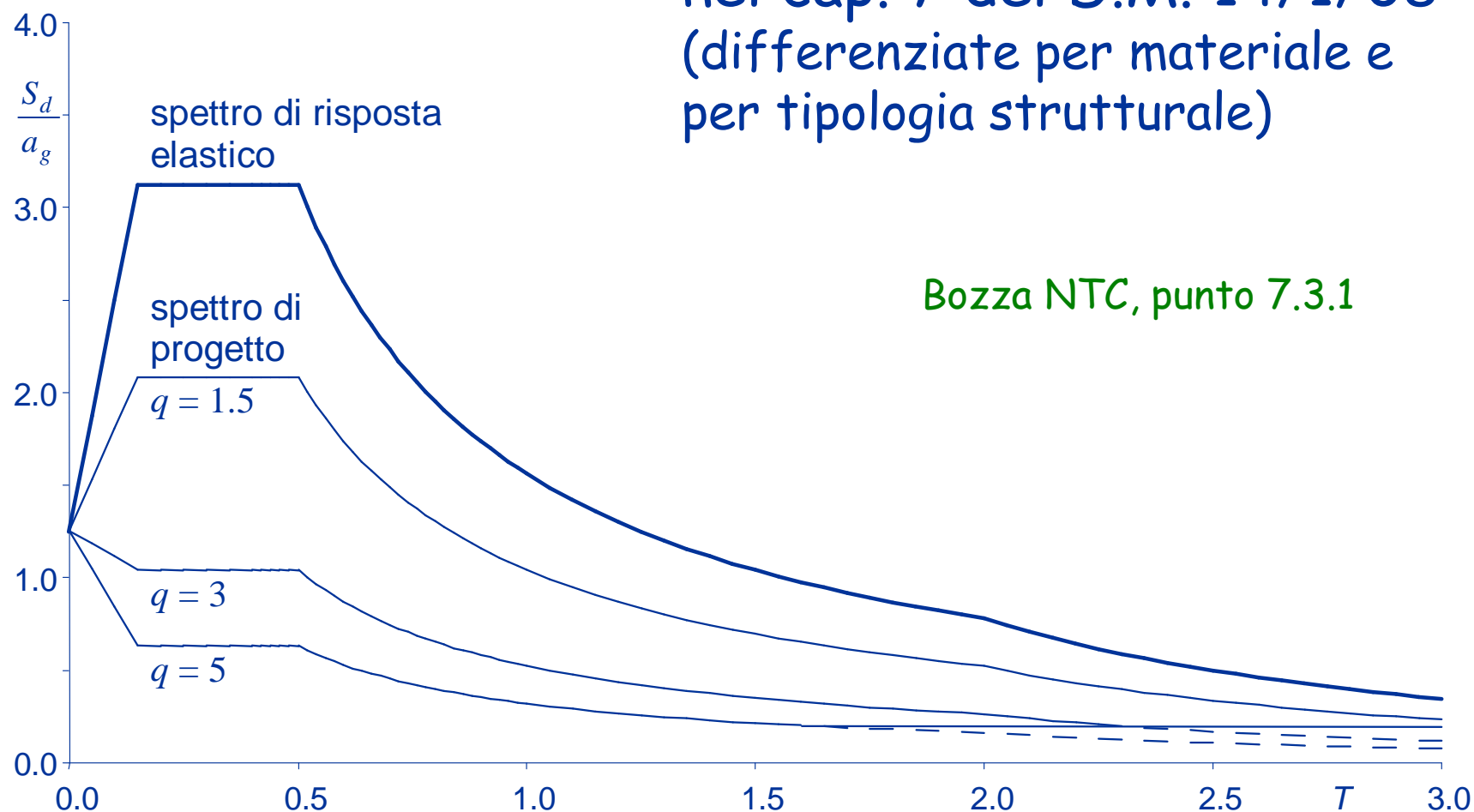


Spettri di progetto di normativa

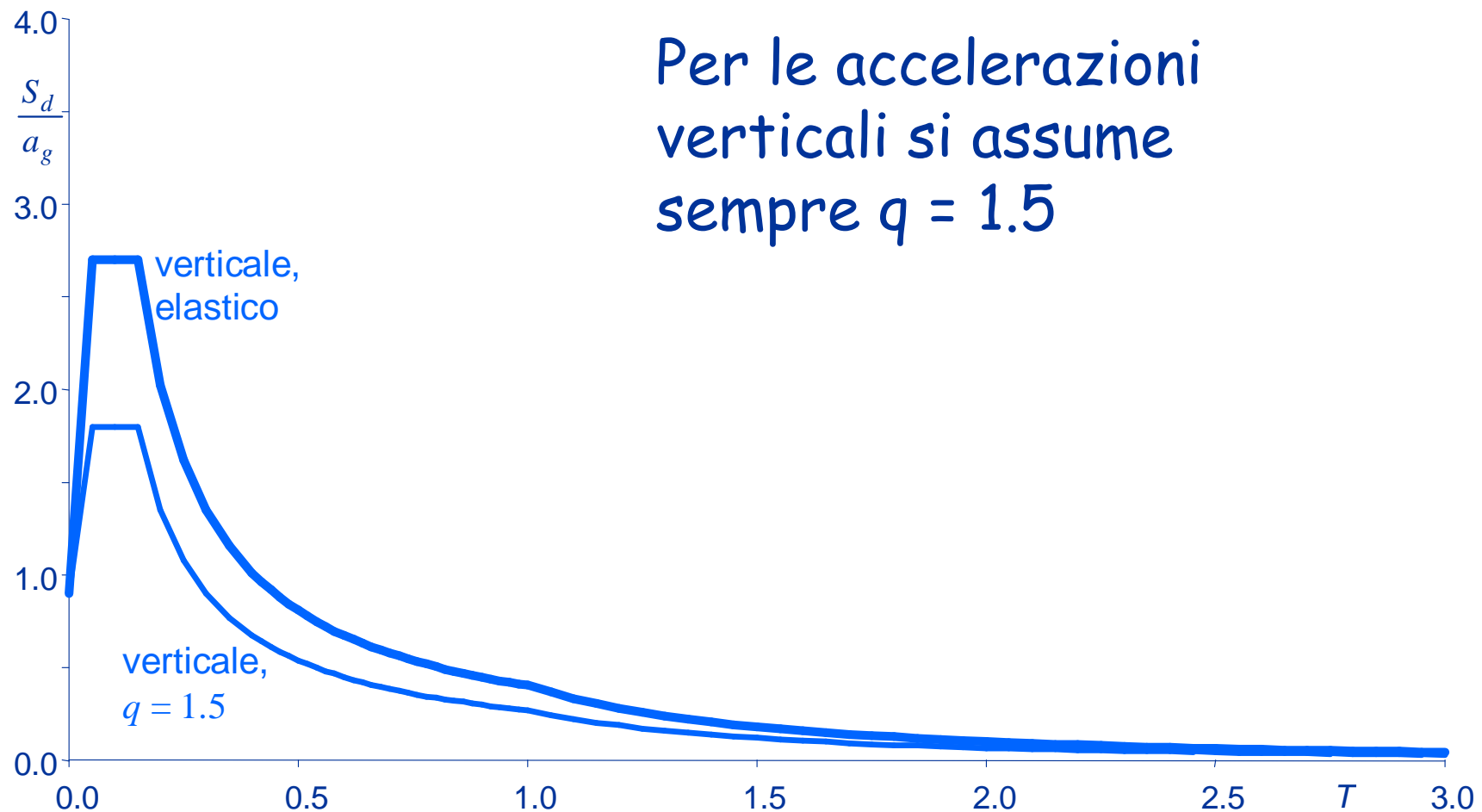


Spettri di progetto di normativa accelerazioni orizzontali

Il valore del fattore di comportamento q è definito
nel cap. 7 del D.M. 14/1/08
(differenziate per materiale e
per tipologia strutturale)



Spettri di progetto di normativa accelerazioni verticali



Ma quanto è duttile una struttura?

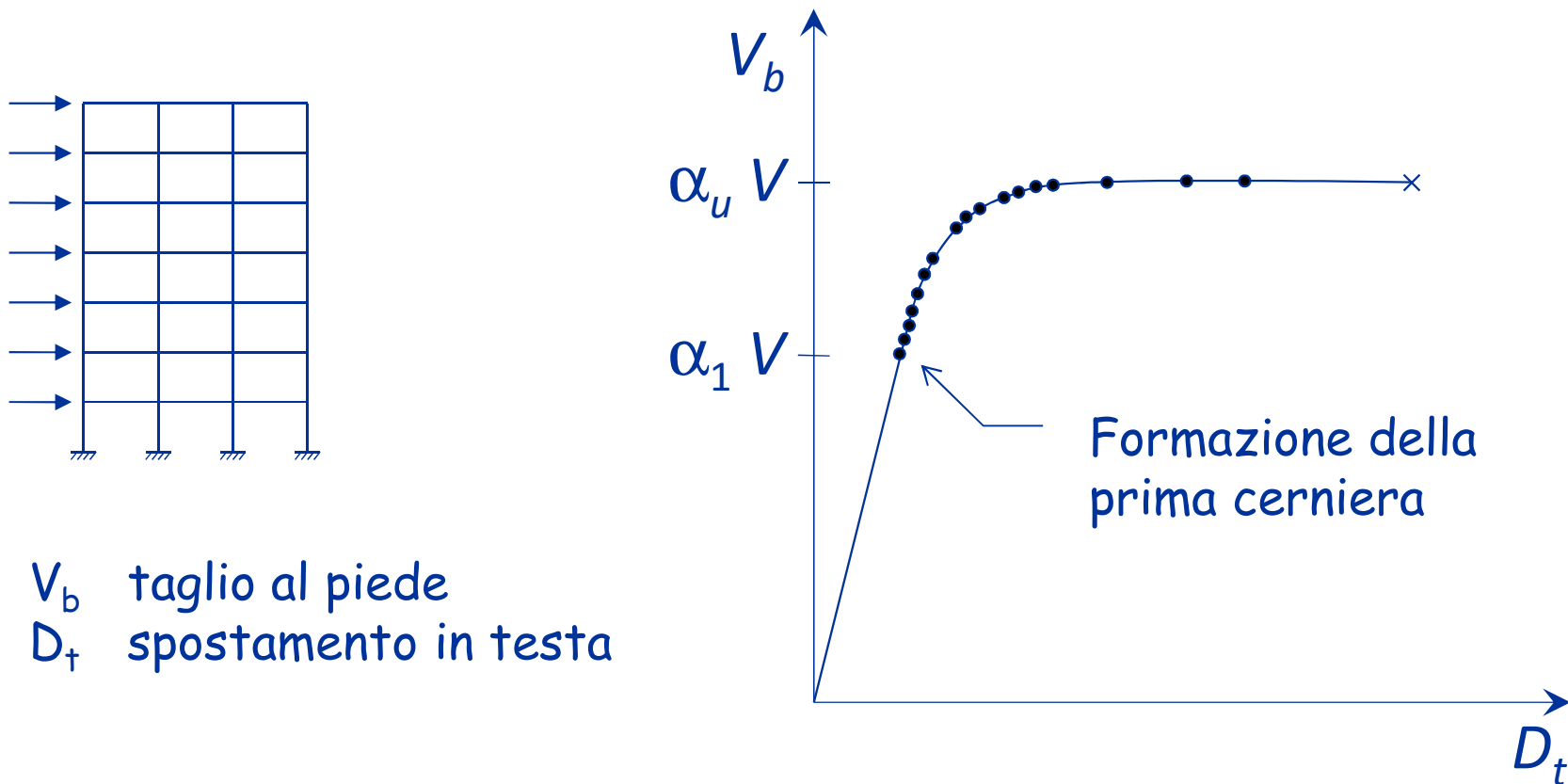
- Un modo possibile per giudicare la duttilità di una struttura è esaminarne il comportamento sotto forze orizzontali crescenti (in aggiunta ai carichi verticali)

Nota 1: il discorso è per ora mantenuto a livello qualitativo; più avanti lo si affronterà anche dal punto di visto quantitativo

Nota 2: si immagina un comportamento a plasticità concentrata (ma ciò non toglie generalità alla trattazione)

Ma quanto è duttile una struttura?

