

Corsi di aggiornamento

# Progettiamo insieme

## Teoria e pratica della progettazione strutturale

### 1. Risposta sismica delle strutture

05 - Progettazione basata sulle forze

Spoletto

18-19 marzo 2016

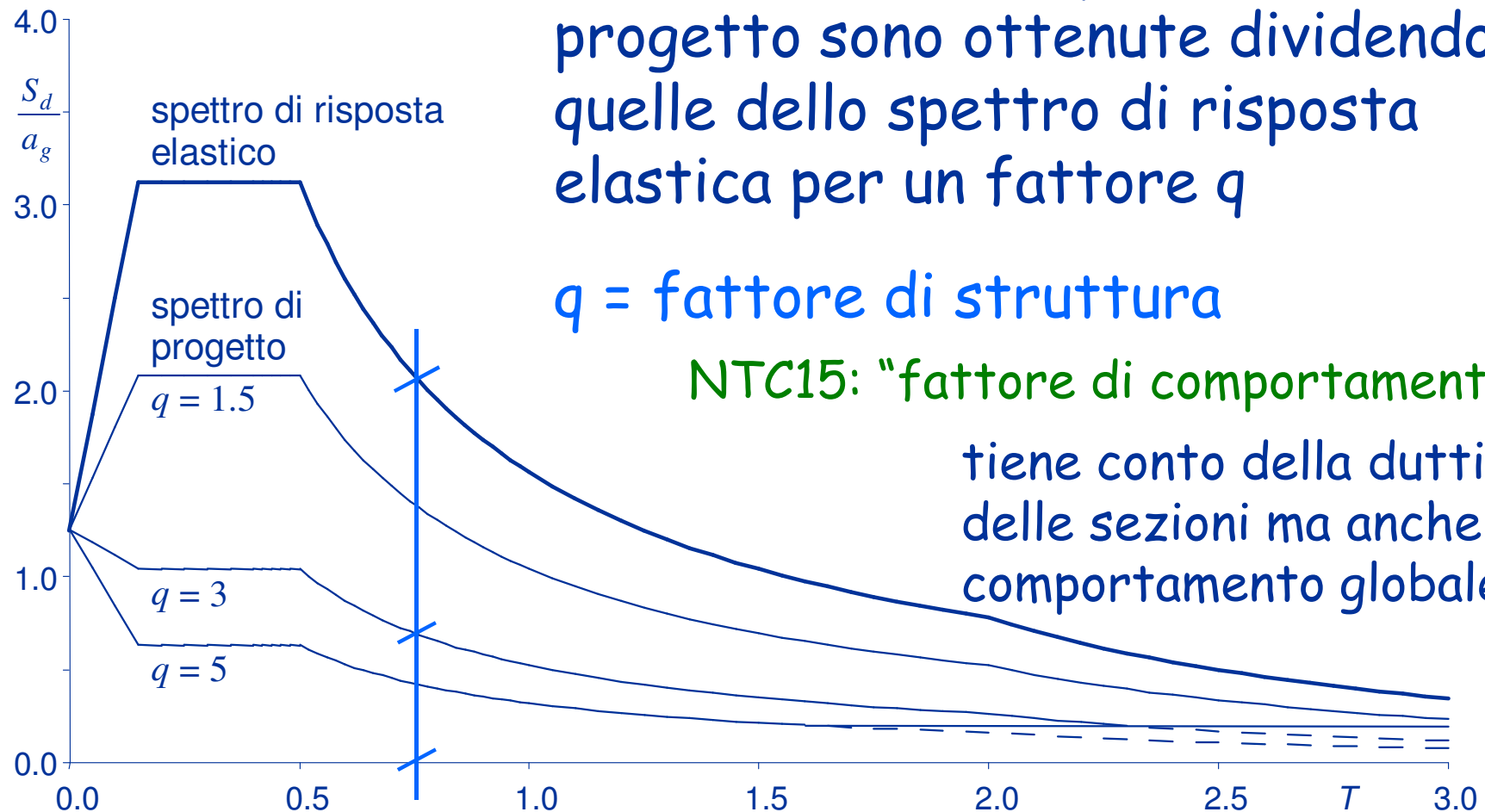
Aurelio Ghersi

# 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)



Le ordinate dello spettro di progetto sono ottenute dividendo quelle dello spettro di risposta elastica per un fattore  $q$

$q$  = fattore di struttura

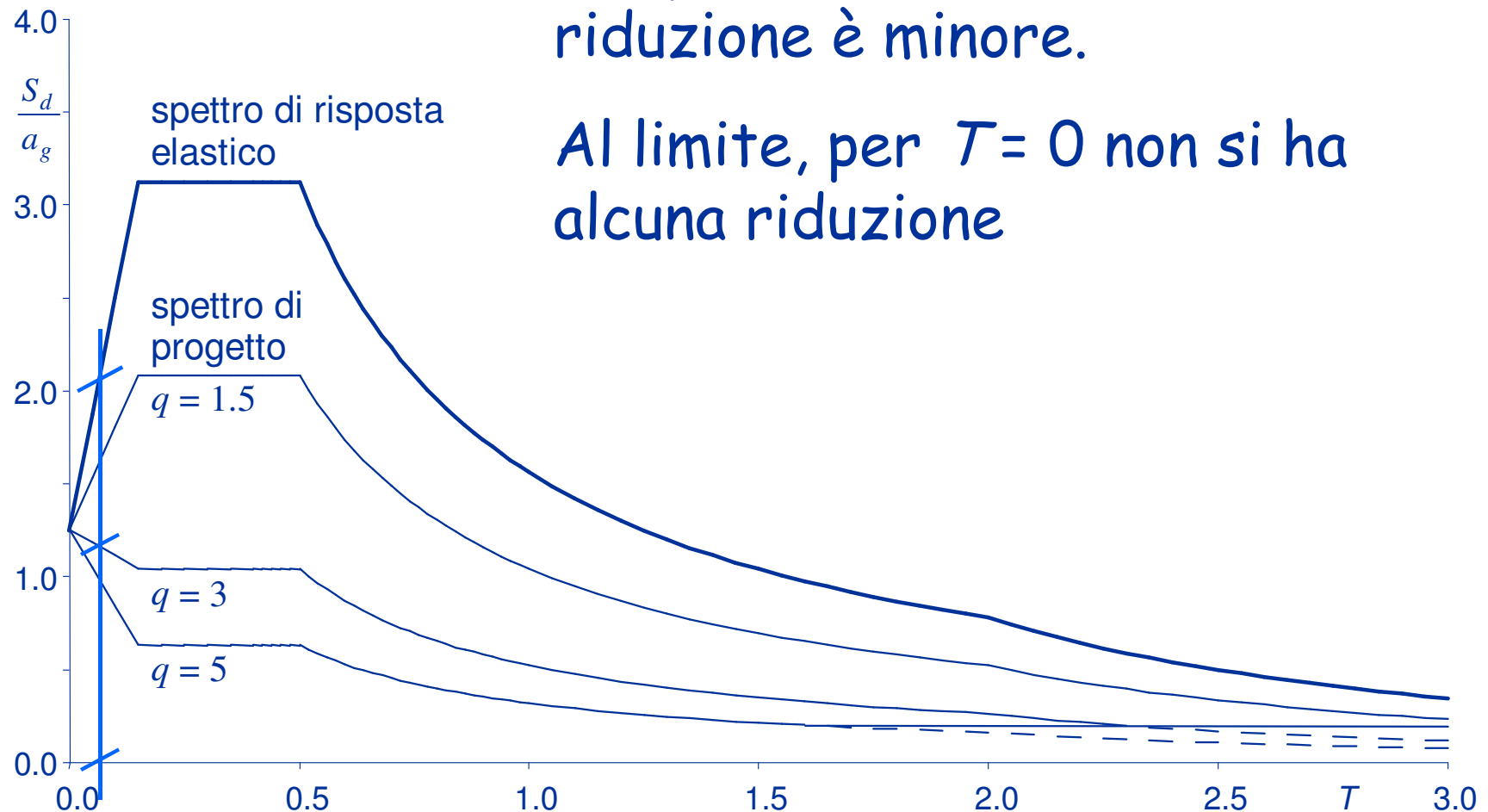
NTC15: "fattore di comportamento"

