

Costruzioni in zona sismica

A.A. 2019-20

Fattore di comportamento

Fattore di comportamento (§3.2.3.5)

Qualora le verifiche agli stati limite ultimi non vengano effettuate tramite l'uso di opportuni accelerogrammi ed analisi dinamiche al passo, ai fini del progetto o della verifica delle strutture le capacità dissipative delle strutture possono essere messe in conto attraverso una riduzione delle forze elastiche, che tiene conto in modo semplificato della **capacità dissipativa anelastica** della struttura, della sua **sovraresistenza, dell'incremento del suo periodo** proprio a seguito delle plasticizzazioni.

In tal caso, lo spettro di progetto $S_d(T)$ da utilizzare, sia per le componenti orizzontali, sia per la componente verticale, è lo spettro elastico corrispondente riferito alla probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} considerata (v. §§ 2.4 e 3.2.1), con le ordinate ridotte **sostituendo η con $1/q$** , dove **q è il fattore di comportamento definito nel capitolo 7**.

Si assumerà comunque $S_d(T) \geq 0,2a_g$.

Fattore di comportamento

Il fattore di comportamento q è un coefficiente che tiene conto in modo semplificato della capacità dissipativa anelastica della struttura della sua sovreresistenza attraverso il quale viene convenientemente ridotto lo spettro di progetto.

S = coeffic. di amplific. stratigrafica

η = fattore per coefficienti di smorzamento ξ diversi dal 5%

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55$$

F_0 = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale

$$0 \leq T < T_B$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

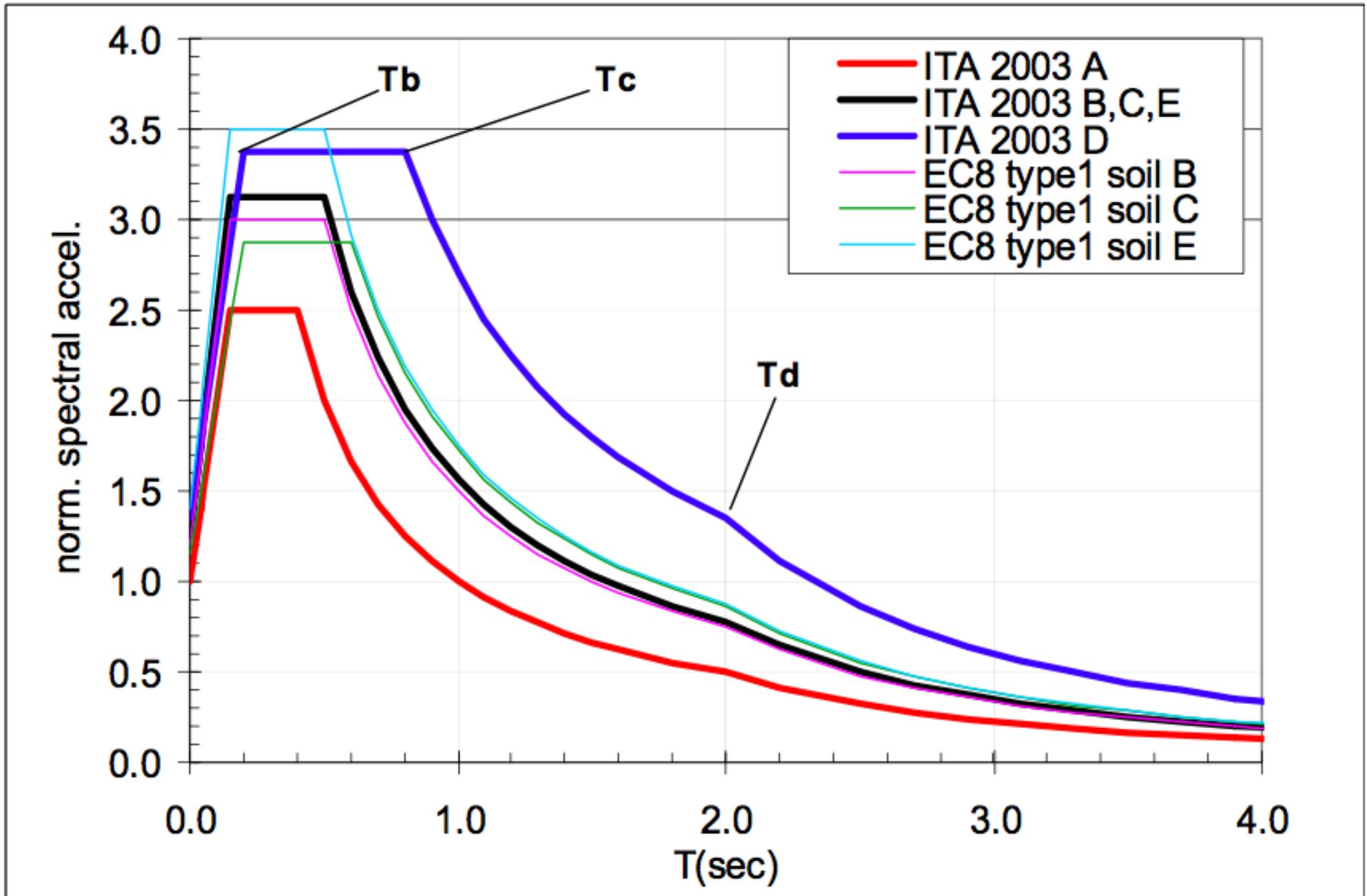
$$T_C \leq T < T_D$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Spettro di Risposta



Fattore di comportamento: riduzione dello spettro di progetto

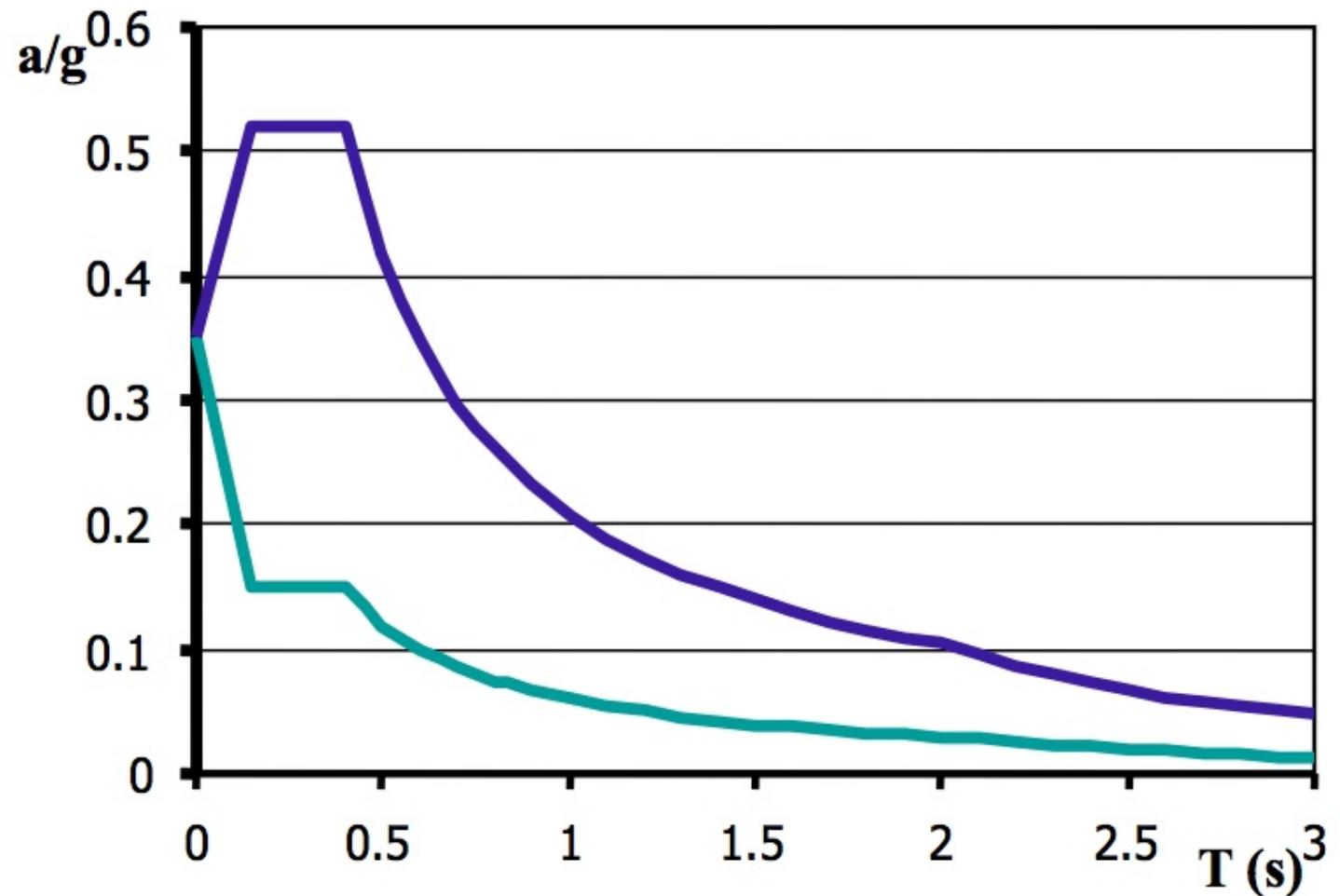
$a_g = 0,35g$, terreno **A**, per valori estremi del fattore q ($\alpha_u/\alpha_1=1,1 \div 1,3$):

$q=q_{min}=1,60$

(strutture in c.a. deformabili torsionalmente, in classe di duttilità bassa e non regolari in altezza);

$q=q_{max}=5,85$

(strutture in c.a. a telaio, in classe di duttilità alta e regolari in altezza).