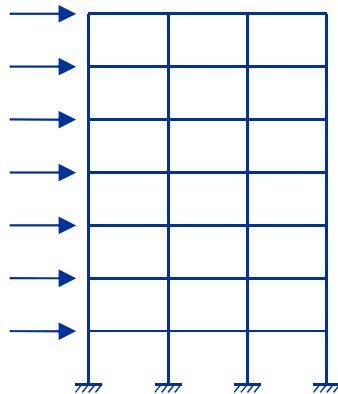
- Comportamento sotto forze orizzontali crescenti



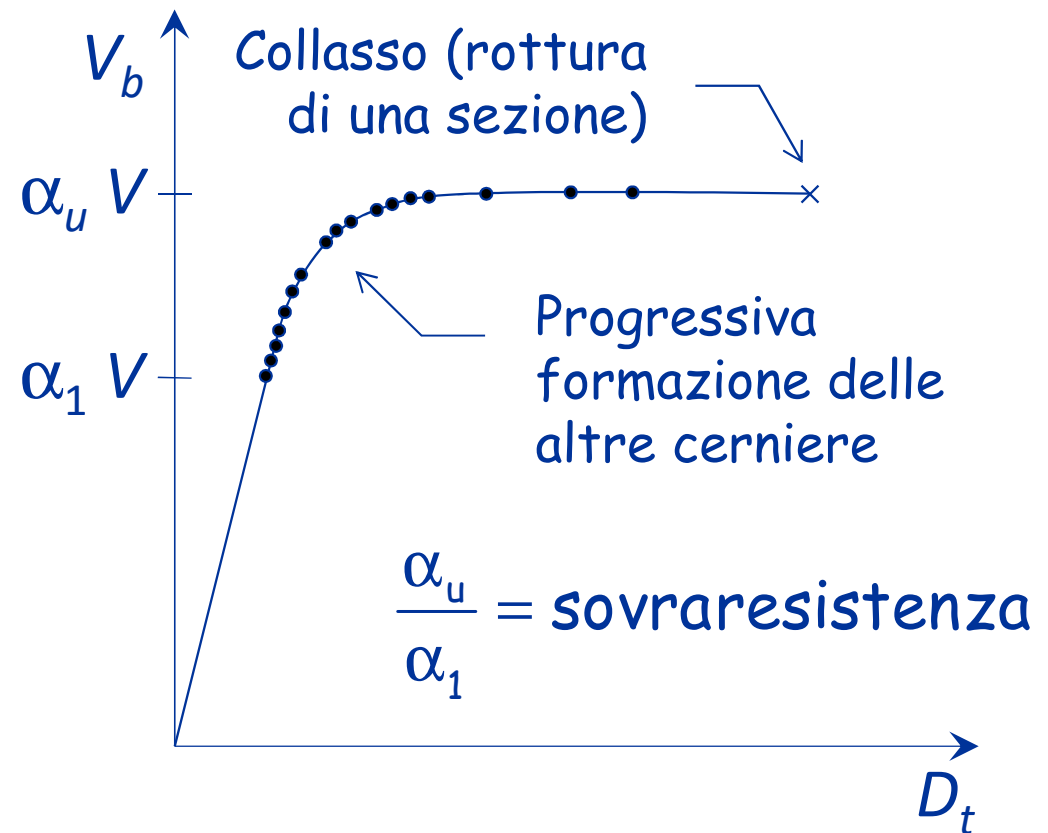
La prima cerniera si forma per un taglio $\alpha_1 V$

Ma quanto è duttile una struttura?

- Comportamento sotto forze orizzontali crescenti



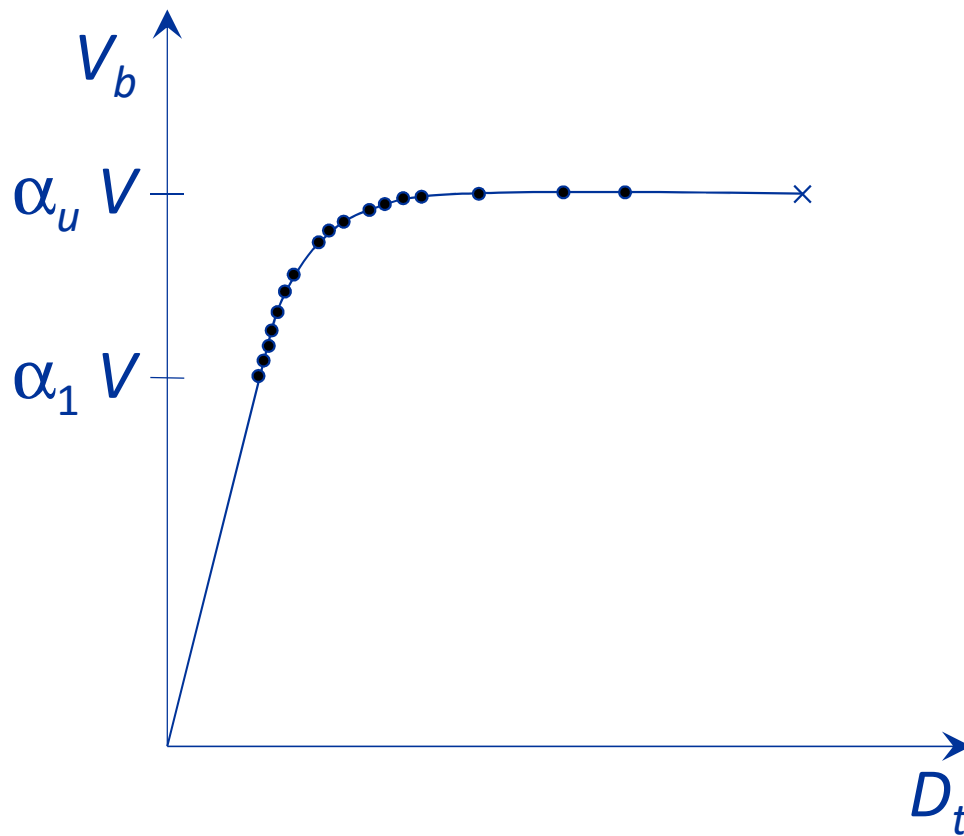
V_b taglio al piede
 D_t spostamento in testa