tiene conto della duttilità delle sezioni ma anche del comportamento globale

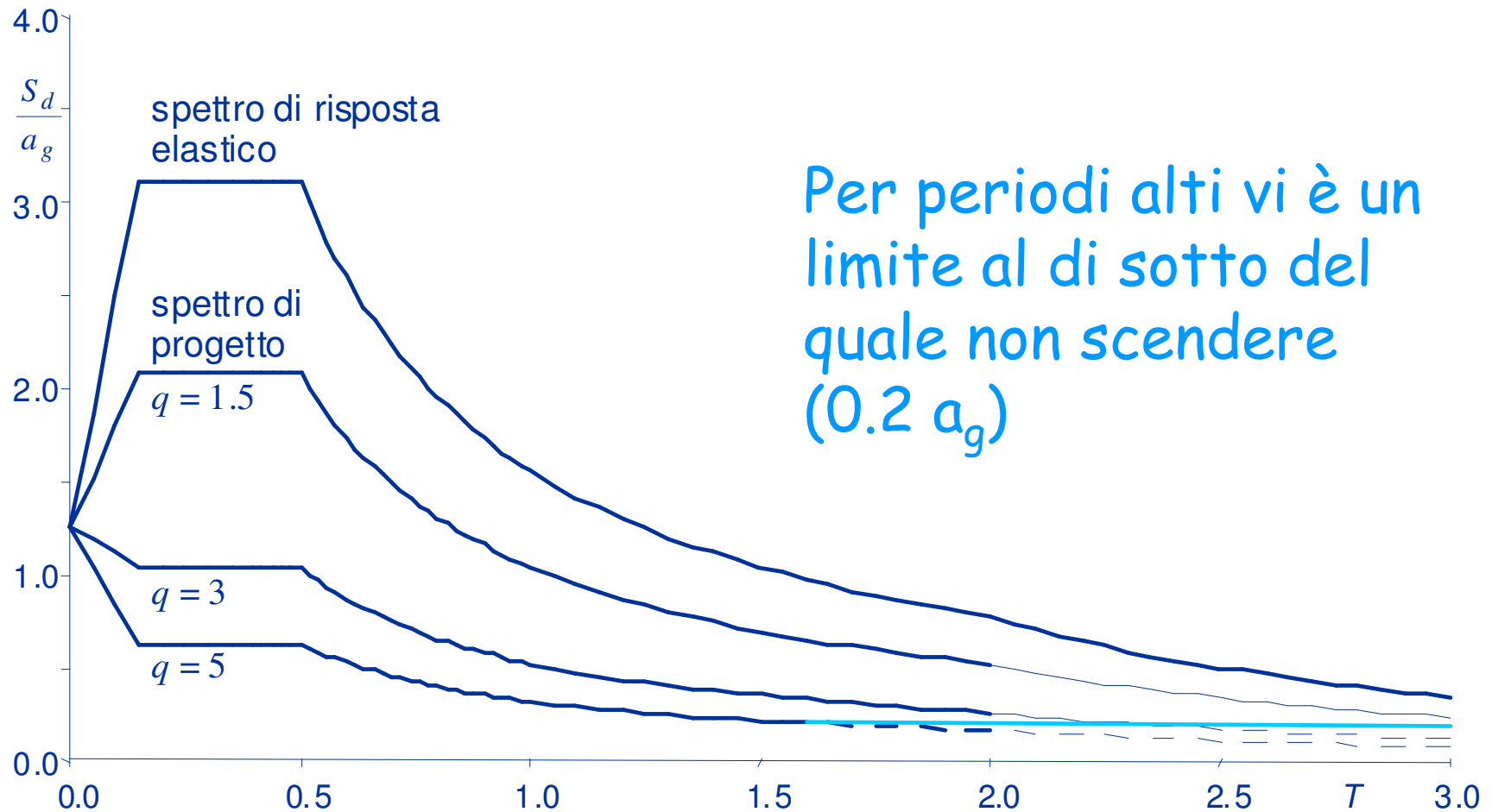
# Spettri di progetto di normativa

Per periodi molto bassi la riduzione è minore.

