

Corso

Progetto di strutture in zona sismica

Catania

ottobre 2017 - gennaio 2018

11 - Progettazione basata sulle forze

26 ottobre 2017

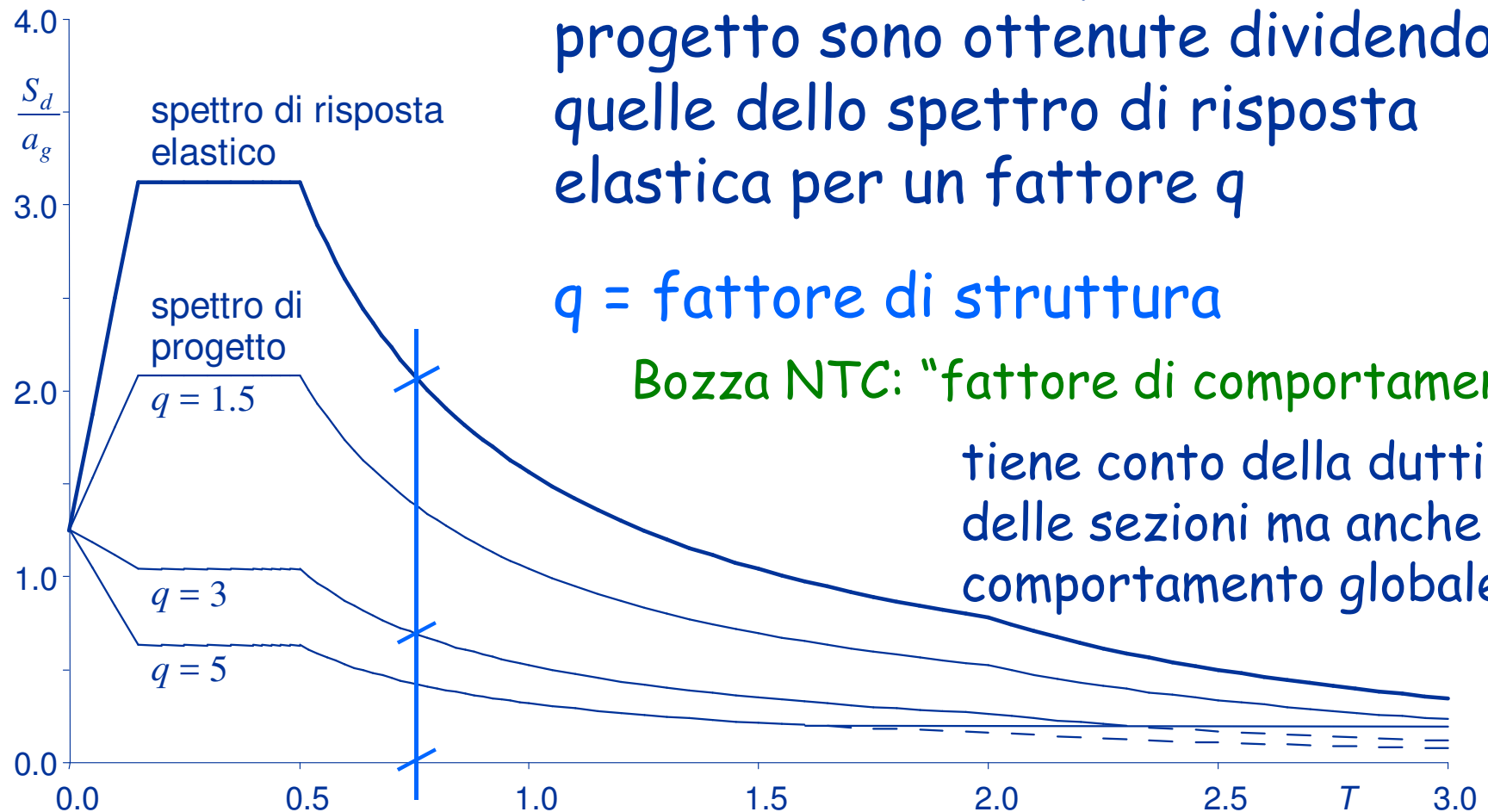
Aurelio Gheresi

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

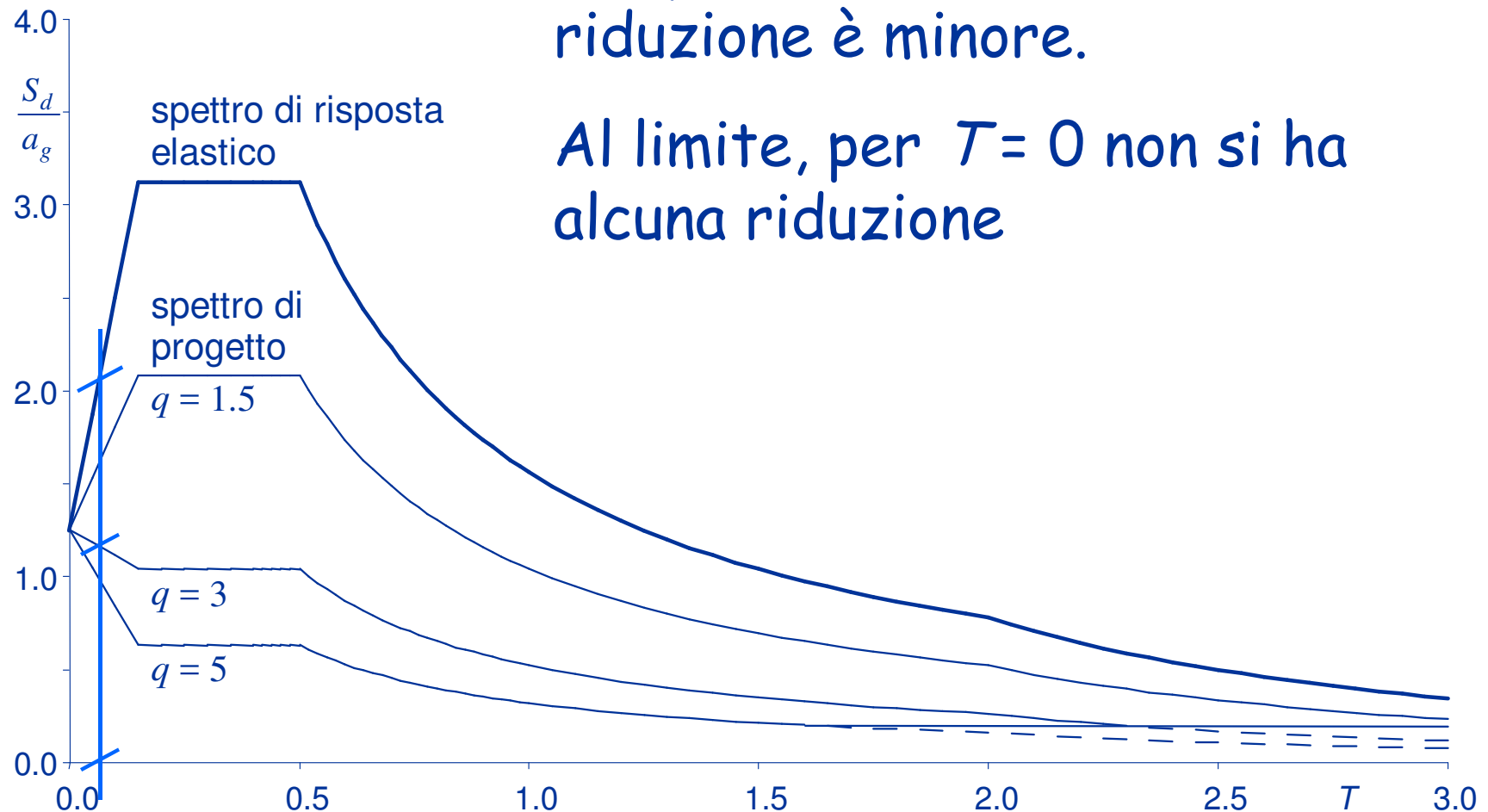
Bozza NTC: "fattore di comportamento"