Fattore di comportamento

Nel caso di comportamento strutturale dissipativo il valore **del fattore di comportamento q** , da utilizzare per lo stato limite considerato e nella direzione considerata per l'azione sismica, dipende:

- dalla **tipologia strutturale**,
- dalla **regolarità** della costruzione in pianta e in altezza
- dalla **classe di duttilità**
- dal **rapporto di sovraresistenza**

e tiene conto, convenzionalmente, delle capacità dissipative del materiale.

Le strutture possono essere classificate come appartenenti ad una tipologia in una direzione orizzontale e ad un'altra tipologia nella direzione orizzontale ortogonale alla precedente, utilizzando per ciascuna direzione il fattore di comportamento corrispondente.

Fattore di comportamento (§7.3.1)

Il limite superiore q_{lim} del fattore di comportamento relativo allo SLV è calcolato tramite la seguente espressione:

$$q_{lim} = q_0 \cdot K_R$$

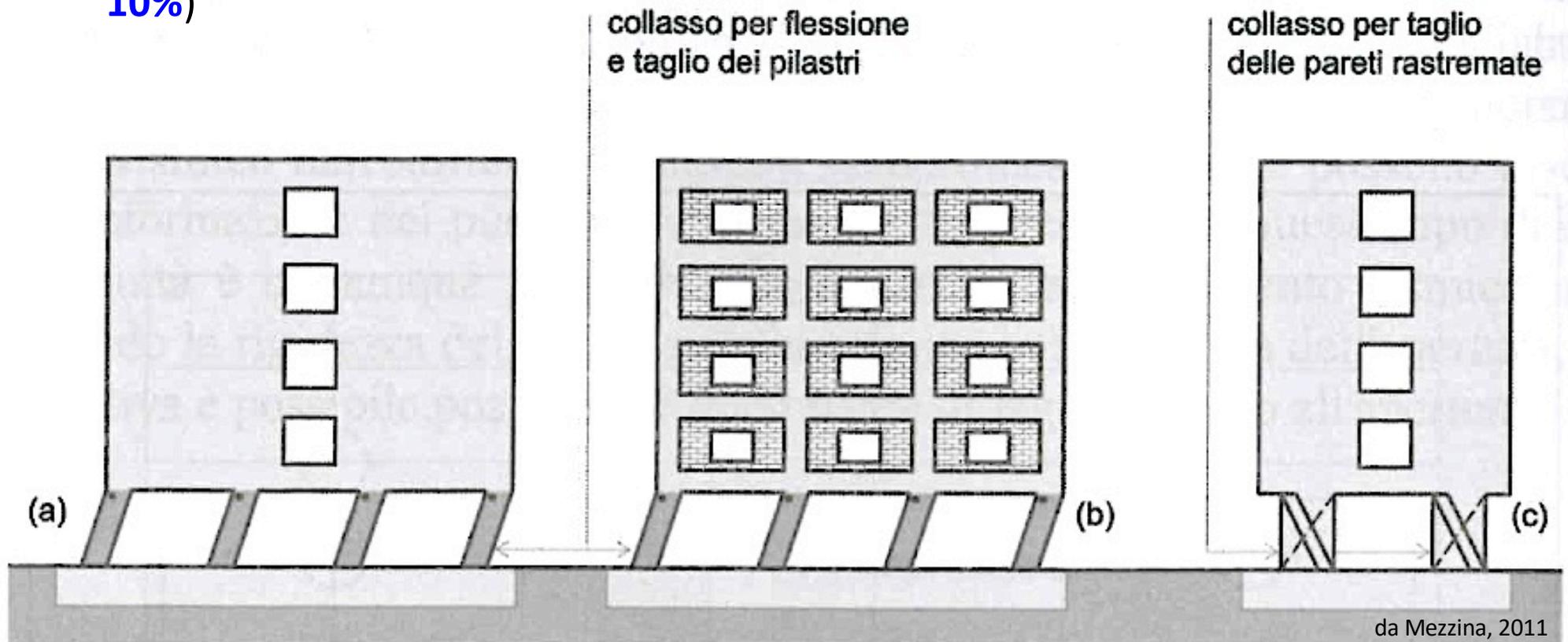
dove:

q_0 è il valore di base del fattore di comportamento allo SLV che dipende dalla **tipologia strutturale**, dalla **classe di duttilità** e dal **rapporto di sovreresistenza α_u/α_1** tra il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile e quello per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione a flessione;

K_R è un fattore riduttivo che dipende dalle **caratteristiche di regolarità in altezza** della costruzione, con valore pari ad 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

Regolarità in altezza (NTC 18)

- d) tutti i sistemi resistenti alle azioni verticali (quali telai e pareti) si estendono per tutta l'altezza della costruzione;
- e) massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (**le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non superano il 25 %, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%**)



Regolarità in altezza (NTC 18)

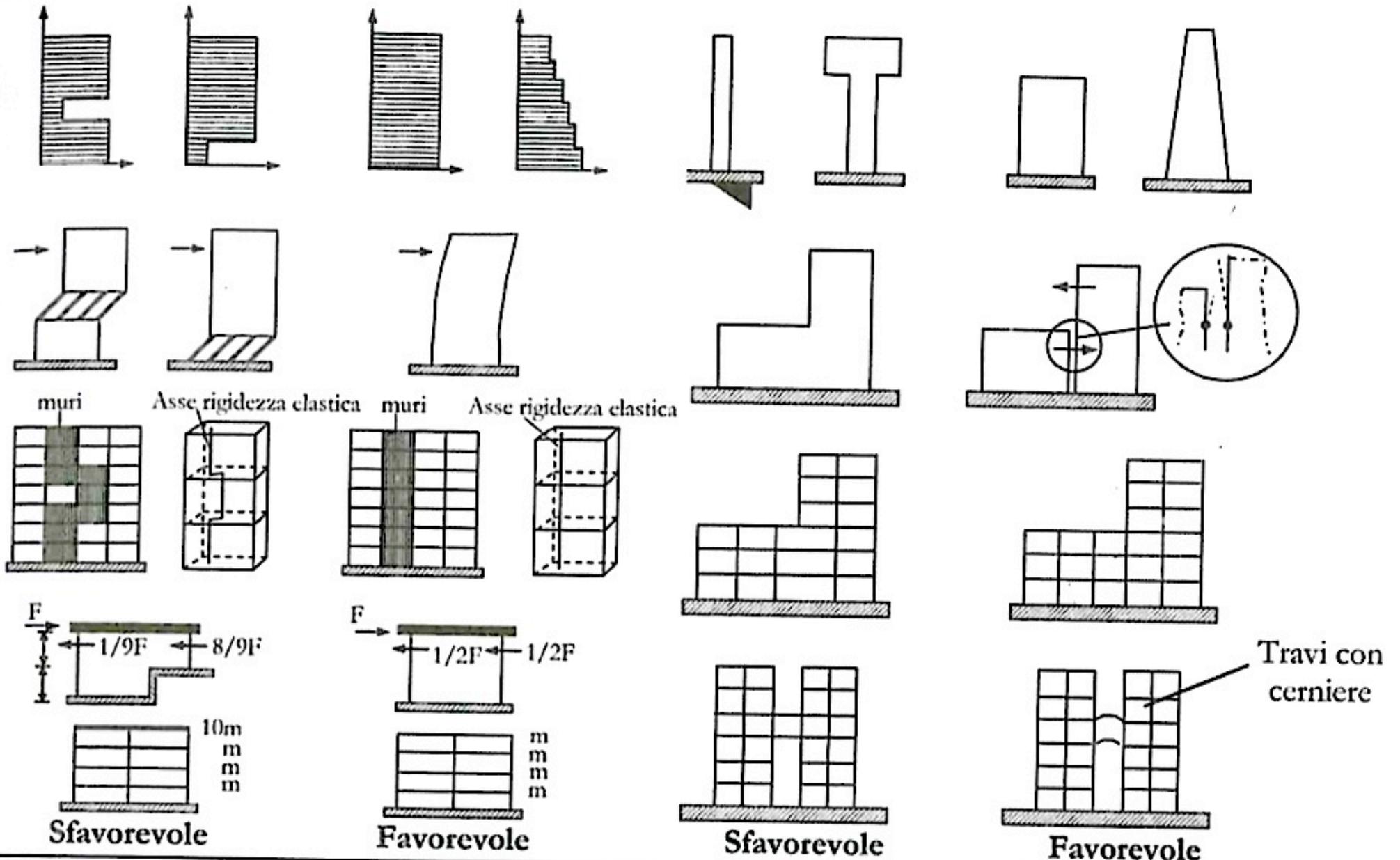
L'edificio di Pettino: irregolarità in pianta, piano debole, assenza di staffe nei nodi, interazione tamponature nodi trave colonna



Regolarità in altezza (NTC 18)

- f) il rapporto tra la capacità e la domanda allo SLV non è significativamente diverso, in termini di resistenza, per orizzontamenti successivi (**tale rapporto, calcolato per un generico orizzontamento, non deve differire più del 30% dall'analogo rapporto calcolato per l'orizzontamento adiacente**); può fare eccezione l'ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;
- g) eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengano con continuità da un orizzontamento al successivo; **oppure avvengano in modo che il rientro di un orizzontamento non superi il 10% della dimensione corrispondente all'orizzontamento immediatamente sottostante, né il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento**. Fa eccezione l'ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro orizzontamenti, per il quale non sono previste limitazioni di restringimento.

