Università di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Corso di
Problemi Strutturali dell'Edilizia Storica

COMPORTAMENTO SISMICO DEGLI EDIFICI IN MURATURA 1

Prof. Ing. Natalino Gattesco

BIBLIOGRAFIA

Tomazevic M. (2001) “Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings”, Series on Innovation in Structures and Construction – Vol. 1, Imperial College Press, London.

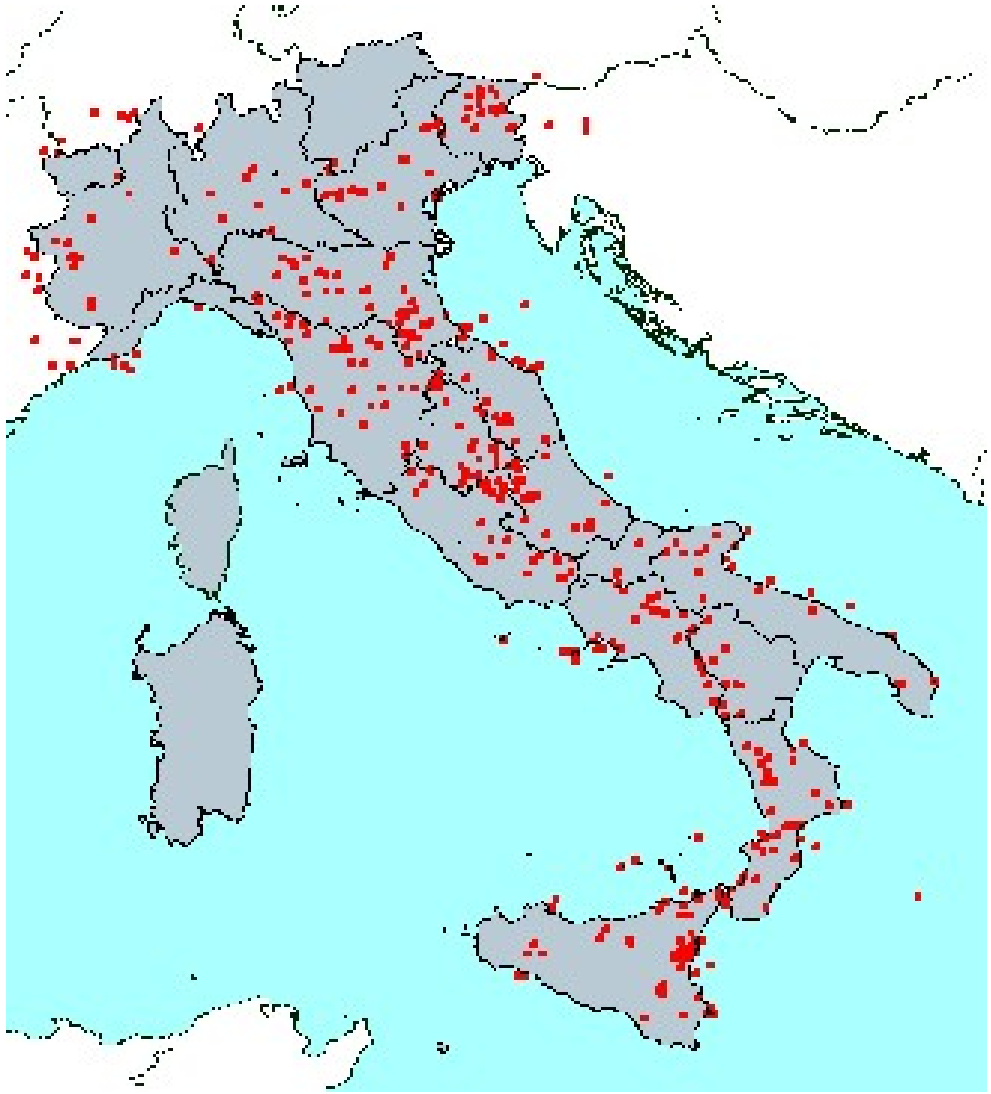
Paulay T., Priestley M.J.N., (1992) “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings”, John Wiley e sons, Inc.

Eurocodice 6 – “Progettazione delle strutture in muratura – Parte 1.1: Regole gfenerali per gli edifici – Regole per la muratura armata e non armata”, UNI ENV 1996-1-1

Eurocodice 8 – “Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 1.3: Regole generali. Regole specifiche per i diversi materiali ed elementi”, UNI ENV 1998-1-3

EVENTI SISMICI

In Italia oltre 30000 eventi sismici di media e forte intensità nell'ultimo millennio, di cui 200 disastrosi



AVVIO AZIONE DI PREVENZIONE

Oltre 120000 vittime nell'ultimo secolo

Terremoto di Messina del 1908 (86000 vittime)

Dopo il 1908 ha inizio l'azione di prevenzione da parte dello Stato attraverso

CLASSIFICAZIONE SISMICA

NORMATIVA PER LE COSTRUZIONI IN ZONA SISMICA

CLASSIFICAZIONE SISMICA

Basata sugli eventi sismici che si sono verificati dopo il 1908 – Aggiornamento in seguito ad eventi sismici.

La mappa delle zone sismiche non è stata più aggiornata dopo il 1984

Nel 1997 la Commissione Grandi Rischi DPC ha incaricato un gruppo di lavoro di formulare una nuova proposta di classificazione sismica

Il gruppo produsse uno studio basato su tre parametri

Accelerazione massima del terreno (PGA)

Spettro di risposta

Intensità massima sperimentata in 1000 anni

REVISIONE STRUMENTI DI PREVENZIONE

Il 31 Ottobre 2002 evento sismico nel Molise in zona non classificata

San Giuliano di Puglia - crollo di una scuola elementare con 28 vittime

Necessità di una revisione in tempi brevi della classificazione sismica (ferma al 1984)

Necessità di un aggiornamento della normativa sismica per ridurre la vulnerabilità delle costruzioni al sisma

ORDINANZA 3274

Dicembre 2002 – Nomina Gruppo di Lavoro per

- ***Definire criteri per l'aggiornamento degli elenchi delle zone sismiche***

- ***Predisporre nuove norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico delle costruzioni***

Marzo 2003 – Ordinanza 3274 del Presidente del Consiglio

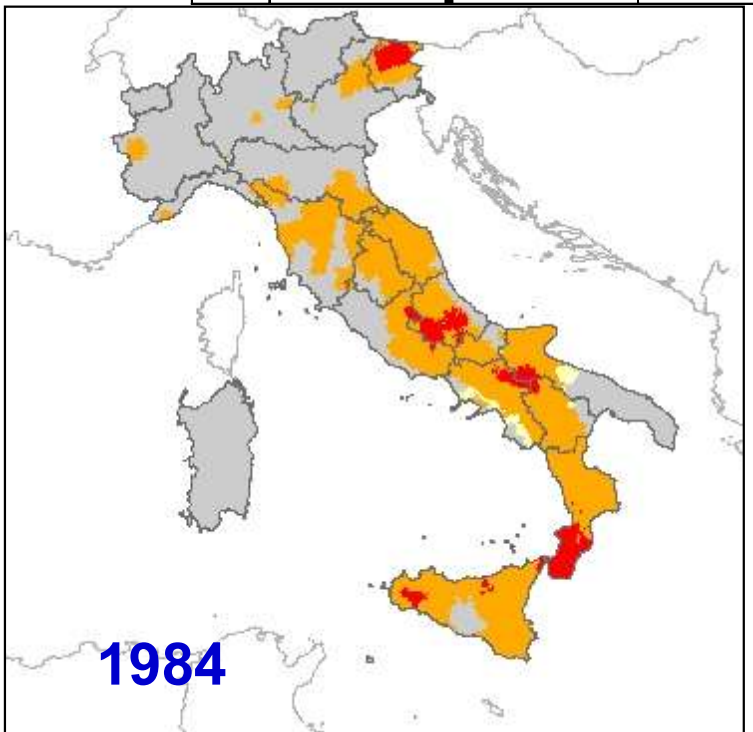
(pubblicata su G.U. 08.05.2003)

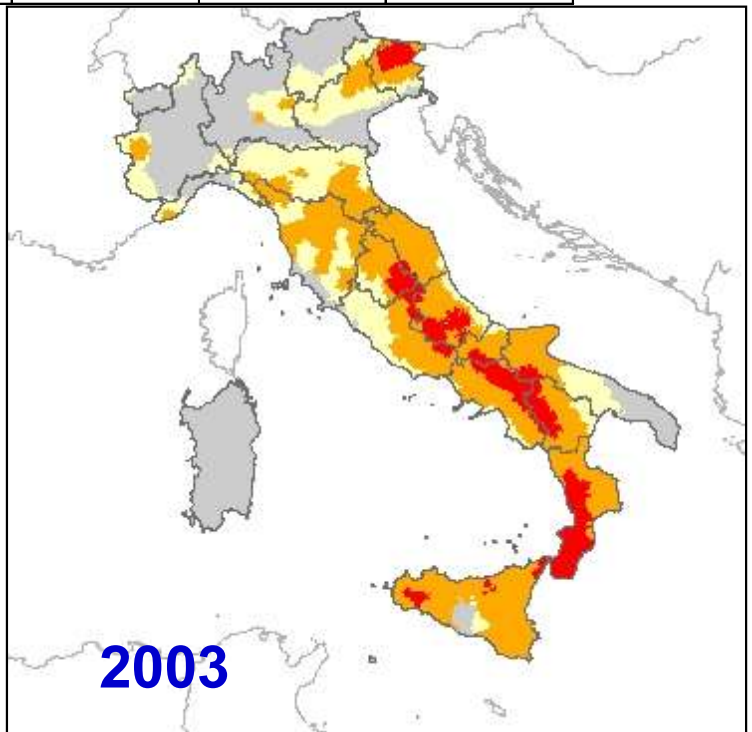
NUOVA CLASSIFICAZIONE

Vecchia classificazione: Cat. \ Classificazione 2003: Zona	1	2	3	4	*Totale*
1ª (S=12)	368	0	0	0	*368*
2ª (S=9)	348	2150	0	0	*2498*
3ª (S=6)	0	88	11	0	*99*
N.C	0	85	1621	3429	*5135*
Totale	*716*	*2323*	*1632*	*3429*	*8100*

