

Università di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Corso di
Progettazione e riabilitazione
Sismica delle Strutture

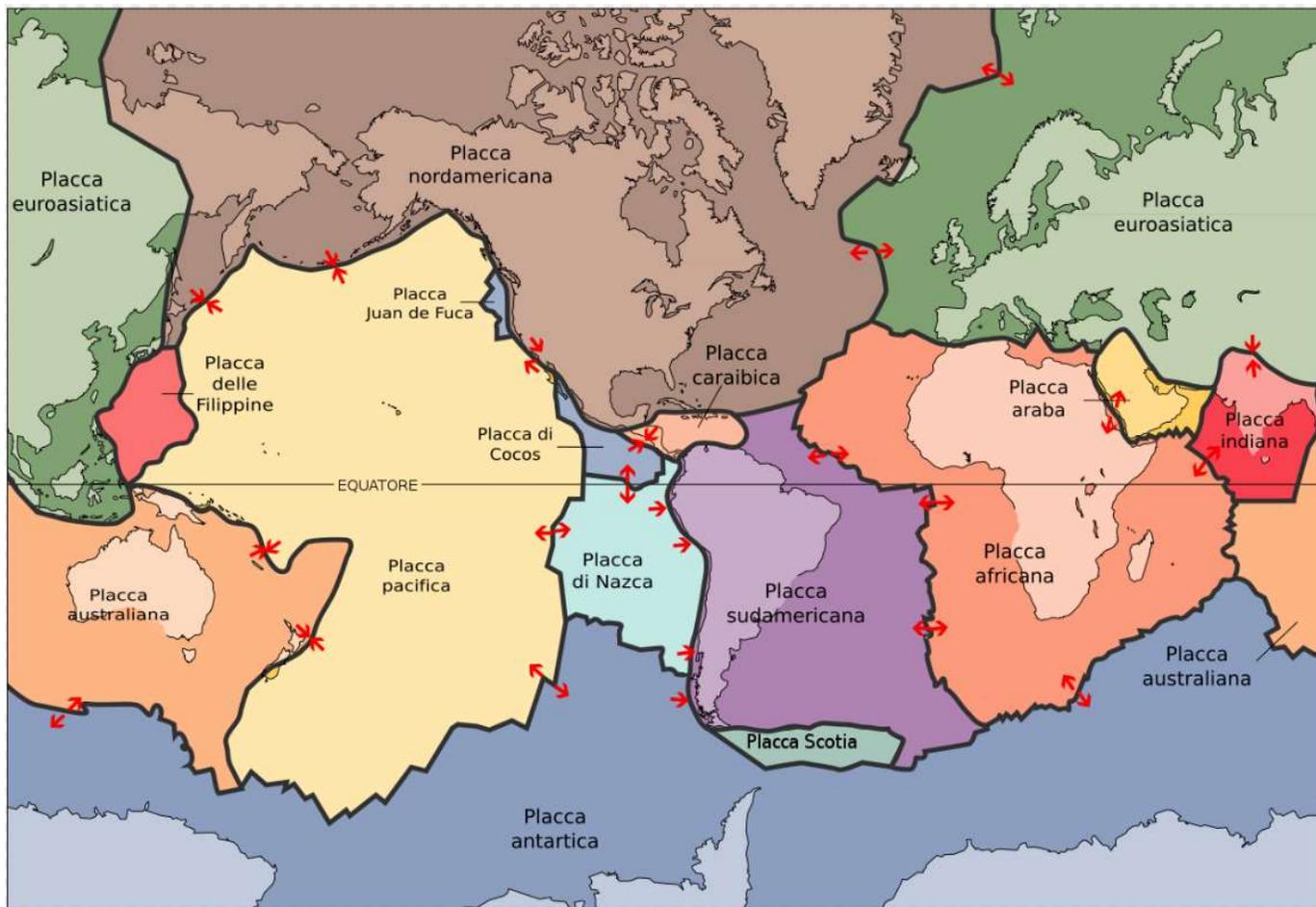
Modulo 1: Progettazione strutturale in zona sismica

CARATTERISTICHE SISMA

Prof. Ing. Natalino Gattesco

TERREMOTI

La superficie del globo è suddivisa in grandi placche litosferiche che si muovono sopra il mantello (deriva dei continenti).