tiene conto della duttilità delle sezioni ma anche del comportamento globale

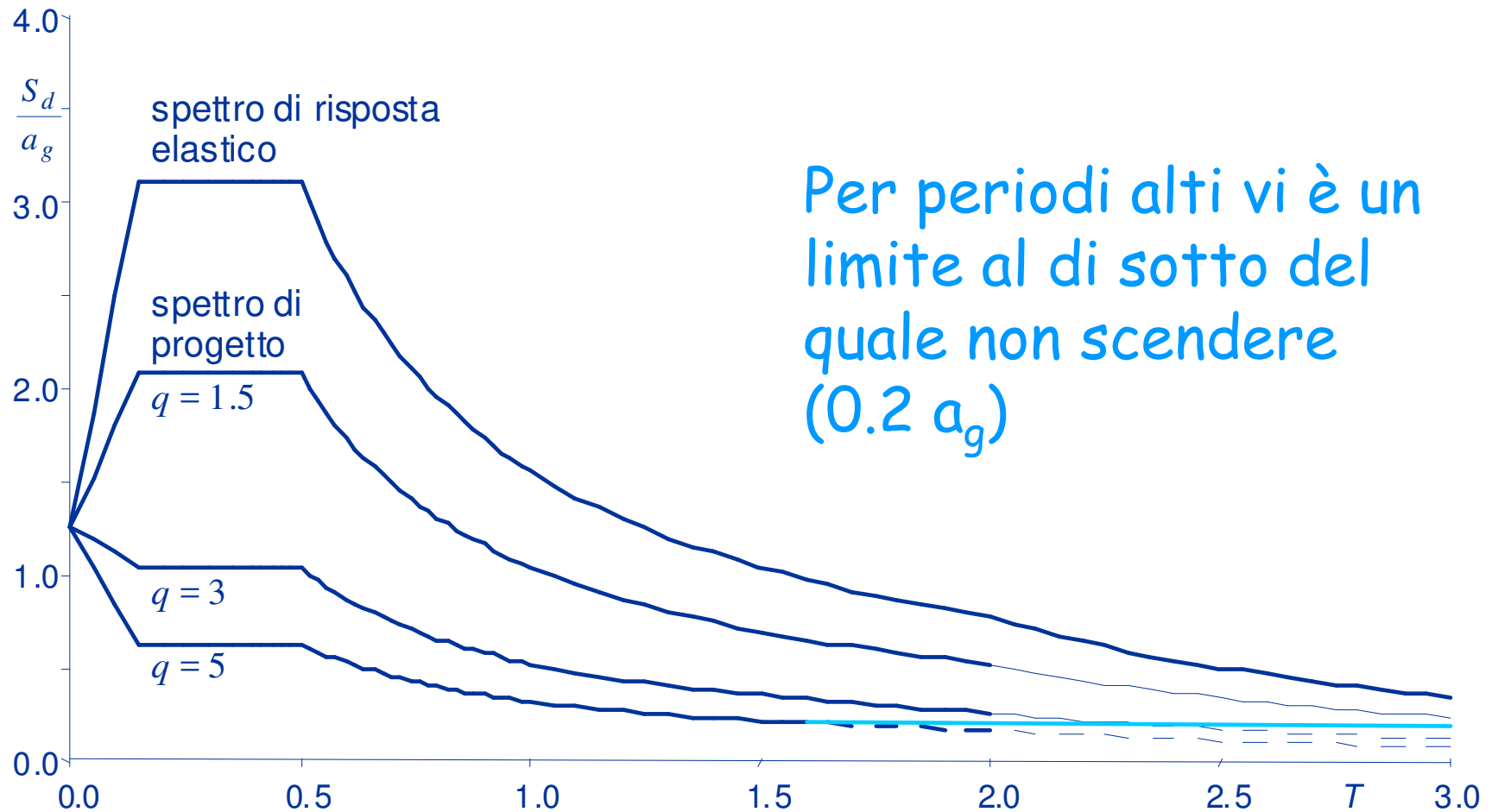
Spettri di progetto di normativa

Per periodi molto bassi la riduzione è minore.