Regolarità in altezza



Fattore di comportamento (§7.3.1)

Tipologia strutturale	CD" A"	CD" B"
Costruzioni di calcestruzzo (§ 7.4.3.2)		
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste (v. § 7.4.3.1)	$4,5 \alpha_u/\alpha_1$	$3,0 \alpha_u/\alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate (v. § 7.4.3.1)	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$	3,0
Strutture deformabili torsionalmente (v. § 7.4.3.1)	3,0	2,0
Strutture a pendolo inverso (v. § 7.4.3.1)	2,0	1,5
Strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano (v. § 7.4.3.1)	3,5	2,5
Costruzioni con struttura prefabbricata (§ 7.4.5.1)		
Strutture a pannelli	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$	3,0
Strutture monolitiche a cella	3,0	2,0
Strutture con pilastri incastrati e orizzontamenti incernierati	3,5	2,5
Costruzioni d'acciaio (§ 7.5.2.2) e composte di acciaio-calcestruzzo (§ 7.6.2.2)		
Strutture intelaiate	$5,0 \alpha_u/\alpha_1$	4,0
Strutture con controventi eccentrici		
Strutture con controventi concentrici a diagonale tesa attiva	4,0	4,0
Strutture con controventi concentrici a V	2,5	2,0
Strutture a mensola o a pendolo inverso	$2,0 \alpha_u/\alpha_1$	2,0
Strutture intelaiate con controventi concentrici	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$	4,0
Strutture intelaiate con tamponature in murature	2,0	2,0
Costruzioni di legno (§ 7.7.3)		
Pannelli di parete a telaio leggero chiodati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi, viti e bulloni	3,0	2,0
Strutture reticolari iperstatiche con giunti chiodati		
Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico	4,0	2,5
Pannelli di parete a telaio leggero chiodati con diaframmi chiodati, collegati mediante chiodi, viti e bulloni.	5,0	3,0
Pannelli di tavole incollate a strati incrociati, collegati mediante chiodi, viti, bulloni		2,5
Strutture reticolari con collegamenti a mezzo di chiodi, viti, bulloni o spinotti		

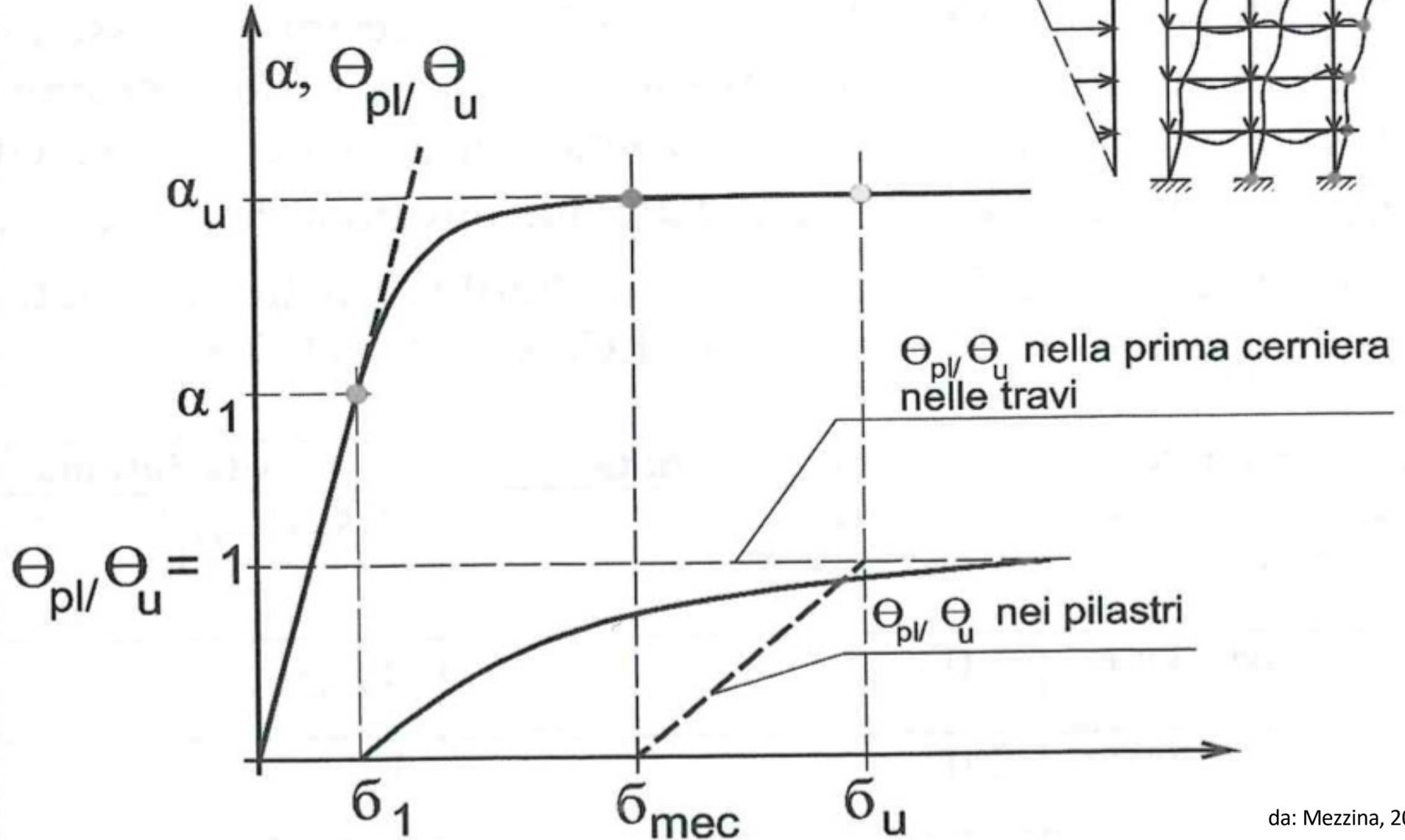
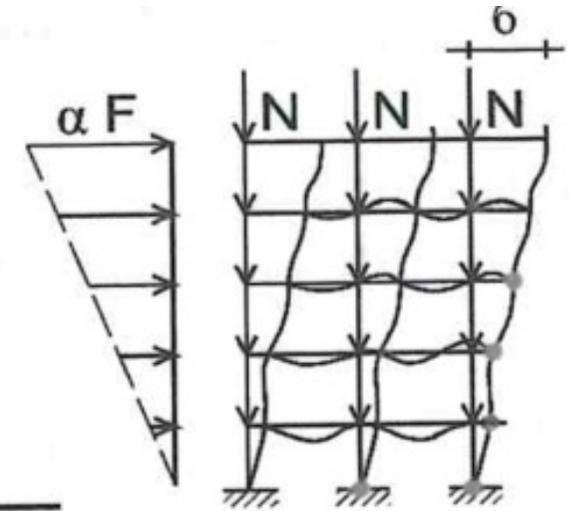
Rapporto di sovraresistenza α_u/α_1

α_1 è il valore dell'azione sismica per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione a flessione;

α_u è il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la plasticizzazione in un numero di zone dissipative tale da rendere la struttura un meccanismo

Rapporto di sovrarresistenza α_u/α_1

Il coefficiente α_u può essere ottenuto da un'analisi statica non-lineare (pushover) globale.



Rapporto di sovraresistenza

- Per le **costruzioni regolari in pianta**, qualora non si proceda ad un'analisi non lineare finalizzata alla valutazione del rapporto α_u/α_1 , per esso possono essere adottati i valori indicati nei paragrafi successivi per le diverse tipologie costruttive.
- Per le **costruzioni non regolari in pianta**, si possono adottare valori di α_u/α_1 pari alla media tra 1,0 ed i valori di volta in volta forniti per le diverse tipologie costruttive.
- La scelta del fattore di struttura deve essere adeguatamente giustificata. Il valore adottato deve dar luogo ad azioni di progetto agli stati limite ultimi coerenti con le azioni di progetto assunte per gli stati limite di esercizio.
- Per la **componente verticale dell'azione sismica** il valore di q utilizzato, a meno di adeguate analisi giustificative, è $q = 1,5$ per qualunque tipologia strutturale e di materiale, tranne che per i ponti per i quali è $q = 1$.

Rapporto di sovraresistenza

Tabella 7.4.I – Valori di q_0

Tipologia	q_0	
	CD" B "	CD" A "
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$3,0\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	3,0	$4,0\alpha_u/\alpha_1$
Strutture deformabili torsionalmente	2,0	3,0
Strutture a pendolo inverso	1,5	2,0

Per strutture regolari in pianta, possono essere adottati i seguenti valori di α_u/α_1 :

a) Strutture a telaio o miste equivalenti a telai

- strutture a telaio di un piano $\alpha_u/\alpha_1 = 1,1$
- strutture a telaio con più piani ed una sola campata $\alpha_u/\alpha_1 = 1,2$
- strutture a telaio con più piani e più campate $\alpha_u/\alpha_1 = 1,3$

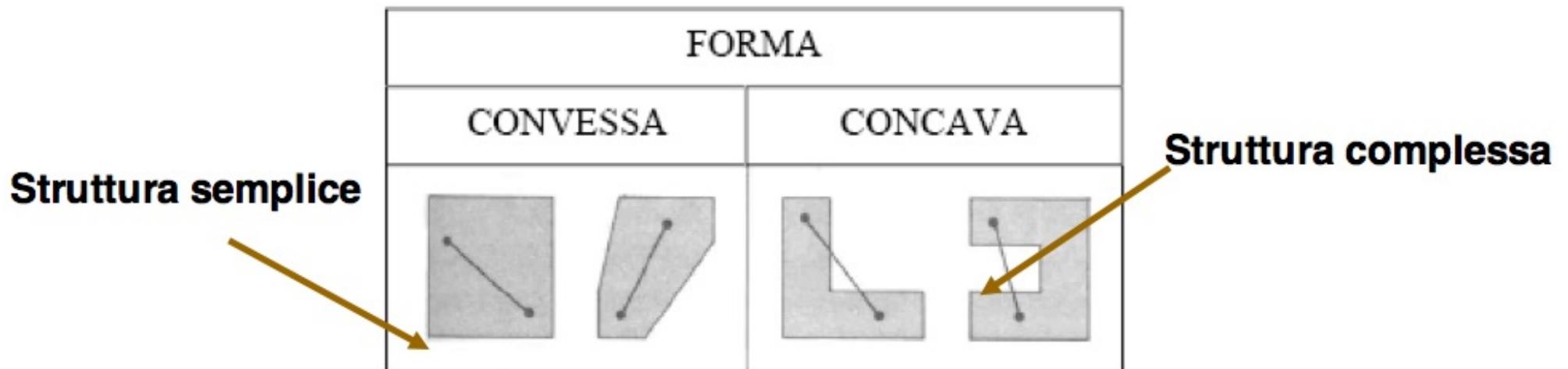
b) Strutture a pareti o miste equivalenti a pareti