Categoria

- 1ª
- 2ª
- 3ª
- NC

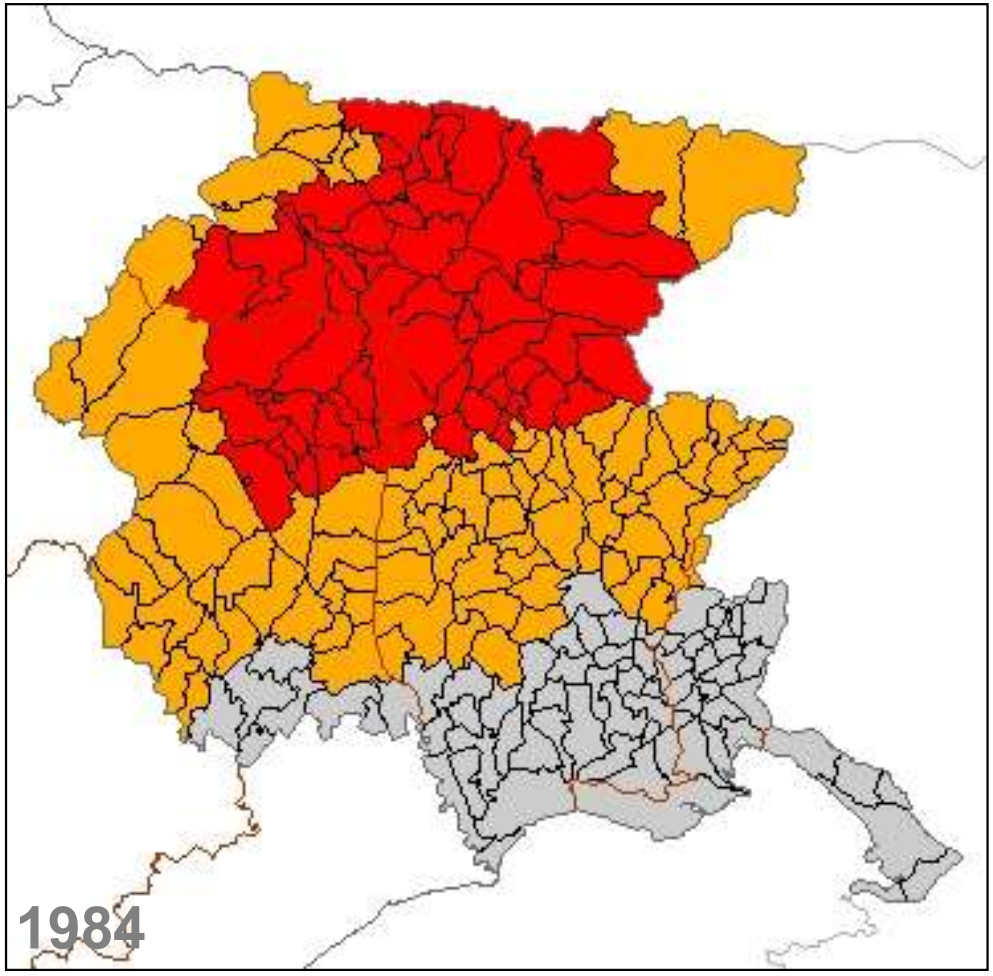


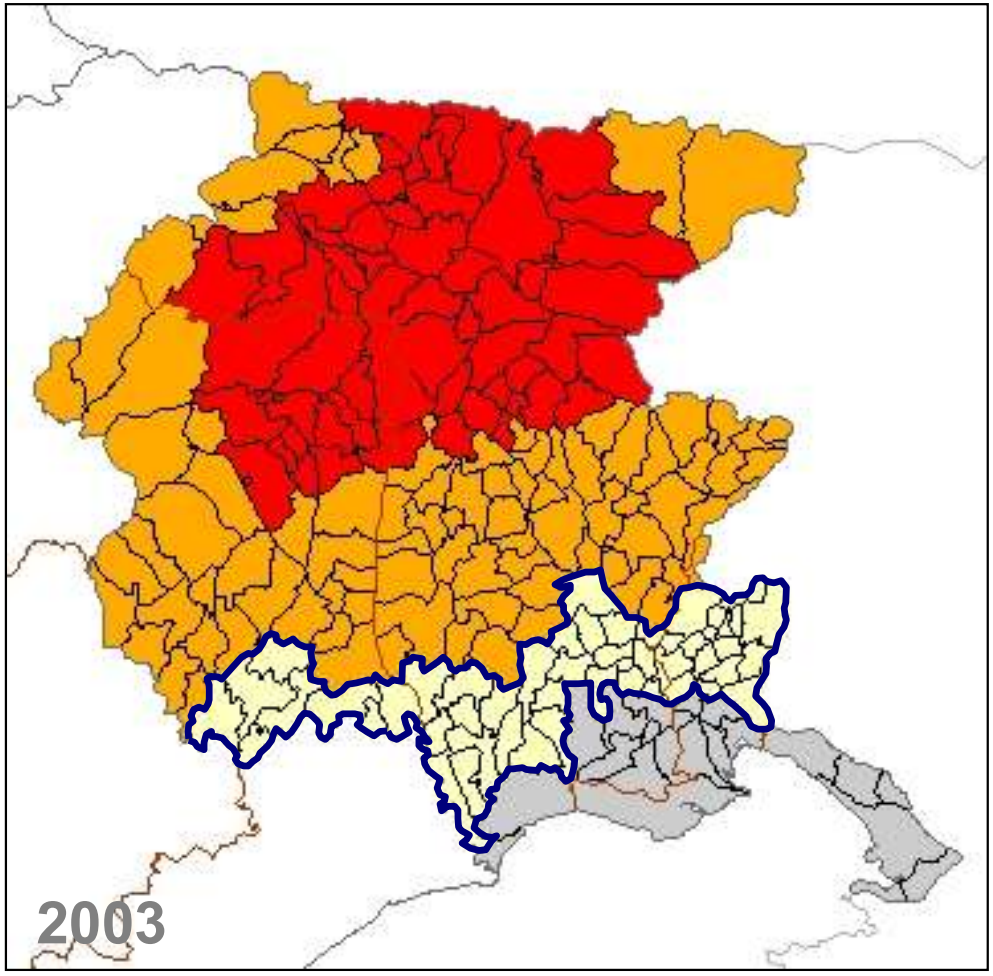


Zona

- 1
- 2
- 3
- 4

NUOVA CLASSIFICAZIONE FVG





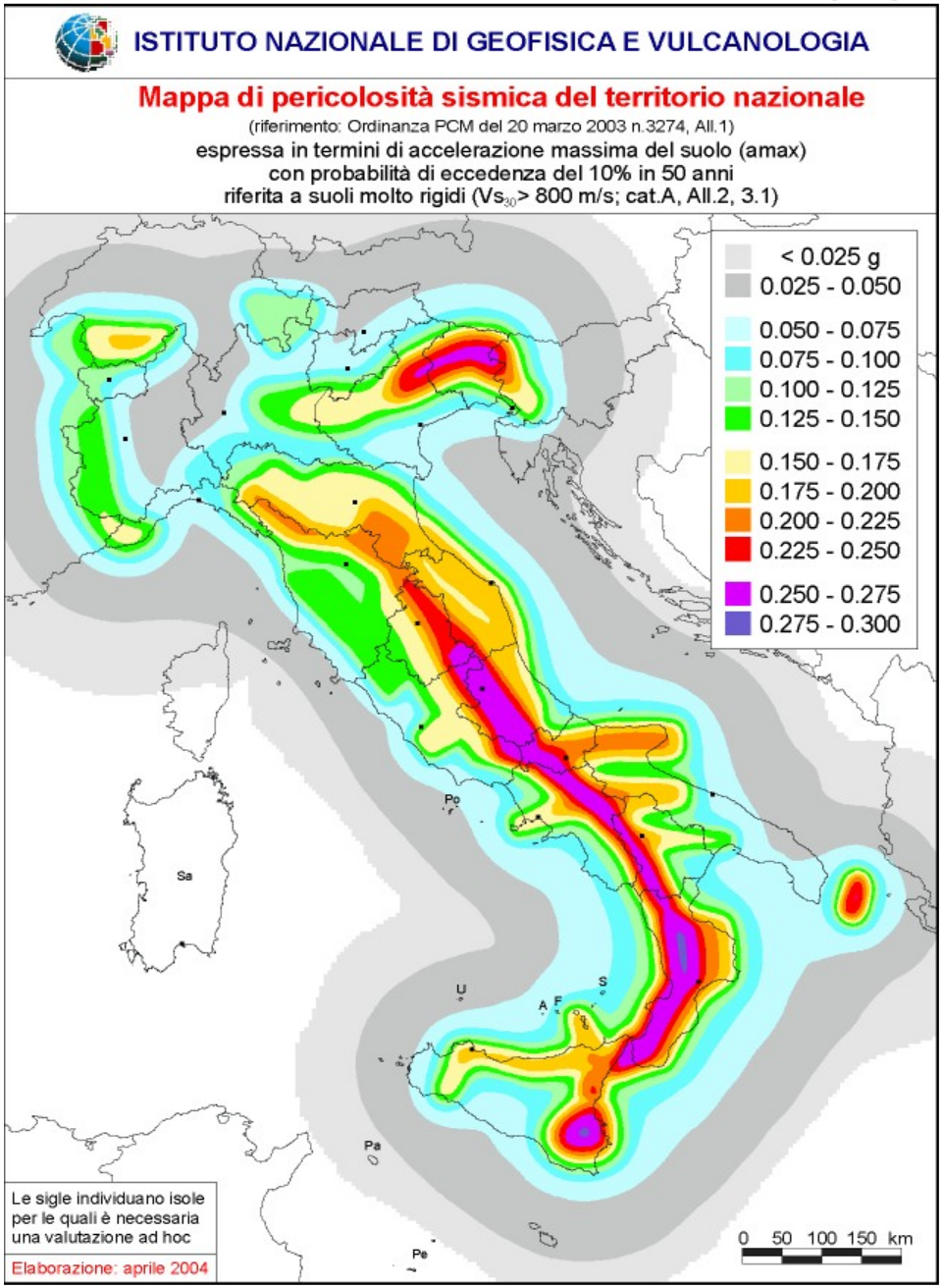
Categoria

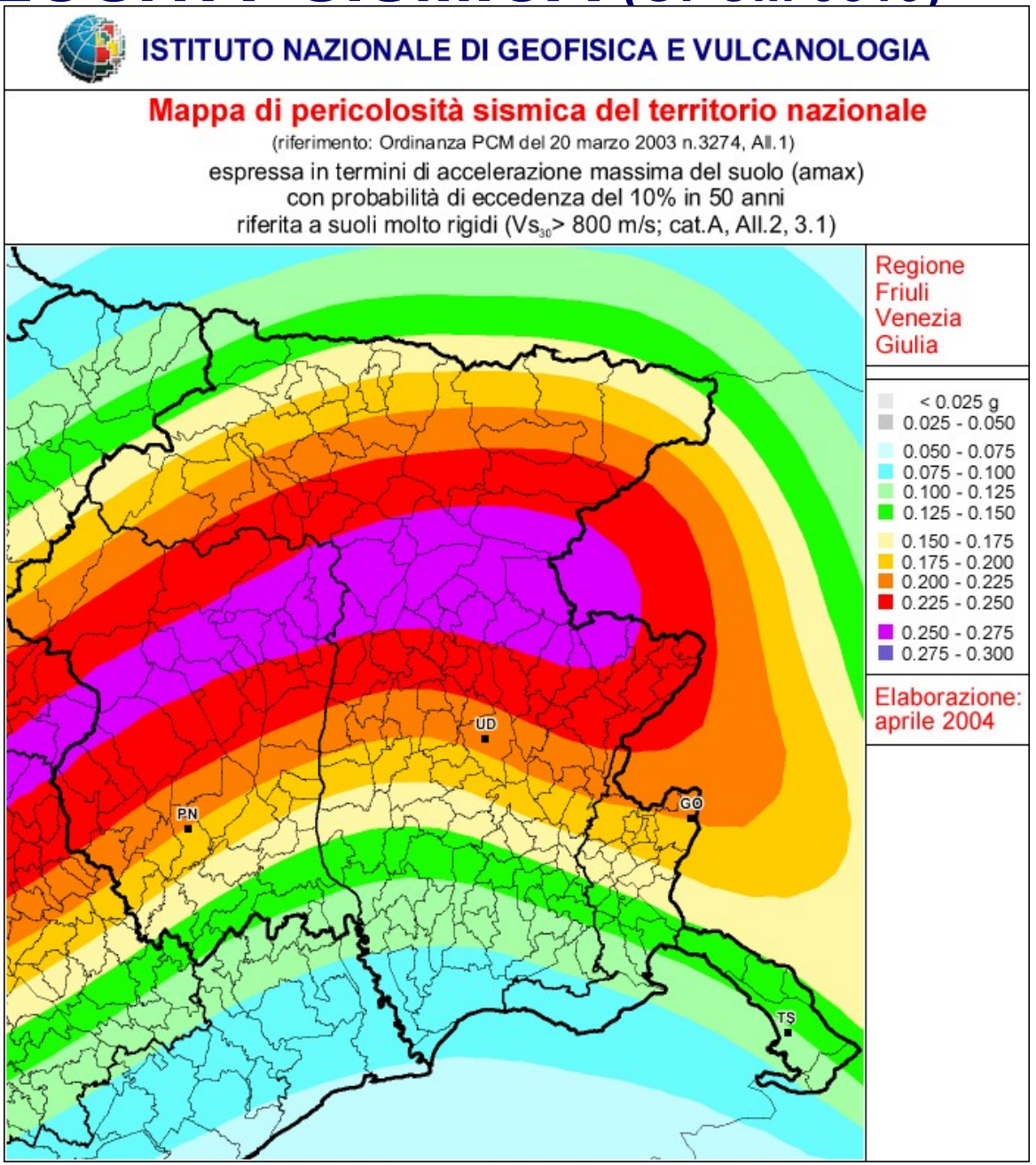
1ª 2ª NC

Zona

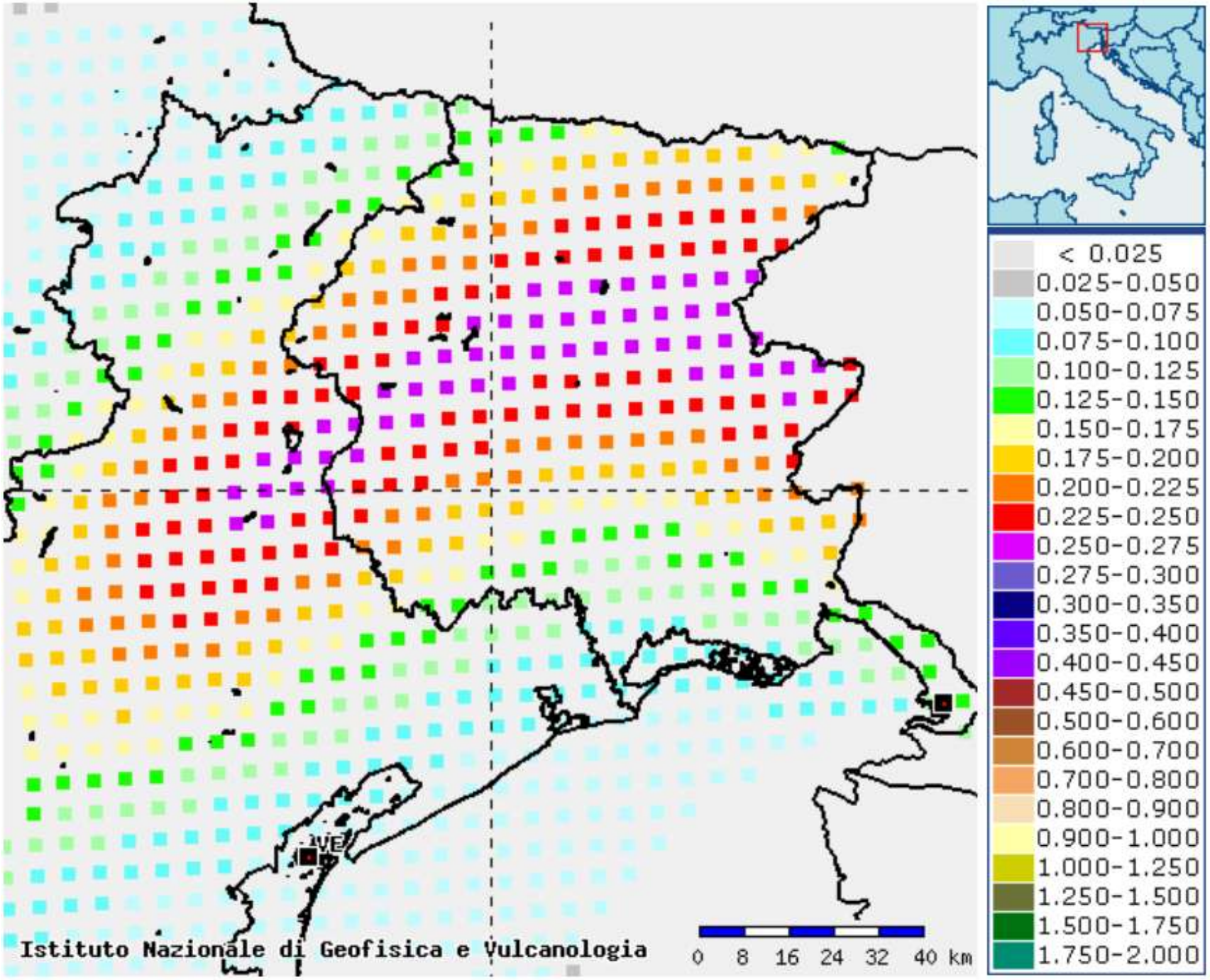
1 2 3 4

MAPPA DI PERICOLOSITA' SISMICA (OPCM 3519)





MAPPA DI PERICOLOSITA' SISMICA (OPCM 3519)



NUOVA NORMATIVA SISMICA

Basata sui risultati degli ultimi quarant'anni di ricerca internazionale sui temi dell'ingegneria sismica

Normativa innovativa e coerente con il sistema degli Eurocodici (*adottati da parte dell'Unione Europea*)

Impostazione secondo i criteri fondamentali codificati dai principali paesi soggetti ai terremoti, come gli Stati Uniti, il Giappone, la Nuova Zelanda, ecc.

NUOVA NORMATIVA SISMICA

Abbandona il carattere convenzionale (*metodo delle tensioni ammissibili*) a favore di una impostazione esplicitamente prestazionale (*metodo degli stati limite*)

Protezione delle vite umane per terremoto violento

STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA

Limitazione dei danni per terremoto ricorrente

STATO LIMITE DI DANNO

Protezione diversa in funzione dell'uso dell'edificio

CLASSE D'USO

EDIFICI E OPERE STRATEGICHE

Attenzione particolare per edifici e opere di carattere strategico per poter garantire i servizi di protezione civile durante eventi sismici violenti

Sedi di uffici pubblici operativi, caserme, aeroporti

Ospedali, case di cura

Centrali elettriche, acquedotti, telecomunicazioni

Ponti, viadotti, dighe

Opere importanti per l'incolumità pubblica

Edifici scolastici, sportivi, di culto, di pubbl. spett.

Stabilimenti con deposito di materiali pericolosi

EDIFICI STRATEGICI REGIONALI

A	**EDIFICI ED OPERE STRATEGICHE REGIONALI**
1	**EDIFICI STRATEGICI** ***Edifici in tutto o in parte destinati a:***
A.1.1.	Sedi degli uffici territoriali di Governo, non di competenza statale
A.1.2.	Sedi operative della Protezione civile
A.1.3.	Sedi di uffici pubblici operativi in caso di calamità(municipi, sedi di Protezione Civile, autorimesse e depositi, etc.), non di competenza statale
A.1.4.	Ospedali di rilievo nazionale e di alta specialità, ospedali di rilievo regionale, edifici di ospedali della rete ospedaliera regionale ospitanti i seguenti servizi la cui funzionalità è essenziale nelle situazioni di emergenza: pronto soccorso, dipartimento di emergenza, aree chirurgiche e di terapia intensiva, edifici di ASS e AO ospitanti funzioni operative per l'emergenza
A.1.5.	Edifici individuati nei piani approvati di protezione civile comunali e provinciali
A.1.6.	Sedi di Forze armate, non di competenza statale
A.1.7.	Sedi di Forze di Polizia, non di competenza statale
A.1.8.	Sedi dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente
A.1.9.	Sedi del Corpo forestale regionale

OPERE INFRASTRUTTURALI STRATEGICHE

2	**OPERE INFRASTRUTTURALI STRATEGICHE** ***Opere infrastrutturali identificabili anche per lotti funzionali, in tutto o in parte individuabili come:***
A.2.1.	Impianti di depurazione
A.2.2.	Opere di sistemazione idraulica di corsi d'acqua (briglie, etc.) di competenza regionale il cui collasso coinvolge edifici e/o opere strategiche o rilevanti
A.2.3.	Opere di sistemazione di pendii di competenza regionale il cui collasso coinvolge edifici e/o opere strategiche o rilevanti
A.2.4.	Strutture connesse con il funzionamento di acquedotti locali
A.2.5.	Strutture, non di competenza statale, connesse con la produzione, il trasporto e la distribuzione di energia elettrica fino ad impianti di media tensione
A.2.6.	Strutture, non di competenza statale, connesse con la produzione, il trasporto e la distribuzione di materiali combustibili
A.2.7.	Strutture connesse con il funzionamento di servizi di comunicazione di competenza regionale (radio, TV, ponti radio, ecc.)
A.2.8.	Strade provinciali e comunali ed opere d'arte annesse, individuati nei piani approvati di protezione civile

B	EDIFICI ED OPERE RILEVANTI REGIONALI
1	**EDIFICI RILEVANTI** ***Edifici in tutto o in parte destinati a:***
B.1.1.	Sedi degli edifici pubblici e degli edifici con funzione pubblica (Sedi regionali, provinciali, comunali, centri civici, etc.), nonché aperti al pubblico per comunità significative
B.1.2.	Scuole di ogni ordine e grado
B.1.3.	Edifici di ospedali regionali (pubblici e privati accreditati) ospitanti servizi non essenziali ai fini dell'emergenza, edifici ospitanti sedi ed uffici di ASS e AO non operative ai fini dell'emergenza, altre strutture residenziali sanitarie e/o socio-assistenziali per non autosufficienti con dotazione superiore a 25 posti letto, strutture sanitarie a media complessità (DGR n. 1292 dd. 23.04.2002)
B.1.4.	Chiese e campanili, non di competenza statale
B.1.5.	Auditorium, teatri, sale multimediali, centri sociali e socio-assistenziali, sale polifunzionali con capienza superiore a 100 unità
B.1.6.	Musei, biblioteche, sale espositive con superfici superiori a 1000 mq
B.1.7.	Impianti sportivi e strutture connesse
B.1.8.	Centri commerciali, strutture adibite al commercio con esposizione diffusa aventi superficie lorda superiore a 5000 mq
B.1.9.	Impianti nucleari ed impianti termoelettrici
B.1.10.	Strutture di produzione e stoccaggio di prodotti insalubri o pericolosi (materie tossiche, gas compressi, materiali esplosivi, prodotti chimici potenzialmente inquinanti)

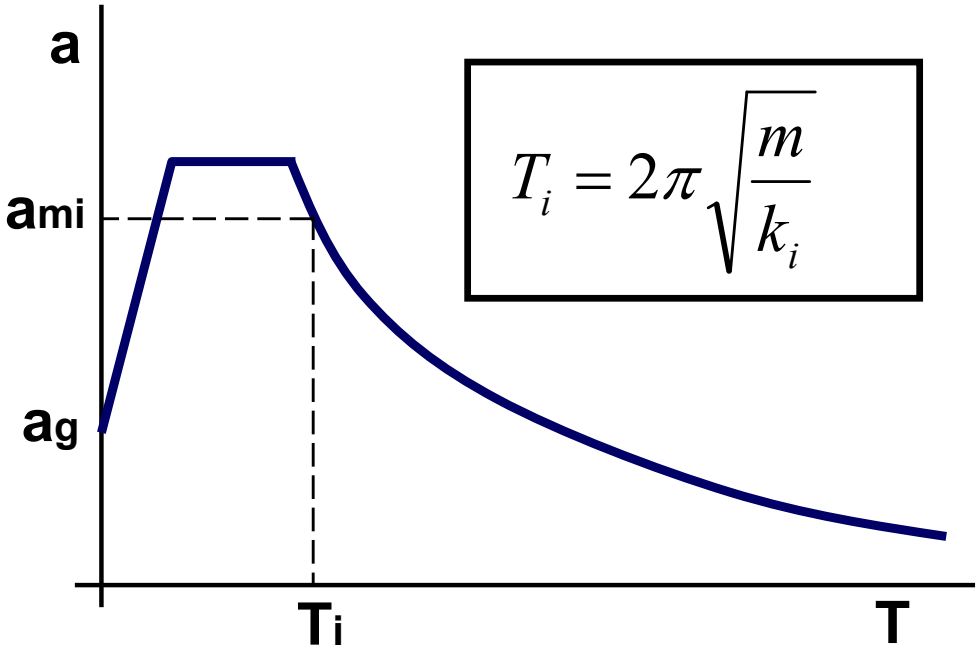
OPERE INFRASTRUTTURALI RILEVANTI

2	**OPERE INFRASTRUTTURALI RILEVANTI** ***Opere infrastrutturali identificabili anche per lotti funzionali, in tutto o in parte individuabili come:***
B.2.1.	Stazioni per il trasporto pubblico, non di competenza statale, incluse in centri abitati di almeno 10000 abitanti

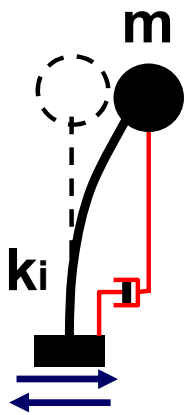
AZIONE SISMICA

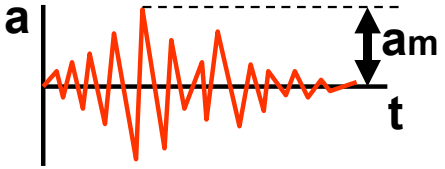
L'azione sismica viene quantificata da due grandezze