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

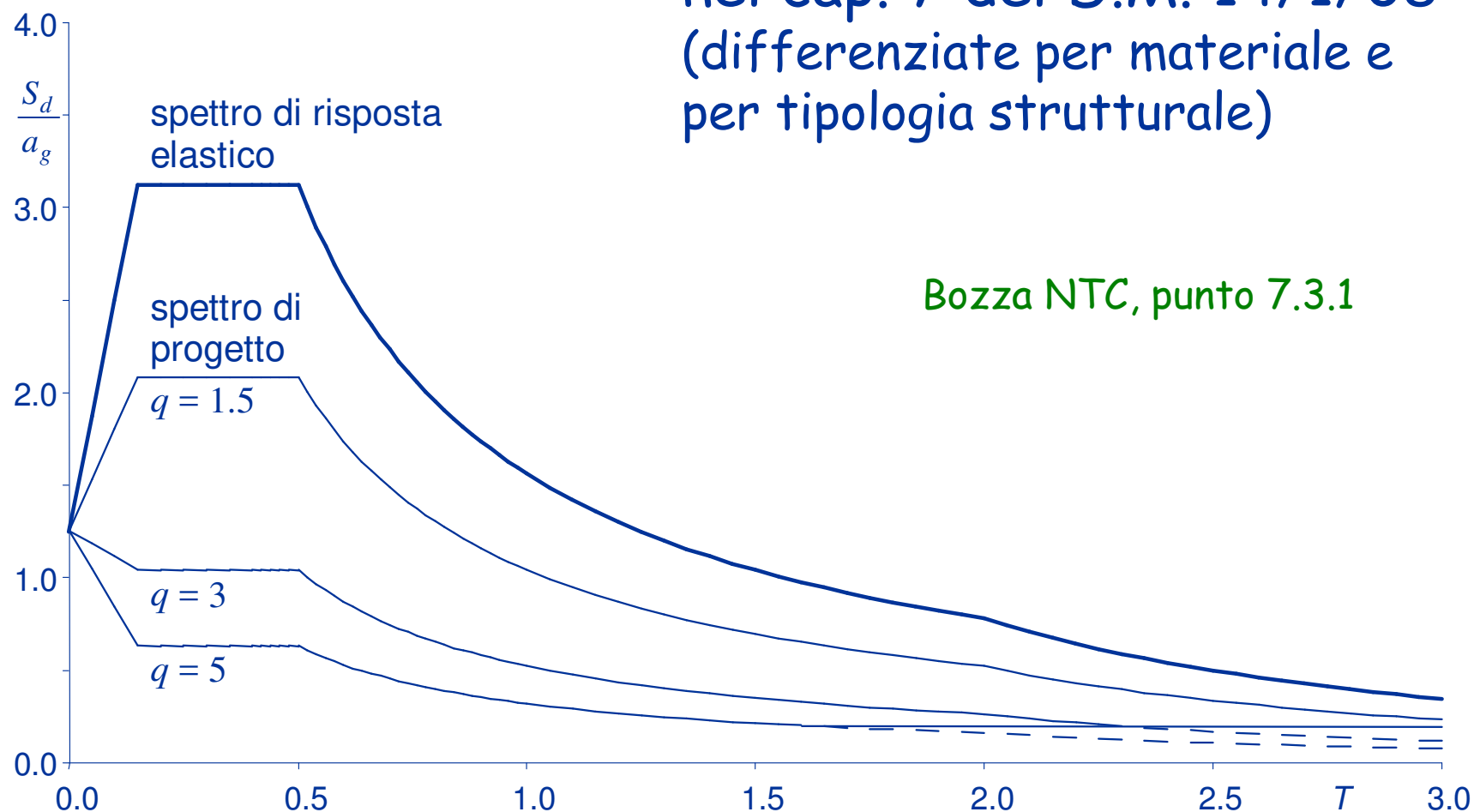


Spettri di progetto di normativa

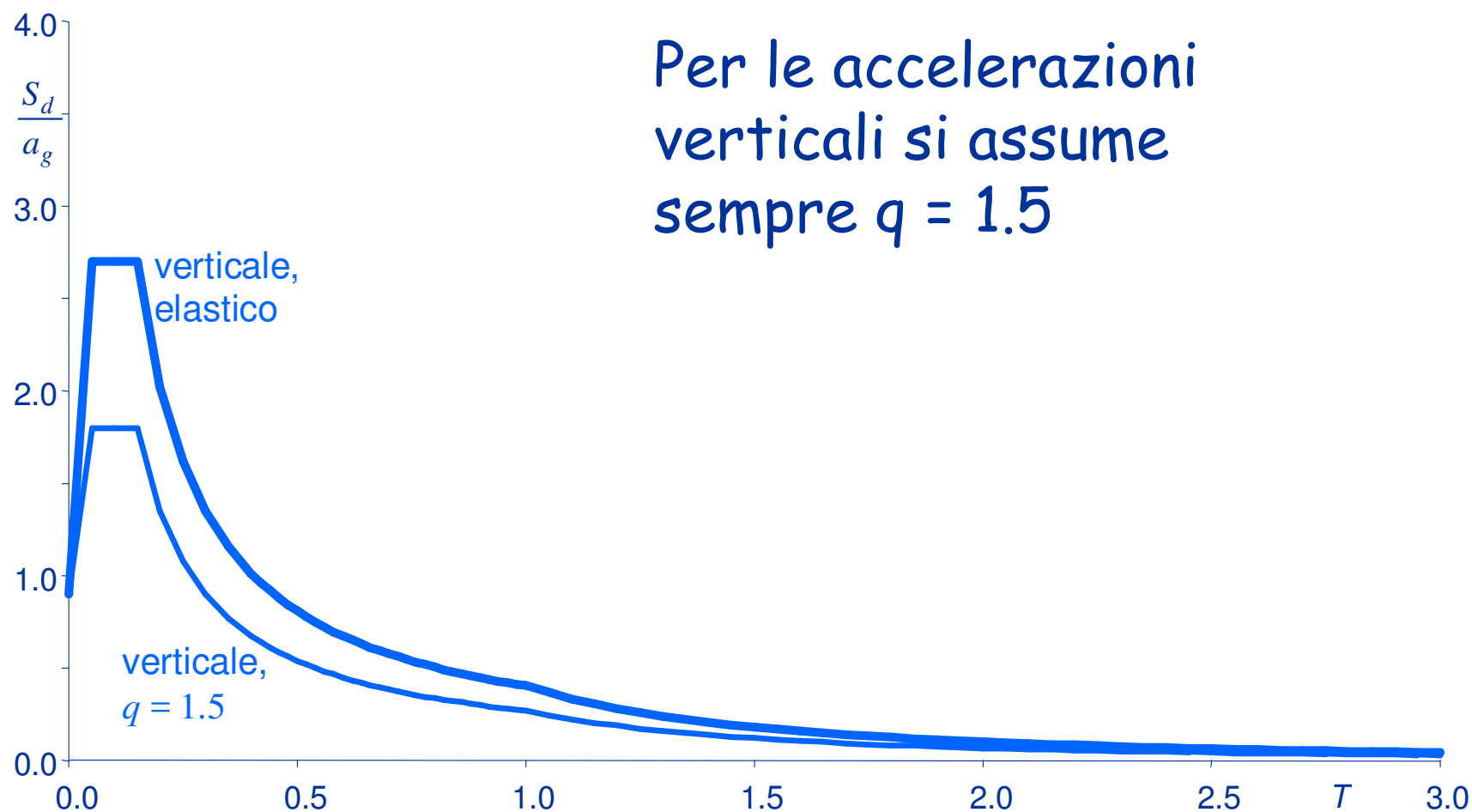


Spettri di progetto di normativa accelerazioni orizzontali

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?