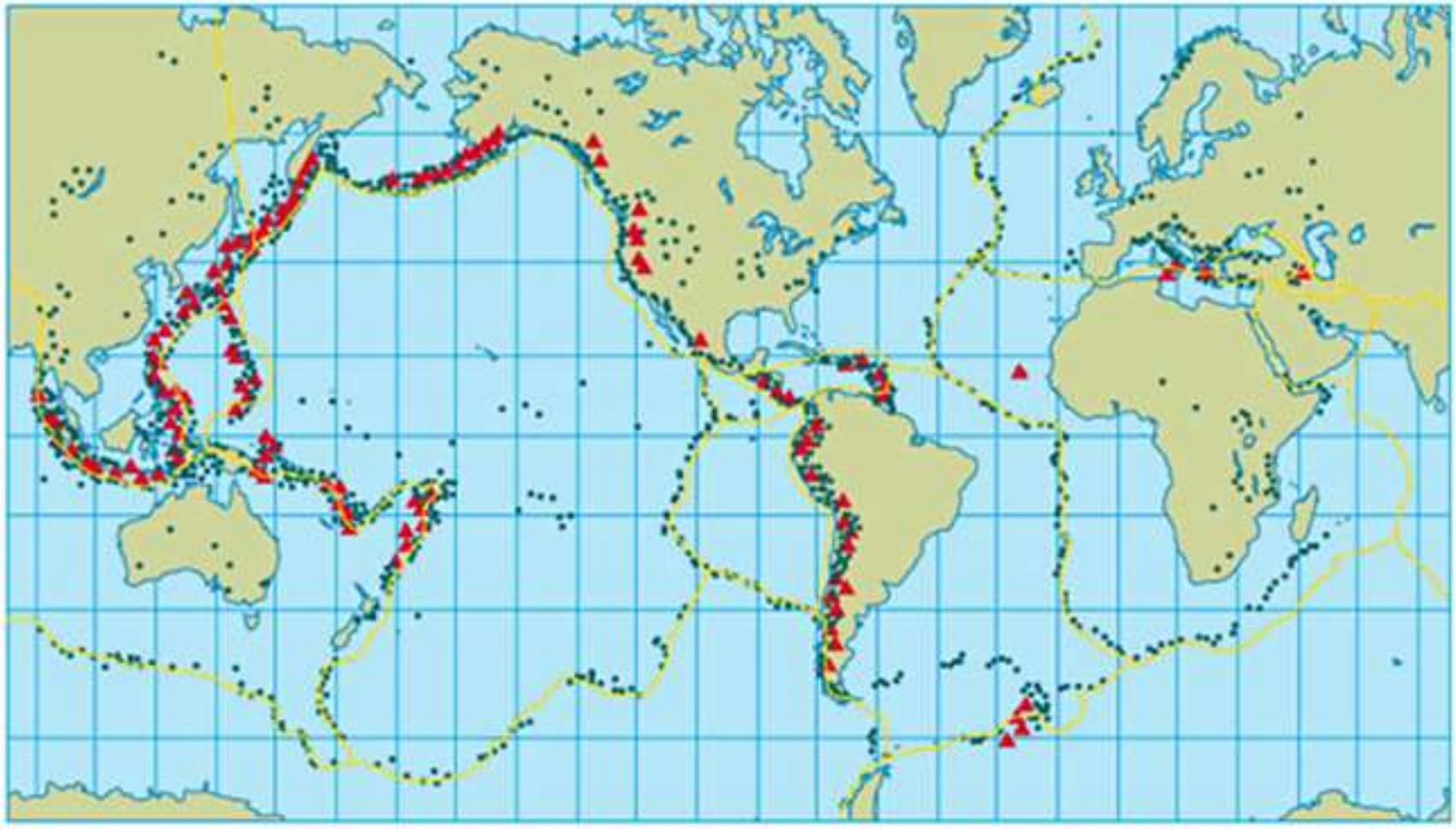
TERREMOTI

**Il supercontinente
denominato Pangea
(250 milioni di anni fa)**



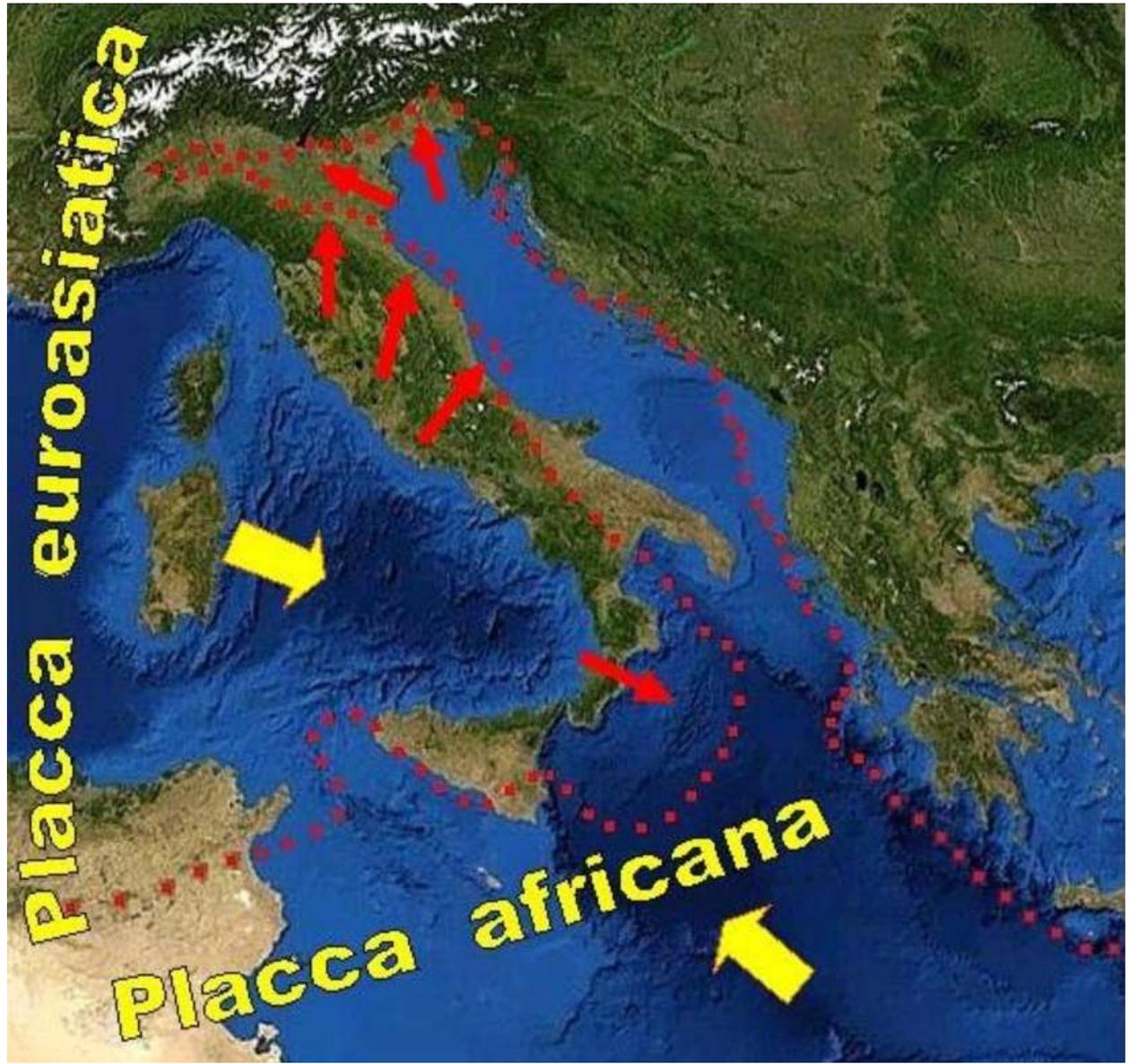
TERREMOTI

I terremoti si verificano lungo i margini di queste placche.



TERREMOTI

L'Italia è interessata dallo spostamento relativo della placca eurasiatica rispetto alla placca Africana, che ha un appendice nell'Adriatico (microplacca Adriatica).



TERREMOTI

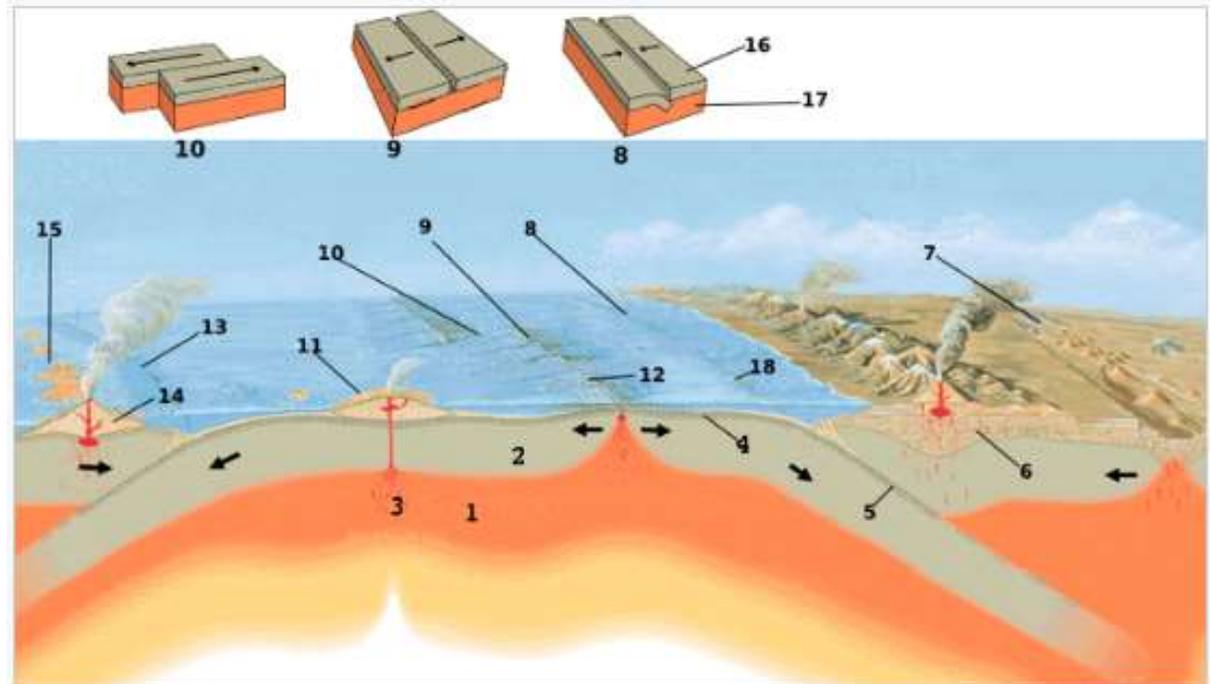
La placca Africana preme verso nord contro la placca Eurasiatica spingendo la placca Adriatica a scendere sotto le Alpi.

La frizione fra le placche genera i fenomeni sismici che interessano il nostro paese.



TERREMOTI

Movimenti tra placche tettoniche



1. Astenosfera;

2. Litosfera;

3. Punto caldo;

4. Crosta oceanica;

5. Placca in subduzione;

6. Crosta continentale;

7. Zona di rift continentale (Nuovo margine di placca);

8. Placca a margine convergente;

9. Placca a margine divergente;

10. Placca a margine trasforme;

11. Vulcano a scudo;

12. Dorsale oceanica;

13. Margine di placca convergente;

14. Strato vulcano;

15. Arco isola;

16. Placca;

17. Astenosfera;

18. Fossa

TERREMOTI

Scorrimento tra placche tettoniche



MAGNITUDO ED ENERGIA

La magnitudo sismica è una misura dell'energia rilasciata durante un terremoto (*Richter 1935*)

La magnitudo è legata al massimo valore di spostamento rilevato dal sismografo a una distanza di 100 km dall'epicentro.