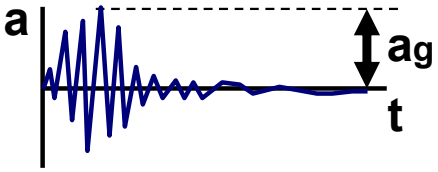
- **Accelerazione di picco PGA (Tr. = 475 anni)**
- **Forma spettrale elastica in accelerazione**



$$T_i = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_i}}$$



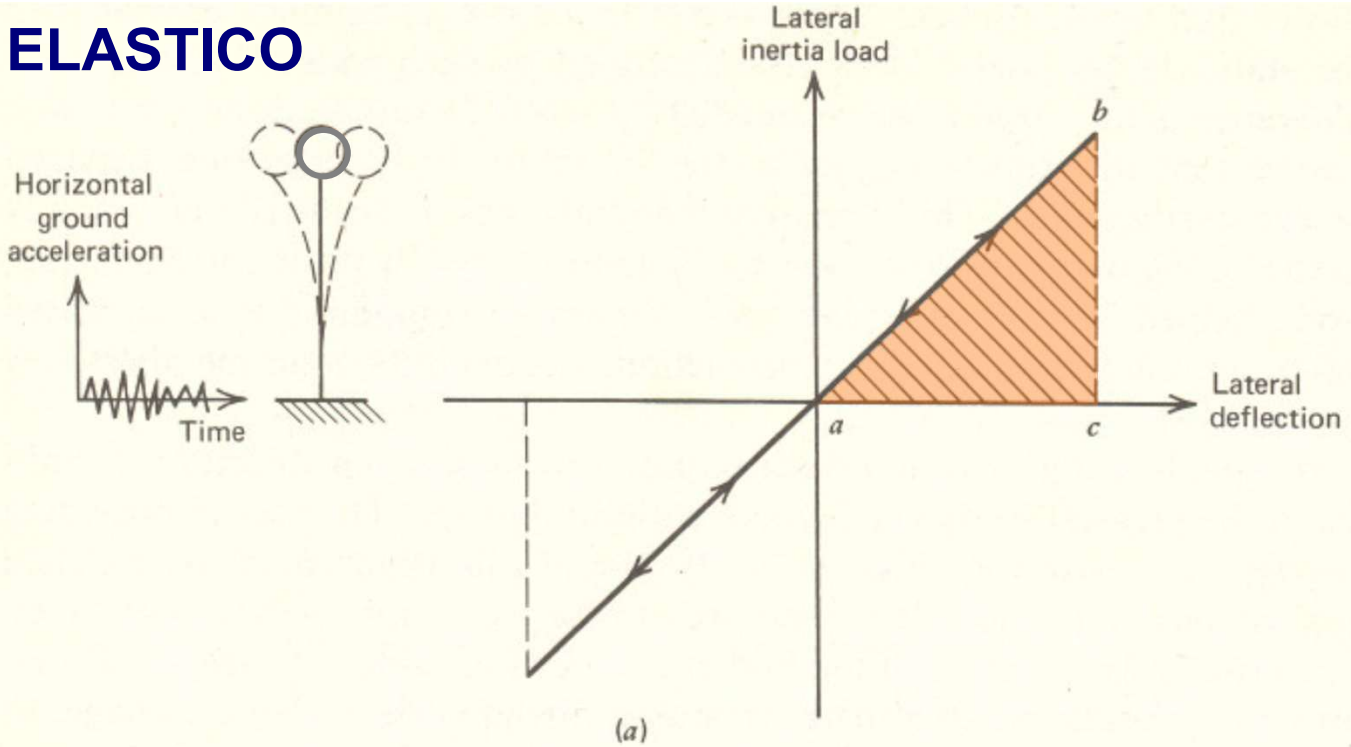




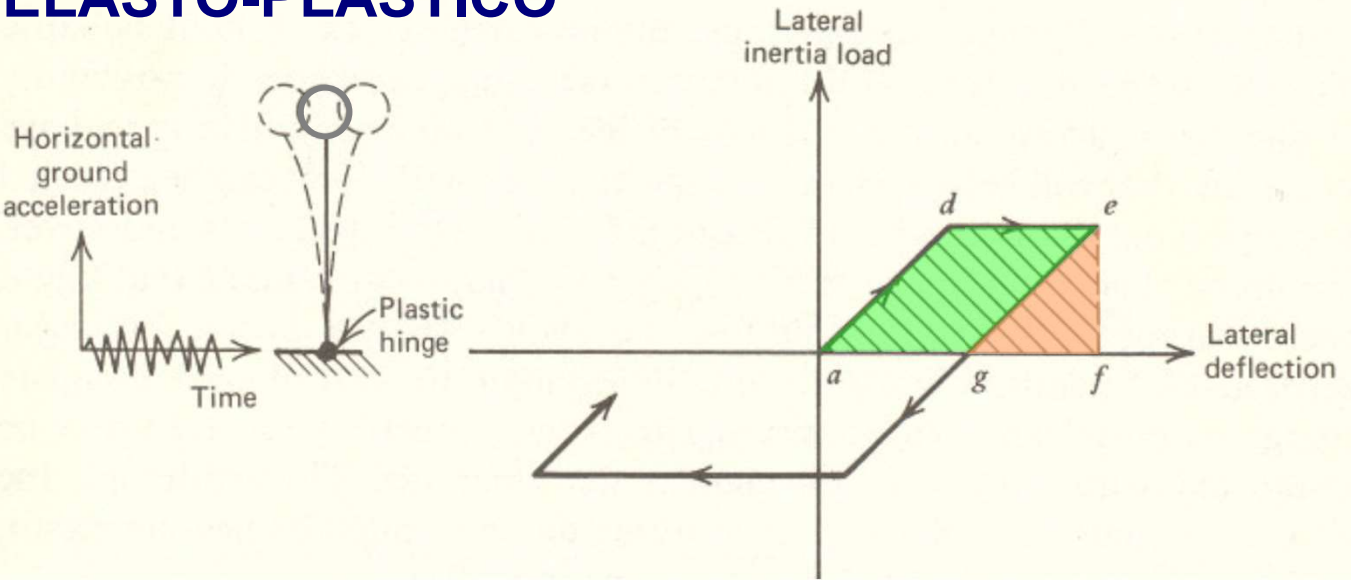
Spettro elastico

OSCILLATORE SEMPLICE

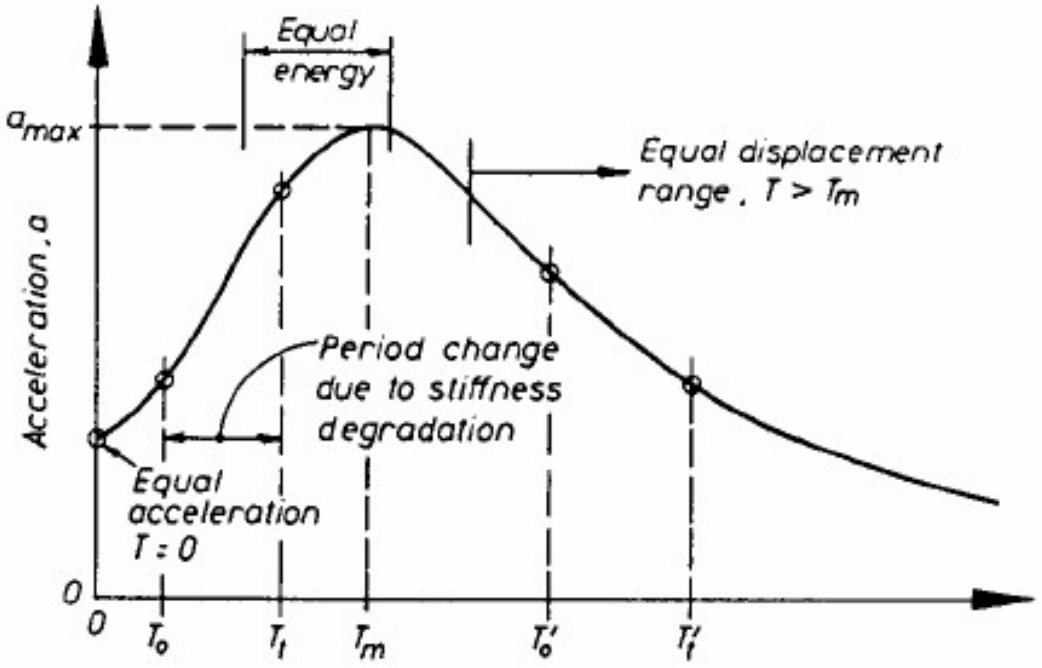
ELASTICO



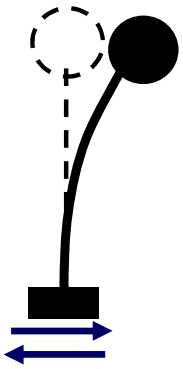
ELASTO-PLASTICO



OSCILLATORE SEMPLICE

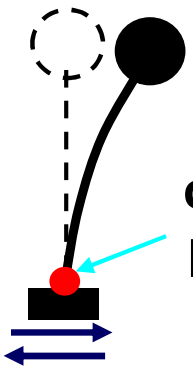


elastico



F_e, s'_u

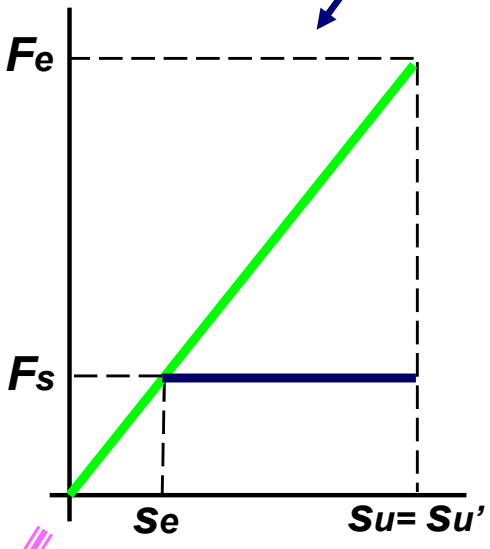
elasto-plastico



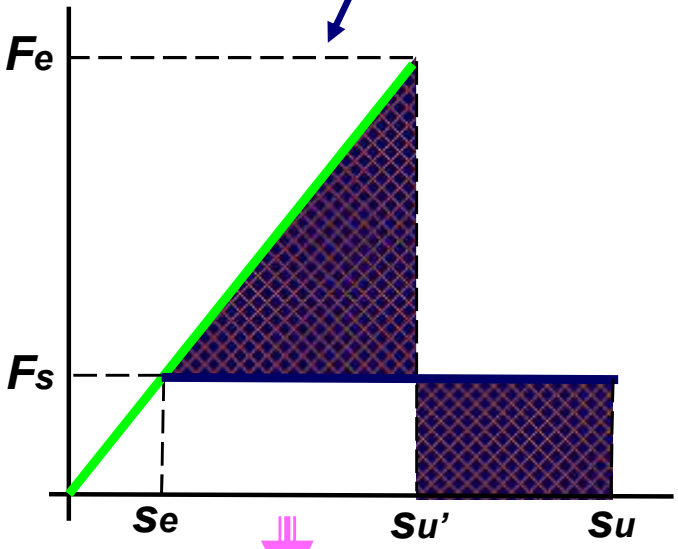
cerniera plastica

F_s (M_p), s_u

Uguale spostamento



Uguale energia



$$\frac{F_e}{F_s} = \frac{s_u}{s_e} = \mu$$

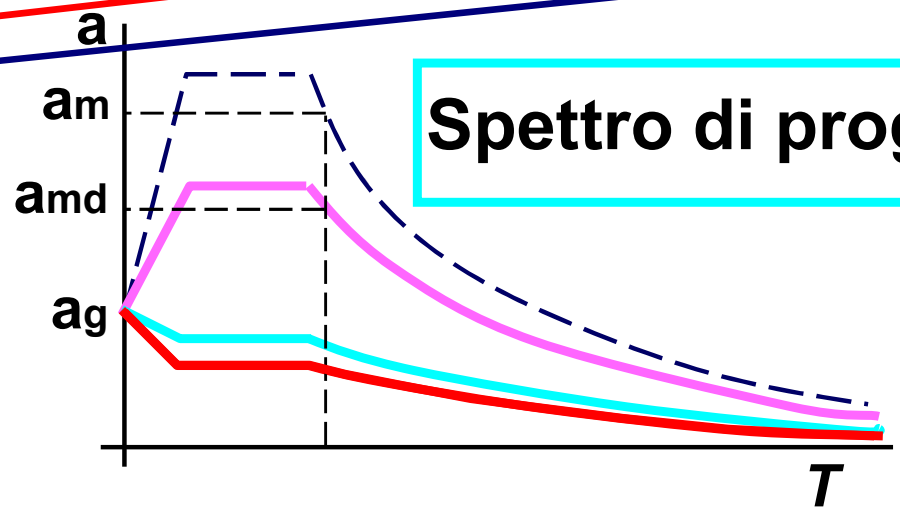
$$\frac{F_e}{F_s} = \sqrt{2\frac{s_u}{s_e} - 1} = \sqrt{2\mu - 1}$$

NUOVA NORMATIVA SISMICA

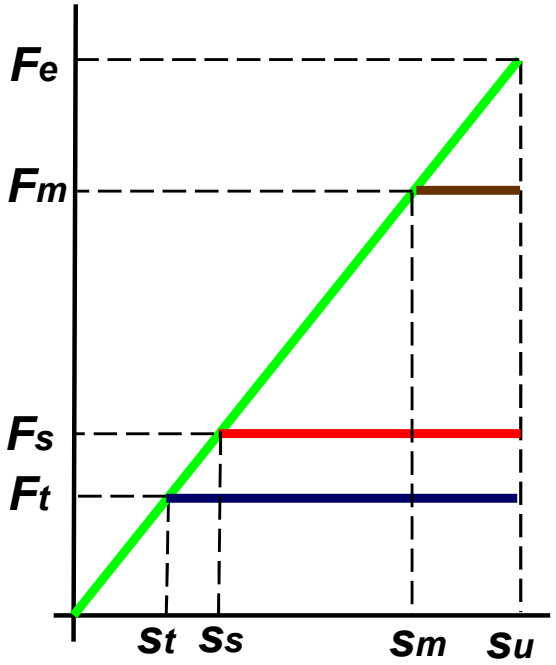
L'azione sismica deriva dallo spettro di progetto, che è lo spettro elastico modificato in funzione delle caratteristiche della struttura (duttilità, sovraresistenza, forma)

$$a_{md} = \frac{a_m}{q} \qquad q = \mu \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1} \cdot k_R$$

Fattore di struttura



Spettro di progetto



Per telai $q = \frac{s_u}{s_t} \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1} \cdot k_R = 2.4 - 5.8$

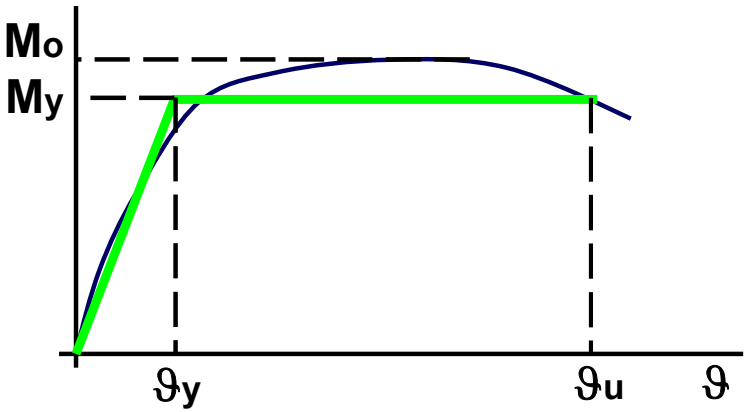
Per setti $q = \frac{s_u}{s_s} \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1} \cdot k_R = 2.4 - 4.8$

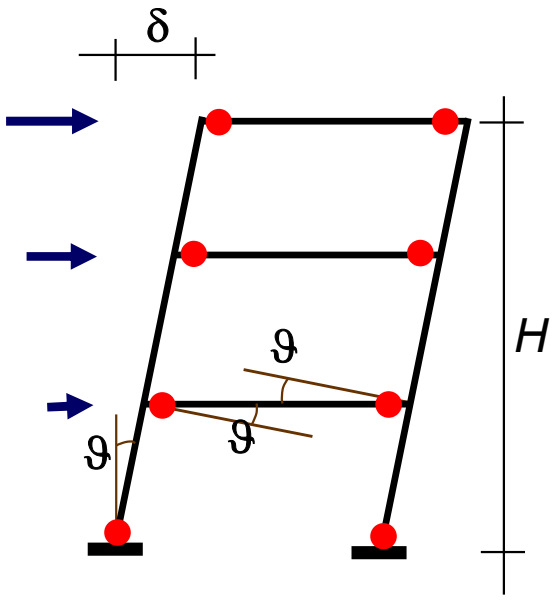
Murature $q = \frac{s_u}{s_s} \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1} = 2.4 - 3.0$

DUTTILITA’

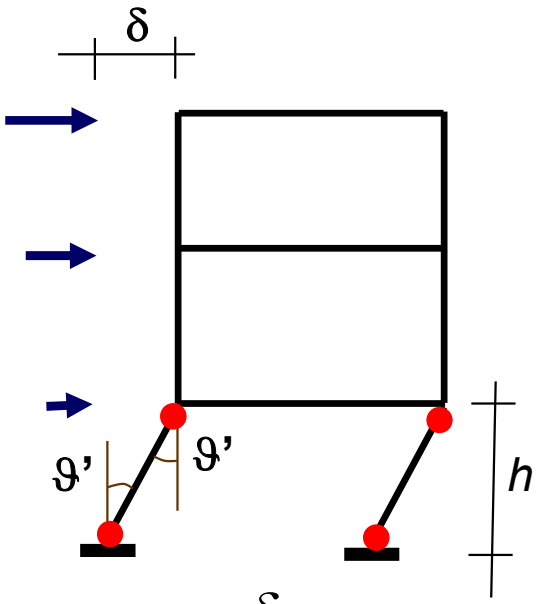
La duttilità della struttura è rappresentata dalla capacità di sviluppare deformazioni plastiche

La richiesta di duttilità sezionale, associata ad una data duttilità strutturale, è tanto più elevata quanto più limitato è il numero di sezioni che si plasticizzano.





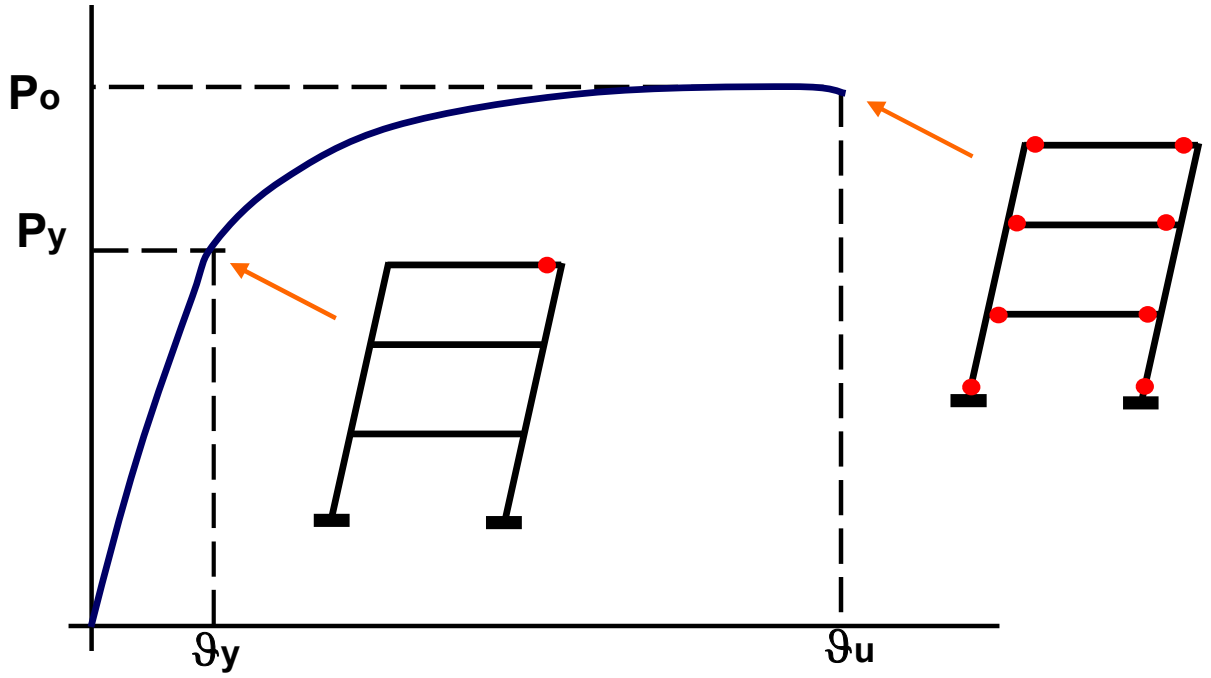
$$\vartheta = \frac{\delta}{H}$$



$$\vartheta' = \frac{\delta}{h}$$

SOVRARESISTENZA

Rappresenta la maggiore resistenza che una struttura è in grado di offrire dopo che si è plasticizzata la prima sezione