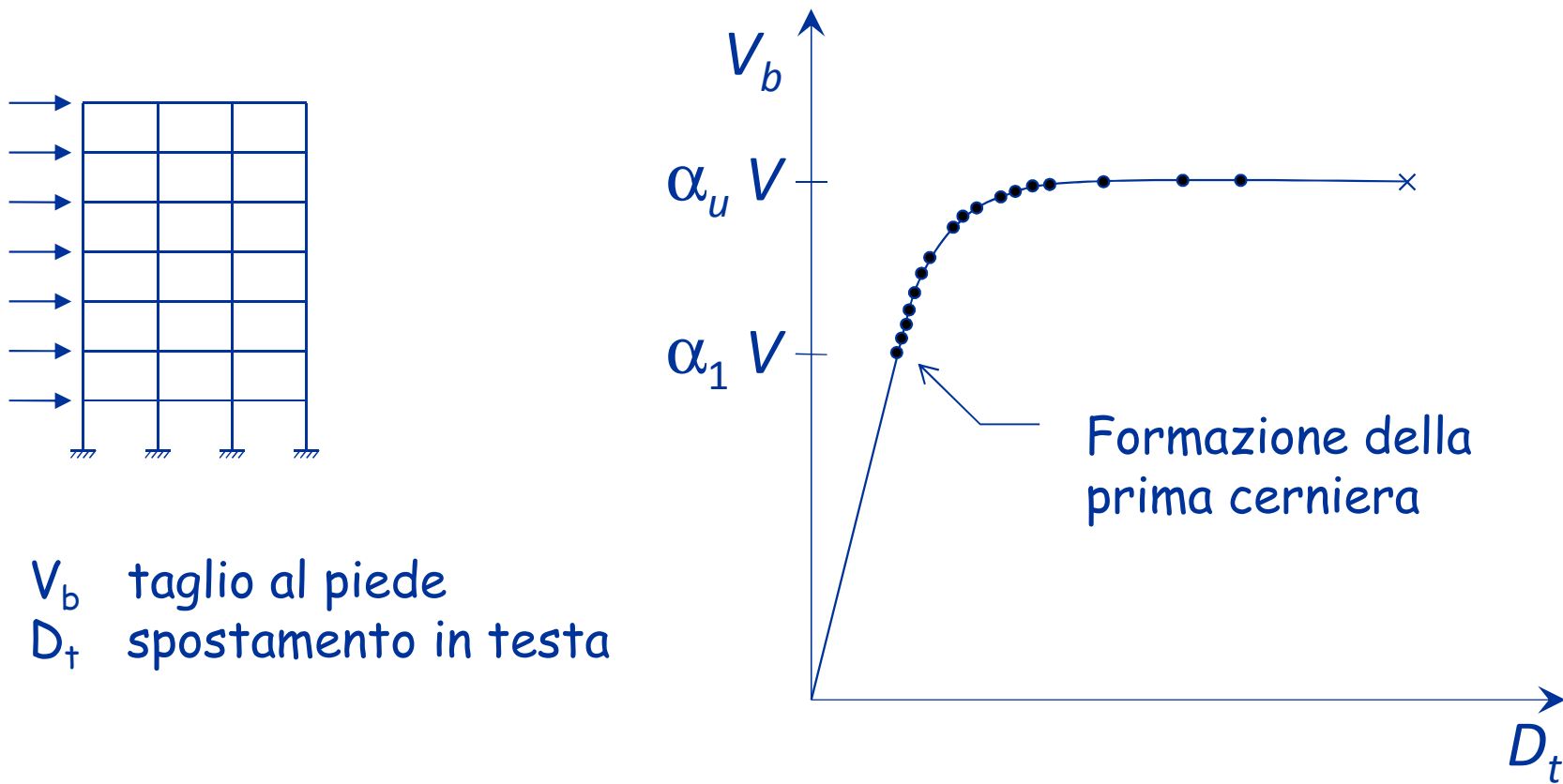
- Un modo possibile per giudicare la duttilità di una struttura è esaminarne il comportamento sotto forze orizzontali crescenti (in aggiunta ai carichi verticali)

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?

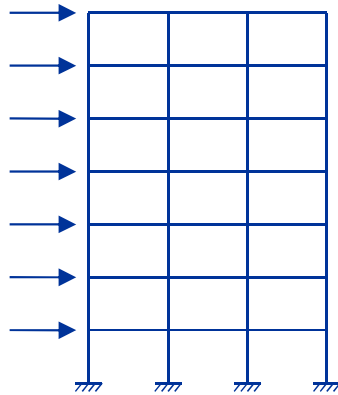
- Comportamento sotto forze orizzontali crescenti



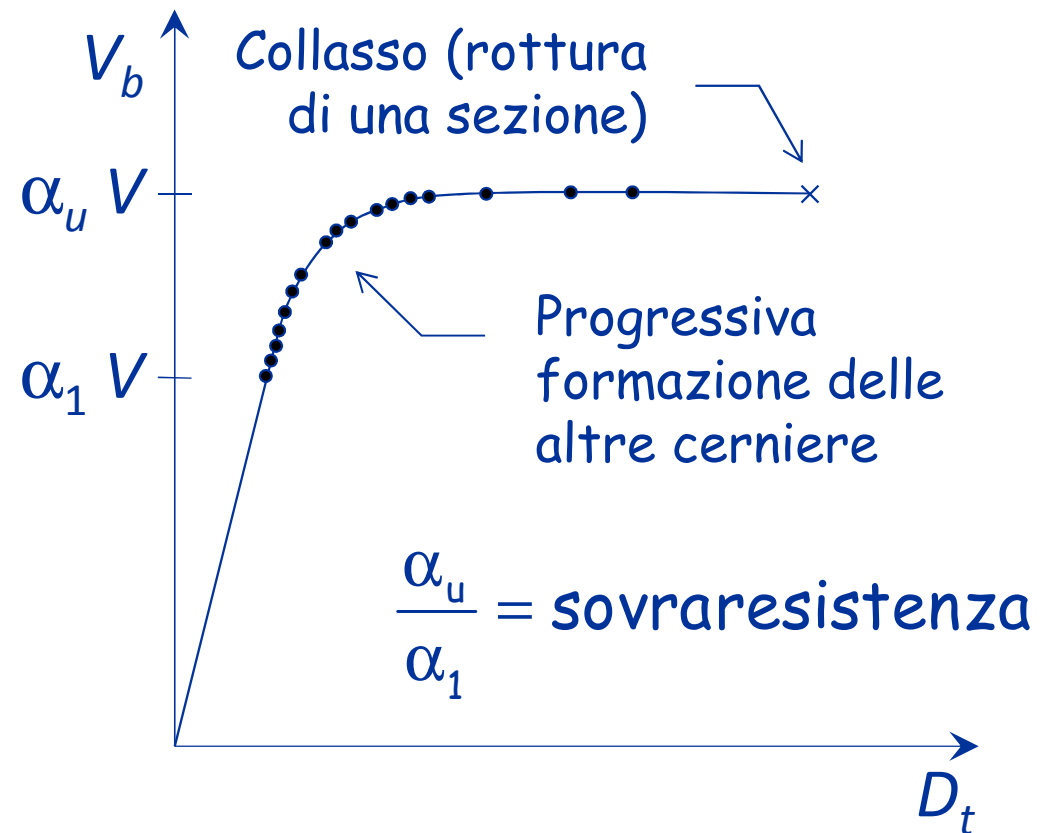
La prima cerniera si forma per un taglio $\alpha_1 V$

Ma quanto è duttile una struttura?