- strutture con solo due pareti non accoppiate per direzione orizzontale $\alpha_u/\alpha_1 = 1,0$
- altre strutture a pareti non accoppiate $\alpha_u/\alpha_1 = 1,1$
- strutture a pareti accoppiate o miste equivalenti a pareti $\alpha_u/\alpha_1 = 1,2$

Regolarità in pianta

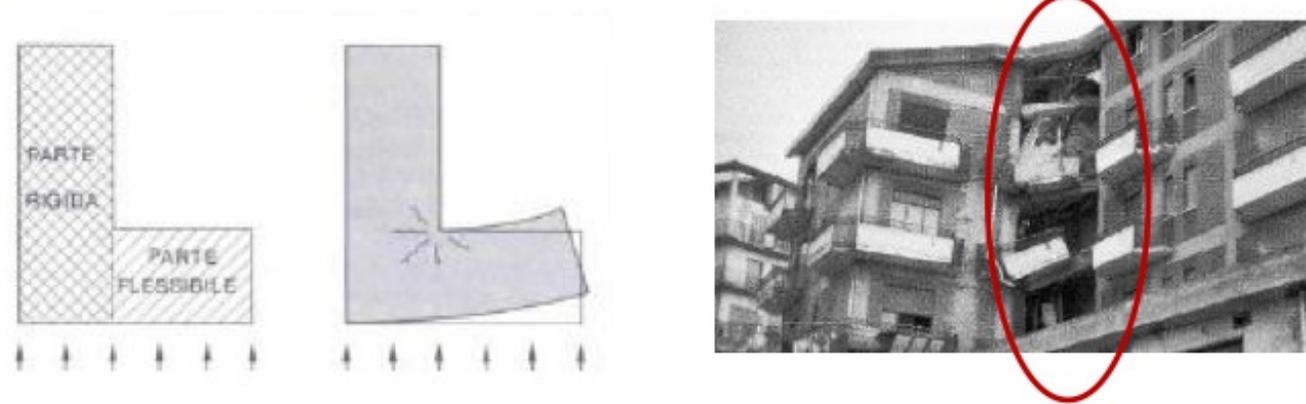
a1) La **distribuzione di masse e rigidzze è approssimativamente simmetrica** rispetto a due direzioni ortogonali

a2) la **forma in pianta è compatta**, ossia il contorno di ogni orizzontamento è convesso; il requisito può ritenersi soddisfatto, anche in presenza di rientranze in pianta, quando esse non influenzano significativamente la rigidezza nel piano dell'orizzontamento e, per ogni rientranza, l'area compresa tra il perimetro dell'orizzontamento e la linea convessa circoscritta all'orizzontamento non supera il 5% dell'area dell'orizzontamento;



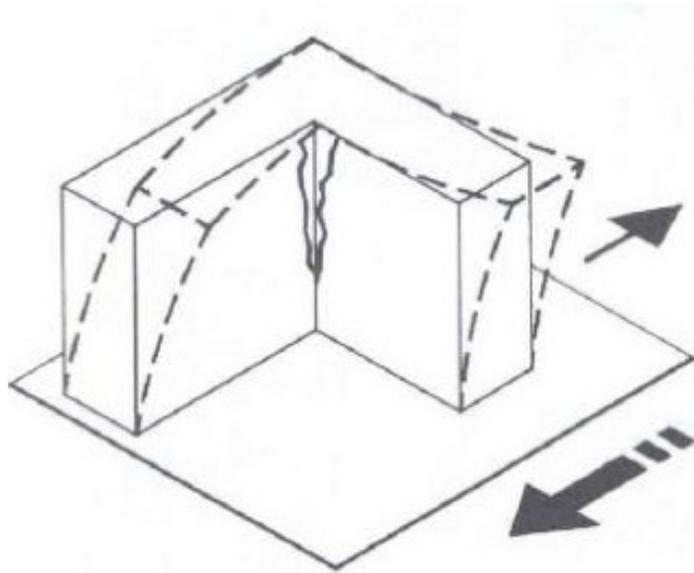
Regolarità in pianta

Problematiche: Concentrazione di sollecitazione in corrispondenza degli angoli rientranti a causa della diversa rigidità delle parti costituenti la struttura a cui si associano stati deformativi differenziali

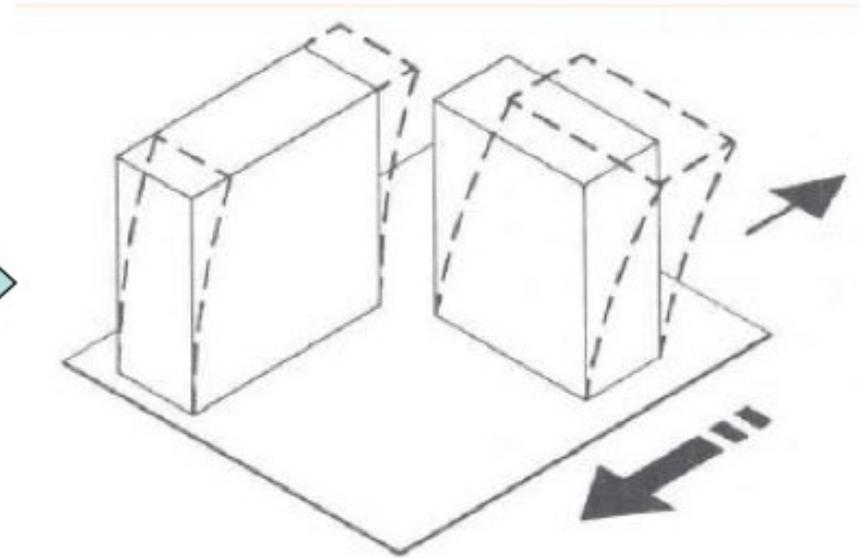


- Effetti torsionali
- Difficoltà di individuare le direzioni di maggiore sollecitazione in relazione all'azione sismica, facilmente identificabili, al contrario, nel caso di simmetria

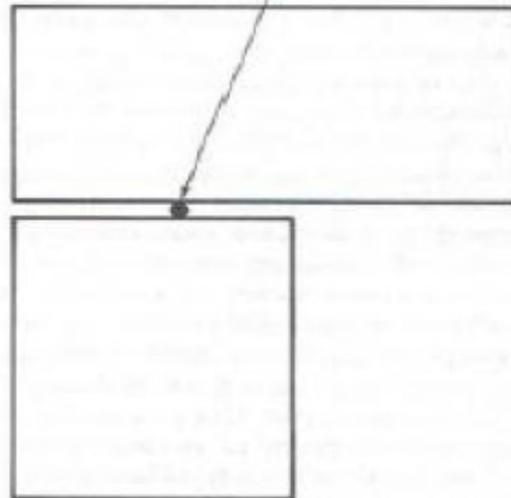
Regolarità in pianta



Soluzione



Giunto



Distanza tra costruzioni contigue

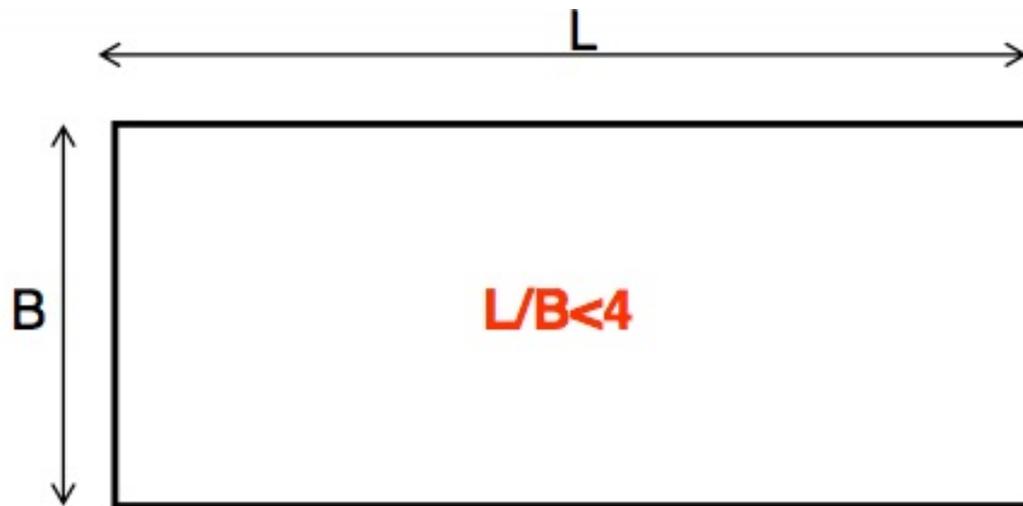
La distanza tra costruzioni contigue deve essere tale da evitare **fenomeni di martellamento** e comunque non può essere inferiore alla somma degli spostamenti massimi determinati per lo *SLV*, calcolati per ciascuna costruzione secondo il § 7.3.3 (analisi lineare) o il § 7.3.4 (analisi non lineare); in ogni caso la distanza tra due punti che si fronteggiano non può essere inferiore ad 1/100 della quota dei punti considerati misurata dal piano di fondazione, moltiplicata per $a_g \cdot S / 0,5g \leq 1$.