Il collasso si ha per un taglio $\alpha_u V$

Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti

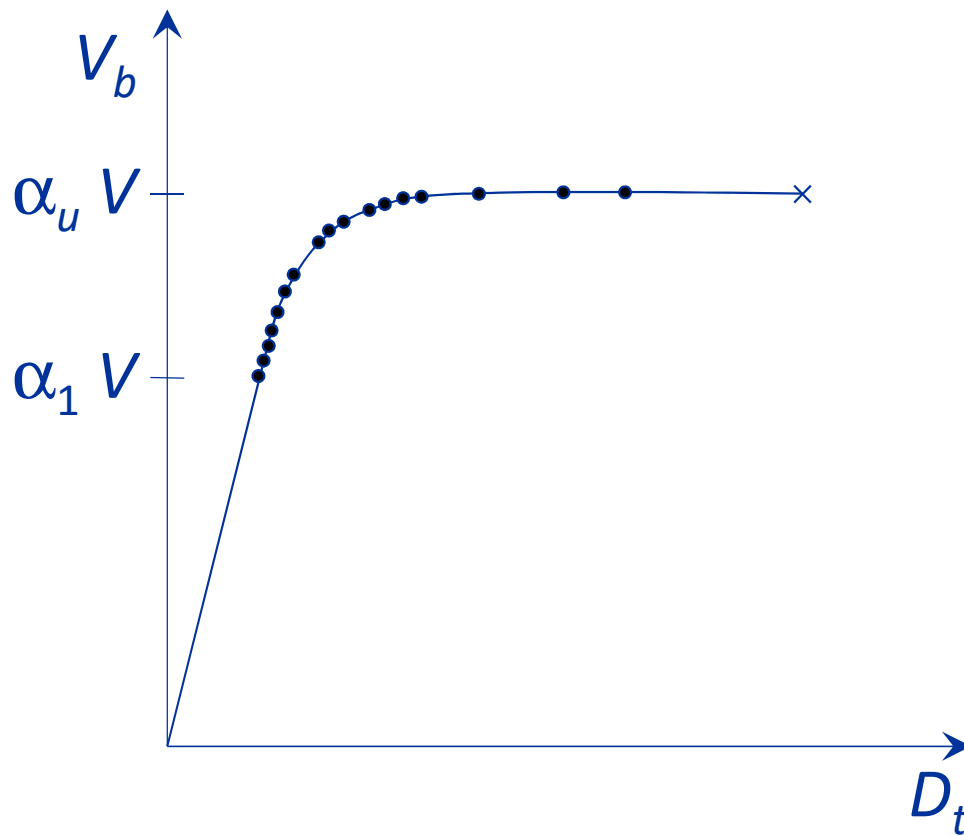


In questo caso:

- Formazione di un gran numero di cerniere plastiche
- Forti spostamenti prima del collasso \rightarrow buona duttilità
- Forte sovraresistenza

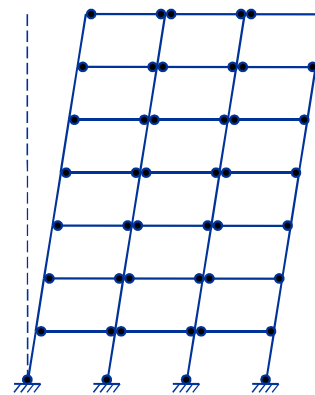
Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti



Alta duttilità

Possibile meccanismo di
collasso:

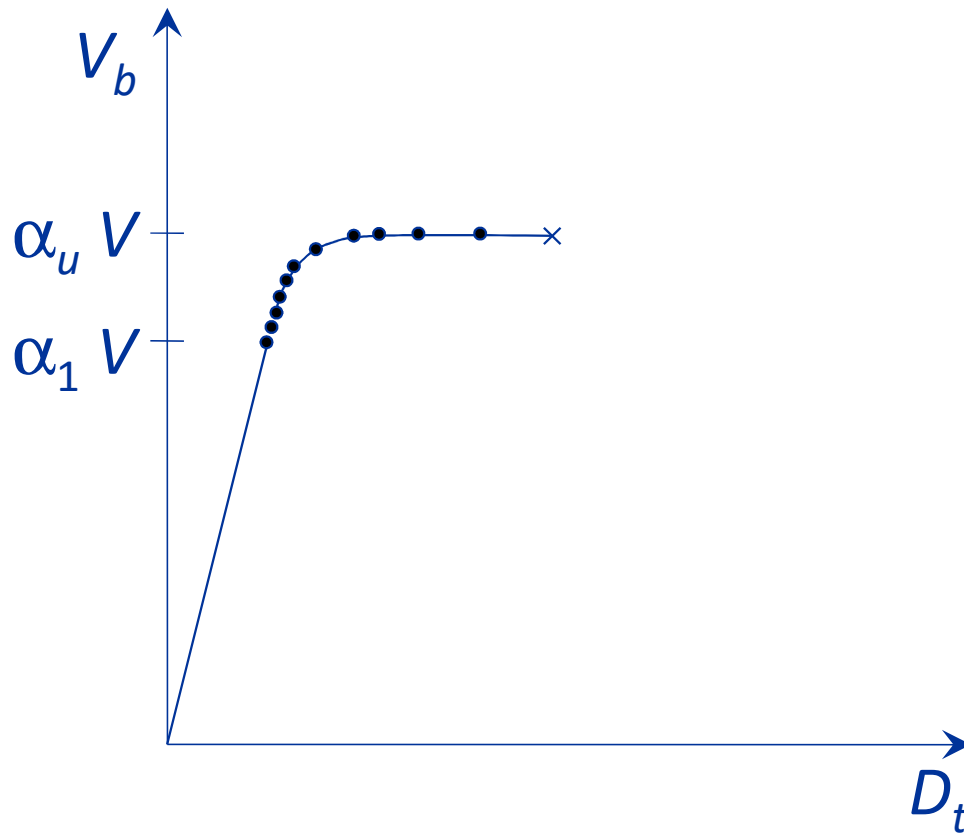


Globale

Cerniere nelle
travi e solo al
piede dei
pilastri

Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti

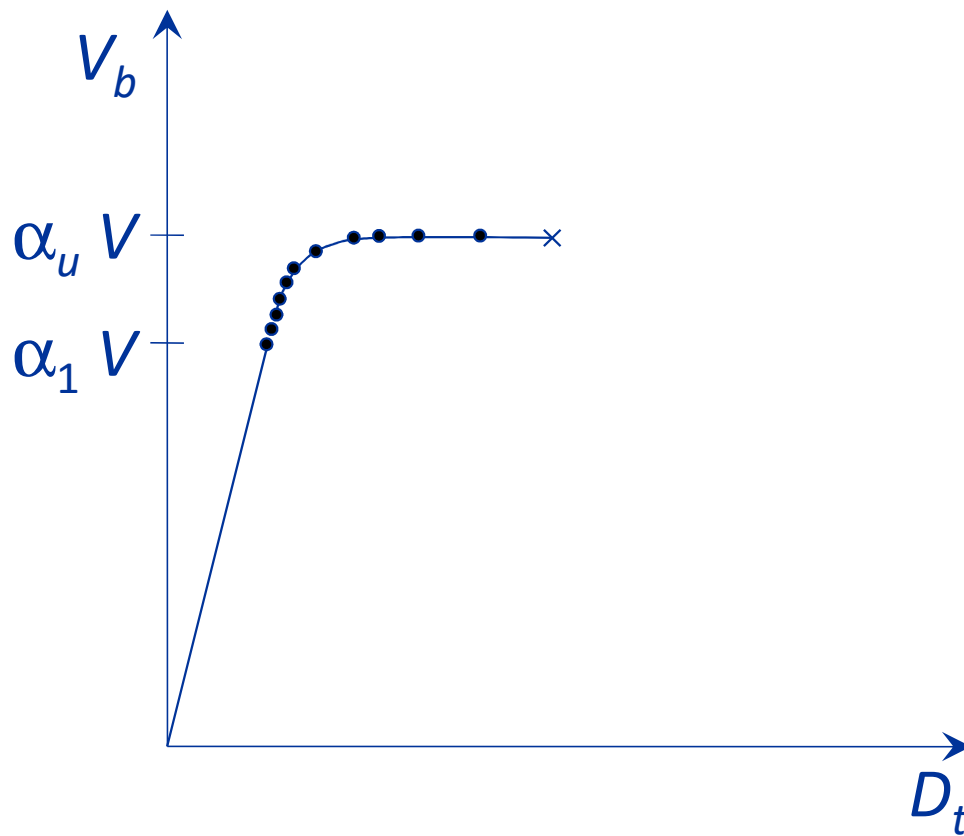


In questo caso:

- Formazione di un numero minore di cerniere plastiche
- Spostamenti prima del collasso più piccoli \rightarrow duttilità più bassa
- Minore sovrarresistenza

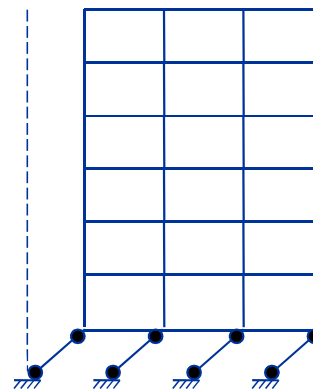
Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti



Bassa duttilità

Possibile meccanismo di collasso:



Di piano

Cerniere in testa e al piede dei pilastri di un ordine

Ma quanto è duttile una struttura?

- La duttilità è fortemente condizionata dal meccanismo di collasso
 - Per avere una alta duttilità il meccanismo deve essere globale, con cerniere nelle travi a tutti i piani e solo alla base nei pilastri
 - Meccanismi con formazione di cerniere in un discreto numero di travi ed in pochi pilastri indicano una duttilità media
 - Un meccanismo di piano implica bassa duttilità e deve essere sempre evitato

Ma quanto è duttile una struttura?

- La duttilità è fortemente condizionata dal meccanismo di collasso
- Per avere un meccanismo di collasso globale occorre:
 - Che i pilastri siano più resistenti delle travi
 - Che si abbiano plasticizzazioni a flessione e non rotture a taglio (che sono fragili)



Criterio di gerarchia delle resistenze

ovvero

Capacity design (progetto in capacità)

Ma quanto è duttile una struttura?

- La duttilità è fortemente condizionata dal meccanismo di collasso
- Occorre anche che le sezioni che si plasticizzano abbiano una alta duttilità. Per questo:
 - Forte staffatura, buona armatura longitudinale in compressione, attenzione ai dettagli costruttivi
 - Limitare la tensione media da sforzo normale



Criteri per garantire duttilità locale

Ma quanto è duttile una struttura?

- La duttilità è fortemente condizionata dal meccanismo di collasso
- Occorre anche che le sezioni che si plasticizzano abbiano una alta duttilità
- Occorre evitare che la mancanza di regolarità porti a concentrazione della plasticizzazione



Influenza della regolarità

Fattore di comportamento

Le ordinate dello spettro di progetto sono ottenute dividendo quelle dello spettro di risposta elastica per il fattore di comportamento q

Il fattore di struttura tiene conto della duttilità locale delle sezioni ma anche del comportamento globale della struttura

Fattore di comportamento

Dipende da:

- Classe di duttilità dell'edificio
- Duttilità generale della tipologia strutturale
- Rapporto tra resistenza ultima e di prima plasticizzazione
- Regolarità dell'edificio

$$q = q_0 K_R$$


Comportamento strutturale e classi di duttilità

Le strutture possono essere progettate:

- Per avere un comportamento strutturale non dissipativo
 - La struttura rimarrà sostanzialmente in campo elastico
 - Si usa un fattore di comportamento non superiore a 1.5
- Per avere un comportamento strutturale dissipativo
 - La struttura avrà rilevanti plasticizzazioni
 - Si usa un fattore di struttura superiore a 1.5
 - Si possono distinguere due classi di duttilità
A = alta B = media

Classe di duttilità

(comportamento globale e duttilità locale)

Classe di duttilità alta: CD"A"

Richiede maggiori accorgimenti e maggiori coefficienti di sicurezza nel calcolo ed impone dettagli costruttivi più severi