- Comportamento sotto forze orizzontali crescenti



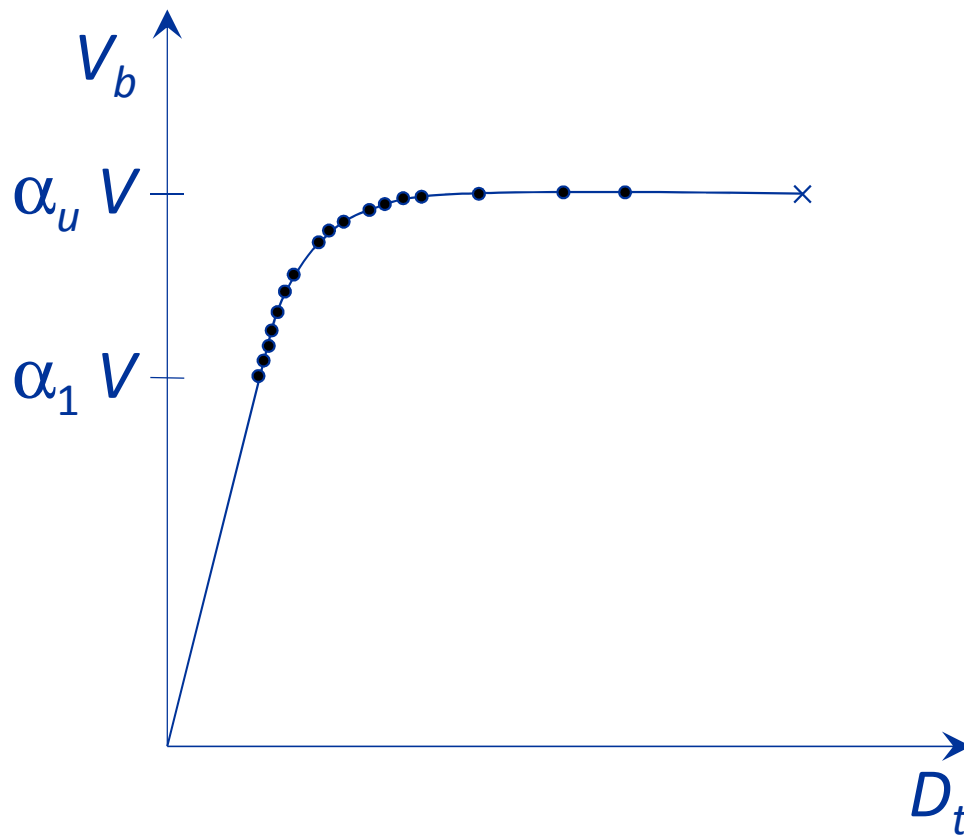
V_b taglio al piede
 D_t spostamento in testa



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

Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti

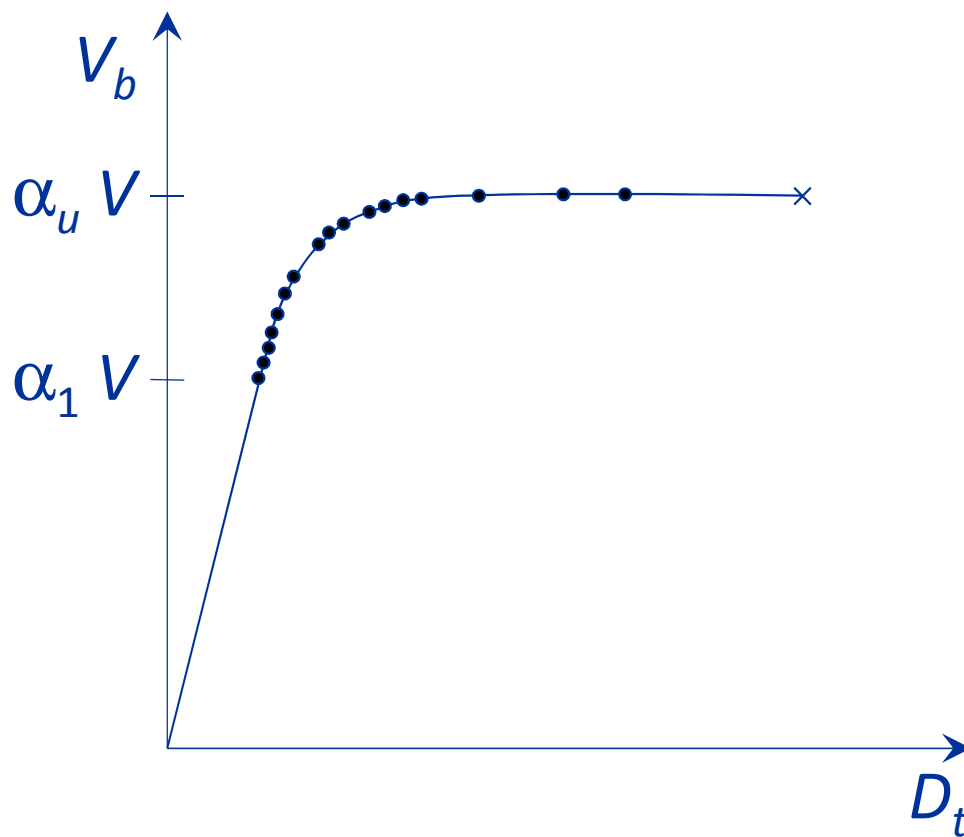


In questo caso:

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

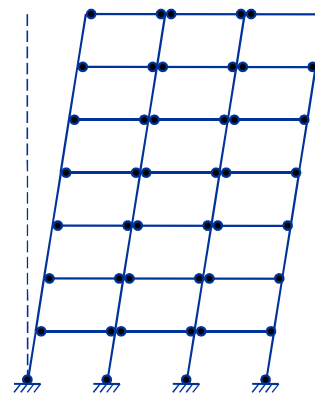
Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti