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

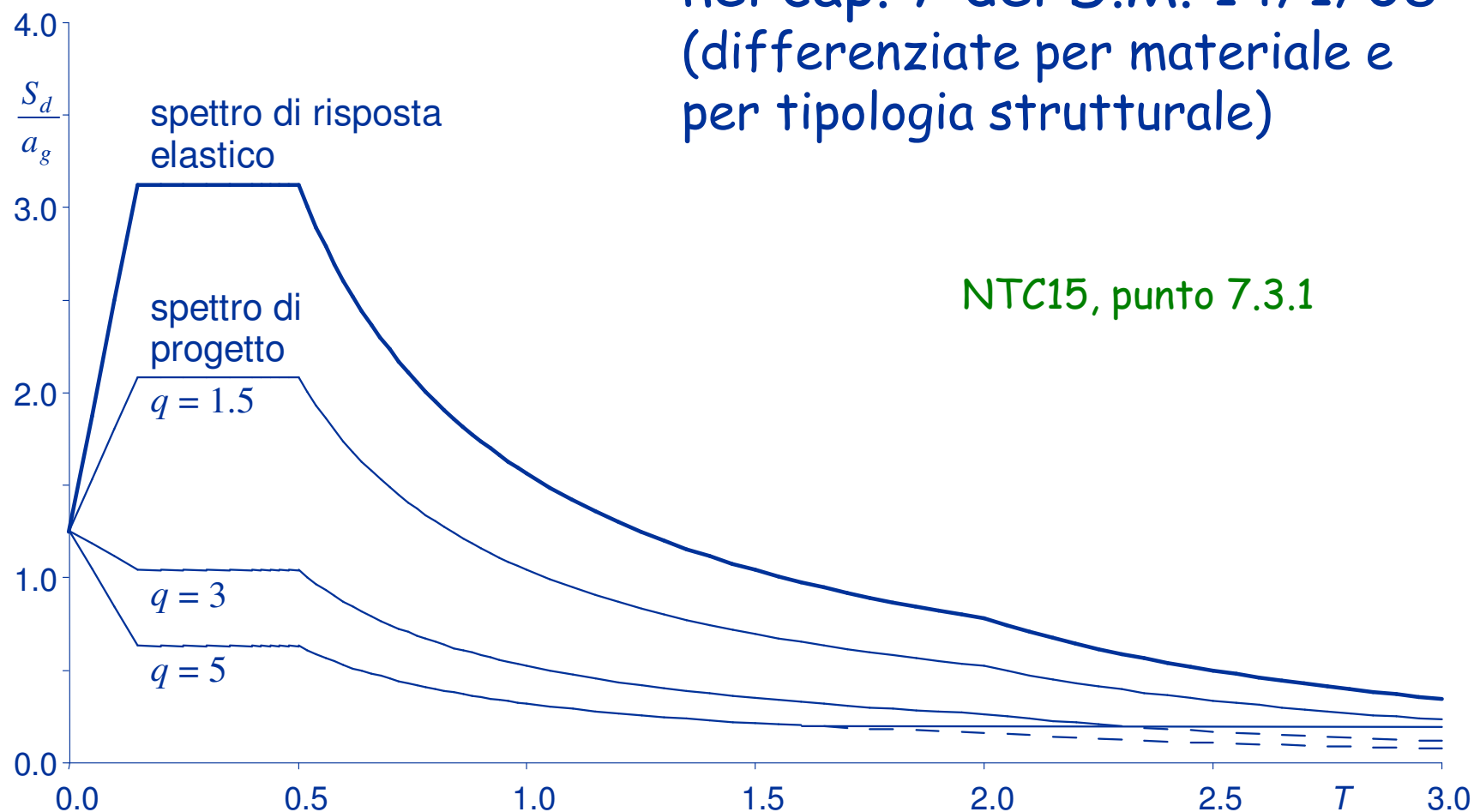


# Spettri di progetto di normativa

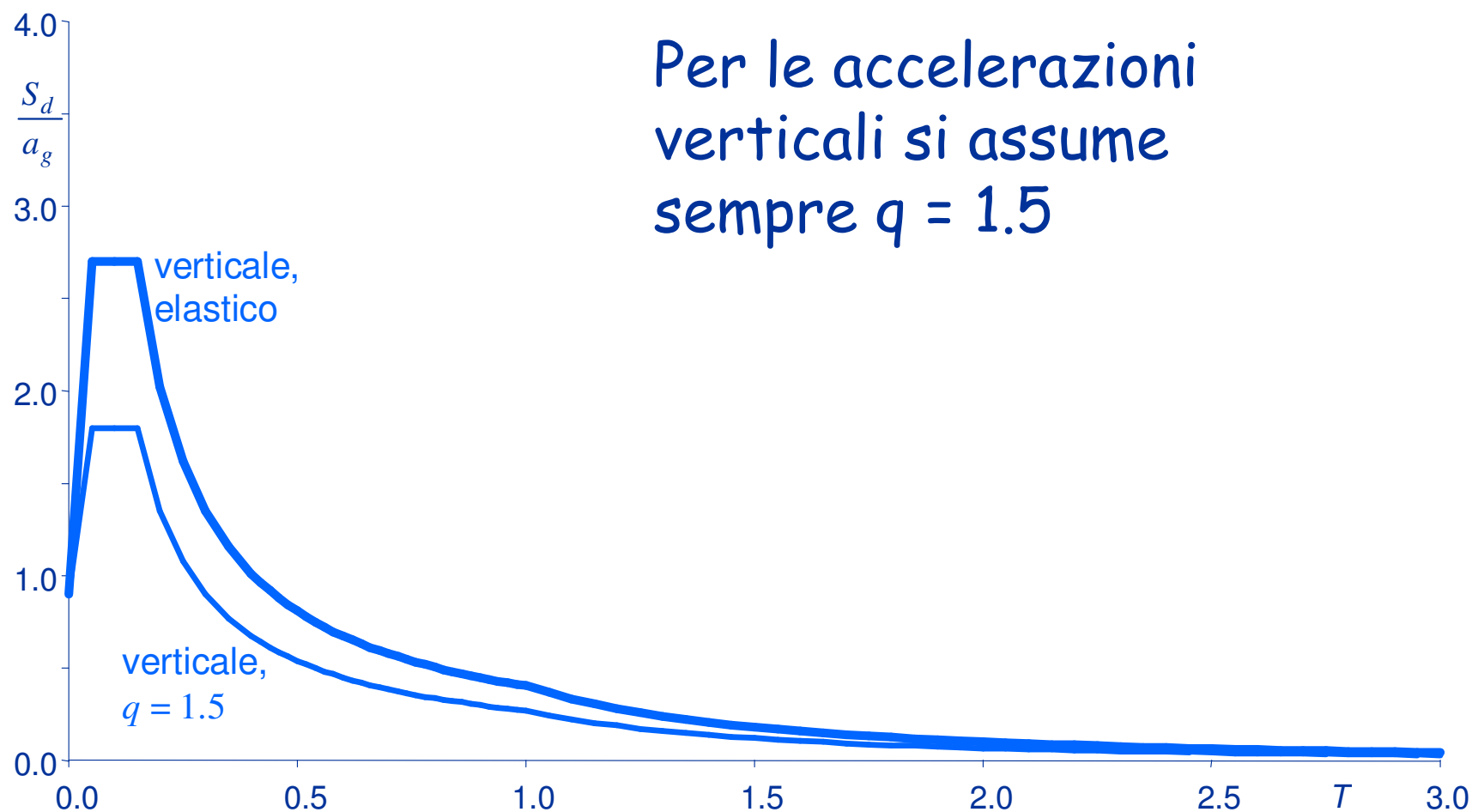


# Spettri di progetto di normativa accelerazioni orizzontali

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)

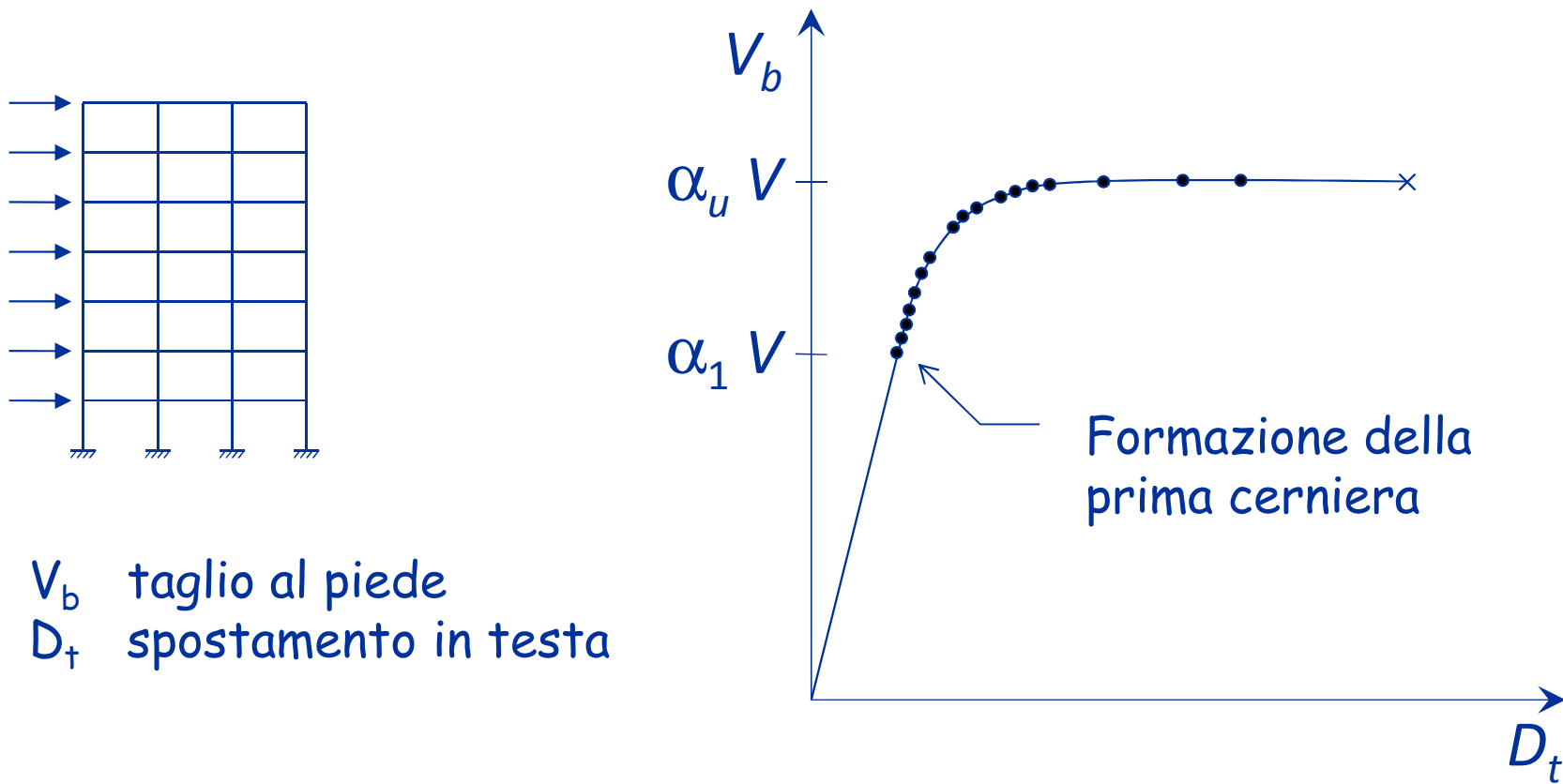
Nota 1: il discorso è per ora mantenuto a livello qualitativo; più avanti lo si affronterà anche dal punto di visto quantitativo