Una relazione accettata tra energia rilasciata E per generare onde sismiche e magnitudo è la seguente

$$\log E = 11.8 + 1.5M \quad (E \text{ in erg})$$

La relazione evidenzia che l'energia aumenta 32 volte se M aumenta di 1 e di 1000 volte se M aumenta di 2.

MAGNITUDO TERREMOTI

Richter Magnitudes	Description	Earthquake Effects	Frequency of Occurrence
Less than 2.0	Micro	Microearthquakes, not felt.	About 8,000 per day
2.0-2.9	Minor	Generally not felt, but recorded.	About 1,000 per day
3.0-3.9		Often felt, but rarely causes damage.	49,000 per year (est.)
4.0-4.9	Light	Noticeable shaking of indoor items, rattling noises. Significant damage unlikely.	6,200 per year (est.)
5.0-5.9	Moderate	Can cause major damage to poorly constructed buildings over small regions. At most slight damage to well-designed buildings.	800 per year
6.0-6.9	Strong	Can be destructive in areas up to about 160 kilometres (100 mi) across in populated areas.	120 per year
7.0-7.9	Major	Can cause serious damage over larger areas.	18 per year
8.0-8.9	Great	Can cause serious damage in areas several hundred miles across.	1 per year
9.0-9.9		Devastating in areas several thousand miles across.	1 per 20 years
10.0+	Epic	Never recorded; see below for equivalent seismic energy yield.	Extremely rare (Unknown)

INTENSITA' TERREMOTI

La misura degli effetti di un terremoto su persone, costruzioni e ambiente è rappresentata dall'**intensità** I_o .

La prima scala di intensità è stata proposta da Mercalli-Cancani-Sielberg (MCS) ed è di 12 gradi. In Europa è ora utilizzata la **European Macroseismic Scale (EMS)**, che è una modifica delle precedent scale.

Le definizioni sono basate su:

- a) Effetti sulle persone
- b) Effetti su oggetti e su natura (escludendo danni agli edifici)
- c) Danni agli edifici

Una relazione semplificata lega l'intensità EMS alla Magnitudo

$$I_o = 1.5M - 0.5$$

SCALA INTENSITA' EMS

<p>I Non avvertito</p>	<p>a) Non avvertito nemmeno nelle circostanze più favorevoli b) Nessun effetto. c) Nessun danno</p>
<p>II Scars sentito</p>	<p>a) Il tremore è avvertito solo da pochissimi individui (meno dell'1%) a riposo b) Nessun effetto c) Nessun danno</p>
<p>III Debole</p>	<p>a) Il terremoto viene avvertito all'interno da poche persone a riposo (leggero tremore) b) Gli oggetti sospesi oscillano leggermente c) Nessun danno</p>
<p>IV Ampiamente osservato</p>	<p>a) Il terremoto viene avvertito da molti negli ambienti chiusi e da pochissime persone all'aperto. Alcune persone si risvegliano. Il livello di vibrazione non è spaventoso. Gli osservatori avvertono un leggero tremore o oscillazione degli edifici, della stanza o del letto, della sedia, ecc. b) Vetri, finestre e porte sbattono. Gli oggetti sospesi oscillano. In alcuni casi i mobili leggeri tremano visibilmente. In alcuni casi le strutture in legno scricchiolano. c) Nessun danno</p>
<p>V Forte</p>	<p>a) Il terremoto è avvertito dalla maggior parte delle persone all'interno, all'esterno da poche persone. Alcune persone hanno paura e corrono all'aperto. Molte persone addormentate vengono risvegliate. Gli osservatori avvertono forti scosse o oscillazioni dell'intero edificio. b) Gli oggetti appesi oscillano notevolmente. Gli oggetti piccoli, alti e pesanti e/o sostenuti in modo precario potrebbero essere spostati o cadere. Porte e finestre si aprono e si chiudono. In alcuni casi i vetri delle finestre si rompono. I liquidi oscillano e possono fuoriuscire da contenitori ben riempiti. Gli animali in casa possono sentirsi a disagio. c) Danni di grado 1 ad alcuni edifici.</p>