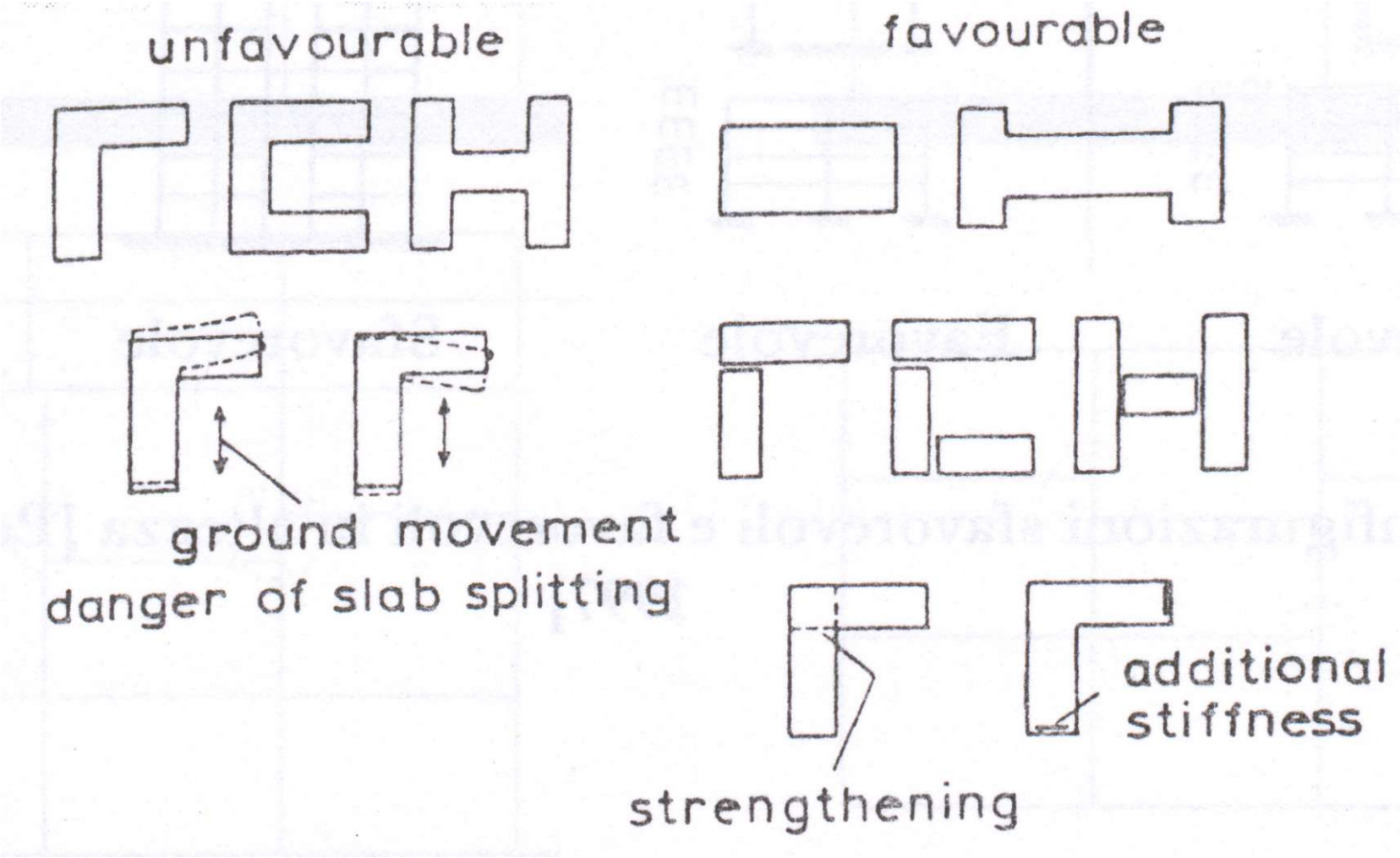


$$Sovraresistenza = \frac{P_o}{P_y} = \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$$

GEOMETRIA IN PIANTA

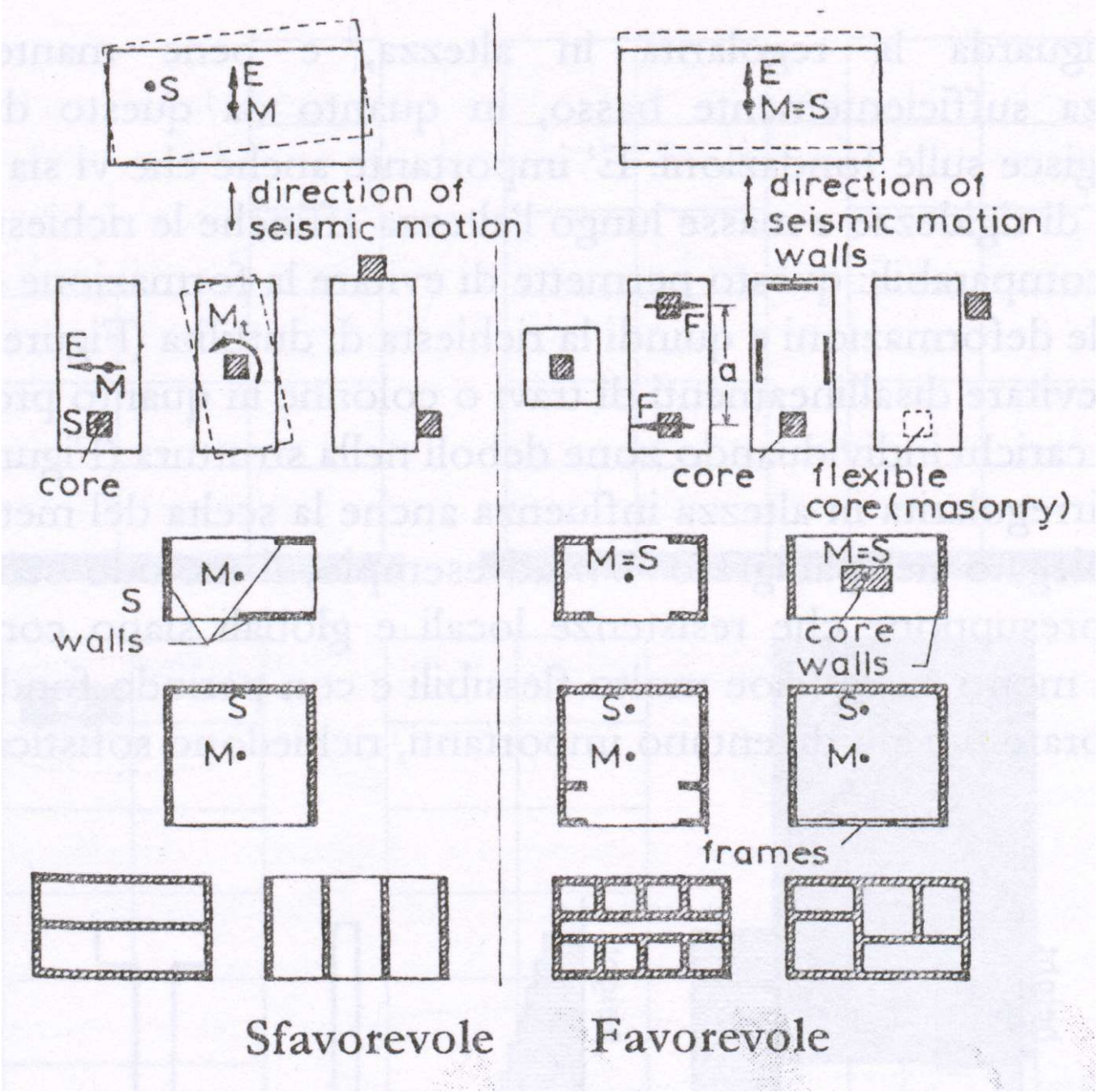
La forma deve essere semplice e compatta $L < 4\,B$

Segmentare l'edificio in più parti per piante complesse.

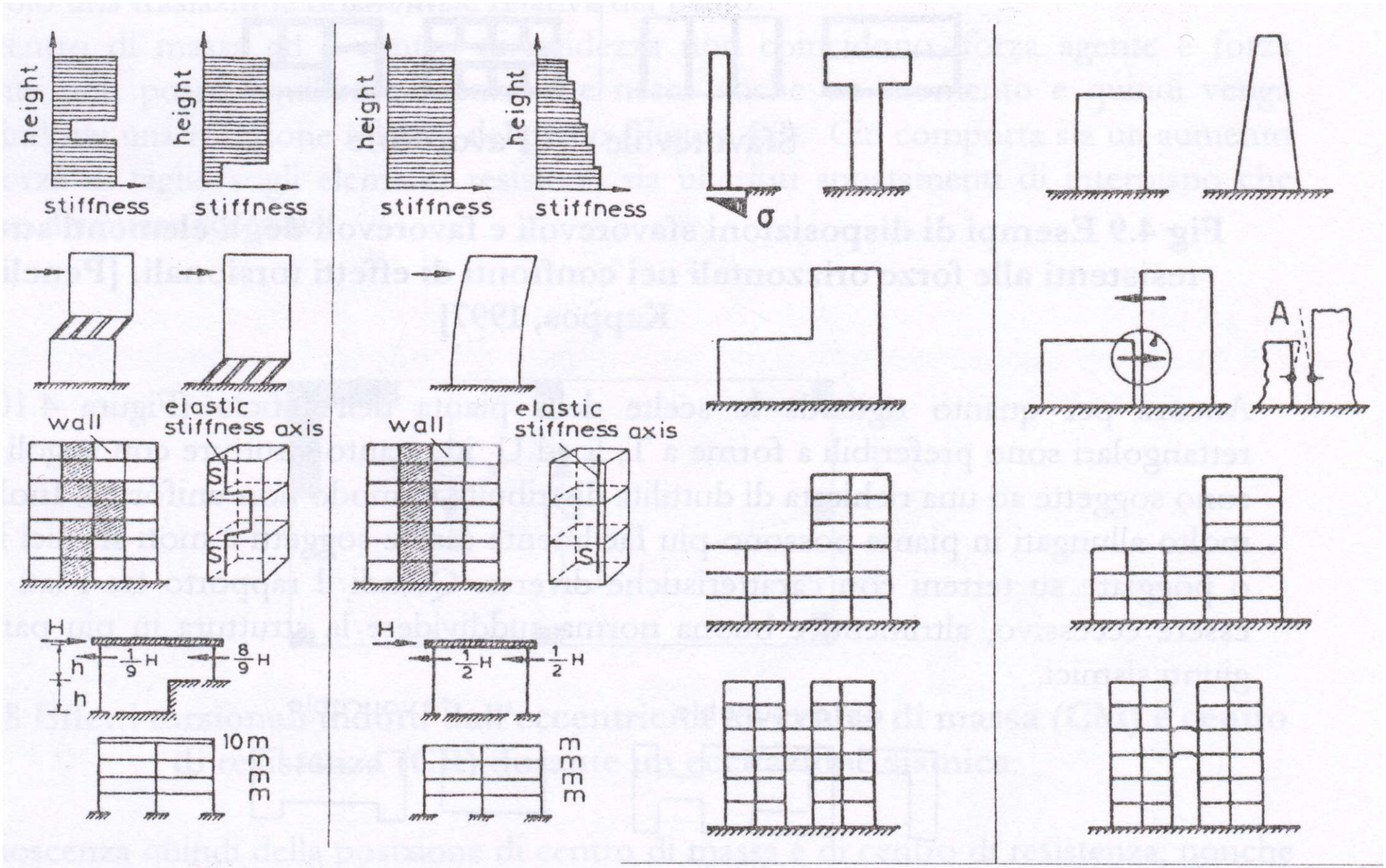


DISTRIBUZIONE MASSE E RIGIDEZZE

La distribuzione degli elementi resistenti alle azioni orizzontali deve essere uniforme in pianta per evitare effetti torsionali rilevanti.



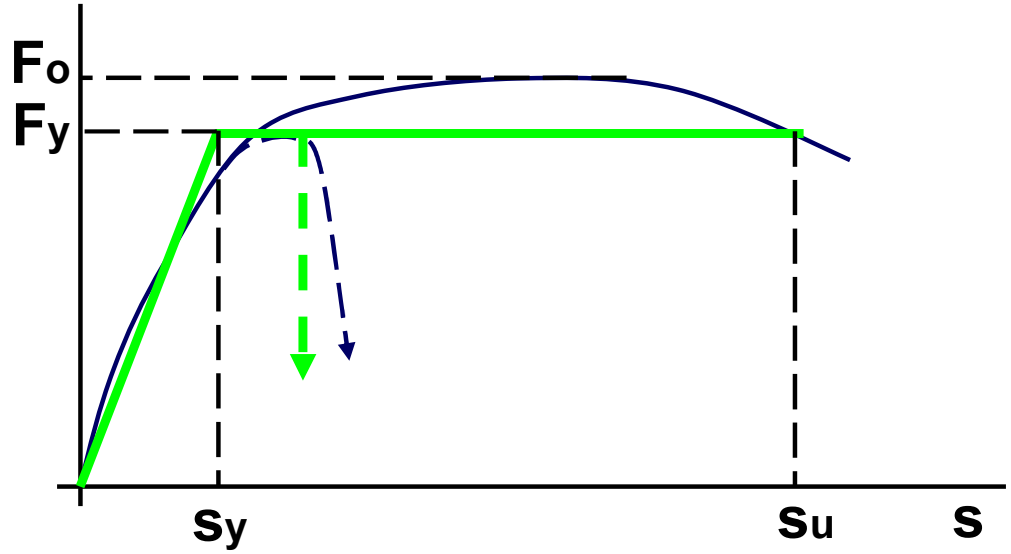
GEOMETRIA IN ALTEZZA



COMPORTAMENTO SISMICO

Comportamento sismico caratterizzato da 3 grandezze

- ***Rigidezza***
- ***Resistenza***
- ***Duttilità***



a) **Minimizzazione danni non strutturali terremoti modesti**

b) **Minimizzazione danni strutturali terremoti medi (SLD)**

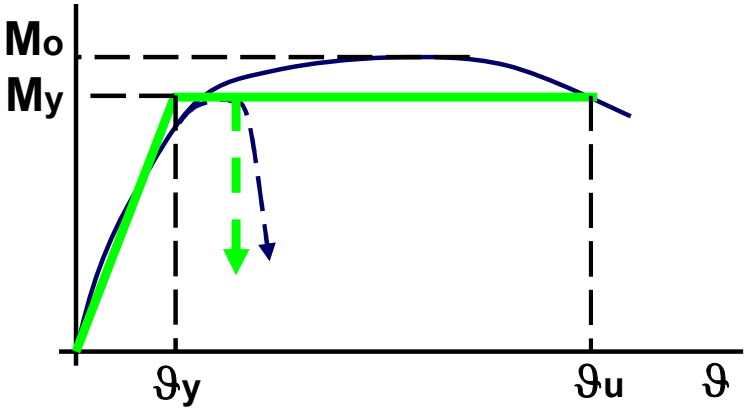
c) **Sopportare grandi spostamenti terremoti forti (SLU)**

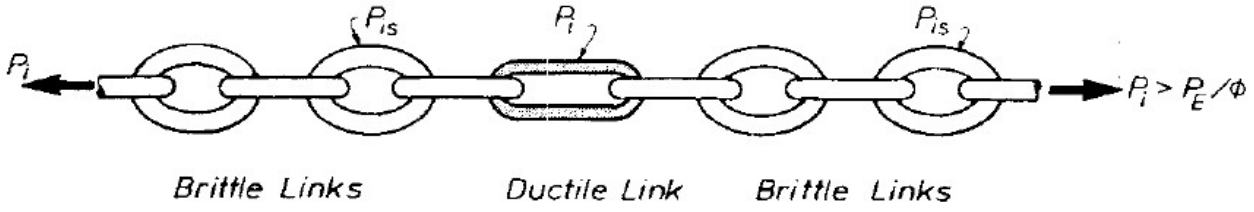
GERARCHIA DELLE RESISTENZE

Nella precedente concezione strutturale gli elementi della struttura venivano progettati sulle azioni

La filosofia della gerarchia delle resistenze prevede di selezionare le zone duttili e le zone fragili (Park, Paulay)

Le prime sono progettate in funzione dell'azione di calcolo, le seconde sulla base della resistenza delle prime (tenendo conto della possibile sovraresistenza)



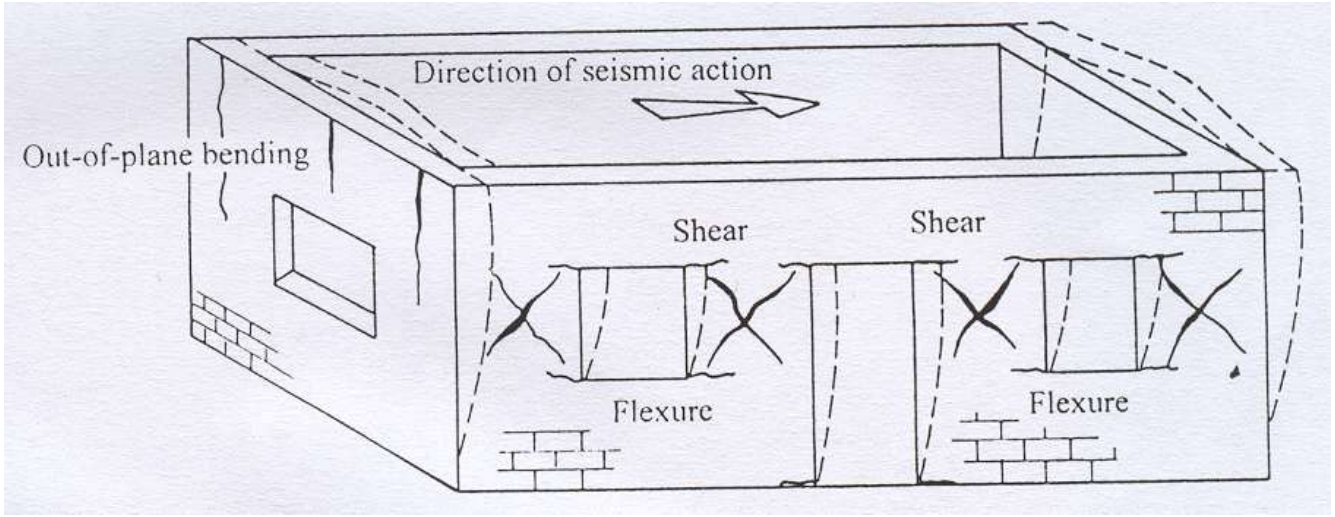


INTRODUZIONE

Le strutture in muratura non armata sono particolarmente vulnerabili alle azioni sismiche a causa di

- **Ridotta duttilità (*limitata capacità di dissipare energia*)**
- **Presenza di sollecitazioni fuori piano nelle pareti**
- **Rottura per sollecitazioni nel piano di tipo tagliante**

Inoltre, la presenza contemporanea di sollecitazioni nel piano e fuori piano anticipa il collasso



Auspicabile il ricorso alla muratura armata

CONFIGURAZIONI STRUTTURALI

I numerosi terremoti occorsi nel passato hanno evidenziato che oltre alla qualità dei materiali è fondamentale la configurazione strutturale

Infatti gli edifici con forma regolare e con pareti e solai ben connessi fra loro hanno spesso superato terremoti di sensibile intensità anche se non erano stati progettati come sismo-resistenti

E' quindi importante che gli edifici abbiano

- **regolarità in pianta e in altezza**
- **elevata iperstaticità (***efficace collegamento fra tutti gli elementi***)**
- **solai rigidi nel proprio piano**

Se sono rispettate queste caratteristiche, in condizioni sismiche l'energia viene dissipata uniformemente in tutti gli elementi della struttura.

REGOLARITA' IN PIANTA

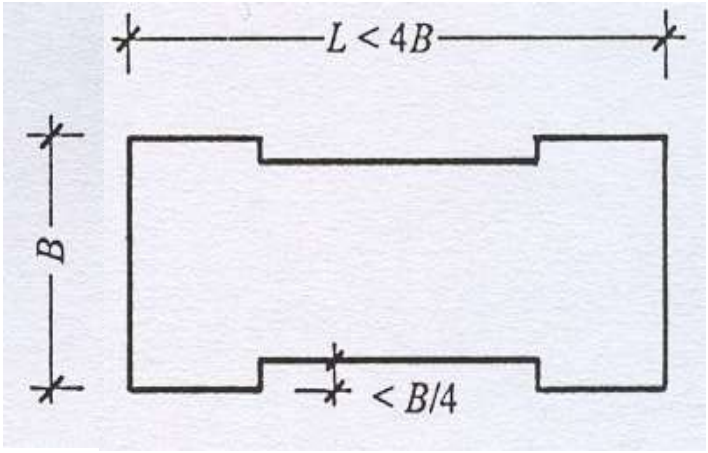
Configurazione in pianta compatta e approssimativamente simmetrica in relazione alla distribuzione di masse e rigidezze.