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



# Ma quanto è duttile una struttura?

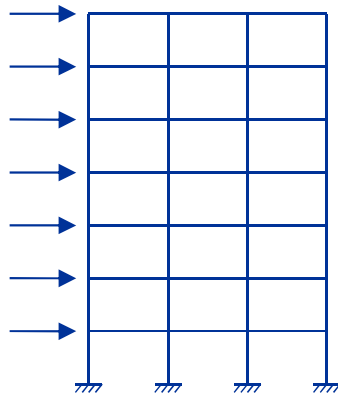
- Comportamento sotto forze orizzontali crescenti



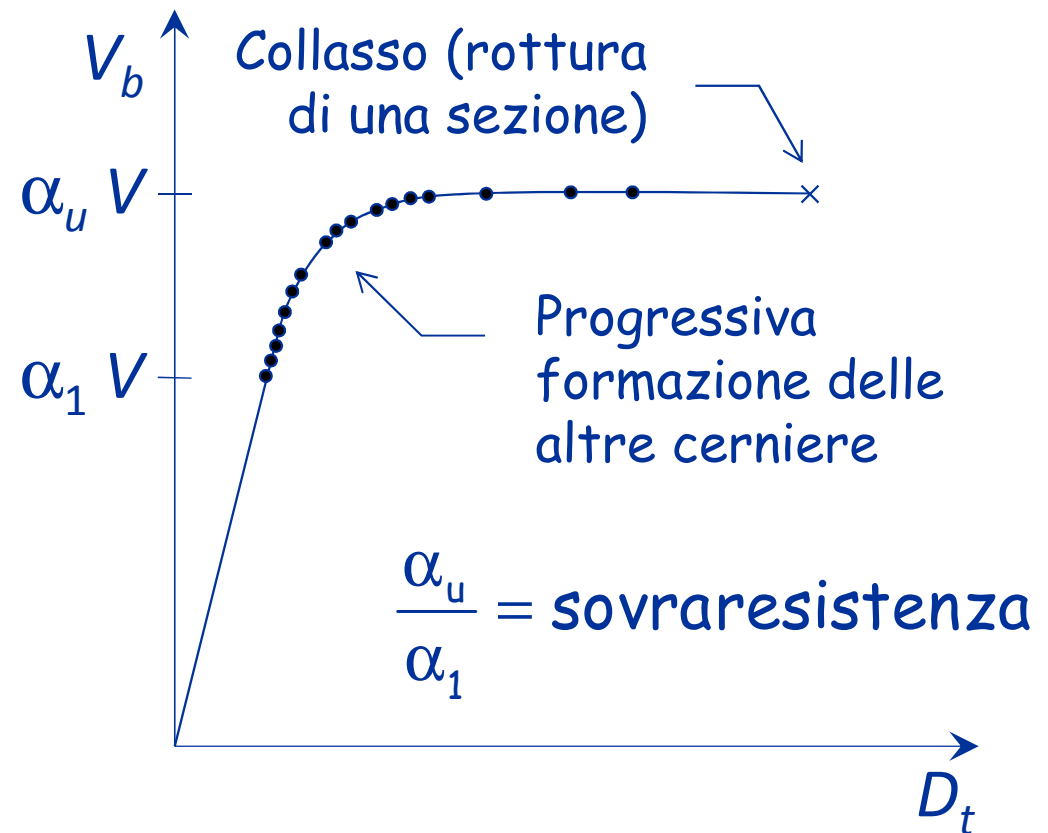
La prima cerniera si forma per un taglio  $\alpha_1 V$

# Ma quanto è duttile una struttura?

- Comportamento sotto forze orizzontali crescenti



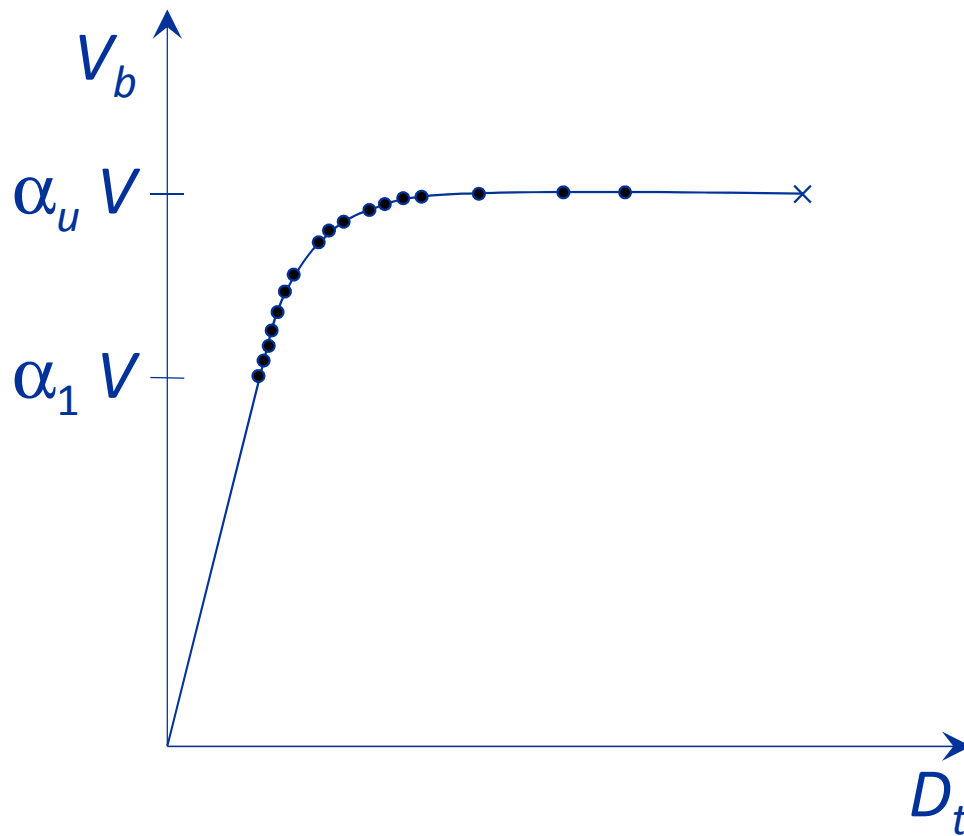
$V_b$  taglio al piede  
 $D_t$  spostamento in testa