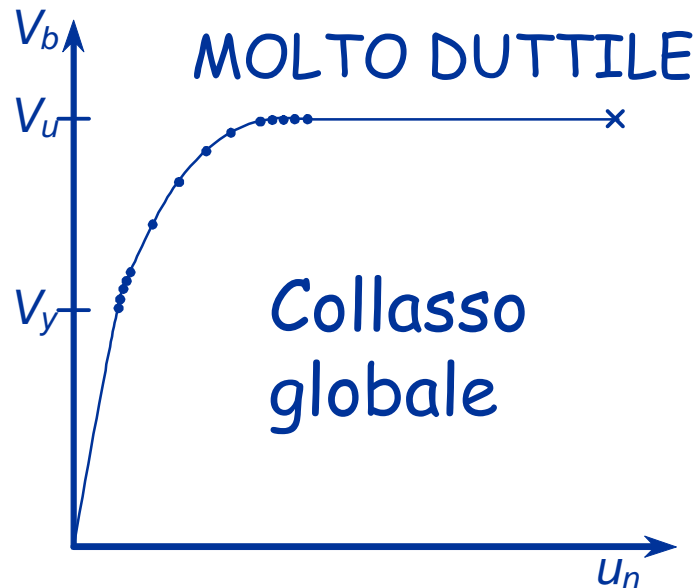
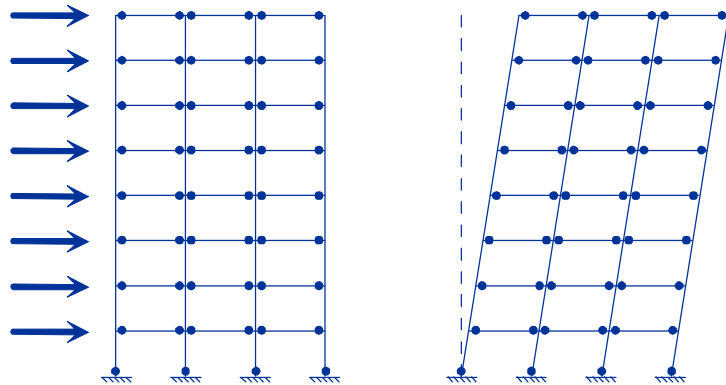
Classe di duttilità media: CD"B"

Forze di calcolo maggiori

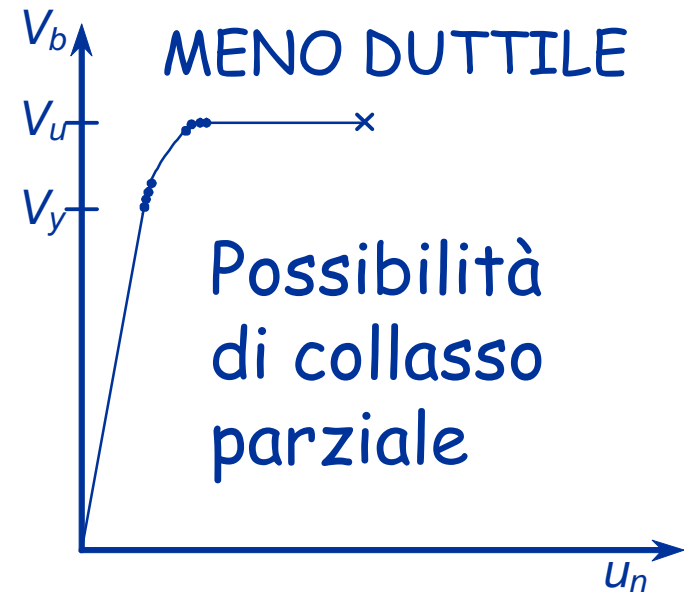
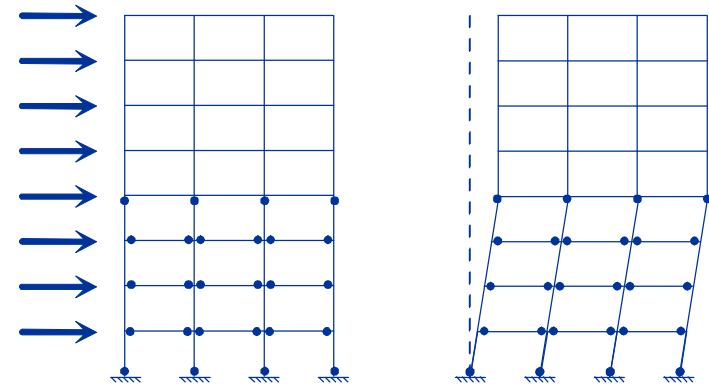
Il progettista deve scegliere, a priori, quale classe di duttilità adottare

Scelte progettuali: alta o media duttilità

ALTA DUTTILITÀ



MEDIA DUTTILITÀ



Attenzione: il grado di sicurezza deve essere uguale

Scelte progettuali: alta o media duttilità

ALTA DUTTILITÀ

- Forze sismiche minori (minore resistenza)
- Dettagli costruttivi più curati
- Progetto col criterio di gerarchia delle resistenze
- Evitare irregolarità strutturali per evitare forti concentrazioni della plasticizzazione

MEDIA DUTTILITÀ

- Forze sismiche maggiore (maggiore resistenza)
- Dettagli costruttivi meno curati
- Il criterio di gerarchia delle resistenze si usa con coefficienti minori

Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

q_0

Tipologia	CD"B"	CD"A"
Strutture a telaio, strutture miste telaio-pareti, strutture a pareti accoppiate	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture a pareti non accoppiate	3.0	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture torsionalmente deformabili	2.0	3.0
Strutture a pendolo inverso	1.5	2.0

- *struttura a telaio*, nella quale le azioni verticali ed orizzontali sono sopportate da un insieme di travi e pilastri che costituiscono un telaio spaziale; si può parlare di struttura a telaio anche in presenza di pareti di modeste dimensioni, a condizione che la gran parte della resistenza ad azioni orizzontali (almeno il 65%) sia garantita dagli elementi a telaio;