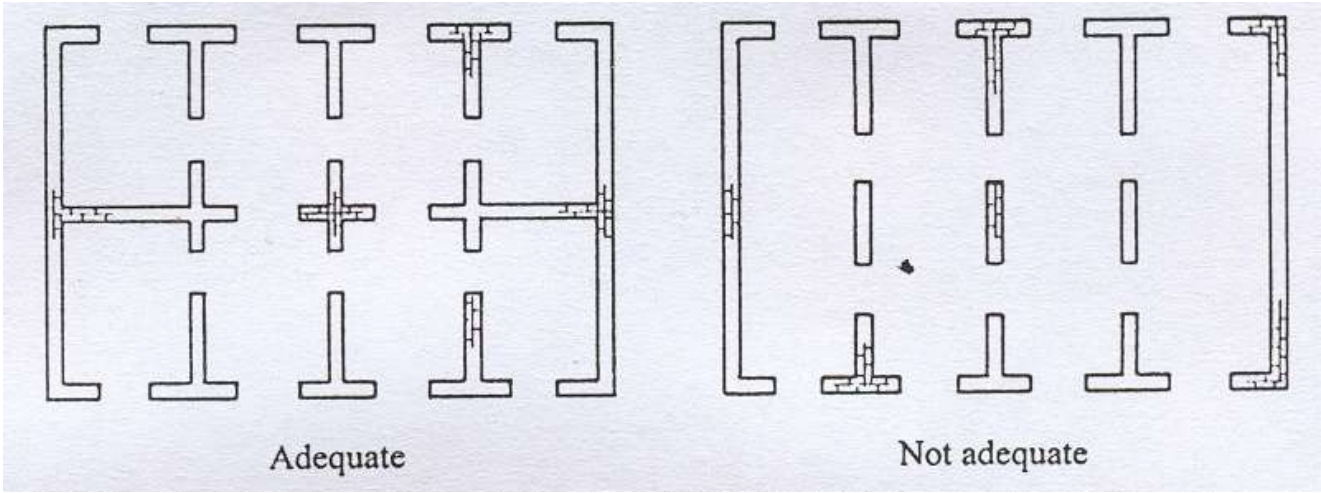
Rapporto fra i lati del rettangolo in cui l'edificio è inscritto inferiore a 4

Rientri o sporgenze non superiori al 25% della dimensione dell'edificio

I solai possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano

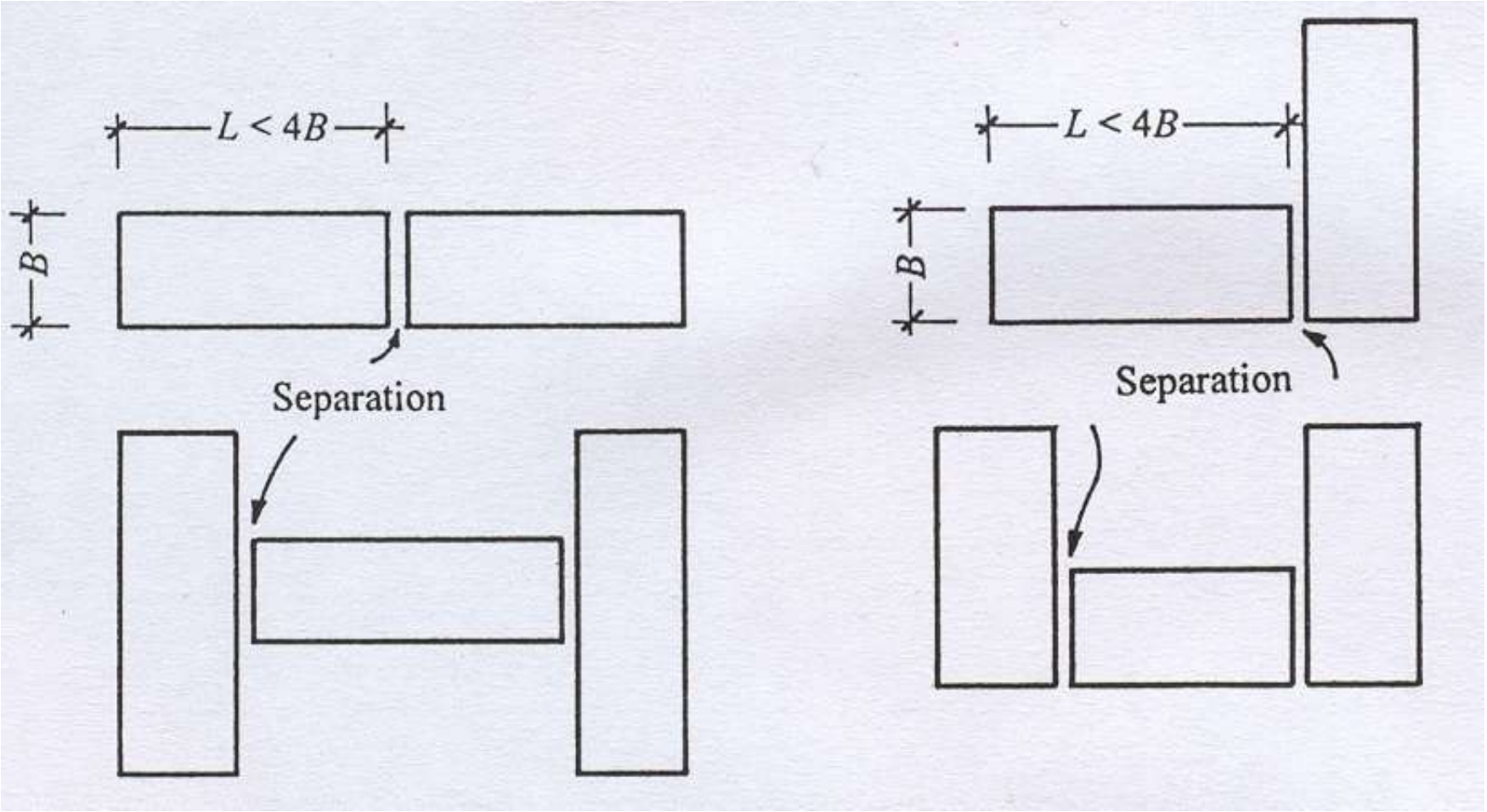
Area e rigidezza delle murature devono essere approssimativamente uguali nelle due direzioni





REGOLARITA' IN PIANTA

Se l'edificio definitivo dovrà avere forme più complesse è necessario scomporre l'intero edificio in più moduli regolari



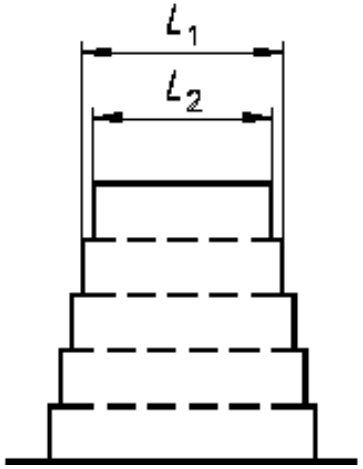
REGOLARITA' IN ALTEZZA

Tutti gli elementi resistenti (pareti) si estendono per tutta l'altezza

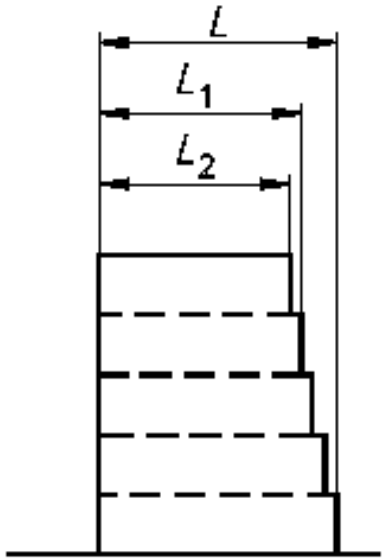
Massa e rigidezza rimangono costanti o si riducono gradualmente con l'altezza (*variazioni di massa inferiori al 25%, rigidezza non minore del 30% del piano sottostante e non superiore del 10% dello stesso piano*)

Resistenza effettiva/resistenza richiesta calcolata al piano *i* non deve differire più del 20% dell'analogo rapporto per un altro piano

Restringimenti della sezione dell'edificio graduali (*≯ 10% a piano e max 30% fra ultimo e primo piano*)



$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0{,}20$$



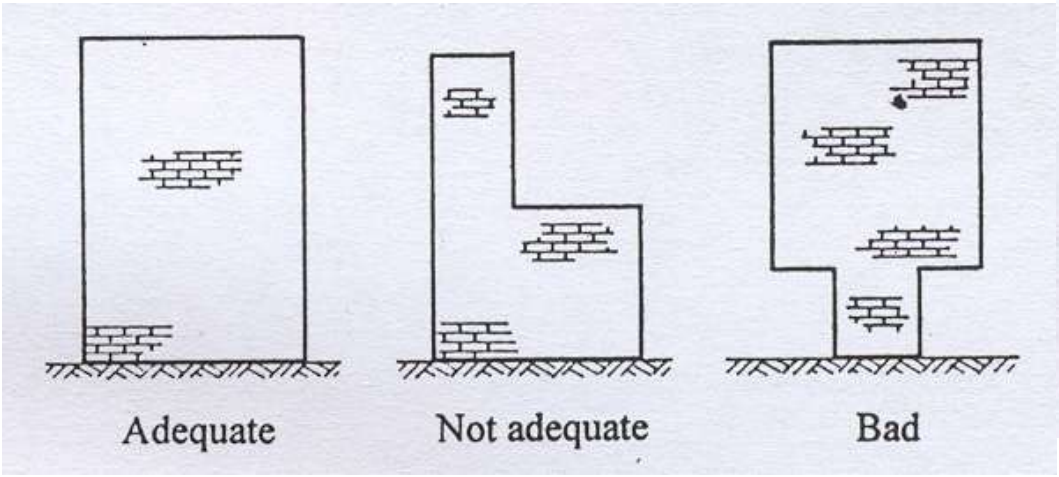
$$\frac{L - L_2}{L} \leq 0{,}30$$

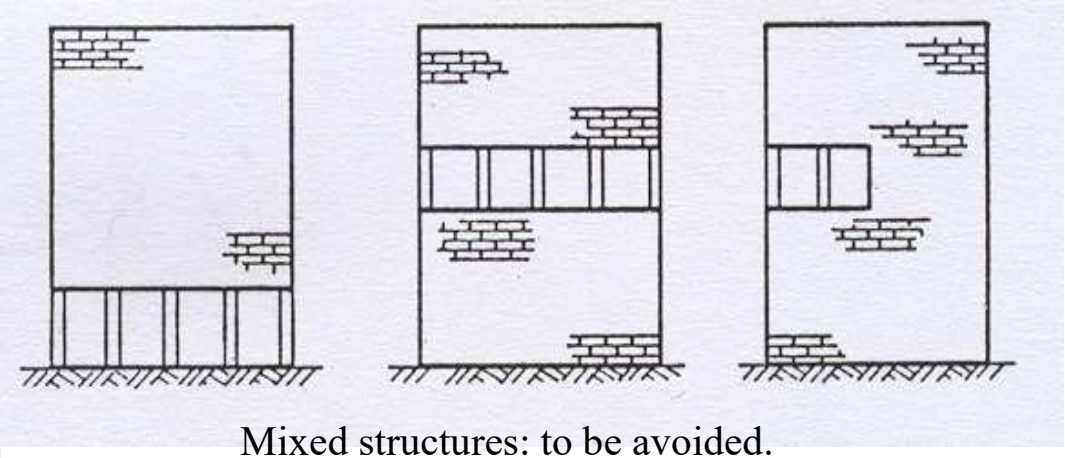
$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0{,}10$$

CONFIGURAZIONI IN ALTEZZA

Quindi configurazioni di questo tipo devono essere evitate

- *strutture miste con piani o parti di piano realizzate con tipologia strutturale e materiali diversi*
- *Strutture con forti rastremazioni ai piani inferiori*



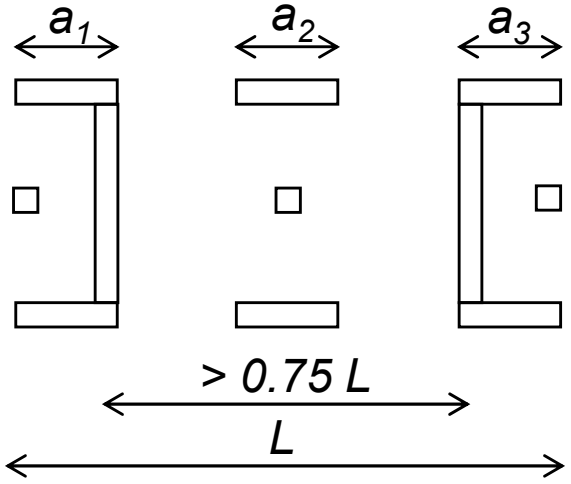

Mixed structures: to be avoided.

- *In zona 1, gli edifici in muratura ordinaria non possono superare i due piani fuori terra.*

COSTRUZIONI SEMPLICI

Si definiscono "costruzioni semplici" se rispettano, oltre alle caratteristiche di regolarità in pianta e in altezza, anche le seguenti

- *in ognuna delle due direzioni principali siano previste almeno due pareti di lunghezza, al netto delle aperture, non inferiore al 50% della larghezza dell'edificio nella medesima direzione*
- *La distanza tra queste due pareti non sia inferiore al 75% della larghezza dell'edificio nella direzione ortogonale*
- *Almeno il 75% dei carichi verticali sia portato da pareti che facciano parte del sistema resistente alle azioni orizzontali*



$\Sigma\, ai > 0.50\, L$

COSTRUZIONI SEMPLICI

Si devono inoltre aggiungere le seguenti condizioni

- *Le pareti strutturali della costruzione devono essere continue dalle fondazioni alla sommità.*
- *La planimetria dell'edificio deve essere inscrivibile in un rettangolo con rapporto fra lato minore e lato maggiore non inferiore a 1/3.*
- *La snellezza della muratura non deve essere maggiore di 12.*
- *Le murature devono rispettare i requisiti geometrici di tabella*
- *Il carico variabile sui solai non deve essere superiore a 3.00 kN/m².*

Tipologie costruttive	t_{min}	$(\lambda=h_0/t)_{max}$	$(l/h')_{min}$
Muratura ordinaria, realizzata con elementi in pietra squadrata	300 mm	10	0,5
Muratura ordinaria, realizzata con elementi artificiali	240 mm	12	0,4
Muratura armata, realizzata con elementi artificiali	240 mm	15	Qualsiasi
Muratura ordinaria, realizzata con elementi in pietra squadrata, in siti ricadenti in zona 3 e 4	240 mm	12	0,3
Muratura realizzata con elementi artificiali semipieni, in siti ricadenti in zona 4	200 mm	20	0,3
Muratura realizzata con elementi artificiali pieni, in siti ricadenti in zona 4	150 mm	20	0,3

COSTRUZIONI SEMPLICI

Si devono inoltre aggiungere le seguenti condizioni

- *Nessun altezza di interpiano sia superiore a 3.5 m*
- *Il rapporto tra l'area della sezione resistente delle pareti e superficie del piano terreno non sia inferiore ai valori indicati nella tabella, per ciascuna delle due direzioni ortogonali*
- *Il numero di piani non è superiore a 3 per muratura ordinaria e a 4 per muratura armata.*

Accelerazione di picco del terreno $a_g \cdot S$		≤0,07 g	≤0,1 g	≤0,15 g	≤0,20 g	≤0,25 g	≤0,30 g	≤0,35 g	≤0,40 g	≤0,45 g	≤0,4725 g
Tipo di struttura	Numero piani										
Muratura ordinaria	1	3,5 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,0 %	6,0 %	6,5 %
	2	4,0 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	6,5 %	6,5 %	7,0 %
	3	4,5 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %			
Muratura armata	1	2,5 %	3,0 %	3,0 %	3,0 %	3,5 %	3,5 %	4,0 %	4,0 %	4,5 %	4,5 %
	2	3,0 %	3,5 %	3,5 %	3,5 %	4,0 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,0 %	5,0 %
	3	3,5 %	4,0 %	4,0 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	5,5 %	6,0 %	6,0 %
	4	4,0 %	4,5 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	5,5 %	6,0 %	6,0 %	6,5 %	6,5 %

COSTRUZIONI SEMPLICI

Si devono inoltre aggiungere le seguenti condizioni

- *In ciascuna delle due direzioni devono essere presenti pareti resistenti alle azioni orizzontali non superiore a 7.0 m, elevabile a 9.0 m per muratura armata.*
- *Deve inoltre risultare, per ogni piano:*

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq 0.25 \frac{f_k}{\gamma_M}$$

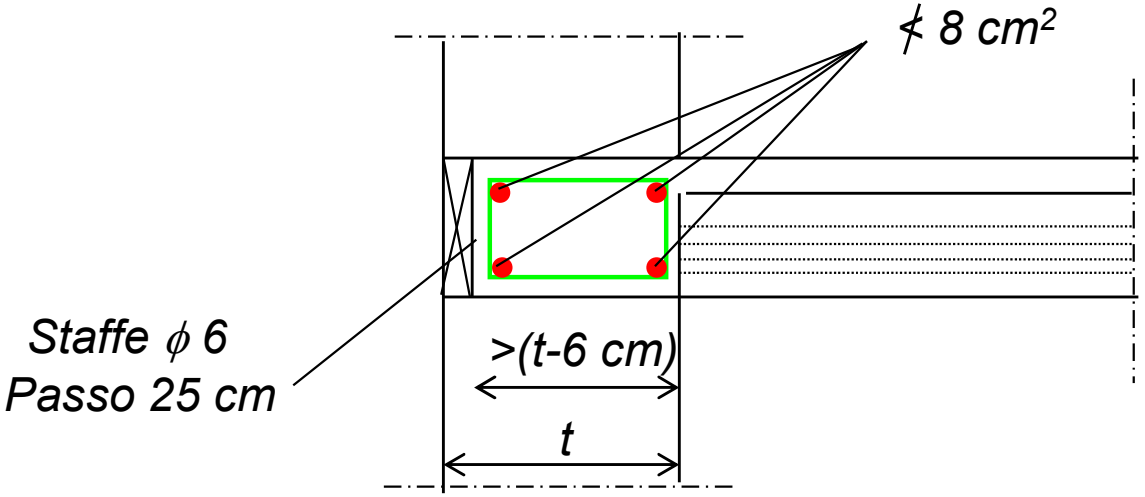
N carico verticale totale alla base di ciascun piano (valori caratteristici)