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

# Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti

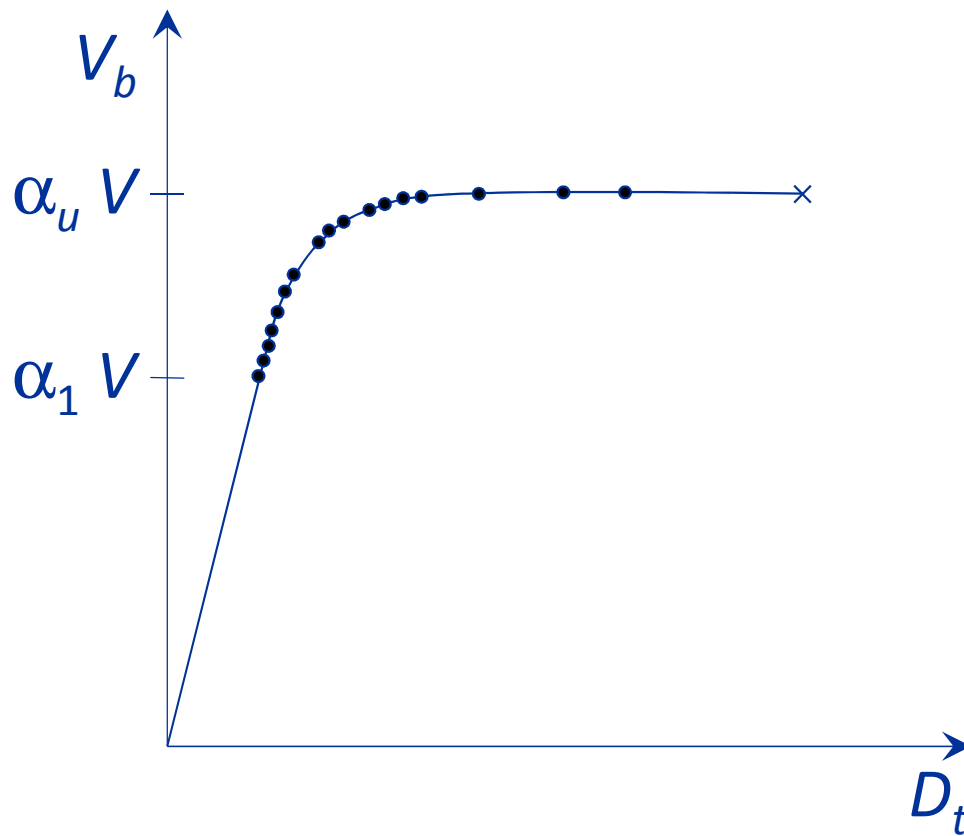


In questo caso:

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

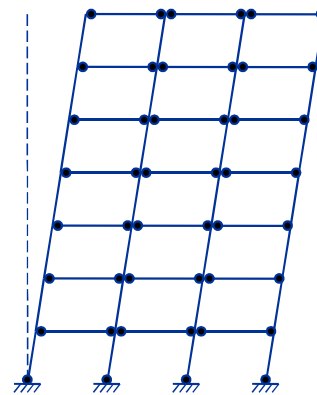
# Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti



Alta duttilità

Possibile meccanismo di  
collasso:

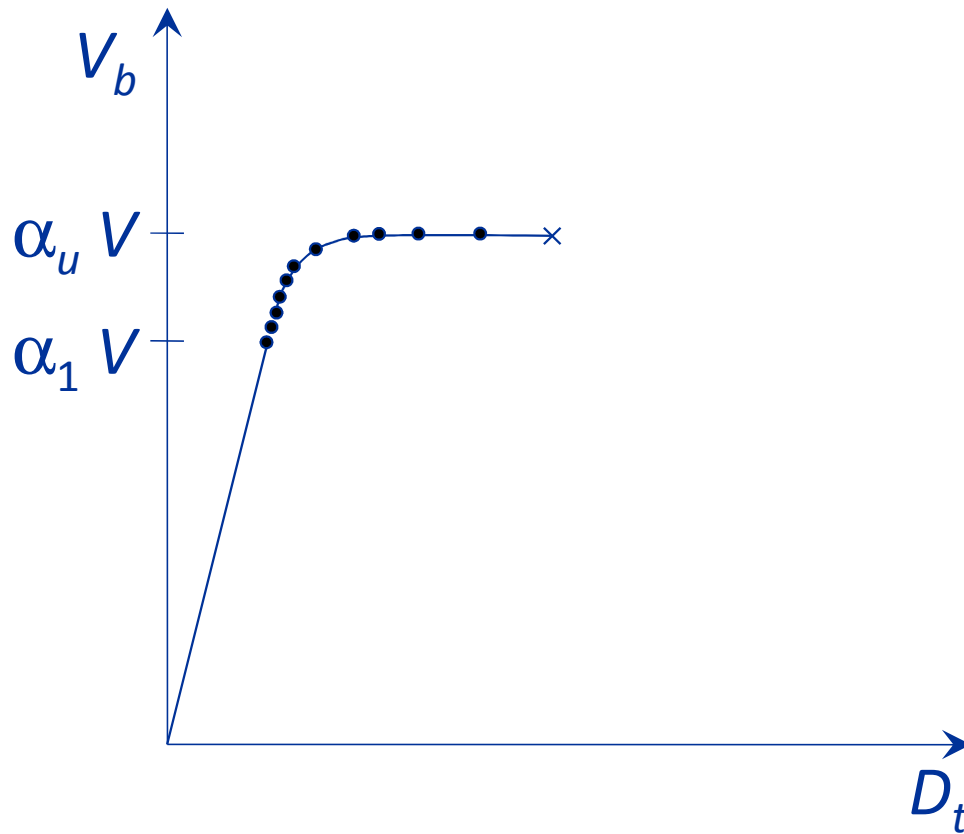


Globale

Cerniere nelle  
travi e solo al  
piede dei  
pilastri

# Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti

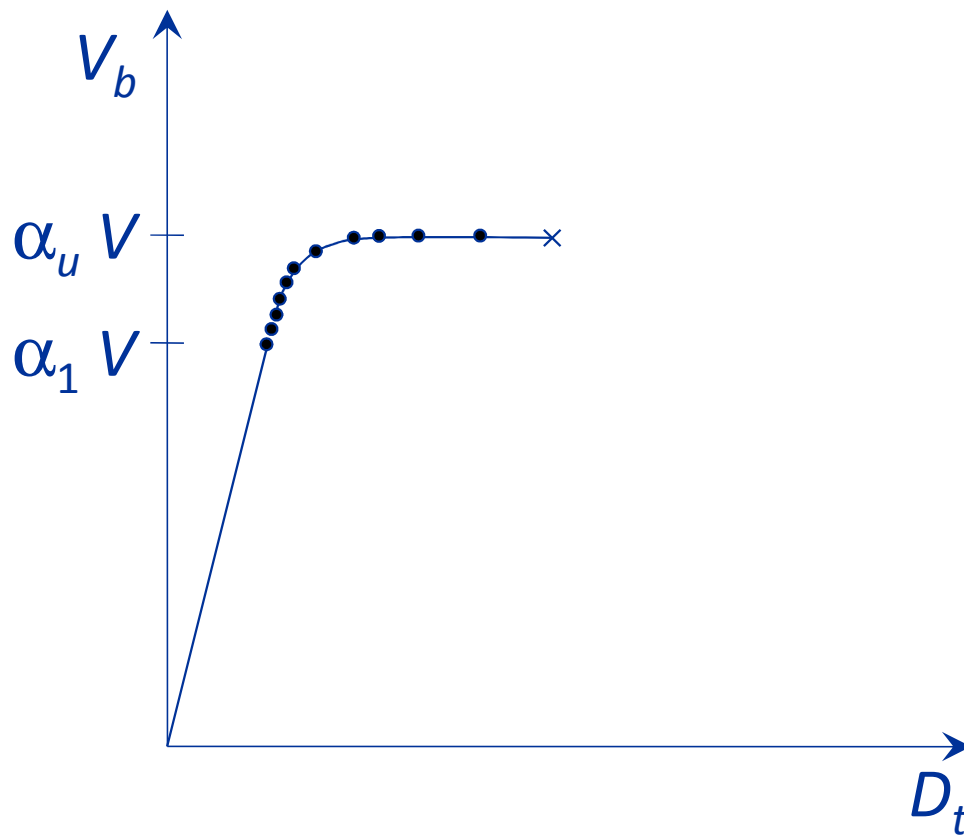


In questo caso:

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

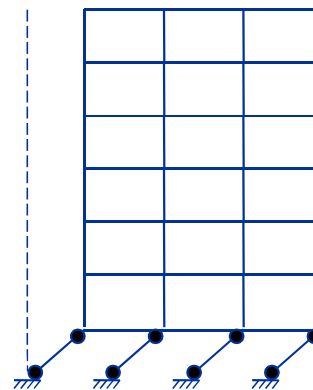
# Ma quanto è duttile una struttura?

- 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

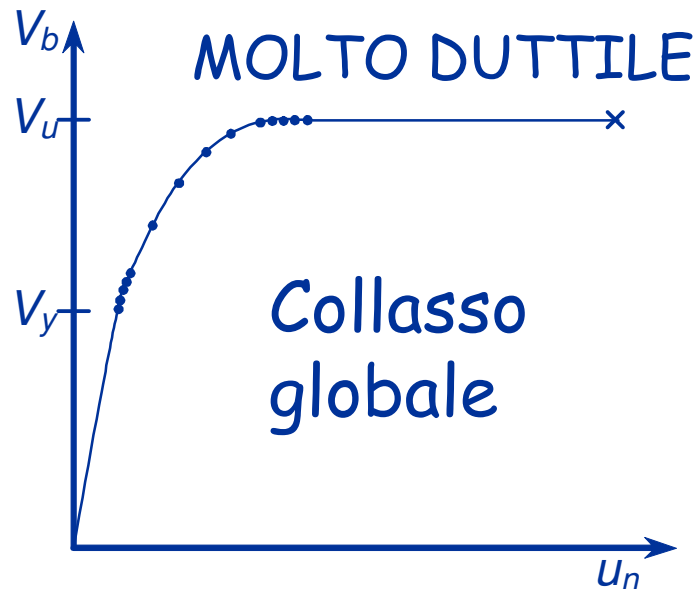
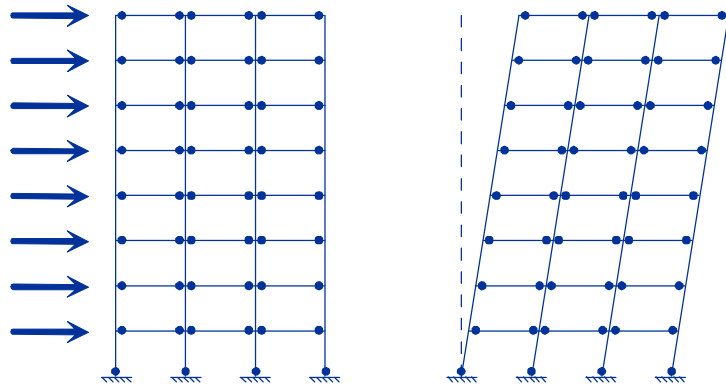
## Classe di duttilità media: CD"B"

Forze di calcolo maggiori

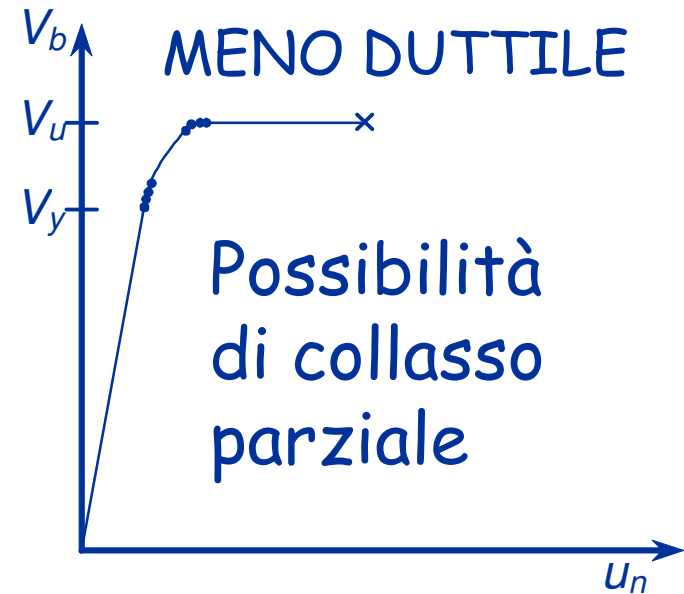
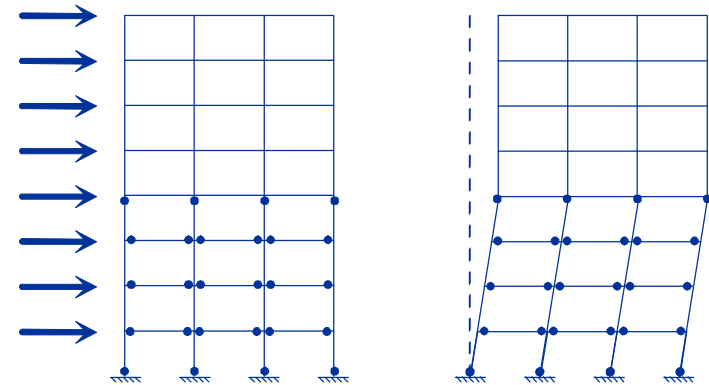
Il progettista deve scegliere, a priori, quale classe di duttilità adottare

# 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;

NTC15, 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;

NTC15, 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*;

NTC15, 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.