Qualora non si eseguano calcoli specifici, lo spostamento massimo di una costruzione non isolata alla base, può essere stimato in 1/100 dell'altezza della costruzione moltiplicata per $a_g \cdot S / 0,5g$.

$$d = \frac{1}{100} * \frac{a_g S}{0,5g} h_{edificio}$$

Regolarità in pianta

b) Forma non troppo allungata. Il rapporto tra i lati del rettangolo circoscritto alla pianta di ogni orizzontamento è inferiore a 4;



Regolarità in pianta

c) Rigidezza degli orizzontamenti. Ciascun orizzontamento ha una rigidezza nel proprio piano tanto maggiore della corrispondente rigidezza degli elementi strutturali verticali da potersi assumere che la sua deformazione in pianta influenzi in modo trascurabile la distribuzione delle azioni sismiche tra questi ultimi e ha resistenza sufficiente a garantire l'efficacia di tale distribuzione.

I solai possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti

Gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano, a condizione che siano realizzati in cemento armato, oppure in latero-cemento con soletta in c.a. di almeno 40 mm di spessore, o in struttura mista con soletta in cemento armato di almeno 50 mm di spessore collegata da connettori a taglio opportunamente dimensionati agli elementi strutturali in acciaio o in legno e purché le aperture presenti non ne riducano significativamente la rigidezza.

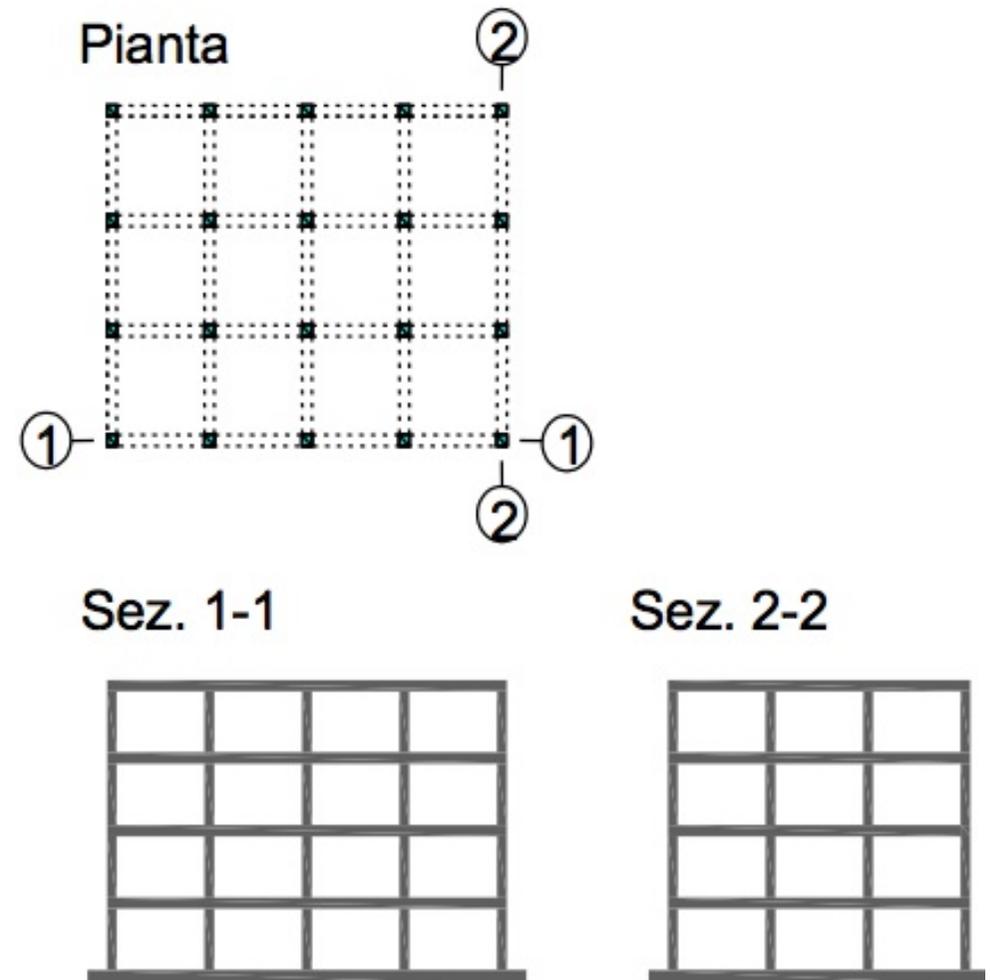
Tipologie strutturali

- *strutture a telaio,*
- *strutture a pareti,*
- *strutture miste telaio-pareti,*
- *strutture a pendolo inverso,*
- *strutture deformabili torsionalmente,*

Le strutture sismo-resistenti in c.a. previste dalle NTC-08 possono essere classificate nelle seguenti tipologie strutturali (§ 7.4.3.1):

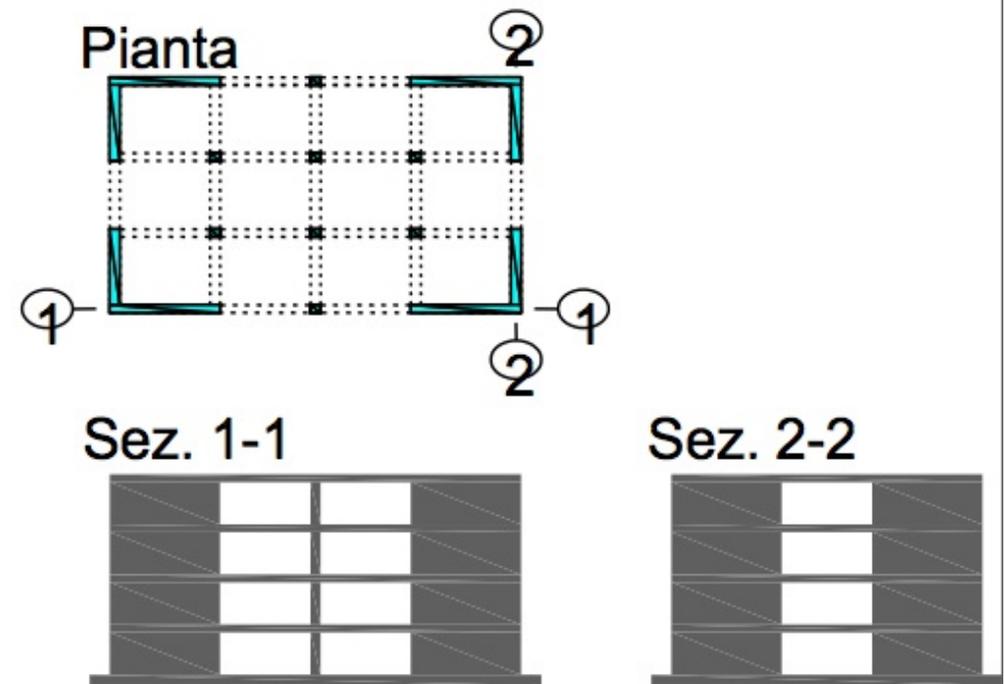
□ **strutture a telaio**

(la resistenza alle azioni verticali e orizzontali è data principalmente da telai spaziali con resistenza a taglio alla base $\geq 65\%$ della resistenza a taglio totale;



□ strutture a pareti

(la resistenza alle azioni verticali e orizzontali è data principalmente da pareti, singole o accoppiate, aventi resistenza a taglio alla base $\geq 65\%$ della resistenza a taglio totale;



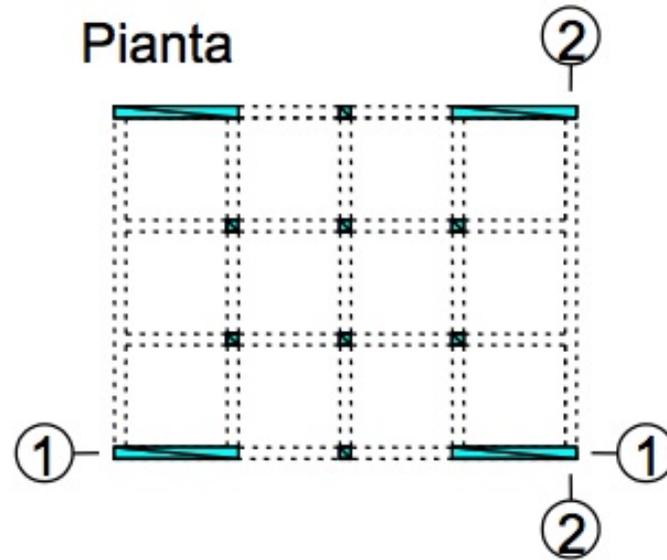
Una **parete semplice** è un elemento strutturale con sezione trasversale caratterizzata da un rapporto tra dimensione massima e minima in pianta superiore a 4.

Una **parete composta** consiste di pareti semplici collegate a formare sezioni a L, T, U, I.

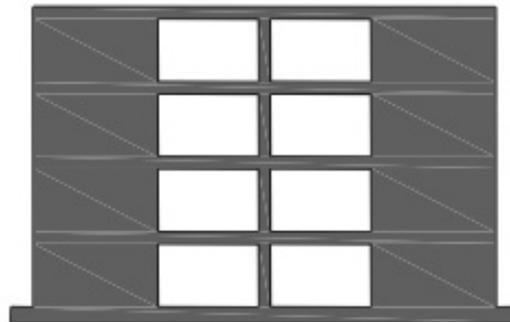
Una **parete accoppiata** consiste di due o più pareti singole collegate tra loro da travi duttili (“travi di accoppiamento”) distribuite in modo regolare lungo l’altezza.

Una **parete è accoppiata (ai fini di della valutazione di q)** quando il momento totale alla base prodotto dalle azioni orizzontali è equilibrato, per almeno il **20%**, dalla coppia prodotta dagli sforzi verticali indotti nelle pareti dalla azione sismica.