A area totale dei muri portanti allo stesso piano

f_k *resistenza caratteristica a compressione in direzione verticale.*

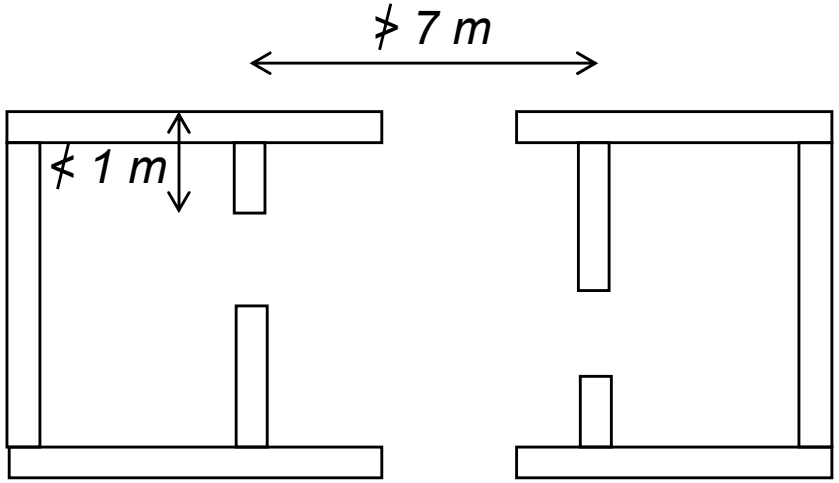
PARTICOLARI COSTRUTTIVI

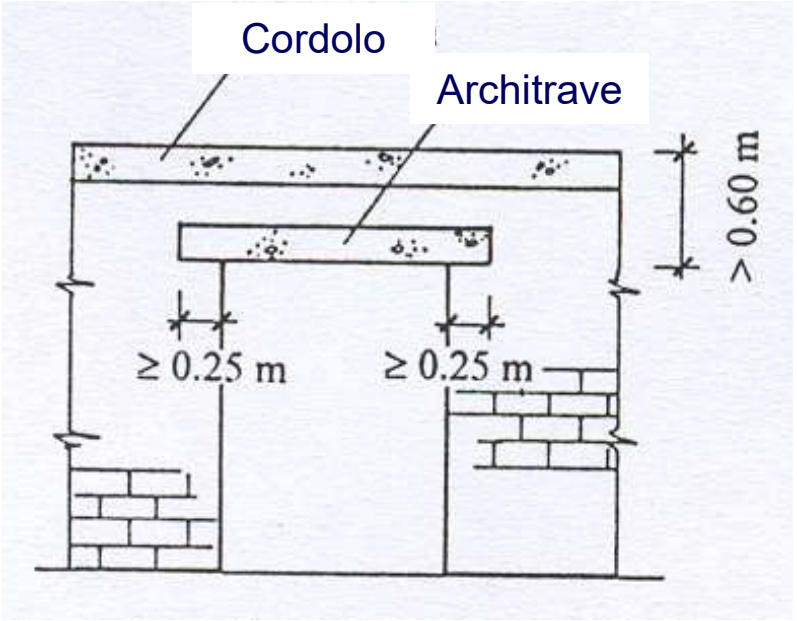
- *Ad ogni piano deve essere realizzato un cordolo continuo all'intersezione tra solai e pareti*
- *La larghezza del cordolo deve essere non inferiore allo spessore della muratura meno 6 cm ed altezza pari a quella del solaio*
- *L'armatura corrente non sarà inferiore a 8 cm^2, le staffe ϕ 6 ogni 25 cm*
- *Le travi metalliche o prefabbricate dei solai devono essere prolungate nel cordolo per almeno la metà della sua larghezza e comunque per non meno di 12 cm*



PARTICOLARI COSTRUTTIVI

- *Ogni muro resistente alle azioni orizzontali deve essere intersecato da altri muri ad esso perpendicolari ad interasse non superiore a 7 m*
- *In corrispondenza degli incroci tra pareti portanti sono prescritte, su entrambi i lati, zone di parete muraria di lunghezza non inferiore a 1 m, compreso lo spessore del muro trasversale*
- *Al di sopra di ogni apertura deve essere realizzato un architrave in c.a. o in acciaio efficacemente ammorsato alla muratura*





AZIONE SISMICA

L'azione sismica viene ricavata sulla base dello spettro di risposta elastico dell'accelerazione, la cui forma dipende dal terreno di fondazione, ma non varia con il livello di sismicità

Lo spettro di risposta elastico dell'accelerazione orizzontale esprime la massima accelerazione subita da un oscillatore semplice elastico di periodo proprio T per effetto di un terremoto con accelerazione orizzontale massima del terreno pari a $a_g S$

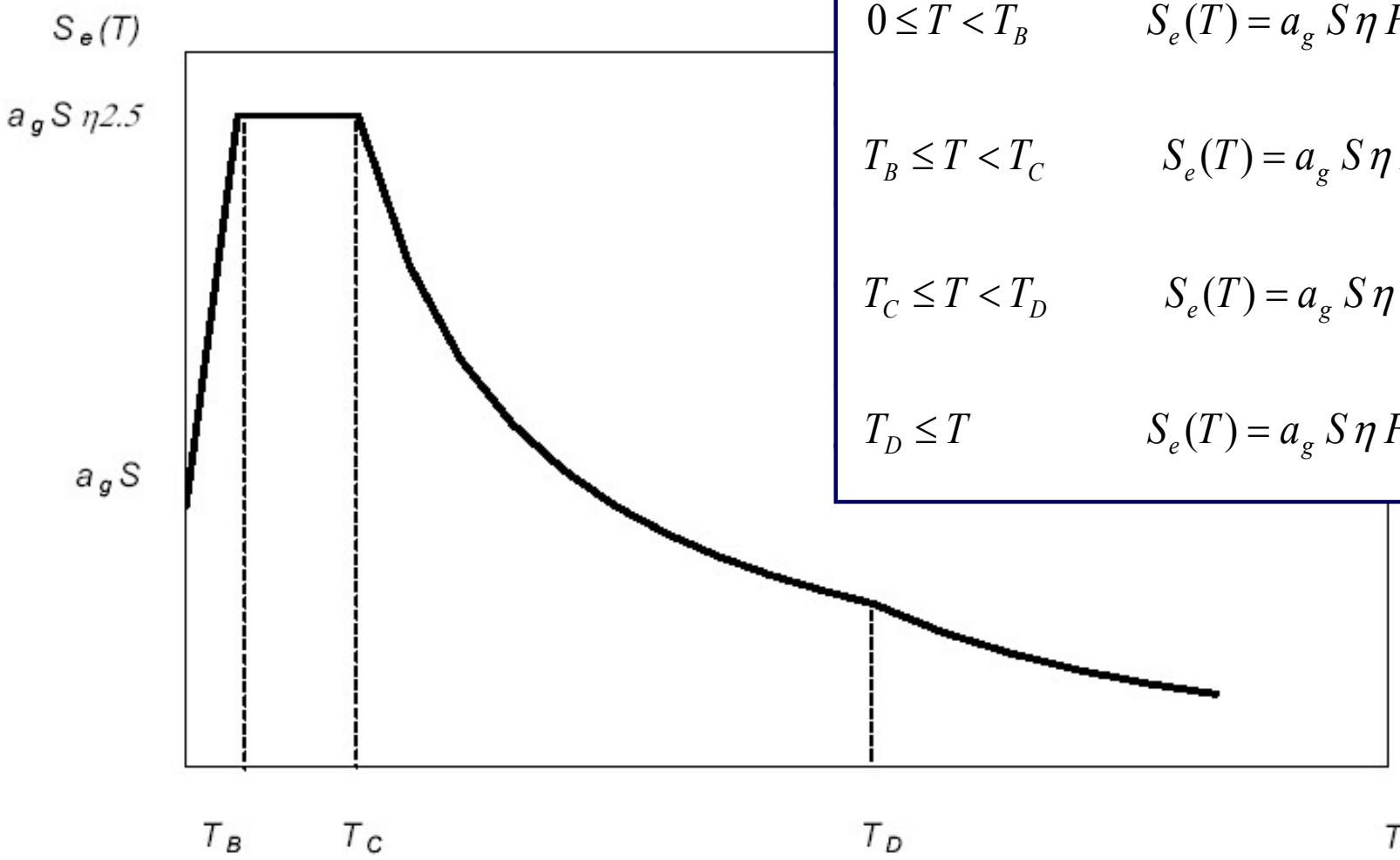
Un altro parametro che influenza lo spettro elastico è lo smorzamento viscoso del sistema ξ**.**

ξ **= 2÷3%** **per strutture in acciaio**

ξ **= 3÷7%** **per strutture in calcestruzzo armato**

ξ **= 7÷10%** **per strutture in muratura**

Spettro di Risposta Elastico Orizzontale:



$$0 \le T < T_B \qquad S_e(T) = a_g\, S\, \eta\, F_o \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_o} \cdot \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \le T < T_C \qquad S_e(T) = a_g\, S\, \eta\, F_o$$

$$T_C \le T < T_D \qquad S_e(T) = a_g\, S\, \eta\, F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

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

dove:

a_g accelerazione del terreno di progetto per terreni Tipo A;

$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \ge 0.55$ fattore di correzione per $\xi \neq 5\%$ (ξ = *coefficiente di smorzamento*

S parametro che dipende dalle caratteristiche del terreno; $(S = S_s \cdot S_T)$

T_B, T_C, limiti del tratto ad accelerazione costante;

T_D limite del tratto a spostamento costante

PARAMETRI DELLO SPETTRO ELASTICO

L'accelerazione di picco è associata alla zona sismica

Zona	Valore di a_g
1	$0.25g < a_g \leq 0.35g$
2	$0.15g < a_g \leq 0.25g$
3	$0.05g < a_g \leq 0.15g$
4	$a_g \leq 0.05g$

F_0 fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale, ed ha valore compreso tra 2.20 e 3.25.

Periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro per suolo reale

$$T_c = C_c \cdot T_c^*$$

Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale per suolo tipo A

$$T_B = T_c / 3$$

$$T_D = 4.0 \cdot \frac{a_g}{g} + 1.6$$

VARI TIPI DI SUOLO DI FONDAZIONE

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti,* caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	*Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D,* con profondità del substrato non superiore a 30 m.

PARAMETRI DELLO SPETTRO ELASTICO

Le espressioni del coefficiente di amplificazione stratigrafica S_s ed il coefficiente C_c sono riportati nella tabella.

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1{,}00 \le 1{,}40 - 0{,}40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}20$	$1{,}10 \cdot (T_C^*)^{-0{,}20}$
C	$1{,}00 \le 1{,}70 - 0{,}60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}50$	$1{,}05 \cdot (T_C^*)^{-0{,}33}$
D	$0{,}90 \le 2{,}40 - 1{,}50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}80$	$1{,}25 \cdot (T_C^*)^{-0{,}50}$
E	$1{,}00 \le 2{,}00 - 1{,}10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}60$	$1{,}15 \cdot (T_C^*)^{-0{,}40}$

PARAMETRI DELLO SPETTRO ELASTICO

I valori del coefficiente di amplificazione topografica S_T sono riportati nella tabella.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15°$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15°$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15° \leq i \leq 30°$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30°$

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

SPETTRO ELASTICO IN SPOSTAMENTO

Lo spettro di risposta elastico dello spostamento si ottiene dalla

$$per \;\; T \le T_E \qquad S_{De}(T) = S_e(T) \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$per \;\; T_E < T \le T_F \qquad S_{De}(T) = 0.025 \cdot a_g \, S \, T_C \, T_D \left[F_o \, \eta + (1 - F_o \, \eta) \cdot \frac{T - T_E}{T_F - T_E} \right]$$

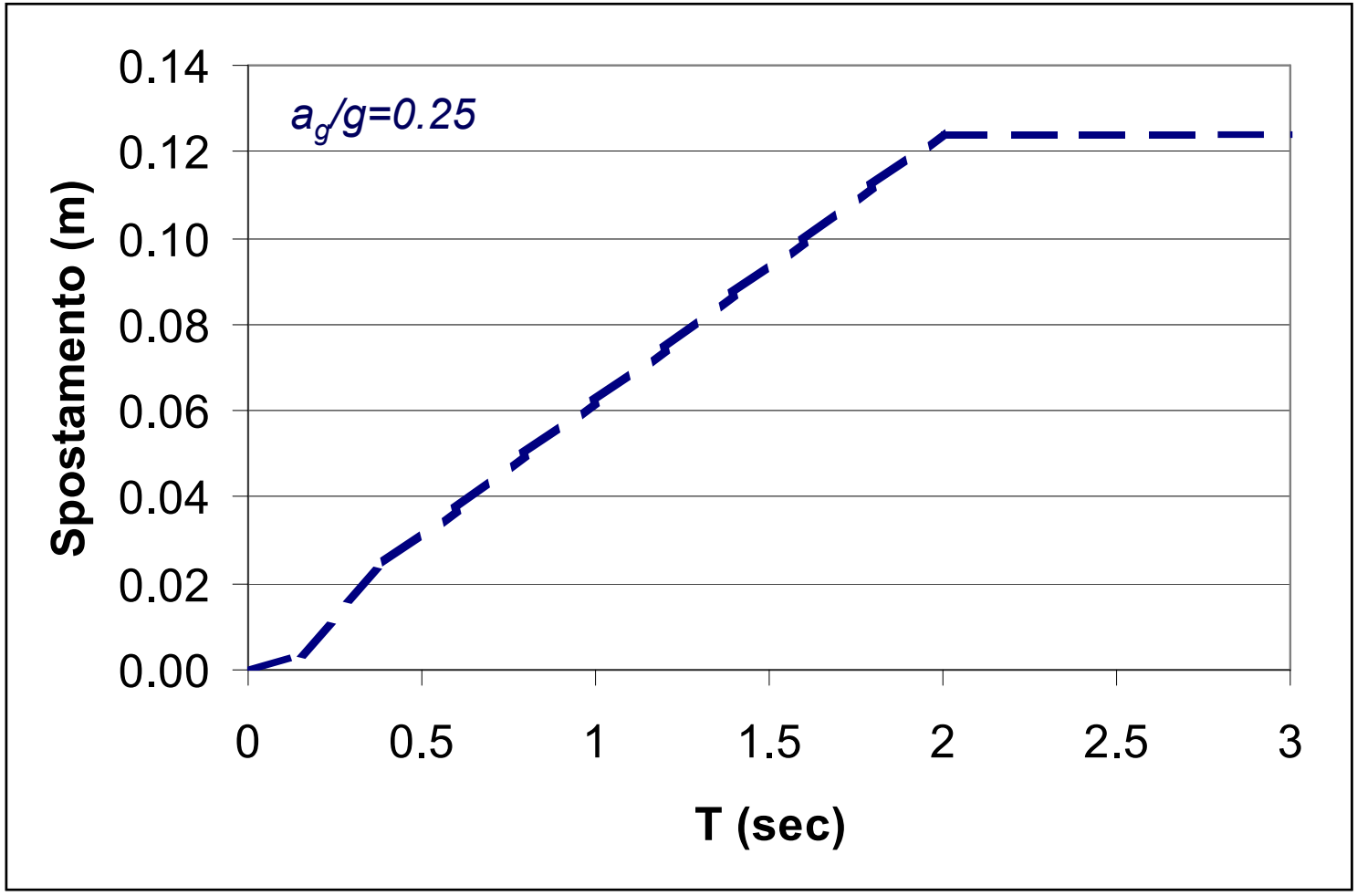
$$per \;\; T > T_F \qquad S_{De}(T) = d_g$$

$$d_g = 0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \, T_D$$

Spostamento orizzontale max del terreno.

Categoria sottosuolo	T_E [s]	T_F [s]
A	4,5	10,0
B	5,0	10,0
C, D, E	6,0	10,0

SPETTRO ELASTICO DELLO SPOSTAMENTO

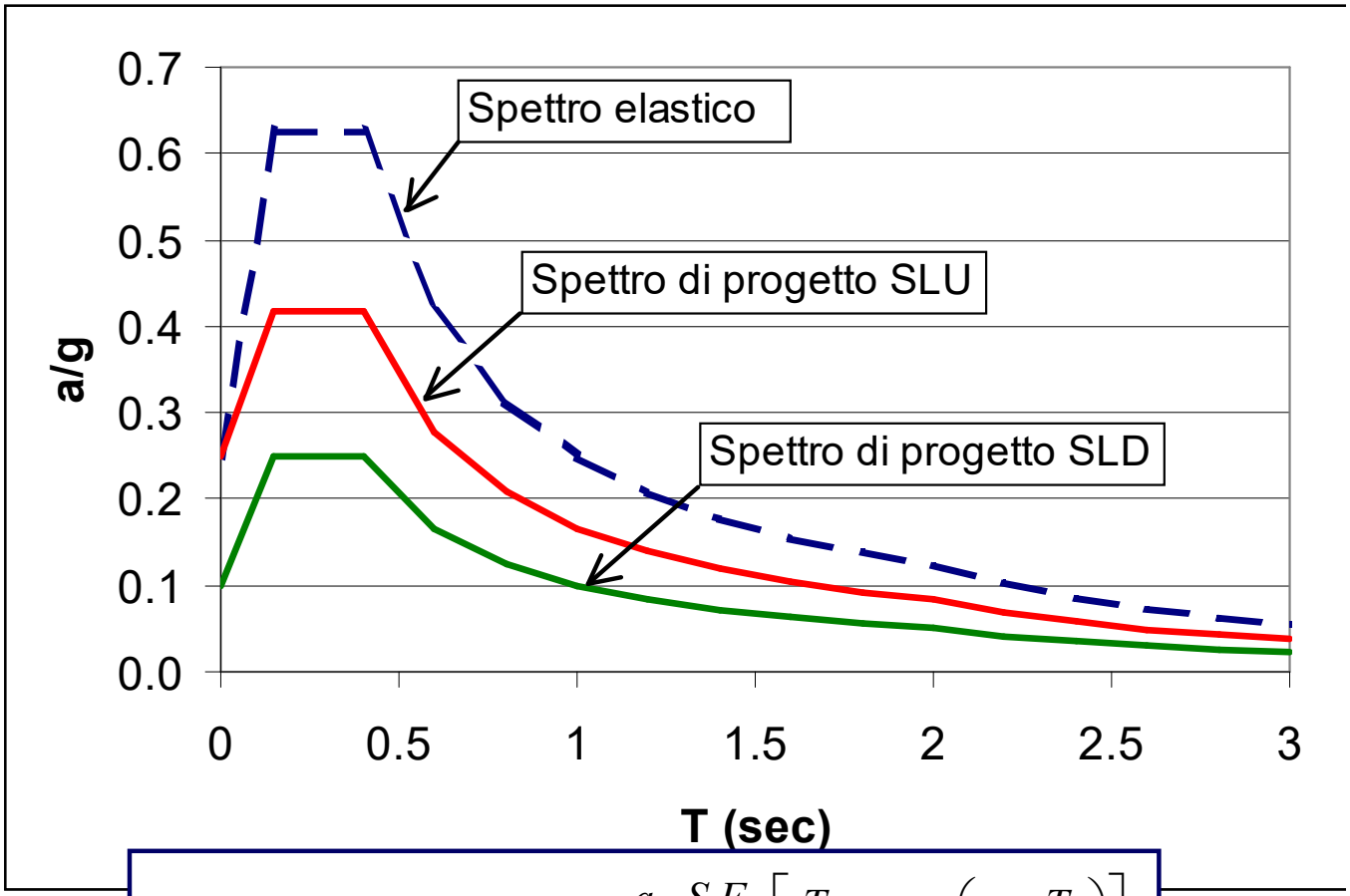


Serve quando si usa l'analisi statica non lineare

SPETTRI DI PROGETTO

Lo spettro di progetto per lo SLD è lo spettro elastico riferito alla probabilità di superamento nel periodo di riferimento.

Lo spettro di progetto per lo SLU si ottiene a partire dallo spettro elastico sostituendo al posto del coefficiente di smorzamento η l'inverso del fattore di struttura *1/q*



$$0 \le T < T_B \qquad S_d(T) = \frac{a_g S F_o}{q}\left[\frac{T}{T_B} + \frac{q}{F_o}\cdot\left(1 - \frac{T}{T_B}\right)\right]$$

$$T_B \le T < T_C \qquad S_d(T) = \frac{a_g S F_o}{q}$$

$$T_C \le T < T_D \qquad S_d(T) = \frac{a_g S F_o}{q}\cdot\left(\frac{T_C}{T}\right)$$

$$T_D \le T \qquad S_d(T) = \frac{a_g S F_o}{q}\cdot\left(\frac{T_C T_D}{T^2}\right)$$

PARAMETRI DI RIFERIMENTO

I parametri di riferimento a_g, T_C^*, F_o, relativi al sito (*coordinate*) e relativi al tempo di ritorno T_R, sono riportati nella Tabella 1 dell'Allegato B alle Norme Tecniche per le Costruzioni.