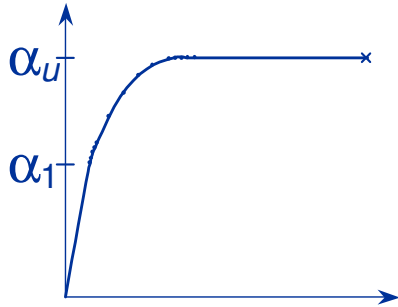
NTC15, punto 7.3.1 e 7.4.3.1

# 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**

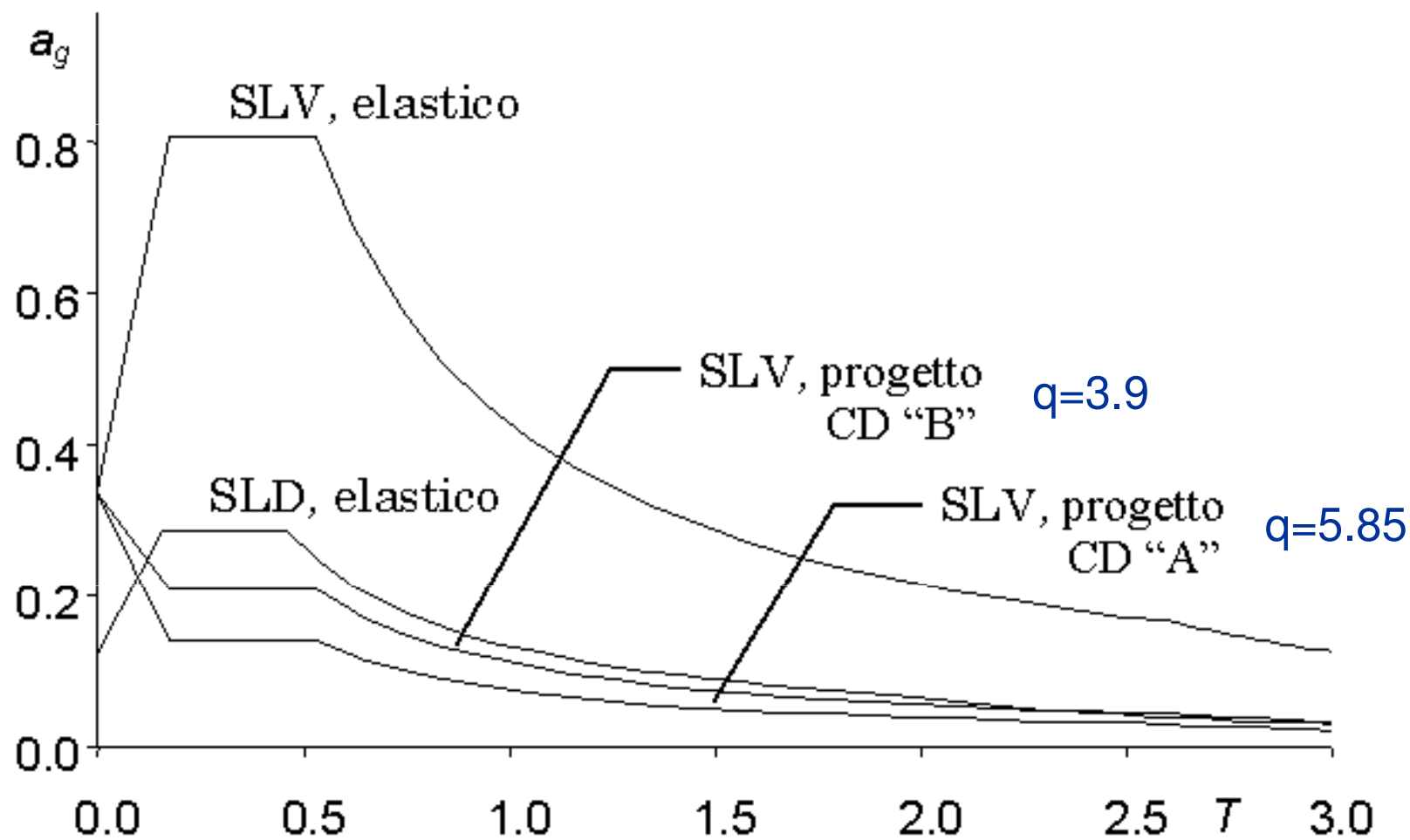
$$q = 3.0 \times 1.15 \times 0.8 = 2.76$$

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  $\alpha_u / \alpha_1$

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

Spettri di risposta e di progetto:  
novità introdotte dalla NTC 2015

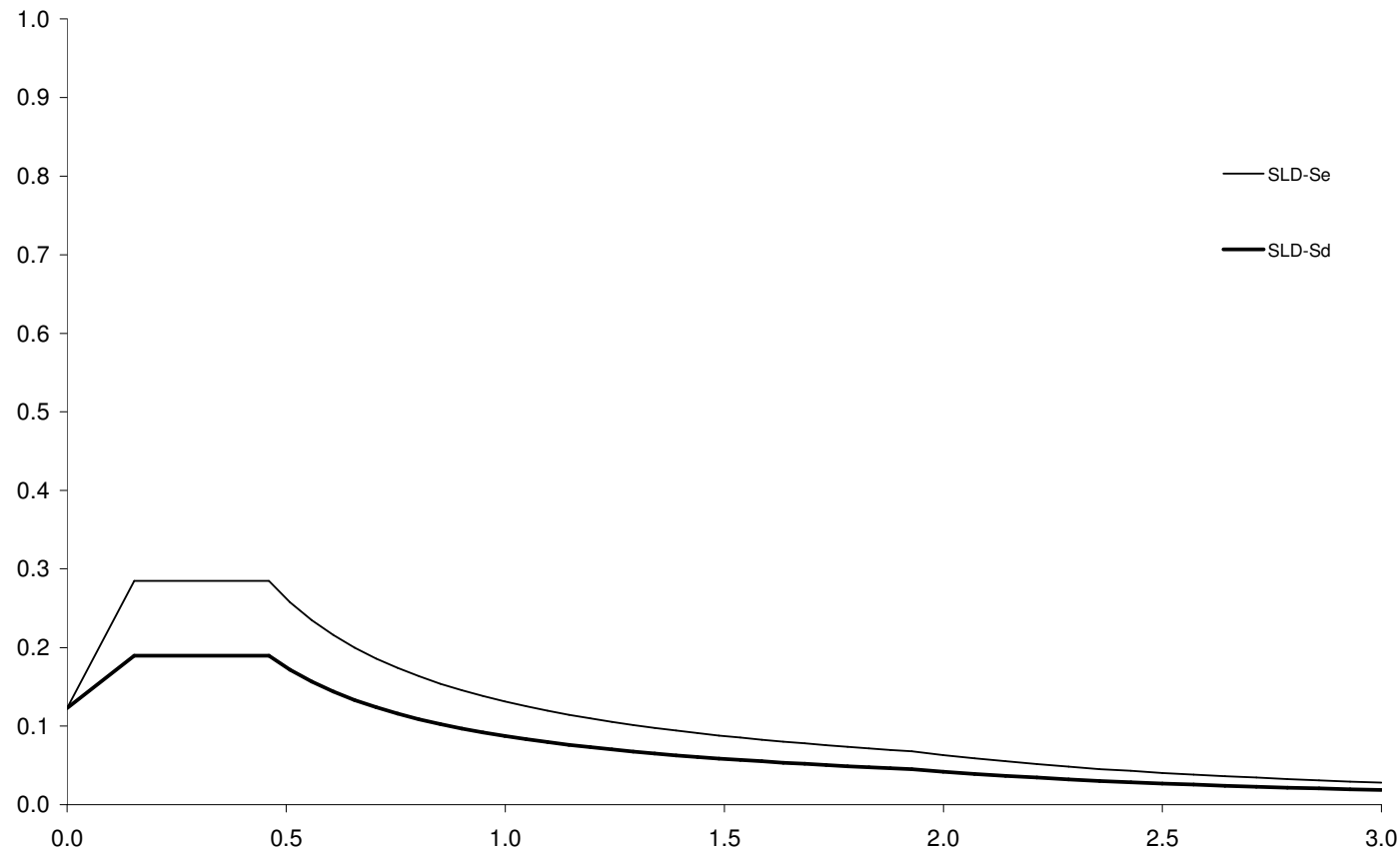
# Spettri di risposta e di progetto: novità introdotte dalla NTC 2013