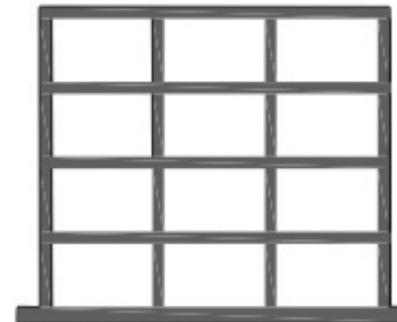
C'è la possibilità che la struttura abbia comportamento diverso lungo due direzioni. Nel caso in esame: **a pareti** lungo 1-1, **a telaio** lungo 2-2.



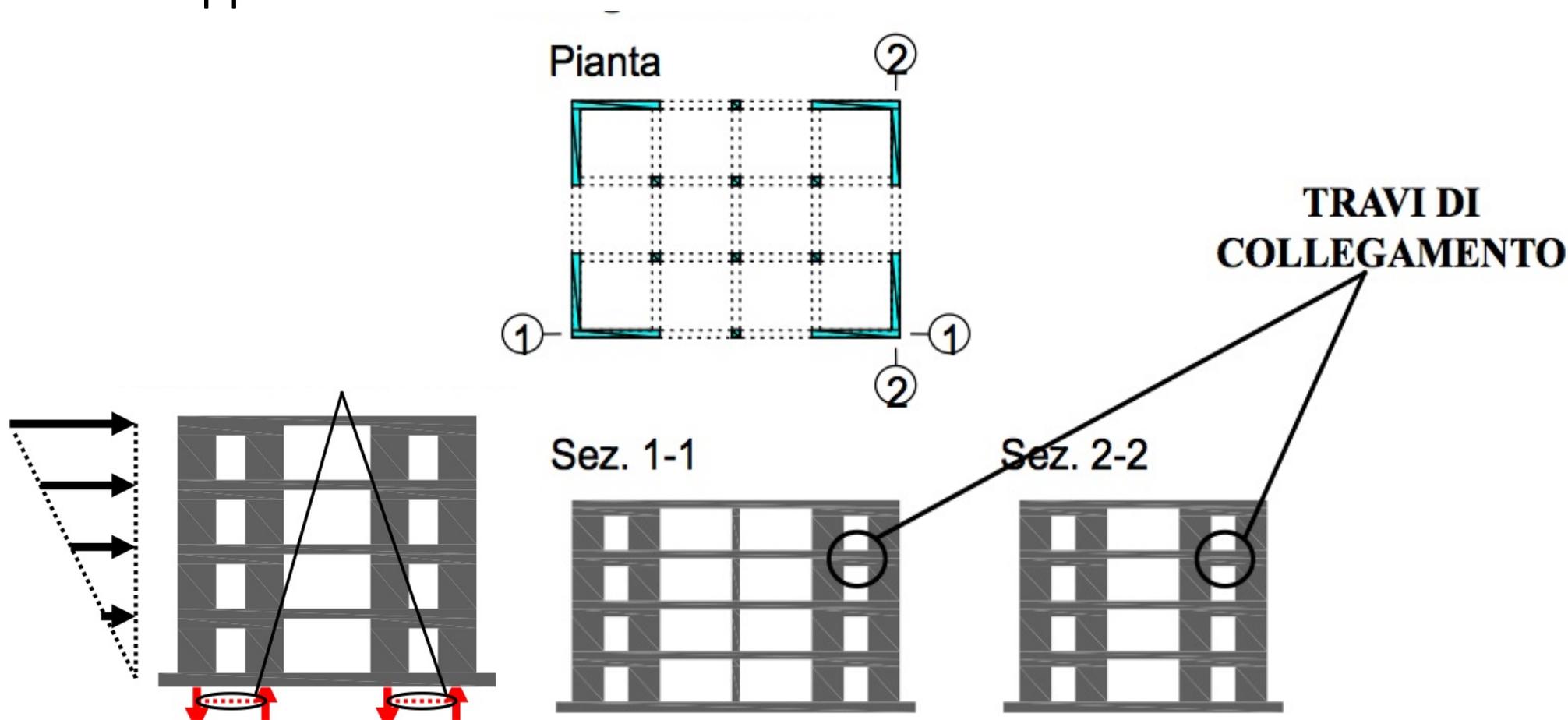
Sez. 1-1



Sez. 2-2

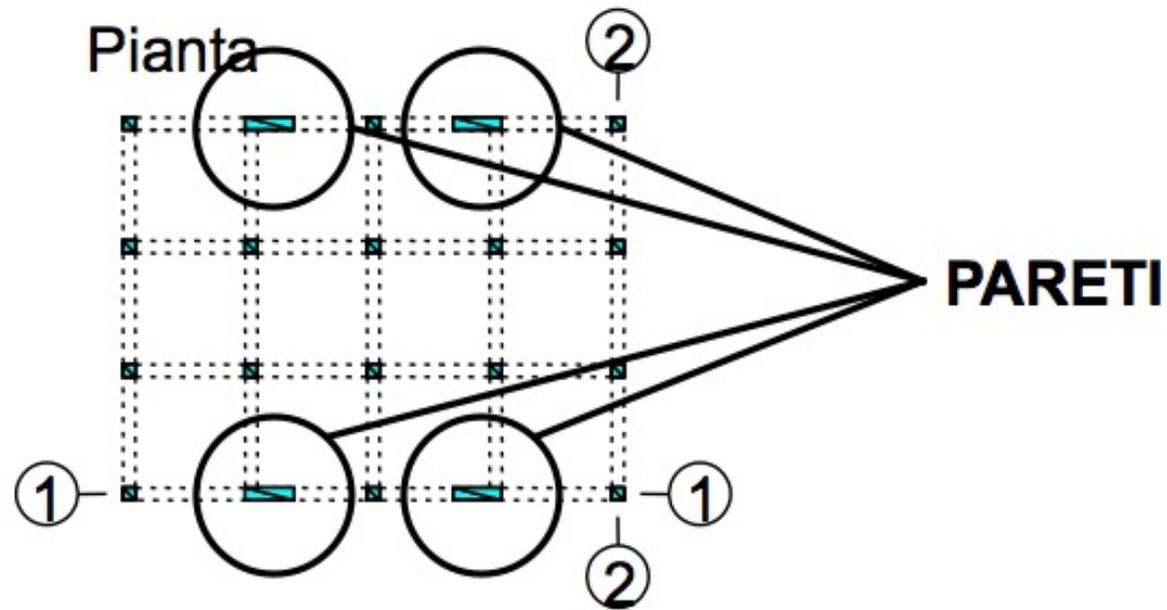


parete accoppiata: Elemento strutturale costituito da due o più pareti singole, connesse secondo uno schema regolare da travi adeguatamente duttili ("travi di connessione"), tale che il momento totale alla base prodotto dalle forze sismiche orizzontali è equilibrato per **almeno il 20%** dalla coppia prodotta dagli sforzi verticali dovuti all'accoppiamento.

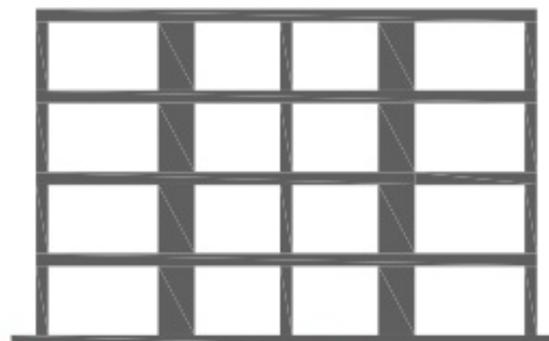


- **strutture miste telaio-pareti** (la resistenza alle azioni verticali è affidata prevalentemente ai telai, la resistenza alle azioni orizzontali è affidata in parte ai telai ed in parte alle pareti, singole o accoppiate); se più del **50% dell'azione orizzontale è assorbita dai telai** si parla di **strutture miste equivalenti a telai**, altrimenti si parla di **strutture miste equivalenti a pareti**;
- **strutture deformabili torsionalmente** (composte da telai e/o pareti, la cui rigidezza torsionale non soddisfa ad ogni piano la condizione $r^2/I_s^2 > 1$, nella quale:
 - r^2 = rapporto tra rigidezza torsionale e flessionale di piano
 - $I_s^2 = (L^2 + B^2)/12$ (L e B dimensioni in pianta del piano)

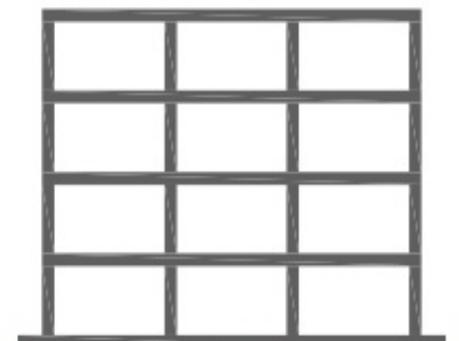
Esempio di **struttura mista telaio parete**