SCALA INTENSITA' EMS

VI Leggermente dannoso	<p>a) Avvertita dalla maggior parte delle persone in ambienti chiusi e da molte all'aperto. Alcune persone perdono l'equilibrio. Molte persone hanno paura e corrono all'aperto.</p> <p>b) Piccoli oggetti di normale stabilità potrebbero cadere e i mobili potrebbero essere spostati. In alcuni casi piatti e bicchieri potrebbero rompersi. Gli animali da fattoria (anche all'aperto) possono essere spaventati.</p> <p>c) Molti edifici subiscono danni di grado 1; alcuni soffrono danni di grado 2.</p>
VII Dannoso	<p>a) La maggior parte delle persone è spaventata e cerca di correre all'aperto. Molti hanno difficoltà a stare in piedi, soprattutto ai piani superiori.</p> <p>b) I mobili vengono spostati e i mobili più pesanti potrebbero essere ribaltati. Gli oggetti cadono dagli scaffali in gran numero. Fuoruscita d'acqua da contenitori, serbatoi e piscine.</p> <p>c) Molti edifici di classe di vulnerabilità B e pochi di classe C subiscono danni di grado 2. Molti edifici di classe A e pochi di classe B subiscono danni di grado 3; alcuni edifici di classe A subiscono danni di grado 4. I danni sono particolarmente evidenti nelle parti superiori degli edifici.</p>
VIII Fortemente dannoso	<p>a) Molte persone hanno difficoltà a stare in piedi, anche all'aperto.</p> <p>b) I mobili potrebbero ribaltarsi. Oggetti come televisori, macchine da scrivere, ecc. cadono a terra. Le lapidi possono occasionalmente essere spostate, attorcigliate o ribaltate. Le onde possono essere viste su un terreno molto soffice.</p> <p>c) Molti edifici di classe di vulnerabilità C subiscono danni di grado 2. Molti edifici di classe B e pochi di classe C subiscono danni di grado 3. Molti edifici di classe A e pochi di classe B subiscono danni di grado 4; alcuni edifici di classe A subiscono danni di grado 5. Alcuni edifici di classe D subiscono danni di grado 2.</p>

SCALA INTENSITA' EMS

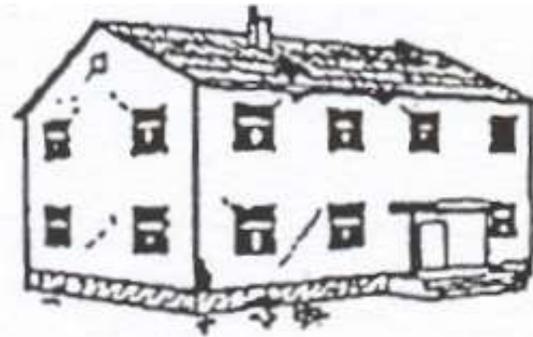
<p>IX Distruttivo</p>	<p>a) Panico generale. Le persone possono essere gettate a terra con la forza. b) Molti monumenti e colonne cadono o si attorcigliano. Le onde si vedono su un terreno soffice. c) Molti edifici di classe di vulnerabilità C subiscono danni di grado 3. Molti edifici di classe B e pochi di classe C subiscono danni di grado 4. Molti edifici di classe A e pochi di classe B subiscono danni di grado 5. Molti edifici di classe D subiscono danni di grado 2; alcuni subiscono danni di grado 3. Alcuni edifici di classe E subiscono danni di grado 2.</p>
<p>X Molto distruttivo</p>	<p>c) Molti edifici di classe di vulnerabilità C subiscono danni di grado 4. Molti edifici di classe B e alcuni di classe C subiscono danni di grado 5, così come la maggior parte degli edifici di classe A. Molti edifici di classe D subiscono danni di grado 3; alcuni subiscono danni di grado 4. Molti edifici di classe E subiscono danni di grado 2; alcuni subiscono danni di grado 3. Alcuni edifici di classe F subiscono danni di grado 2.</p>
<p>XI Devastante</p>	<p>c) Molti edifici di classe di vulnerabilità C subiscono danni di grado 4. La maggior parte degli edifici di classe B e molti di classe C subiscono danni di grado 5. Molti edifici di classe D subiscono danni di grado 4; alcuni subiscono danni di grado 5. Molti edifici di classe E subiscono danni di grado 3; alcuni subiscono danni di grado 4. Molti edifici di classe F subiscono danni di grado 2; alcuni subiscono danni di grado 3.</p>
<p>XII Completamente devastante</p>	<p>c) Praticamente tutte le strutture sopra e sotto terra vengono distrutte.</p>

SCALA INTENSITA' EMS

Classificazione danno edifici in muratura



Grado 1: Danni da trascurabili a lievi (nessun danno strutturale). Crepe capillari in pochissimi muri; caduta solo di piccoli pezzi di intonaco. Caduta di pietre sciolte dalle parti superiori degli edifici solo in pochissimi casi.



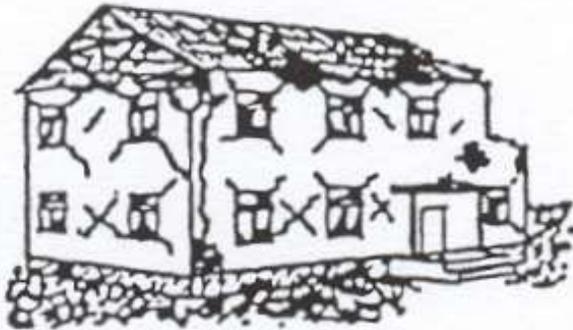
Grado 2: Danni moderati (lievi danni strutturali, moderati danni non strutturali). Crepe in molti muri; caduta di pezzi di intonaco abbastanza grandi; cadono parti di camini.

SCALA INTENSITA' EMS

Classificazione danno edifici in muratura



Grado 3: Danni gravi e sostanziali (danni strutturali moderati, danni non strutturali pesanti). Fessure grandi ed estese nella maggior parte dei muri. I camini sono tranciati sulla linea del tetto; cedimento di singoli elementi non strutturali.