- Viene inserito un fattore di struttura anche per lo stato limite di danno SLD  
 $q \leq 1.5$

Questa modifica si basa sulla considerazione che per terremoti corrispondenti ad un periodo di ritorno di 50 anni si riscontrano danni strutturali e non strutturali, anche se non troppo rilevanti. Si assume quindi che il danneggiamento strutturale possa corrispondere a  $q \leq 1.5$

# Spettri di risposta e di progetto: novità introdotte dalla NTC 2013

- Viene inserito un fattore di struttura anche per lo stato limite di danno SLD  
 $q \leq 1.5$



# Azione sismica

## paragrafo 3.2 e 7.3

- Viene indicato di scegliere valori del fattore di comportamento  $q$  tali che sia  $S_{d(SLV)} \geq S_{d(SLD)}$

Spettro di risposta di progetto per gli stati limite di danno (SLD), di Salvaguardia della vita (SLV) e di prevenzione del collasso ... le ordinate ridotte ... con  $1/q$

NTC15, punto 3.2.3.5

Qualora la domanda di resistenza allo SLV risulti inferiore a quella allo SLD, si può scegliere di progettare la capacità di resistenza sulla base della domanda allo SLD invece che allo SLV. In tal caso il fattore di comportamento allo SLV deve essere scelto in modo che le ordinate dello spettro di progetto per lo SLV siano non inferiori a quelle dello spettro di progetto per lo SLD

NTC15, punto 7.3.1

# Azione sismica

## paragrafo 3.2 e 7.3

- Viene indicato di scegliere valori del fattore di comportamento  $q$  tali che sia  $S_{d(SLV)} \geq S_{d(SLD)}$

Spettro di risposta di progetto per gli stati limite di danno (SLD), di Salvaguardia (SLV) e di Estremo (SE) ... le ordinate

Qualora ...

Ma allora si deve o si può ... ?

o 3.2.3.5

Qualora la domanda di progetto sia inferiore a quella allo SLD, si può scegliere di progettare la capacità di resistenza sulla base della domanda allo SLD invece che allo SLV. In tal caso il fattore di comportamento allo SLV deve essere scelto in modo che le ordinate dello spettro di progetto per lo SLV siano non inferiori a quelle dello spettro di progetto per lo SLD

NTC15, punto 7.3.1

# Azione sismica

## paragrafo 3.2 e 7.3

- Viene indicato di scegliere valori del fattore di comportamento  $q$  tali che sia  $S_{d(SLV)} \geq S_{d(SLD)}$

Questa modifica ha un senso, perché usare un fattore di comportamento tanto alto da avere ordinate dello spettro di progetto SLV maggiori di quelle di SLD vuol dire che per il terremoto relativo a SLD si ha un danneggiamento maggiore di quanto solitamente accettato

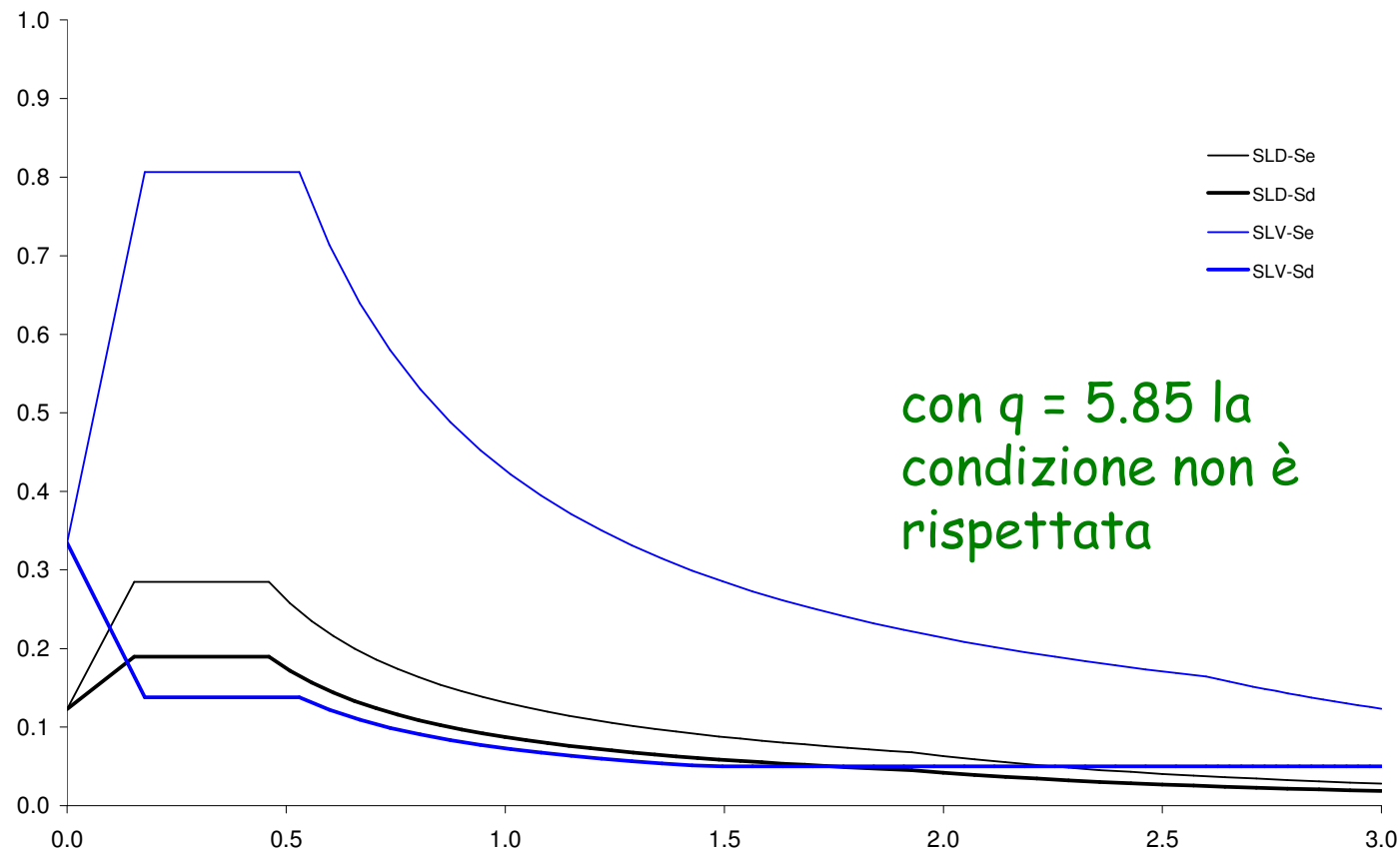
Ma questa prescrizione, se obbligatoria, impedisce quasi sempre di usare i fattori di comportamento tipici della classe di duttilità alta



# Azione sismica

## paragrafo 3.2 e 7.3

- Viene indicato di scegliere valori del fattore di comportamento  $q$  tali che sia  $S_{d(SLV)} \geq S_{d(SLD)}$



# Azione sismica

## paragrafo 3.2 e 7.3

- Viene indicato di scegliere valori del fattore di comportamento  $q$  tali che sia  $S_{d(SLV)} \geq S_{d(SLD)}$