Alta duttilità

Possibile meccanismo di
collasso:

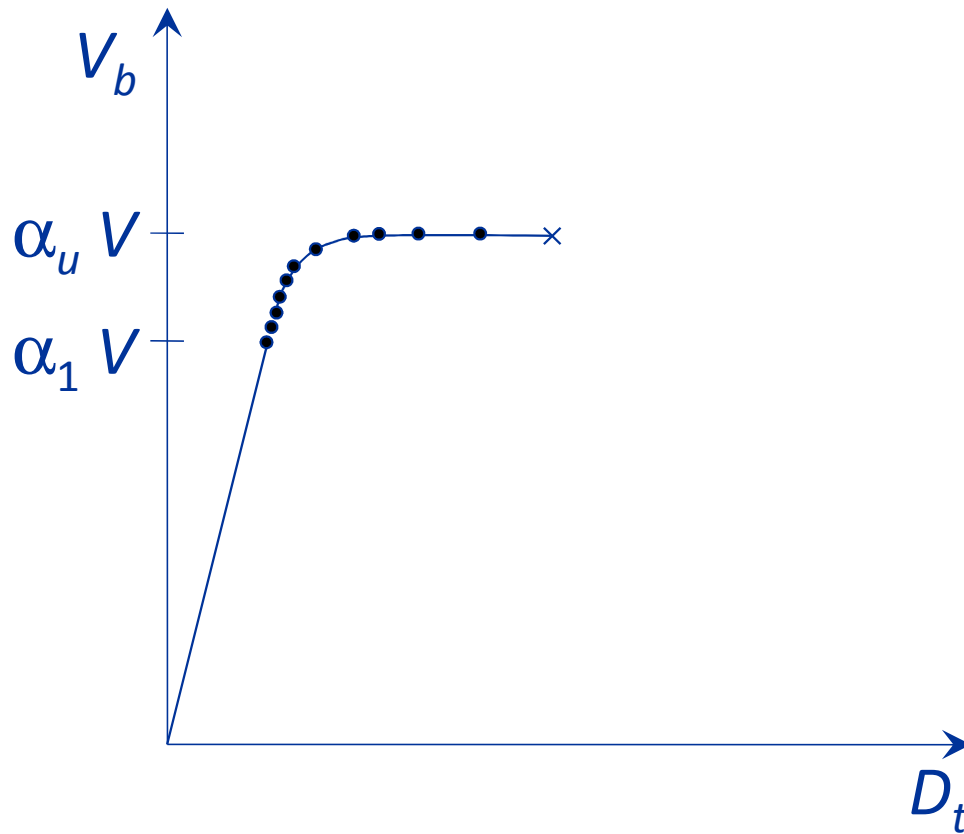


Globale

Cerniere nelle
travi e solo al
piede dei
pilastri

Ma quanto è duttile una struttura?

- Confronto tra possibili comportamenti

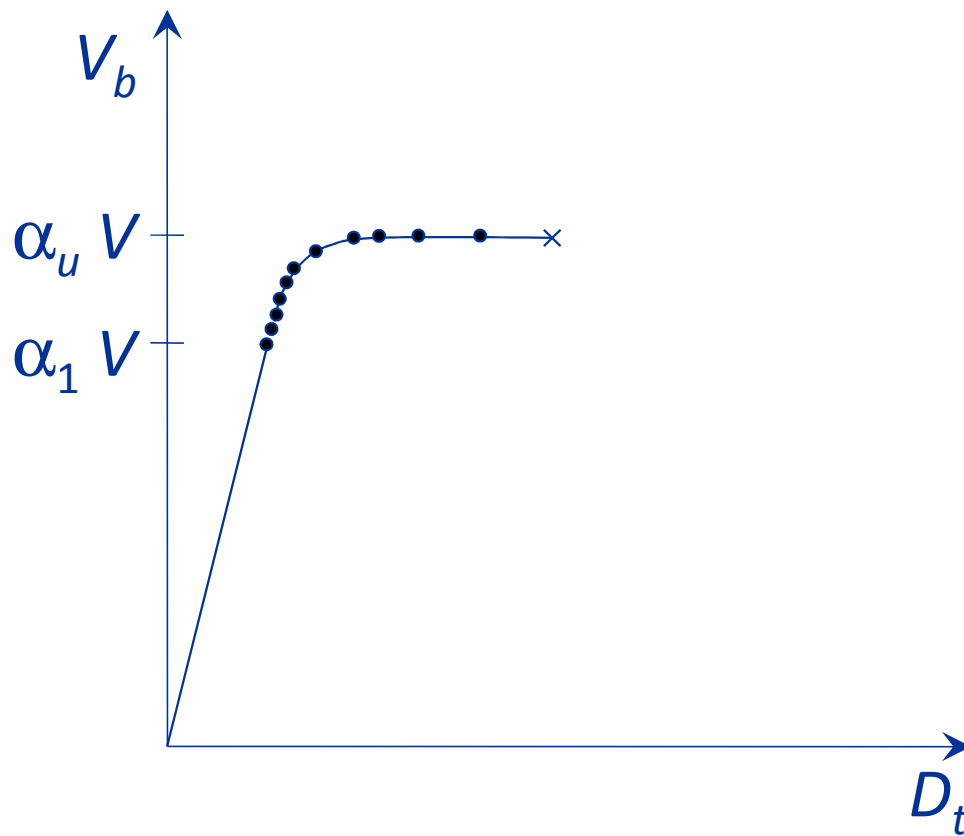


In questo caso:

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

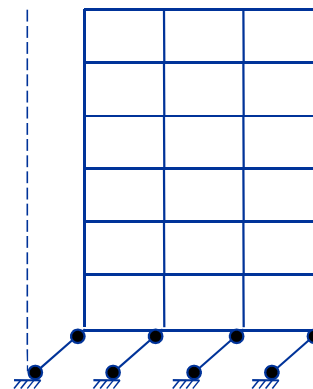
Ma quanto è duttile una struttura?