Bozza NTC, punto 7.3.1 e 7.4.3.1

Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

q_0

Tipologia	CD" B "	CD" A "
Strutture a telaio, strutture miste telaio-pareti, strutture a pareti accoppiate	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture a pareti non accoppiate	3.0	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture torsionalmente deformabili	2.0	3.0
Strutture a pendolo inverso	1.5	2.0

- *struttura a pareti*, nella quale le azioni verticali ed orizzontali sono sopportate principalmente da pareti ; si può parlare di struttura a pareti anche in presenza di pilastri e travi, a condizione che la gran parte della resistenza ad azioni orizzontali (almeno il 65%) sia garantita dalle pareti;

Bozza NTC, punto 7.3.1 e 7.4.3.1

Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

q_0

Tipologia	CD"B"	CD"A"
Strutture a telaio, strutture miste telaio-pareti, strutture a pareti accoppiate	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture a pareti non accoppiate	3.0	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture torsionalmente deformabili	2.0	3.0
Strutture a pendolo inverso	1.5	2.0

- *struttura mista telaio-pareti*, nella quale le azioni verticali sono sopportate prevalentemente da un telaio spaziale, mentre quelle orizzontali sono affidate sia al telaio che a pareti in c.a.; in particolare, se almeno il 50% dell'azione orizzontale è affidata a pareti si parla di *struttura mista equivalente a pareti*, nel caso contrario di *struttura mista equivalente a telaio*;

Bozza NTC, punto 7.3.1 e 7.4.3.1

Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

q_0

Tipologia	CD"B"	CD"A"
Strutture a telaio, strutture miste telaio-pareti, strutture a pareti accoppiate	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture a pareti non accoppiate	3.0	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture torsionalmente deformabili	2.0	3.0
Strutture a pendolo inverso	1.5	2.0

- *struttura a pendolo inverso*, nella quale il 50%, o più, della massa è concentrato nel terzo superiore dell'altezza della struttura, o nella quale la dissipazione è localizzata alla base di un singolo elemento dell'edificio;
- *struttura torsionalmente deformabile*, nella quale la rigidezza rotazionale è inferiore rispetto a quella traslazionale.

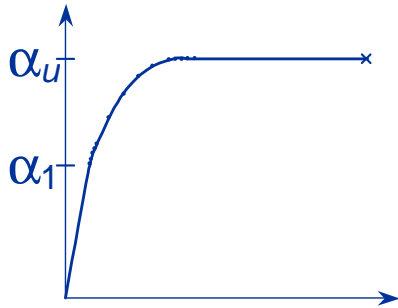
Bozza NTC, punto 7.3.1 e 7.4.3.1

Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

Strutture torsionalmente deformabili

- Sono fortemente penalizzate perché hanno un cattivo comportamento sismico: le rotazioni vengono fortemente amplificate, con conseguente forte incremento di spostamenti e sollecitazioni su tutti i lati della struttura
- Per la normativa una struttura è torsionalmente deformabile se il rapporto tra raggio d'inerzia delle rigidezze e raggio d'inerzia delle masse è \leq di ~~0.8~~ 1.0
Questo equivale a controllare se il rapporto tra periodo traslazionale e periodo rotazionale è \leq di ~~0.8~~ 1.0

Rapporto tra resistenza ultima e di prima plasticizzazione



$$\alpha_u / \alpha_1$$

Strutture a telaio o strutture miste equivalenti a telaio		
– ad un solo piano	1.1	1.05
– a più piani ma ad una sola campata	1.2	1.10
– a più piani e più campate	1.3	1.15
Strutture a pareti o strutture miste equivalenti a pareti		
– solo due pareti non accoppiate per ogni direzione	1.0	
– più pareti non accoppiate	1.1	1.05
– pareti accoppiate o strutture miste equivalenti a pareti	1.2	1.10

per strutture
non regolari in
pianta

Oppure effettuare analisi statica non lineare

Regolarità dell'edificio

	K_R
Edifici regolari in altezza	1.0
Edifici non regolari in altezza	0.8

La regolarità in altezza deve essere valutata a priori, guardando la distribuzione delle masse e le sezioni degli elementi resistenti, ma anche controllata a posteriori

Esempio (casi estremi)

Edificio multipiano (e più campate) con struttura a telaio, **regolare** in altezza e in pianta, ad **alta duttilità**

$$q = 4.5 \times 1.3 \times 1.0 = 5.85$$

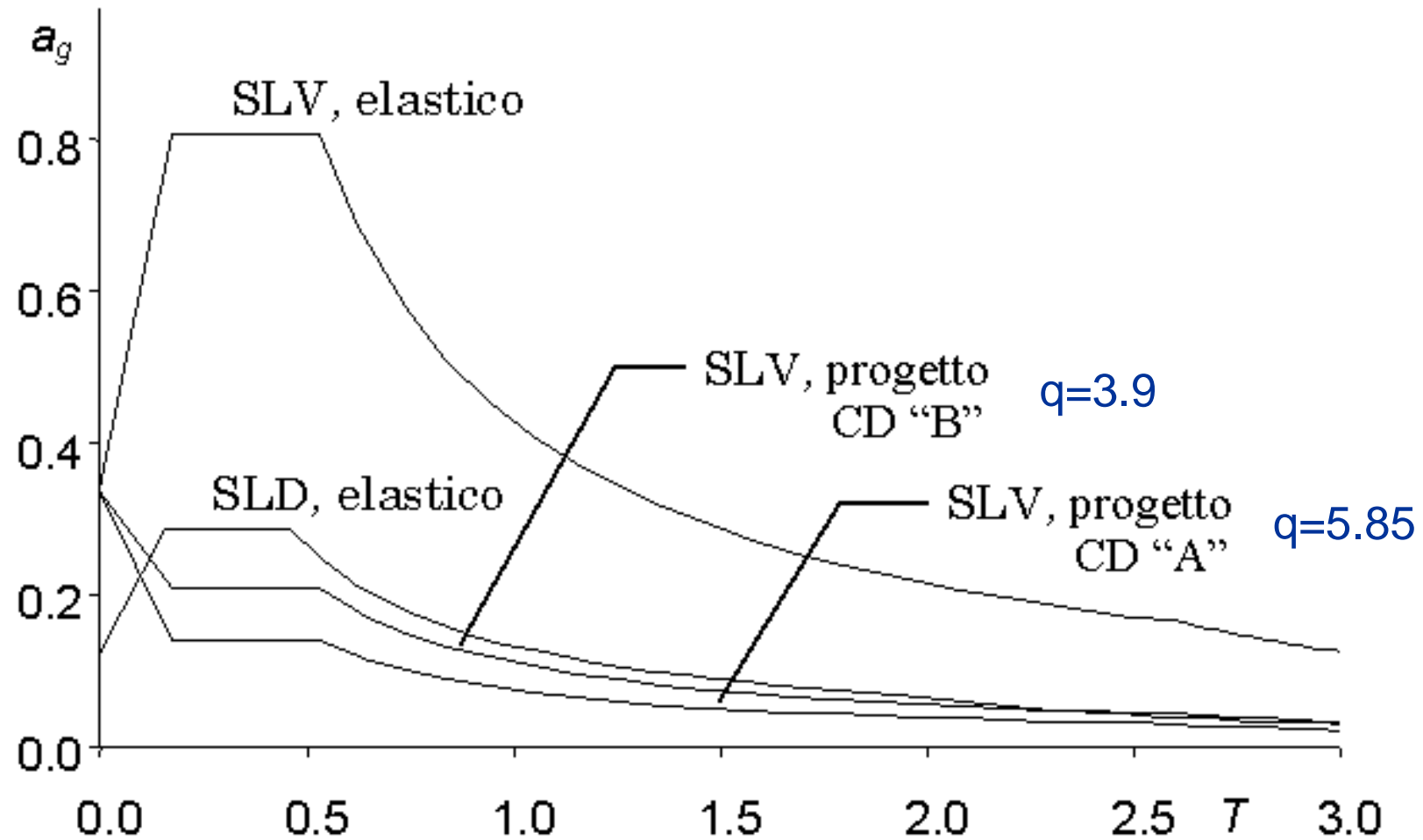
Stesso edificio, ma **non regolare** in altezza né in pianta ed a **media duttilità**