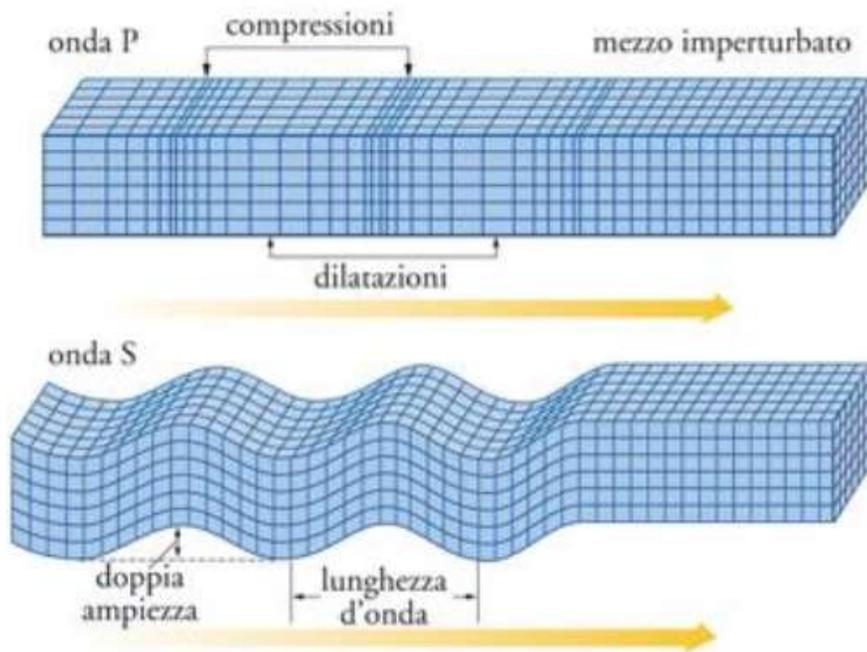
Grado 4: Danni molto gravi (danni strutturali gravi, danni non strutturali molto gravi). Crollo grave dei muri; cedimento strutturale parziale.



Grado 5: Distruzione (danni strutturali molto gravi). Collasso totale o quasi totale.

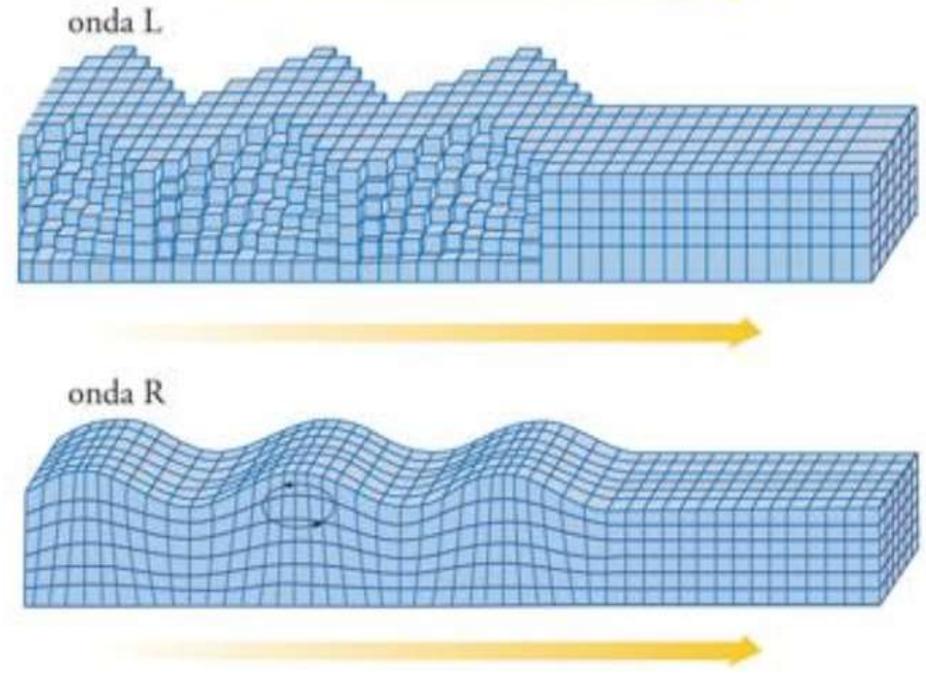
ONDE SISMICHE

Onde di volume



Le onde di volume Principali (di compressione) e Secondarie (di taglio) si muovono dall'ipocentro alla superficie in tutte le direzioni

Onde di superficie

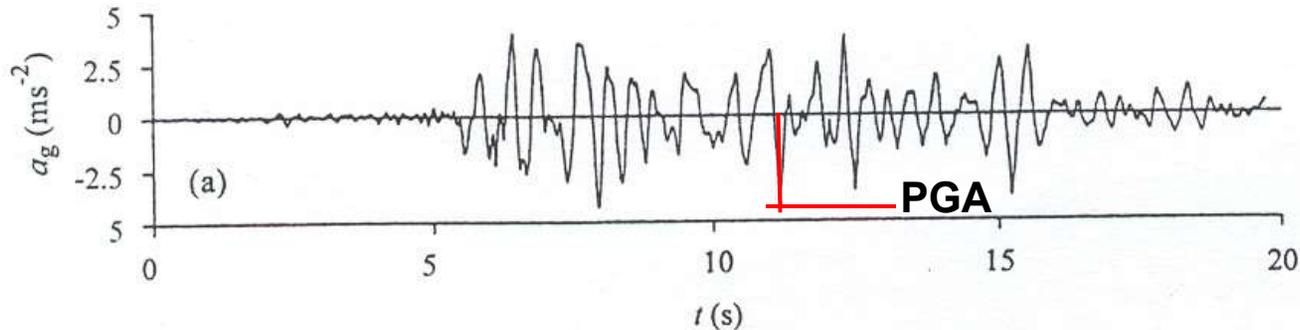


Le onde di volume quando raggiungono la superficie, in parte si riflettono e in parte originano le onde di superficie di Rayleigh (simili alle onde del mare) e di Love (trasversali rispetto alla direzione di propagazione).