	TIPI DI COSTRUZIONE	Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva[1]	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

$$V_R = C_U \cdot V_N$$

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

CLASSI D'USO DELLA COSTRUZIONE

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso *III* o in Classe d'uso *IV*, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso *IV*. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

TEMPO DI RITORNO DI RIFERIMENTO

Stati Limite		P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

$$T_R = -V_R / \ln(1 - P_{V_R}) = -C_U \cdot V_N / \ln(1 - P_{V_R})$$

Stati Limite		Valori in anni del periodo di ritorno T_R al variare del periodo di riferimento V_R
Stati Limite di Esercizio (SLE)	SLO	(2) 30 anni $\leq T_R = 0,60 \cdot V_R$
	SLD	$T_R = V_R$
Stati Limite Ultimi (SLU)	SLV	$T_R = 9,50 \cdot V_R$
	SLC	$T_R = 19,50 \cdot V_R \leq$ 2475 anni (1)

SPETTRI DI PROGETTO

La forza sismica di progetto riferita ad un oscillatore elasto-plastico ad un grado di libertà di massa *W/g* è pari a

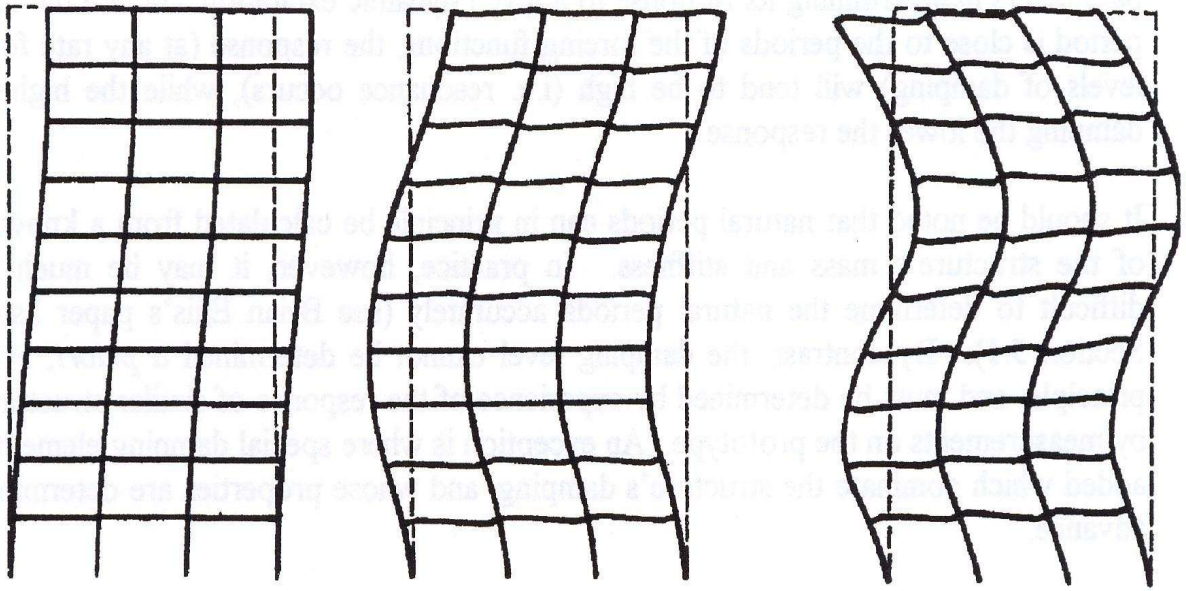
$$F_d = \frac{S_d(T) \cdot W}{g}$$

STRUTTURA REALE

La struttura reale è in genere complessa. Si può pensare le masse concentrate a livello dei solai schematizzabili quindi come oscillatori a *n* gradi di libertà

E' necessario determinare i modi propri di vibrazione

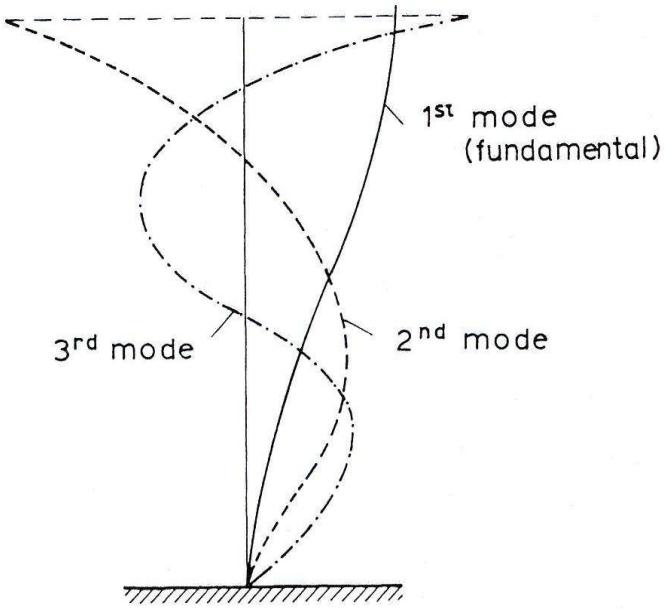
Per ogni modo la massima risposta si calcola come per l'oscillatore semplice.



Mode 1
$T_1 = 1.7$ s

Mode 2
$T_2 = 0.65$ s

Mode 3
$T_3 = 0.34$ s



STRUTTURA REALE

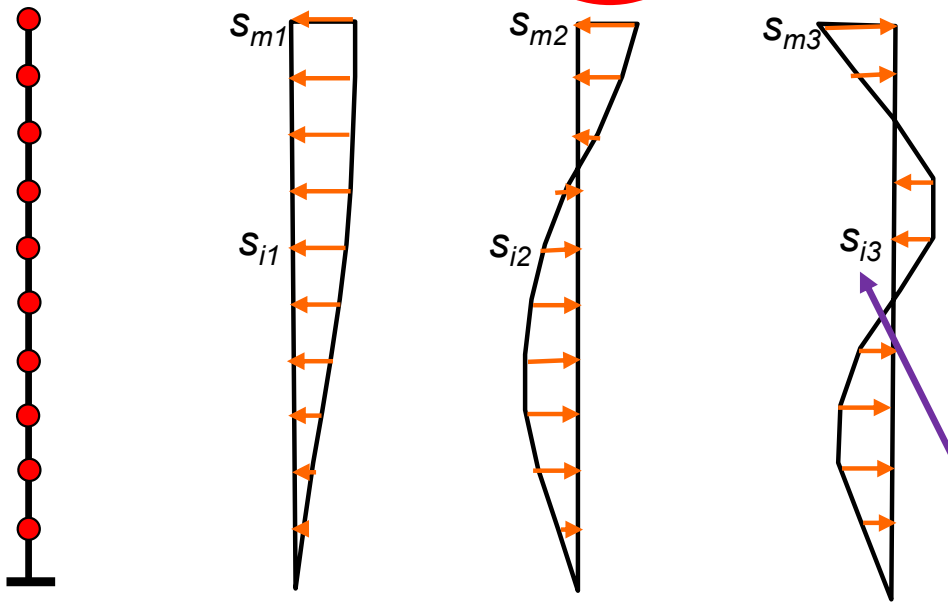
La risposta globale si ottiene sommando, con opportuni metodi, le risposte relative ai singoli modi

Siccome di norma la maggior parte della massa viene eccitata dai primi modi è sufficiente tener conto del solo contributo di questi.

$$F_{ik} = S_d(T_k)\, s_{ik} \frac{W_i}{g} \frac{\sum_{j=1}^{m} s_{jk} W_j}{\sum_{j=1}^{m} s_{jk}^2 W_j}$$

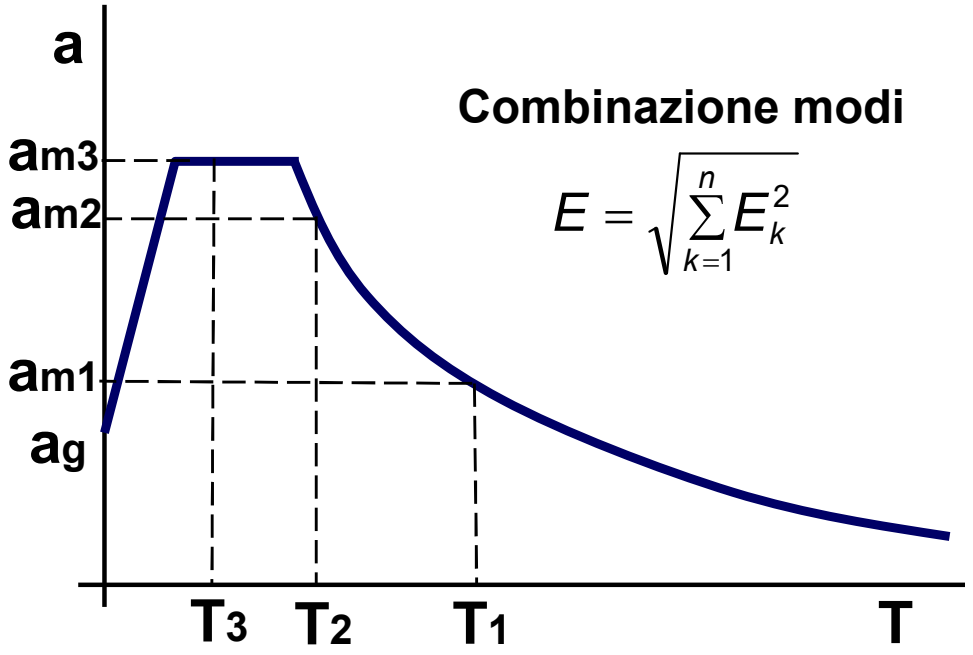
Fattore di partecipazione modale

In genere con i primi tre modi si eccita più dell'85% della massa



1° modo **2° modo** **3° modo**

Spostamento di piano normalizzato



Combinazione modi

$$E = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} E_k^2}$$

COMBINAZIONE DELLE AZIONI

La verifica allo SLU o di danno SLD deve essere effettuata per la seguente combinazione dell'azione sismica con le altre azioni

$$E_d = E + G_1 + G_2 + P + \sum_i \left(\psi_{2i} \, Q_{ki} \right)$$

dove

E	*azione sismica per lo stato limite in esame*
G_1, G_2	*carichi permanenti al loro valore caratteristico (pesi propri)*
P	*valore caratteristico della precompressione, a cadute avvenute*
ψ_{2i}	*coeff. di combinazione per valore quasi-permanente di* Q_i
Q_{ki}	*valore caratteristico dell'azione variabile* Q_i

MASSE ASSOCIATE ALL'AZIONE SISMICA

Per la valutazione degli effetti dell'azione sismica devono essere considerate le masse associate ai seguenti carichi gravitazionali

$$G_1 + G_2 + \sum_i \left(\psi_{2i}\, Q_{ki}\right)$$

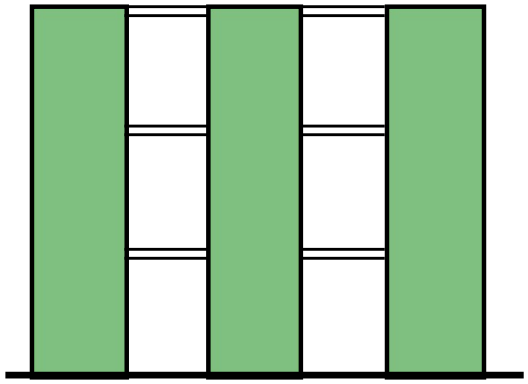
ψ_{2i} *coefficiente di combinazione di* Q_i

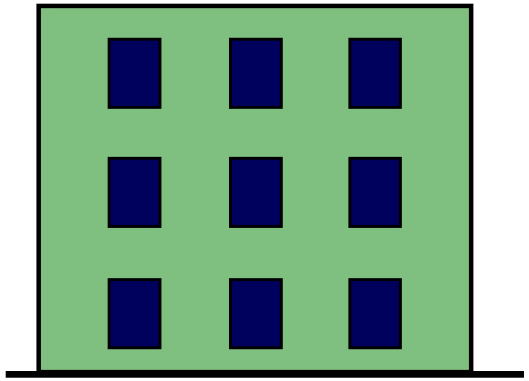
Categoria/Azione variabile	ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,3
Categoria B Uffici	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,3
Categoria H Coperture	0,0
Vento	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,2
Variazioni termiche	0,0

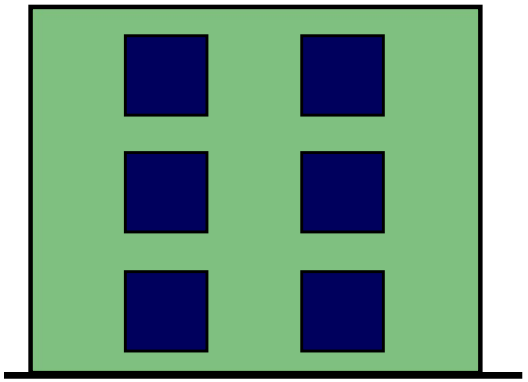
TIPOLOGIE STRUTTURALI

Negli edifici in muratura si hanno generalmente tre tipologie strutturali

- **Struttura a pareti collegate a livello dei solai da travi flessibili**
- **Struttura a pareti forate con traverse molto robuste**
- **Struttura a pareti forate con traverse meno robuste dei maschi (***meno frequenti nella pratica soprattutto per muratura non armata)*







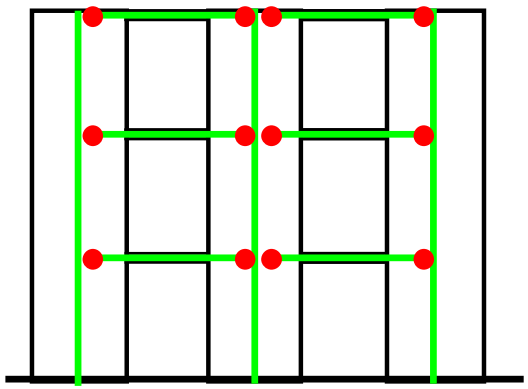
MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA

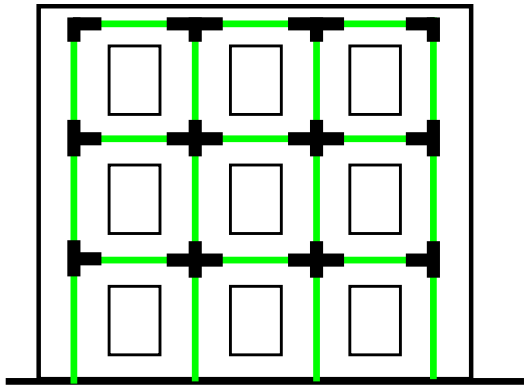
Il modello della struttura su cui verrà effettuata l'analisi dovrà rappresentare in modo adeguato la distribuzione di massa e rigidezza effettiva considerando, dove appropriato, il contributo degli elementi non strutturali

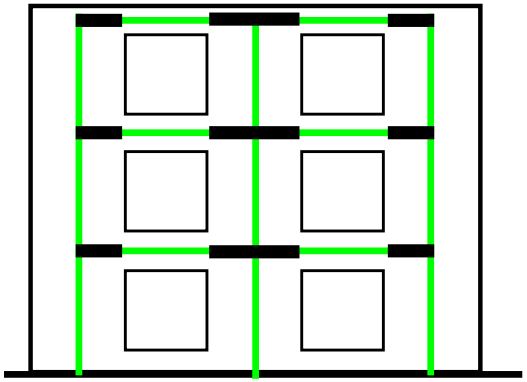
In generale il modello della struttura sarà costituito da elementi resistenti piani a telaio o a parete connessi da diaframmi orizzontali

La rigidezza degli elementi resistenti sarà valutata tenendo conto sia della deformabilità flessionale che di quella tagliante.

Nel caso di modellazione a telaio le parti di intersezione tra elementi verticali e orizzontali possono essere considerate infinitamente rigide







ANALISI DELLA STRUTTURA

La valutazione delle sollecitazioni nella struttura dovute alle azioni sismiche può essere condotta facendo ricorso ad uno dei seguenti metodi di analisi

- **Analisi statica lineare** (*o delle forze statiche equivalenti*)**,** *applicabile anche per edifici irregolari in altezza, purché si assuma* λ*=1. Il periodo del modo di vibrare principale non deve superare 2.5* T_C *o* T_D*. Nel calcolo delle rigidezze degli elementi deve tener conto sia del contributo flessionale che tagliante. E' suggerito l'utilizzo di rigidezze fessurate (in alternativa* $EI_{fes}=0.5\ EI_{int}$*)*
- **Analisi dinamica modale,** *si deve considerare un numero di modi tale da garantire che la somma delle masse modali efficaci sia almeno pari all'85% della massa totale e che siano inclusi tutti i modi con massa efficace non inferiore al 5% di* M_T

ANALISI DELLA STRUTTURA

Oppure facendo ricorso ad uno dei seguenti metodi di analisi

- **Analisi statica non lineare** (*Push-Over*), *consente di determinare l'intero diagramma forza-spostamento dell'edificio fino all'incipiente collasso. E' applicabile a edifici in cui la massa partecipante del primo modo di vibrare è superiore al 60% di quella totale.*
- **Analisi dinamica non lineare,** *integrazione passo-passo delle equazioni di moto a partire da un assegnato accelerogramma di progetto. Ha lo scopo di valutare il comportamento dinamico della struttura in campo non lineare, consentendo il confronto tra duttilità richiesta e duttilità disponibile, nonché di verificare l'integrità degli elementi strutturali nei confronti di possibili comportamenti fragili.*

ANALISI STATICA LINEARE

Si considerano delle forze statiche equivalenti associate alla forma modale del primo modo di vibrare della struttura

Il primo modo di vibrare può determinarsi con formule empiriche

$$\boxed{T_1 = 0.05\,H^{0.75}} \qquad T_1 = 0.09\,H/\sqrt{L}$$

oppure utilizzando il metodo di Rayleigh, che ricava il primo modo dagli spostamenti laterali ai piani s_i dovuti ad un sistema di forze F_i

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{\sum_1^n W_i\,s_i^2}{g\sum_1^n F_i\,s_i}}$$