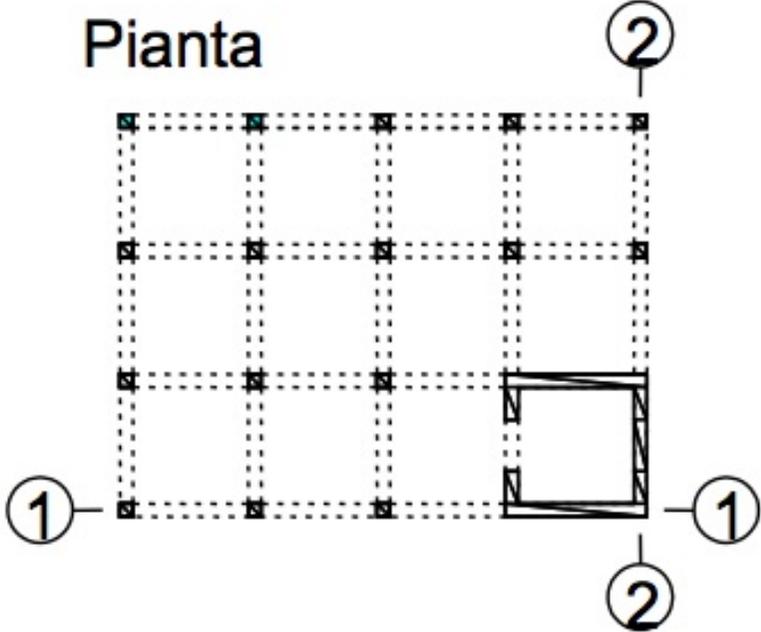
Sez. 1-1



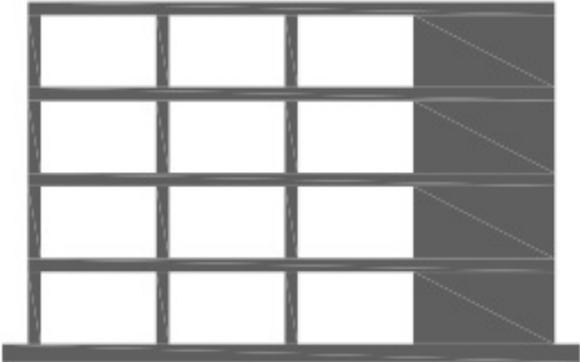
Sez. 2-2



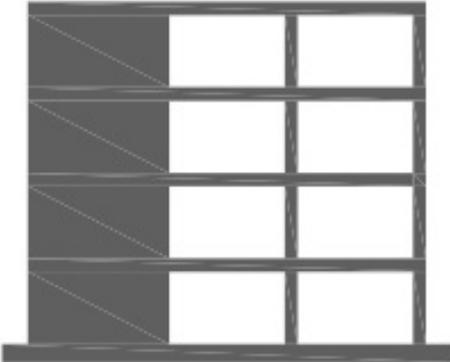
Esempio di **struttura deformabile torsionalmente o a nucleo**



Sez. 1-1



Sez. 2-2



Deformabilità torsionale

- Ad ogni livello e per ogni direzione di analisi x e y , il **raggio torsionale r** deve essere in accordo con la condizione riportata di seguito, che è espressa per la direzione di analisi y :

$$r_x^2/l_s^2 > 1$$

dove:

r_x è la radice quadrata del rapporto tra la rigidezza torsionale e la rigidezza laterale nella direzione y ("raggio torsionale");

l_s è il raggio giratore della massa del piano in pianta [radice quadrata del rapporto tra (a) il momento di inerzia polare della massa del piano in pianta rispetto al centro di massa del piano e (b) la massa del piano].

Deformabilità torsionale

$$K_T = \sum_{i=1}^n K_{xi} d_{yi}^2 + \sum_{j=1}^m K_{yj} d_{xj}^2$$
$$K_x = \sum_{i=1}^n K_{xi} \quad K_y = \sum_{j=1}^m K_{yj}$$

Le distanze, d'_{xi} e d'_{yj} , ricordiamo che si riferiscono alle distanze degli elementi resistenti dal baricentro delle rigidezze.

Il baricentro delle rigidezze è dato da:

$$x_R = \frac{\sum_{i=1}^n K_{xi} d_{yi}}{\sum_{i=1}^n K_{xi}} \quad y_R = \frac{\sum_{j=1}^m K_{yj} d_{xj}}{\sum_{j=1}^m K_{yj}}$$

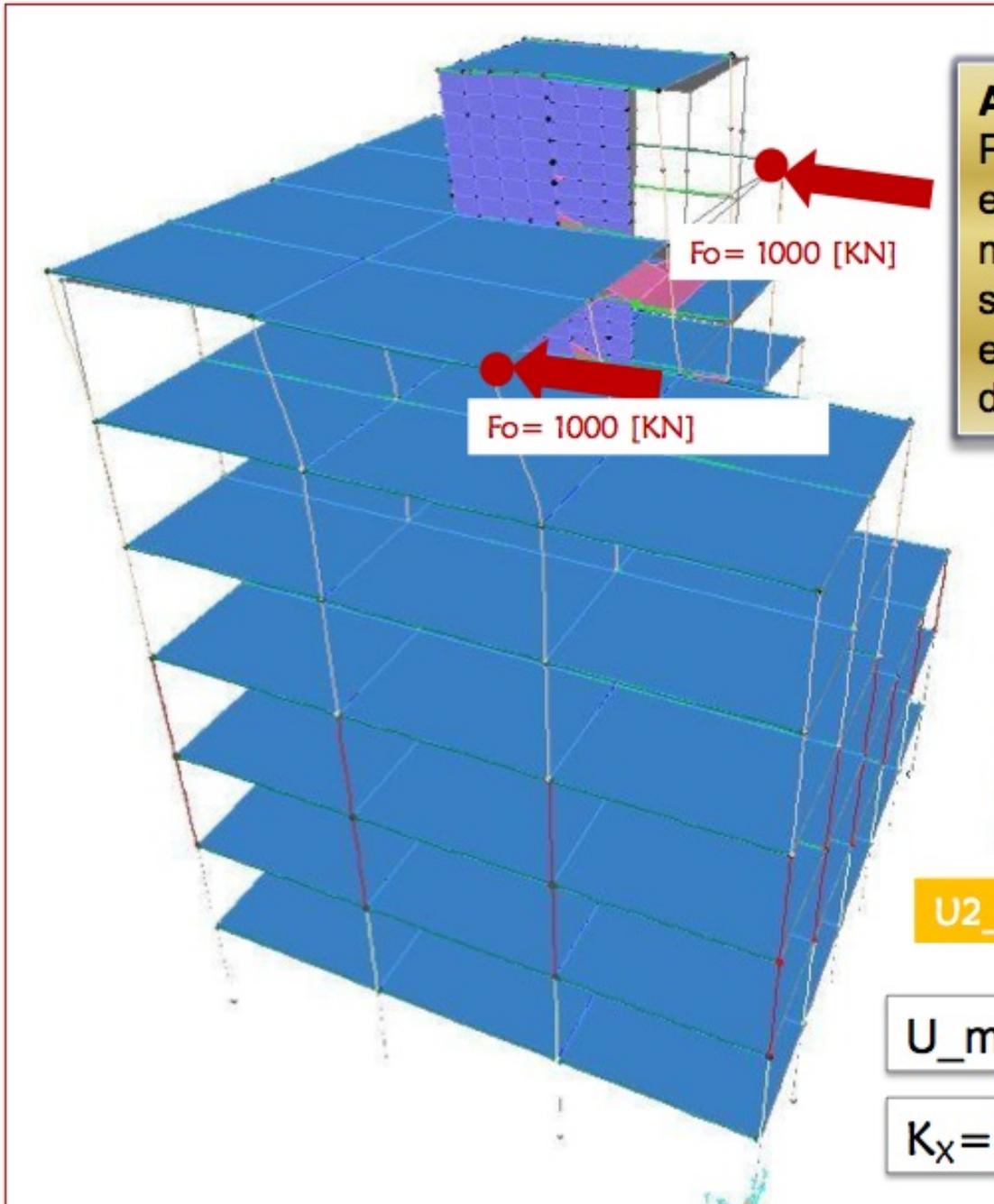
Raggio torsionale

$$r_x = \sqrt{\frac{K_T}{K_x}} \quad r_y = \sqrt{\frac{K_T}{K_y}}$$

$$I_s = \sqrt{\frac{L^2 + B^2}{12}}$$

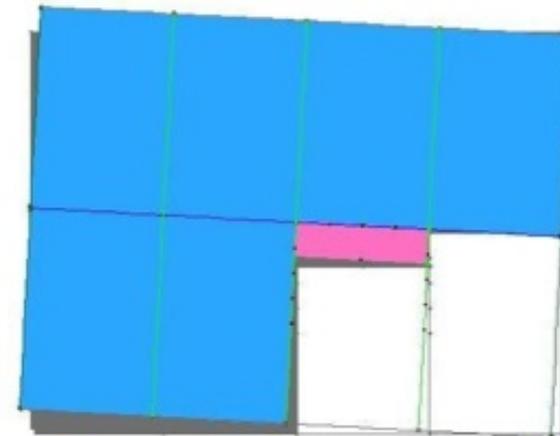
Raggio polare

Deformabilità torsionale



Analisi sismica

Per valutare il valore delle rigidezze (per esempio all'ultimo piano) si sono bloccati i movimenti di piano rigido nei piani sottostanti e si sono applicati due carichi esploratori, calcolando gli spostamenti di due punti qualsiasi del piano.