ACCELEROGRAMMI

L'intensità riflette gli effetti di un terremoto sulle costruzioni e può essere usato solo per valutare il danno.

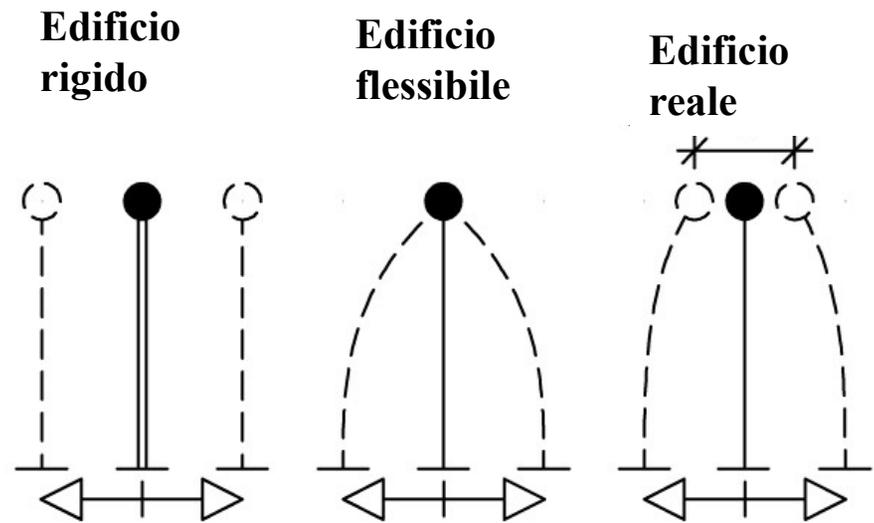
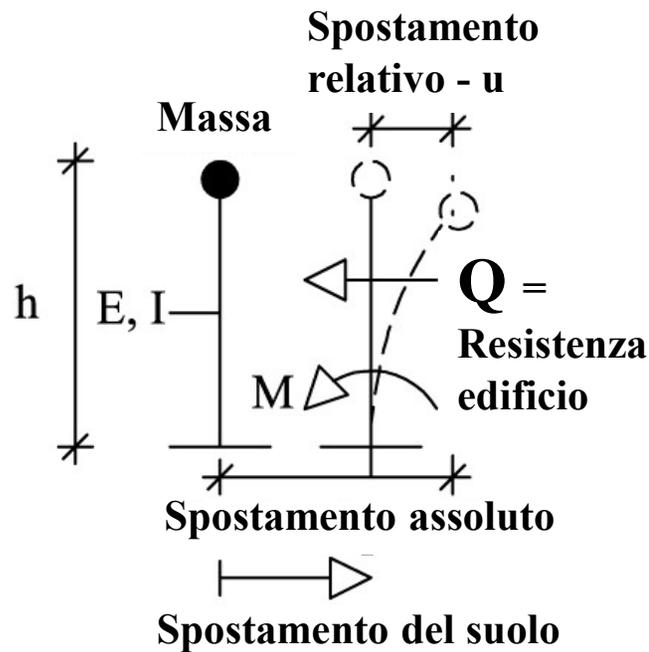
Nella progettazione è necessario fare riferimento a quantità fisiche come l'accelerazione del terreno (accelerogrammi).



In realtà il principale parametro considerato nella progettazione per quantificare l'intensità di un terremoto è il Peak Ground Acceleration PGA.

RISPOSTA DEGLI EDIFICI AL SISMA

Effetto della rigidità dell'edificio



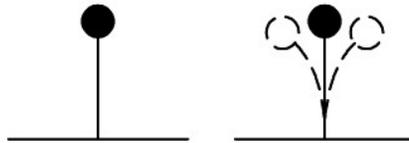
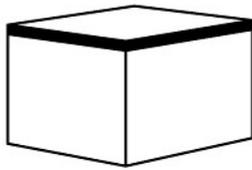
Movimento del terreno (assoluto)