$$q = 3.0 \times 1.15 \times 0.8 = 2.76$$

Quindi le forze sono maggiori di oltre il doppio

Attenzione: in ogni caso bisogna evitare un collasso con meccanismo di piano, perché la riduzione di duttilità globale sarebbe anche maggiore

Confronto tra spettri



Valori riferiti a Messina, Piazza Cairolì, suolo C

Regolarità dell'edificio

Secondo l'attuale normativa:

- La mancanza di regolarità in altezza riduce il fattore di comportamento q mediante il coefficiente K_R
- La mancanza di regolarità in pianta riduce il fattore di comportamento riducendo la sovrarresistenza, cioè il rapporto α_u / α_1

La normativa tratti in maniera poco corretta gli aspetti connessi alla regolarità (o mancanza di regolarità)

Regolarità in altezza

- I sistemi resistenti verticali si estendono per tutta l'altezza dell'edificio
- Massa e rigidezza non variano bruscamente da un piano all'altro
- Il rapporto tra resistenza effettiva e resistenza di calcolo non varia molto da un piano all'altro

Principi generali = prestazione richiesta

Regolarità in altezza

Andando dal basso verso l'alto:

- le variazioni di massa sono, al massimo, il 25%
- la rigidezza non si riduce più del 30% e non aumenta più del 10%
- il rapporto tra resistenza effettiva e resistenza di calcolo varia di $\pm 20\%$

Regole applicative = prescrizioni (obbligatorie?)

Regolarità in altezza

Si noti inoltre che:

- il controllo delle masse può essere effettuato a priori, all'inizio del calcolo
- il controllo sulla rigidezza e sulla resistenza può essere effettuato solo a posteriori, dopo aver effettuato il calcolo e la disposizione delle armature

Regolarità in pianta

Criteri di normativa:

- configurazione compatta e approssimativamente simmetrica
- rapporto tra i lati di un rettangolo in cui è inscritta la pianta inferiore a 4
- rientri o sporgenze non superiori al 25% della dimensione della pianta nella stessa direzione
- impalcati infinitamente rigidi nel loro piano

Criteri poco significativi e quasi non utilizzati

Considerazioni sulla definizione di regolarità

La normativa italiana ed europea affronta il problema (molto importante) della regolarità in maniera poco soddisfacente

- Le problematiche nelle quali entra in gioco la regolarità sono numerose e andrebbero distinte in maniera chiara
- Le definizioni di "regolarità" dovrebbero essere messe chiaramente in relazione con la problematica relativa
- Sarebbe opportuno usare sempre criteri di controllo **a posteriori**, basati sulla risposta sismica della struttura e non su definizioni approssimate **a priori**

Regolarità e fattore di comportamento q

Cosa influenza realmente la duttilità della struttura e quindi il fattore di comportamento da utilizzare?

- Carenza di duttilità locale

Le prescrizioni di normativa su staffe e armatura longitudinale dovrebbero garantire una buona duttilità locale

La presenza di sforzo normale di compressione molto alto può ridurre la duttilità locale

Nel caso di aste molto corte è difficile rispettare la gerarchia taglio-flessione

Regolarità e fattore di comportamento q

Cosa influenza realmente la duttilità della struttura e quindi il fattore di comportamento da utilizzare?

- Precoce plasticizzazione di alcune sezioni

Il calcolo dovrebbe garantire adeguata resistenza a tutte le sezioni

Aste molto rigide (ad esempio aste molto corte) hanno una sovreresistenza minore delle altre aste. Si potrebbe arrivare al collasso con la formazione di poche cerniere plastiche

Anche la rotazione planimetrica, nel caso di strutture non bilanciate, può portare ad una plasticizzazione precoce delle aste perimetrali

Regolarità e fattore di comportamento q

Cosa influenza realmente la duttilità della struttura e quindi il fattore di comportamento da utilizzare?

- Influenza delle tamponature

Potrebbero essere inserite nel modello di calcolo (ma in genere non lo sono)

L'azione concentrata all'estremo di un pilastro può portare a rottura a taglio o plasticizzazione precoce

La distribuzione delle tamponature lungo l'altezza può portare ad un meccanismo di piano

La distribuzione delle tamponature in pianta può portare a rotazioni dell'impalcato e plasticizzazione precoce delle aste di estremità