W_i sono i pesi delle masse ad ogni piano

FORZE SISMICHE EQUIVALENTI

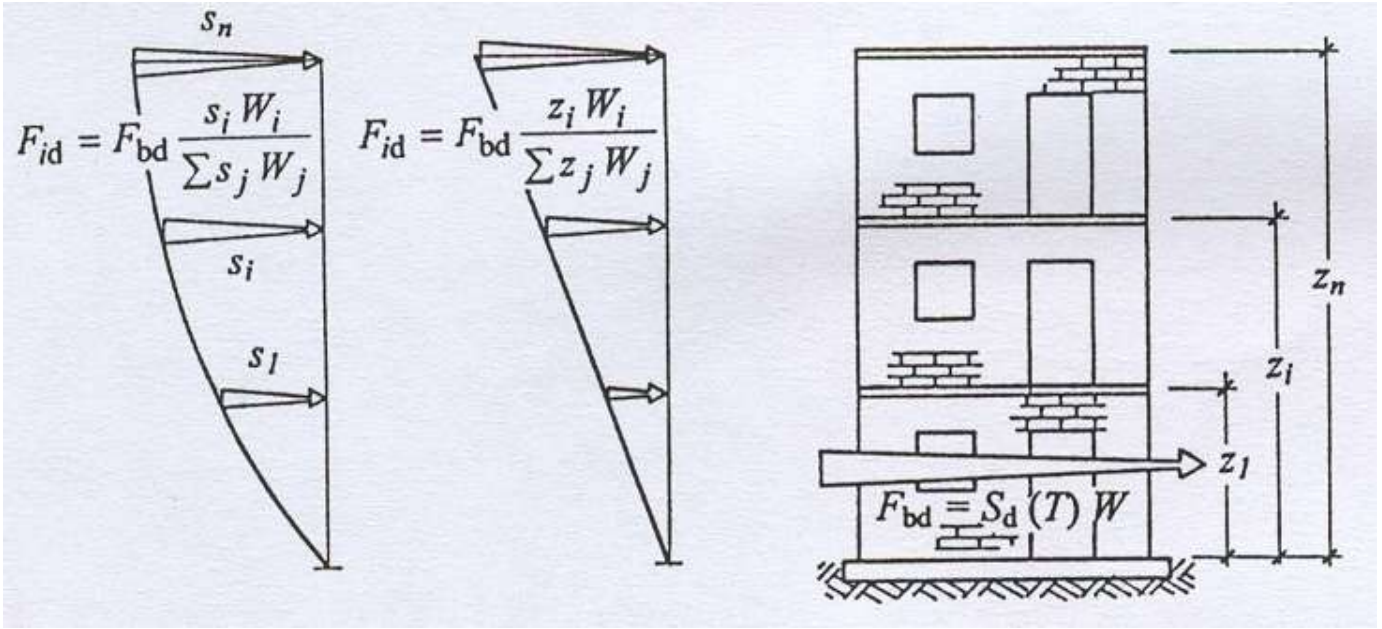
Dallo spettro di risposta di progetto, in corrispondenza del periodo calcolato, si ricava il coefficiente sismico che moltiplicato per la massa totale esprime la risultante delle forze sismiche equivalenti

$$F_h = S_d(T_1) W \lambda / g \qquad \lambda = 0.85 \div 1.0$$

Le forze da applicare a ciascun piano sono date dalla relazione, basata sulla forma modale del primo modo di vibrare, oppure più semplicemente ipotizzando una distribuzione triangolare

$$F_i = F_h \frac{W_i s_i}{\sum W_j s_j}$$

$$F_i = F_h \frac{W_i z_i}{\sum W_j z_j}$$



EFFETTI TORSIONALI

In aggiunta all'eccentricità effettiva, si deve considerare un'eccentricità accidentale, spostando il centro di massa di ogni piano, in ogni direzione considerata, di una distanza pari al 5% della dimensione massima del piano in direzione perpendicolare all'azione sismica

Se le rigidezze e le masse sono distribuite simmetricamente in pianta, gli effetti torsionali accidentali possono essere considerati amplificando le forze da applicare a ciascun elemento verticale con il fattore (δ) risultante dalla seguente espressione

$$\delta = 1 + 0.6\, x / L_e \qquad \textit{(max 1.3)}$$

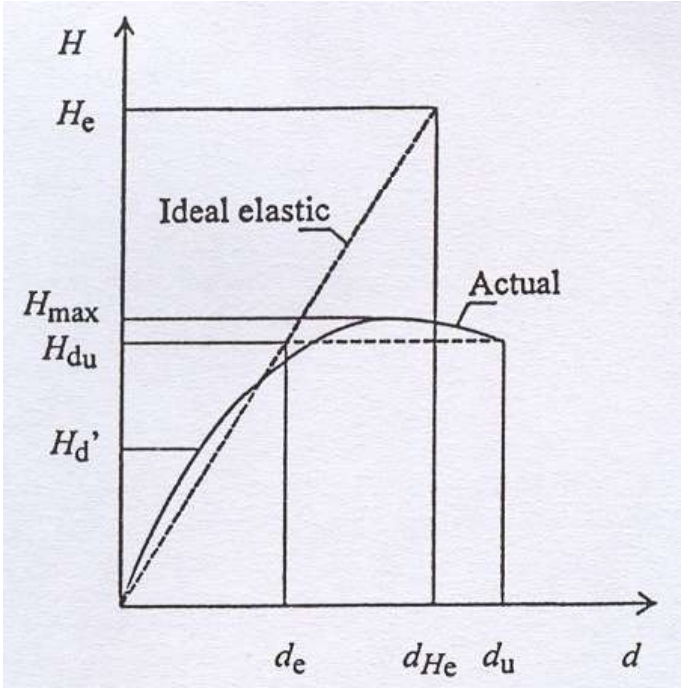
x **è la distanza dell'elemento resistente verticale dal baricentro geometrico dell'edificio, misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica considerata**

L_e **è la distanza tra i due elementi resistenti più lontani, misurata allo stesso modo**

RISPOSTA NON LINEARE

Nonostante la muratura sia considerato materiale fragile, le prove sperimentali su campioni e su strutture hanno mostrato che anche gli edifici in muratura possiedono una significativa capacità di dissipazione di energia che quindi rende possibile la riduzione delle forze sismiche elastiche.

Per tener conto della risposta non lineare, come per gli altri materiali, si considera un fattore di struttura maggiore dell'unità



La capacità di dissipazione di energia è espressa dal fattore di duttilità $\mu_u=d_u/d_e$, non è quindi necessario progettare la struttura per resistere alla forza H_e ma alla forza H_{du}. Tenendo conto anche della sovraresistenza H_{max}/H_{du}, la forza di progetto può essere ridotta rispetto a quella elastica del fattore di struttura q_o

$$q_o = \frac{H_e}{H_{du}} \cdot \frac{H_{max}}{H_{du}}$$

FATTORE DI STRUTTURA

La normativa sismica indica per il fattore di struttura per murature

Costruzioni di muratura (§ 7.8.1.3)	
Costruzioni di muratura ordinaria	1,75 α_u/α_1
Costruzioni di muratura armata	2,5 α_u/α_1
Costruzioni di muratura armata con progettazione in capacità	3,0 α_u/α_1
Costruzioni di muratura confinata	2,0 α_u/α_1
Costruzioni di muratura confinata con progettazione in capacità	3,0 α_u/α_1

Valori del fattore di sovraresistenza

- costruzioni di muratura ordinaria $\alpha_u/\alpha_1 = 1,7$
- costruzioni di muratura armata $\alpha_u/\alpha_1 = 1,5$
- costruzioni di muratura armata progettate con la progettazione in capacità $\alpha_u/\alpha_1 = 1,3$
- costruzioni di muratura confinata $\alpha_u/\alpha_1 = 1,6$
- costruzioni di muratura confinata progettate con la progettazione in capacità $\alpha_u/\alpha_1 = 1,3$.

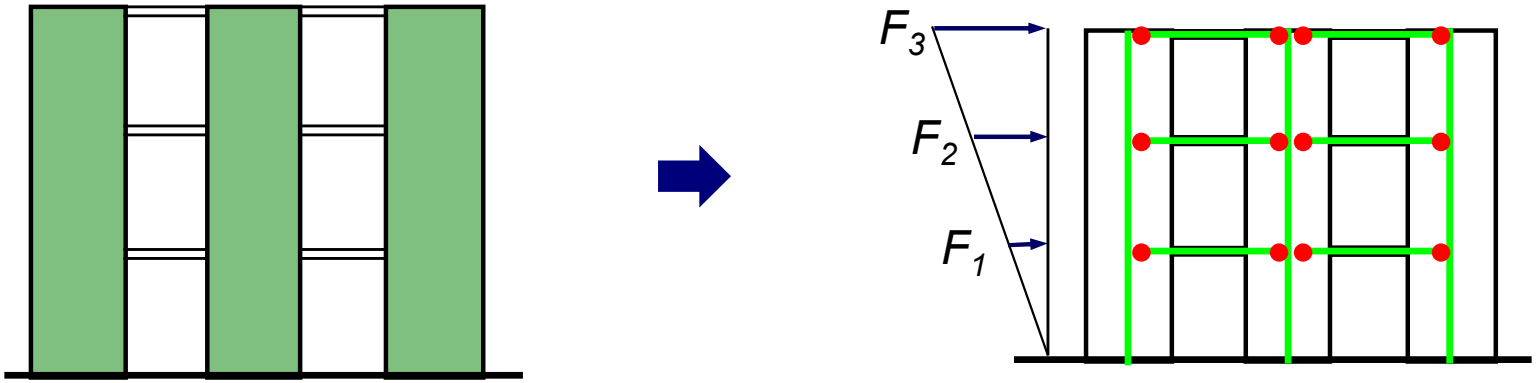
$$q = K_R \cdot q_o$$

$K_R=1$ **costruzioni regolari in altezza**

$K_R=0.8$ **costruzioni irregolari in altezza**

SCHEMATIZZAZIONE DELLA STRUTTURA

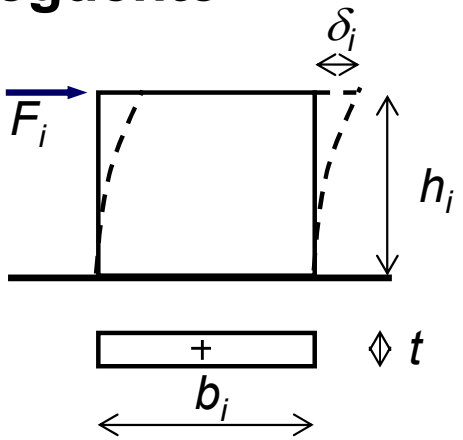
Se l'edificio è costituito da pareti continue a tutta altezza collegate fra loro in corrispondenza dei solai mediante travi snelle o cordoli, si schematizza la struttura con elementi a mensola



RIGIDEZZA ELEMENTI RESISTENTI

Se la struttura è costituita da elementi murari collegati da traverse molto snelle è possibile adottare un procedimento di ripartizione delle azioni orizzontali semplificato piano per piano, purché i solai possano essere considerati rigidi nel loro piano.

La rigidezza del generico elemento può essere calcolata nel modo seguente



$$Per \quad F_i = 1 \quad \Rightarrow \quad \delta_i = \frac{h_i^3}{3EI_i} + \frac{\chi h_i}{GA_i}$$

Deformormabilità flessionale — **Deformormabilità tagliante**

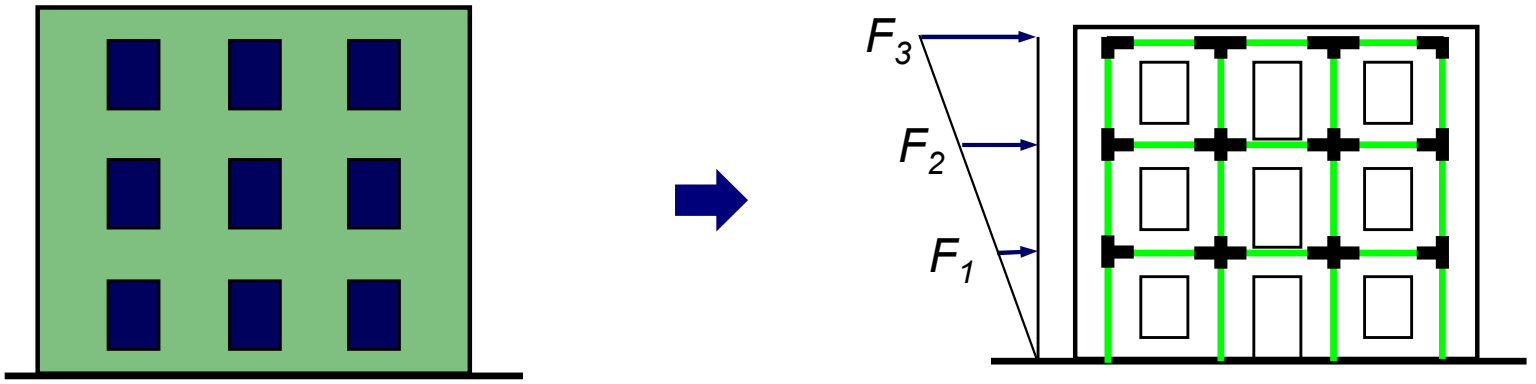
$$K_i = \frac{1}{\frac{h_i^3}{3EI_i} + \frac{\chi h_i}{GA_i}} = \frac{G\, b_i\, t}{\chi\, h_i \left[1 + \frac{G}{E}\frac{4}{\chi}\left(\frac{h_i}{b_i}\right)^2 \right]}$$

-Traverse non rigide flessionalmente

-Elementi a sezione costante lungo l'altezza o che variano tutti solo nello spessore *t*

SCHEMATIZZAZIONE DELLA STRUTTURA

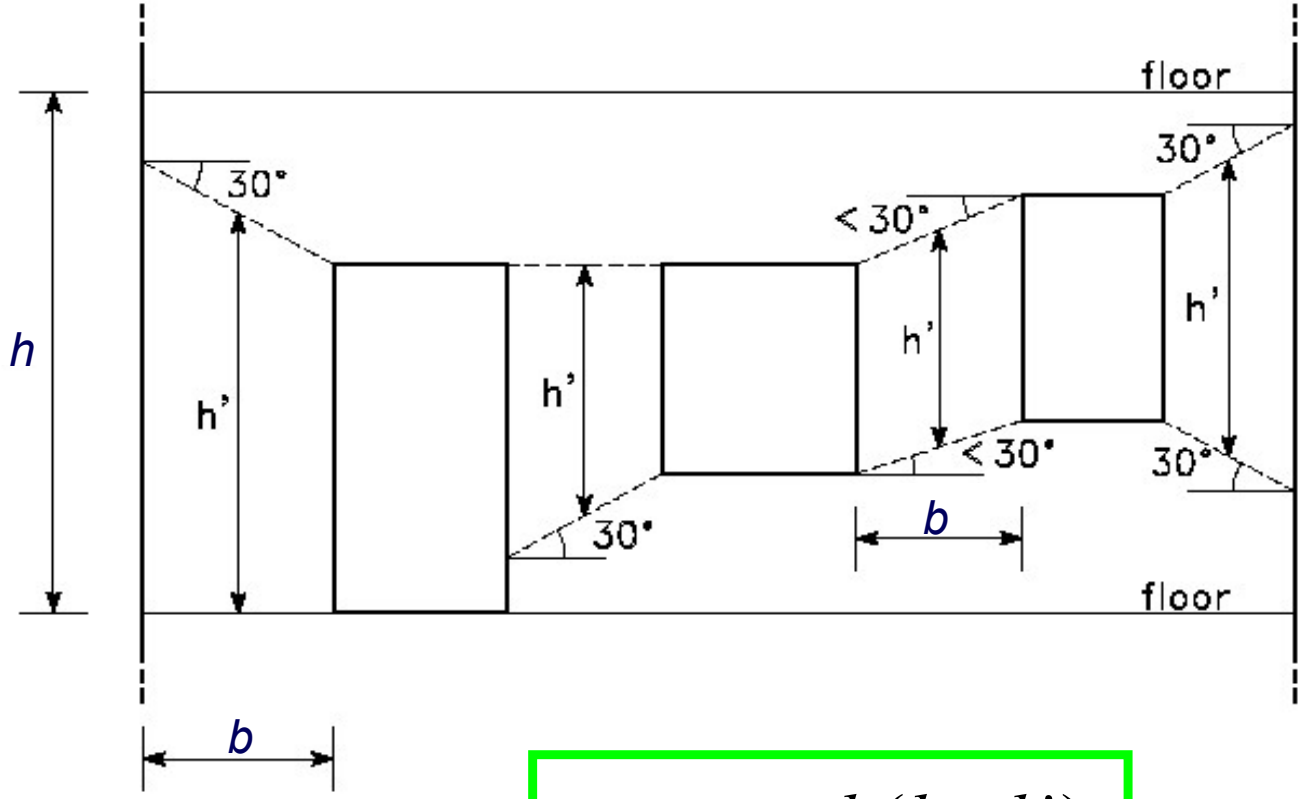
Se l'edificio è costituito da pareti forate, si schematizza la struttura con elementi a telaio considerando deformabili solo i tratti fra le aperture e quindi infinitamente rigidi i nodi di intersezione tra aste



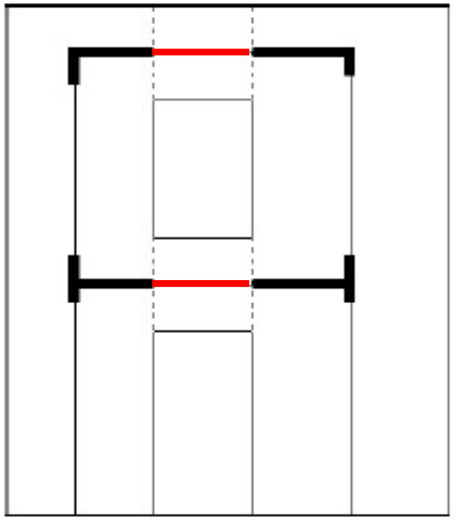
I telai piani possono essere anche collegati fra loro mediante tratti infinitamente rigidi

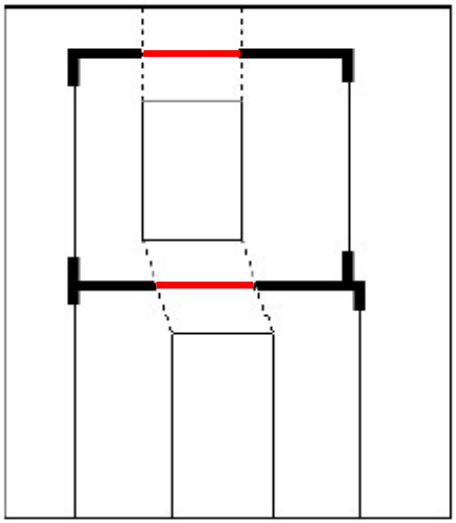
DIMENSIONE MASCHI E FASCE

Nel modello strutturale l'altezza efficace dei maschi (*Dolce 1989*) e delle fasce (*Magenes et al. 2000*) segue quanto illustrato



$$h_{eff} = h' + \frac{b(h-h')}{3h'}$$

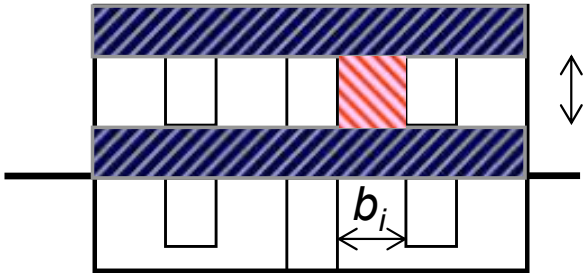




RIGIDEZZA MASCHI MURARI

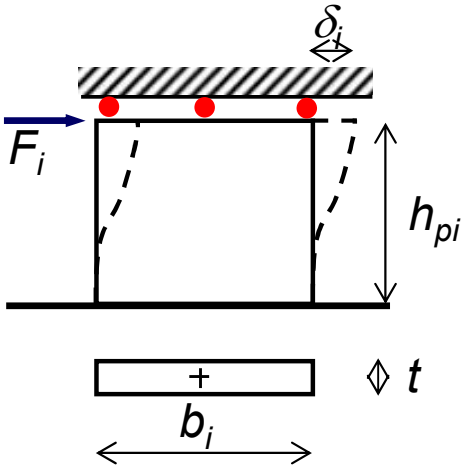
Se la struttura è costituita da pareti forate con fasce di piano molto più robuste dei maschi (*caso molto frequente negli edifici in muratura non armata*) è possibile la schematizzazione come segue.

La rigidezza del generico maschio può essere valutata assumendo che le due estremità del maschio possano solo traslare (*no rotazione*)



$$Per \quad F_i = 1 \quad \Rightarrow \quad \delta_i = \frac{h_{pi}^3}{12EI_i} + \frac{\chi h_{pi}}{GA_i}$$

Deformormabilità flessionale — **Deformormabilità tagliante**



$$K_i = \frac{1}{\frac{h_{pi}^3}{12EI_i} + \frac{\chi h_{pi}}{GA_i}} = \frac{G\, b_i\, t}{\chi\, h_{pi}\left[1 + \frac{G}{E}\frac{1}{\chi}\left(\frac{h_{pi}}{b_i}\right)^2\right]}$$