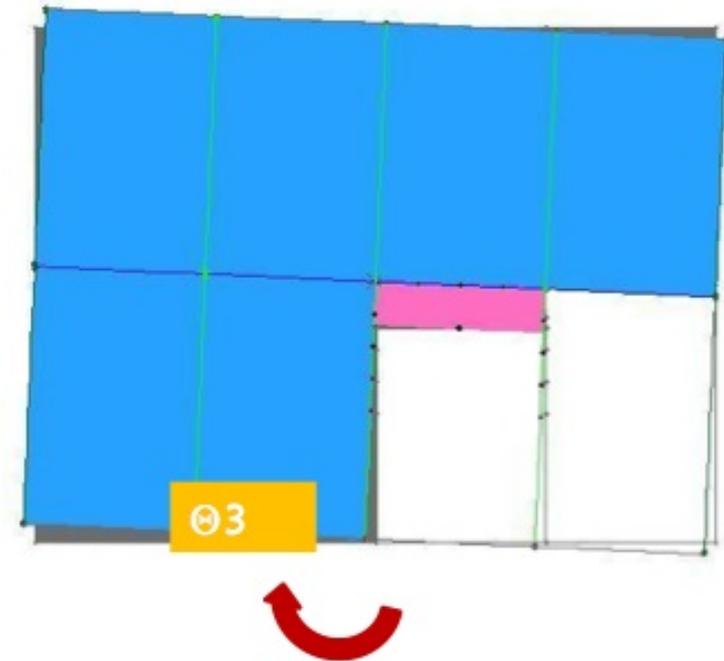
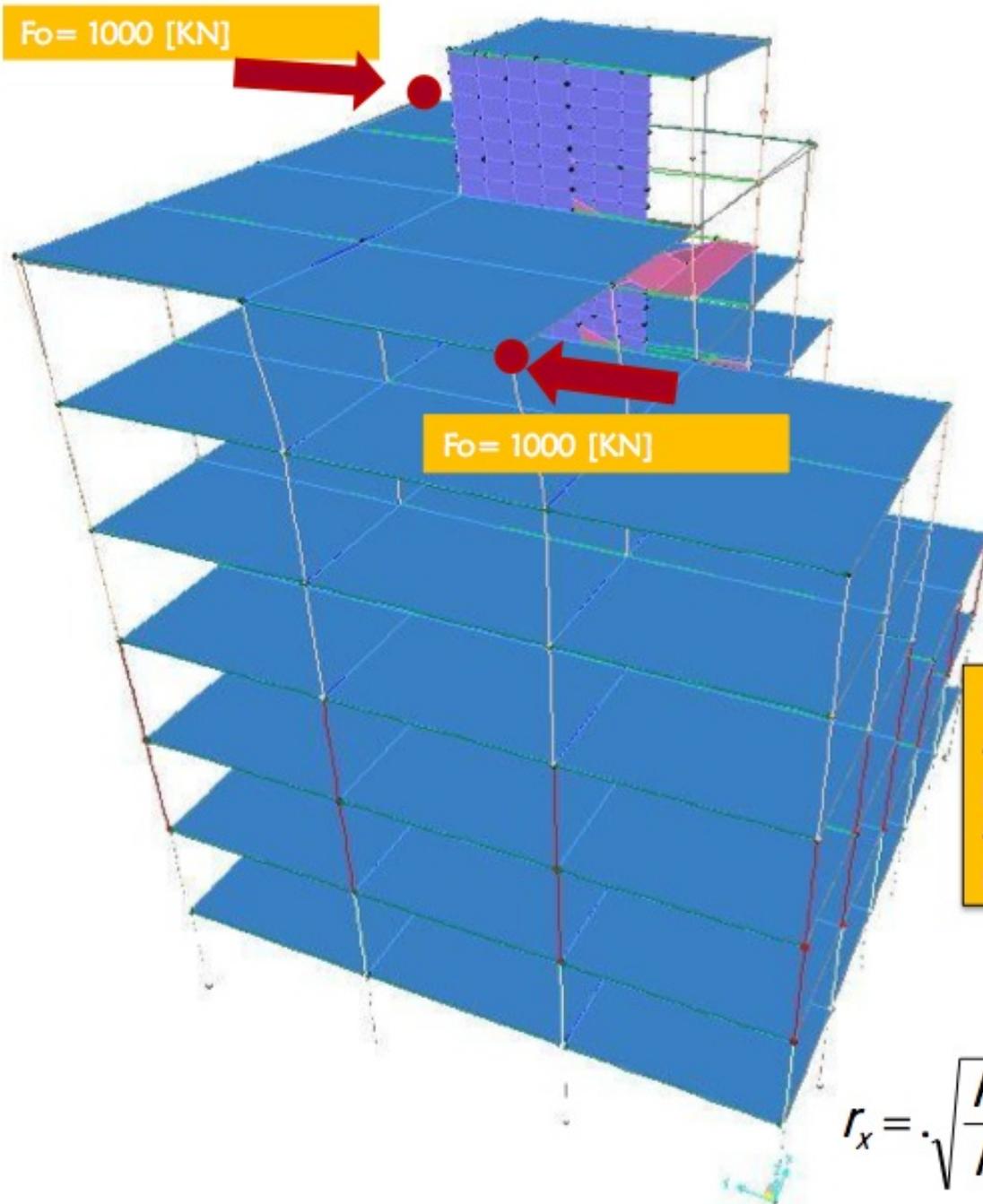
$U2_a$

$U2_b$

$$U_{med} = (U2_a + U2_b) / 2$$

$$K_x = 2F_0 / U_{med}$$

Deformabilità torsionale



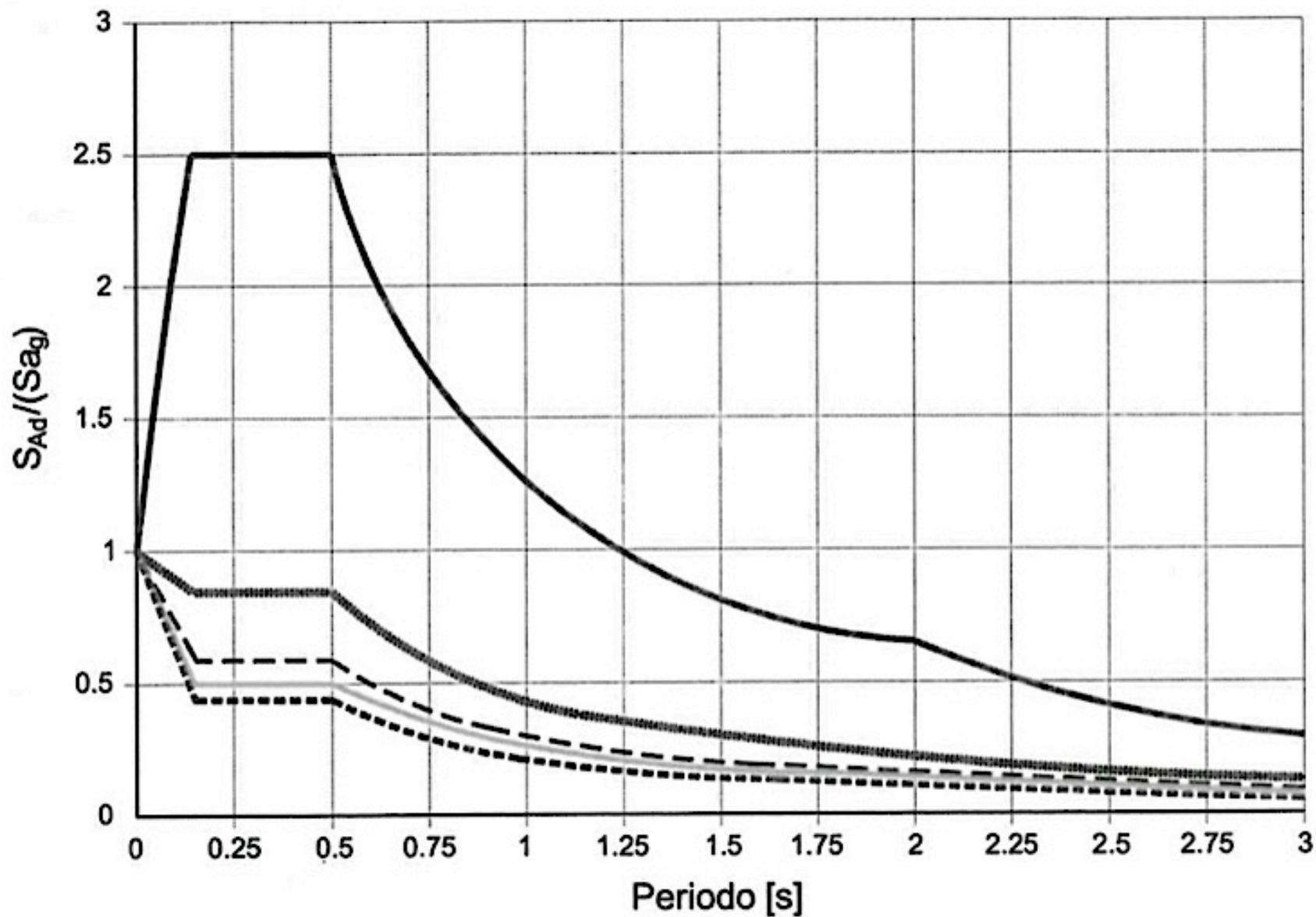
Per valutare la rigidezza torsionale (per esempio all'ultimo piano) si sono bloccati i movimenti di piano rigido nei piani sottostanti e si sono applicati due carichi esploratori, calcolando la rotazione del piano in esame.

$$K_T = M_t / \theta_3$$

$$r_x = \sqrt{\frac{K_T}{K_x}}$$

$$r_x = 0.44 / s$$

TORSIONALMENTE DEFORMABILE



- Elastico
- Strutture a telaio + piani + campate
- Strutture miste a telaio - parete
- - - Strutture a pareti non accoppaite
- · - · - Strutture a nucleo

TABELLA DI SINTESI

Tipologia	Classe di Duttività		Regolare in altezza		$q=q_0K_R$
	CD "A"	CD "B"	Si	No	
A telaio, a pareti accoppiate, miste	5,85		1		5,85
	4,95			0,8	3,96
		3,90	1		3,90
		3,30		0,8	2,64
A pareti non accoppiate	5,20		1		5,20
	4,40			0,8	3,52
		3,90	1		3,90
		3,30		0,8	2,64
Deformabili torsionalmente	3,00		1		3,00
	3,00			0,8	2,40
		2,00	1		2,00
		2,00		0,8	1,60
A pendolo inverso	2,00		1		2,00
	2,00			0,8	1,60
		1,50	1		1,50
		1,50		0,8	1,20