- 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

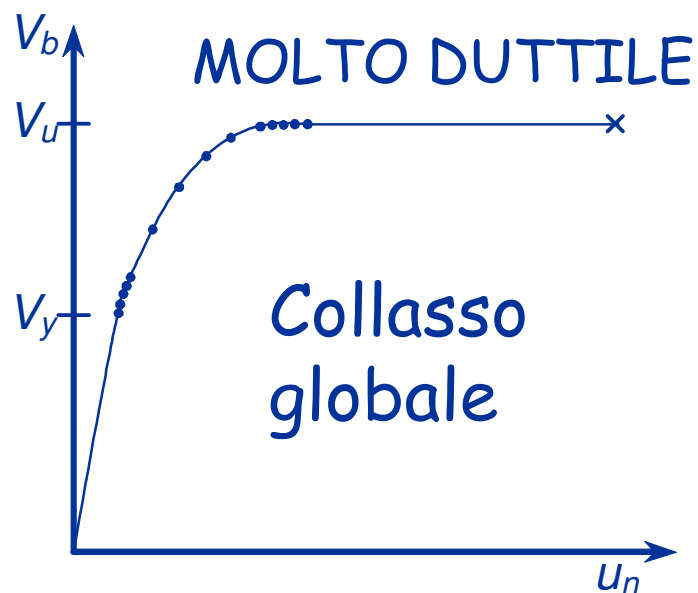
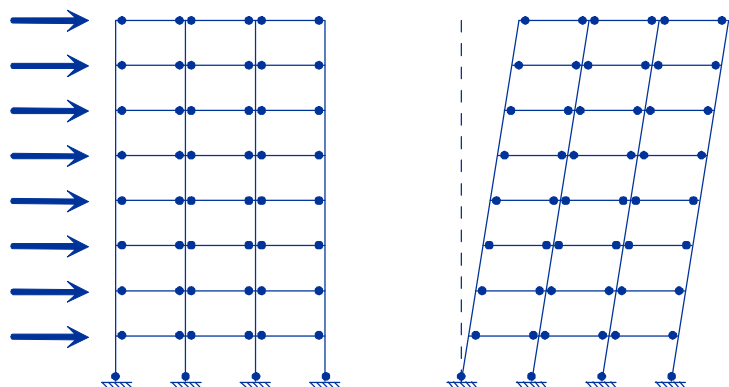
Classe di duttilità media: CD"B"

Forze di calcolo maggiori

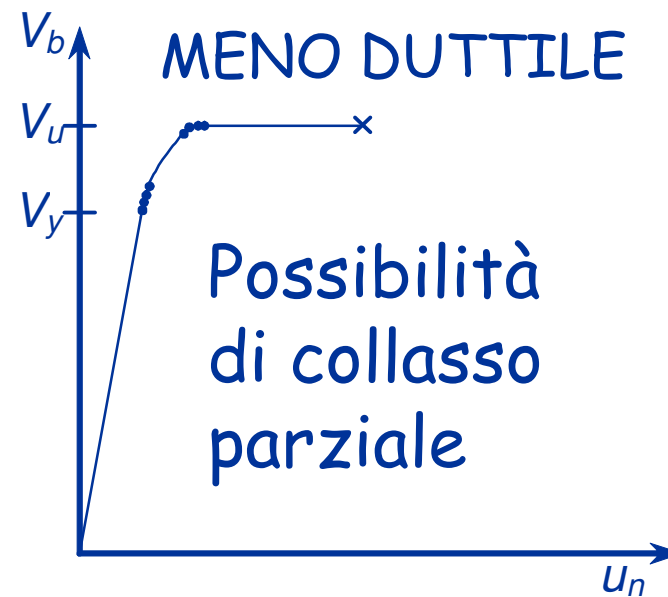
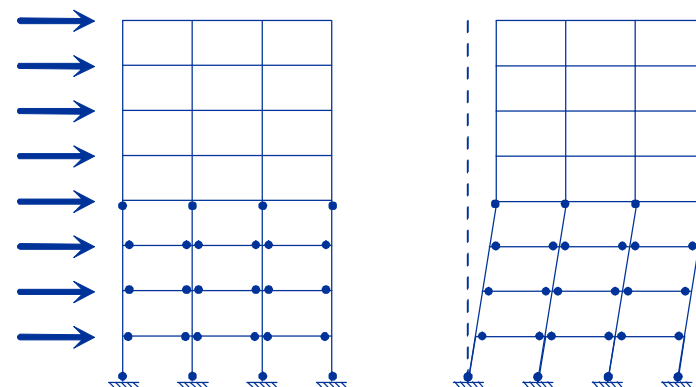
Il progettista deve scegliere, a priori, quale classe di duttilità adottare

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
- Progetto con gerarchia delle resistenze (minime differenze)

Tipologia strutturale

valori di q_0 per edifici in cemento armato

Tipologia strutturale	CD "A"	CD "B"
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$4.5 \alpha_u / \alpha_1$	$3.0 \alpha_u / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	$4.0 \alpha_u / \alpha_1$	3.0
Strutture deformabili torsionalmente	3.0	2.0
Strutture a pendolo inverso	2.0	1.5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano	3.5	2.5

strutture a telaio:

strutture nelle quali la resistenza alle azioni sia verticali che orizzontali è affidata principalmente a telai spaziali, aventi resistenza a taglio alla base $\geq 65\%$ della resistenza a taglio totale

Tipologia strutturale

valori di q_0 per edifici in cemento armato

Tipologia strutturale	CD "A"	CD "B"
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$4.5 \alpha_u / \alpha_1$	$3.0 \alpha_u / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	$4.0 \alpha_u / \alpha_1$	3.0
Strutture deformabili torsionalmente	3.0	2.0
Strutture a pendolo inverso	2.0	1.5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano	3.5	2.5

strutture a pareti:

strutture nelle quali la resistenza alle azioni sia verticali che orizzontali è affidata principalmente a pareti, aventi resistenza a taglio alla base $\geq 65\%$ della resistenza a taglio totale;

le pareti si definiscono **accoppiate** se sono presenti "travi di accoppiamento" duttili distribuite in modo regolare lungo l'altezza

Bozza NTC, punto 7.3.1 e 7.4.3.1

Tipologia strutturale

valori di q_0 per edifici in cemento armato

Tipologia strutturale	CD "A"	CD "B"
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$4.5 \alpha_u / \alpha_1$	$3.0 \alpha_u / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	$4.0 \alpha_u / \alpha_1$	3.0
Strutture deformabili torsionalmente	3.0	2.0
Strutture a pendolo inverso	2.0	1.5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano	3.5	2.5

strutture miste telaio-pareti:

strutture nelle quali la resistenza alle azioni orizzontali è affidata in parte ai telai ed in parte alle pareti;

se più del 50% dell'azione orizzontale è assorbita dai telai si parla di strutture miste equivalenti a telai, altrimenti si parla di strutture miste equivalenti a pareti

Tipologia strutturale

valori di q_0 per edifici in cemento armato

Tipologia strutturale	CD "A"	CD "B"
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$4.5 \alpha_u / \alpha_1$	$3.0 \alpha_u / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	$4.0 \alpha_u / \alpha_1$	3.0
Strutture deformabili torsionalmente	3.0	2.0
Strutture a pendolo inverso	2.0	1.5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano	3.5	2.5

strutture deformabili torsionalmente:

strutture composte da telai e/o pareti, la cui rigidezza torsionale non soddisfa ad ogni piano la condizione $r^2 / I_s^2 \geq 1$

Tipologia strutturale

valori di q_0 per 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

Tipologia strutturale

valori di q_0 per edifici in cemento armato

Tipologia strutturale	CD "A"	CD "B"
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$4.5 \alpha_u / \alpha_1$	$3.0 \alpha_u / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	$4.0 \alpha_u / \alpha_1$	3.0
Strutture deformabili torsionalmente	3.0	2.0
Strutture a pendolo inverso	2.0	1.5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano	3.5	2.5

strutture a pendolo inverso:

strutture nelle quali almeno il 50% della massa è nel terzo superiore dell'altezza della costruzione e nelle quali la dissipazione d'energia avviene alla base di un singolo elemento strutturale

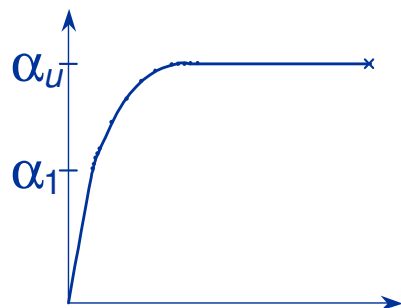
Tipologia strutturale

valori di q_0 per edifici in cemento armato

Tipologia strutturale	CD "A"	CD "B"
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$4.5 \alpha_u / \alpha_1$	$3.0 \alpha_u / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	$4.0 \alpha_u / \alpha_1$	3.0
Strutture deformabili torsionalmente	3.0	2.0
Strutture a pendolo inverso	2.0	1.5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano	3.5	2.5

strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano:
strutture nelle quali almeno il 50% della massa è nel terzo superiore dell'altezza della costruzione, in cui i pilastri sono incastrati in sommità alle travi lungo entrambe le direzioni principali dell'edificio

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

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 per struttura a telaio in c.a.

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

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

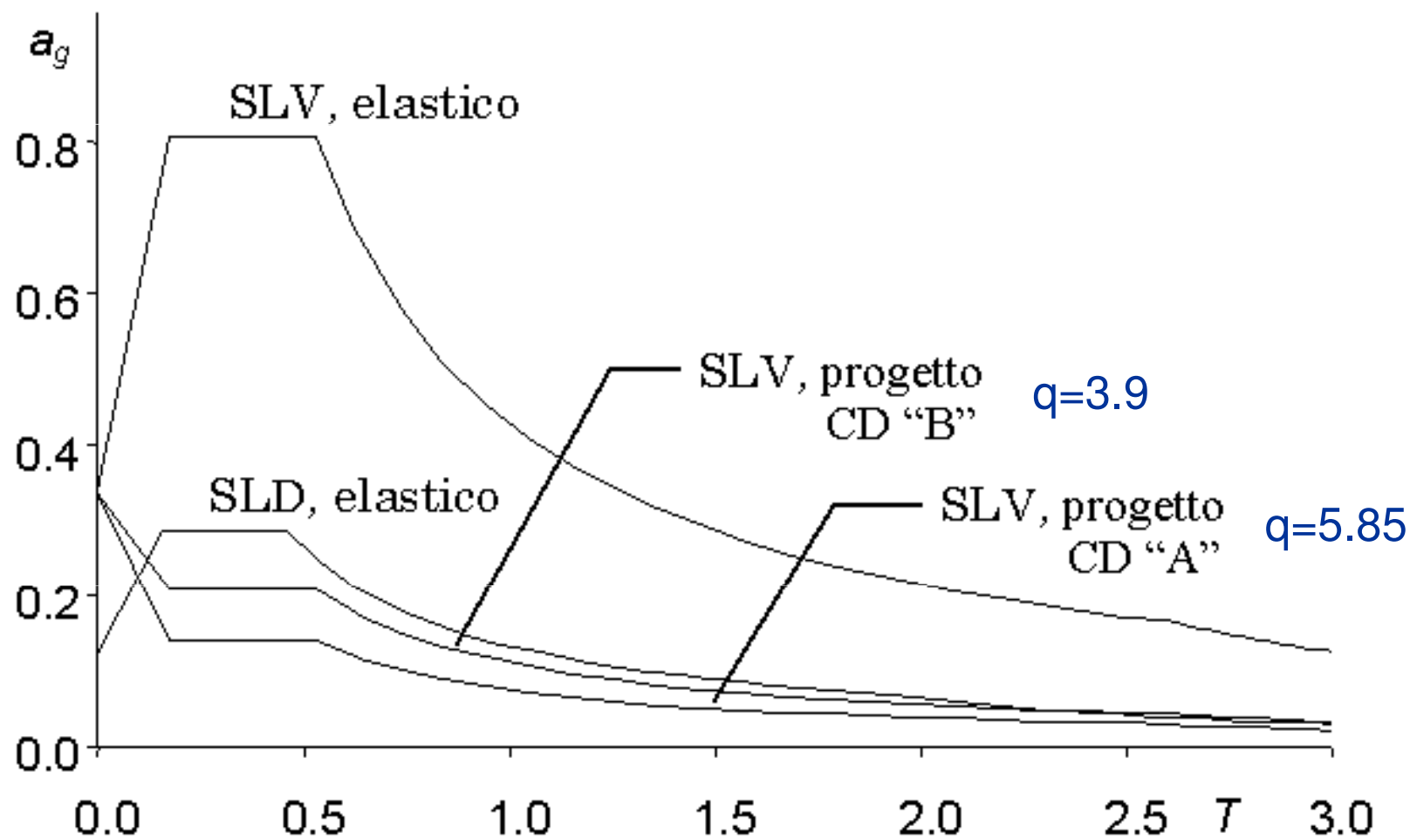
Stesso edificio, ma **non regolare** in altezza né in pianta ed a **media duttilità**

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

Quindi le forze sono maggiori di oltre il doppio

Nota: 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

La struttura è regolare in altezza se:

- 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 $\pm \cancel{20\%}$ 30%

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 può essere effettuato in linea di massima a priori ma è opportuno un controllo a posteriori, dopo aver effettuato il calcolo degli spostamenti
- il controllo 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
- impalcati infinitamente rigidi nel loro piano
- 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

Regolarità in pianta

Criteri di normativa:

- configurazione compatta e approssimativamente simmetrica
- impalcati infinitamente rigidi nel loro piano
- rapporto tra i lati di un rettangolo in cui è inscritta la pianta inferiore a 4
- l'area compresa tra il perimetro dell'orizzontamento e la linea convessa circoscritta all'orizzontamento non supera il 5% dell'area dell'orizzontamento

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