$$Q = ku = \left(\frac{3EI}{h^3} \right) u$$

k = rigidezza del sistema

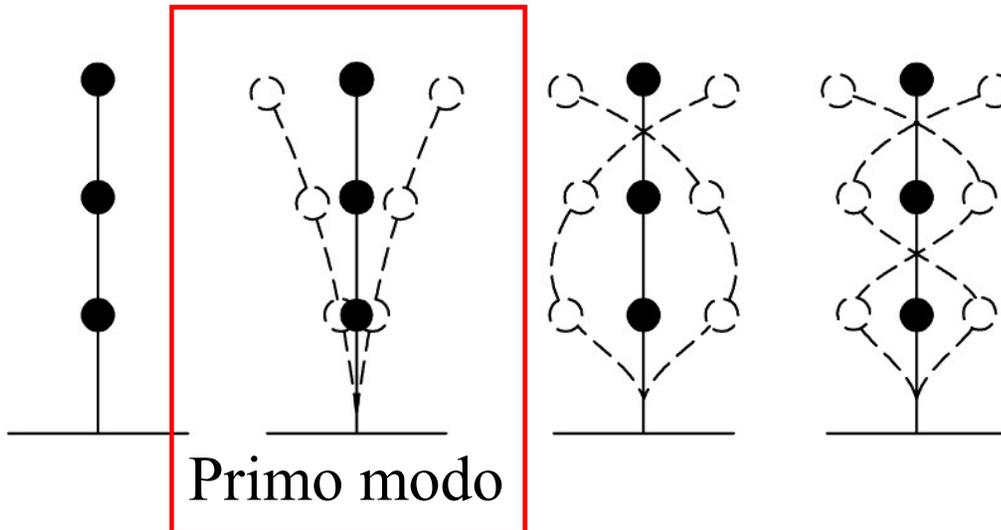
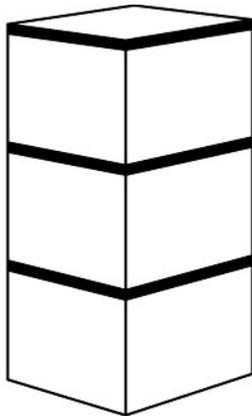
MODI DI VIBRARE E PERIODI DEGLI EDIFICI

Singola massa – un modo di vibrare



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

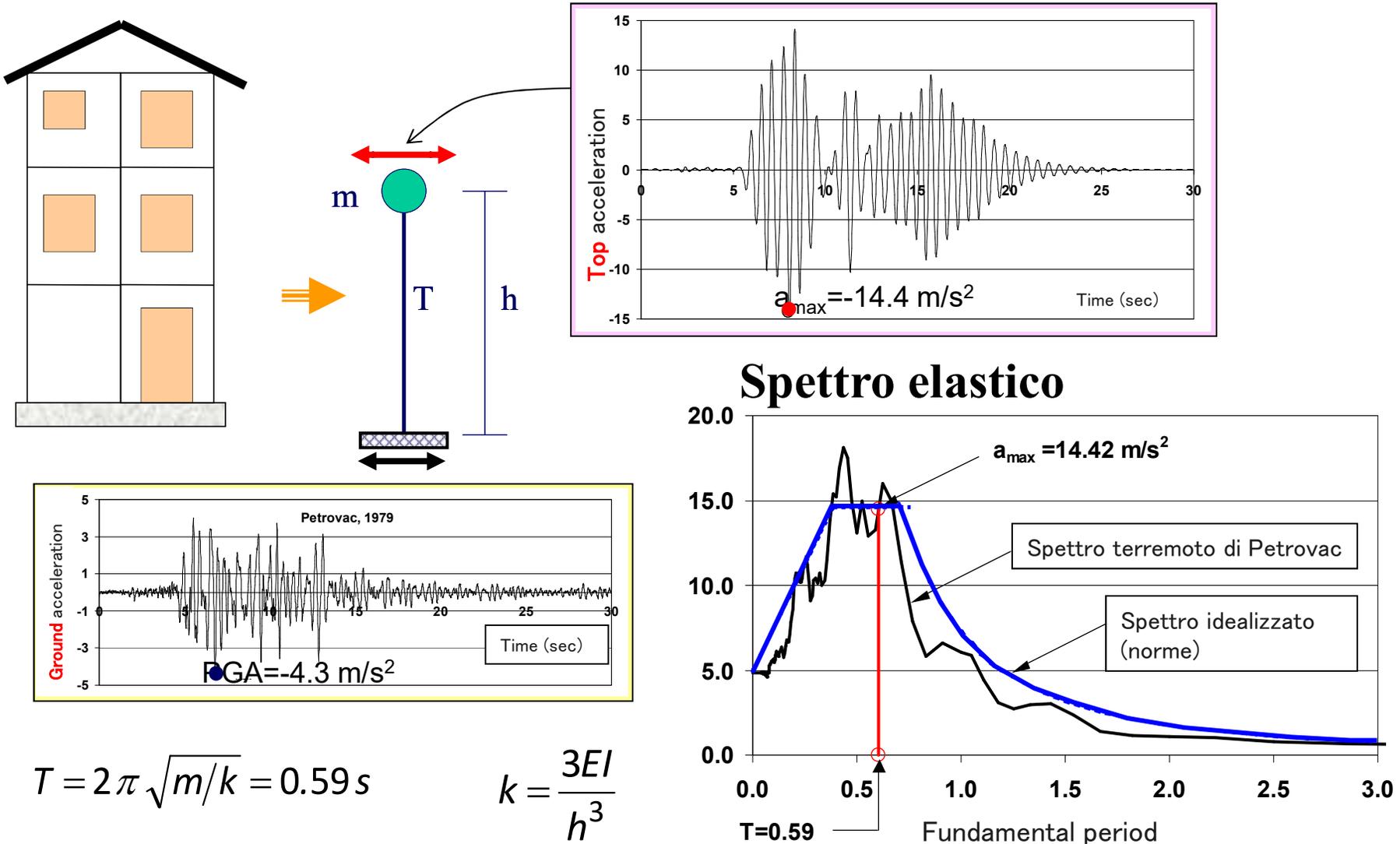
3 masse – tre modi di vibrare



Primo modo

SPETTRO ELASTICO

Il valore di accelerazione della massa dipende dalla frequenza propria

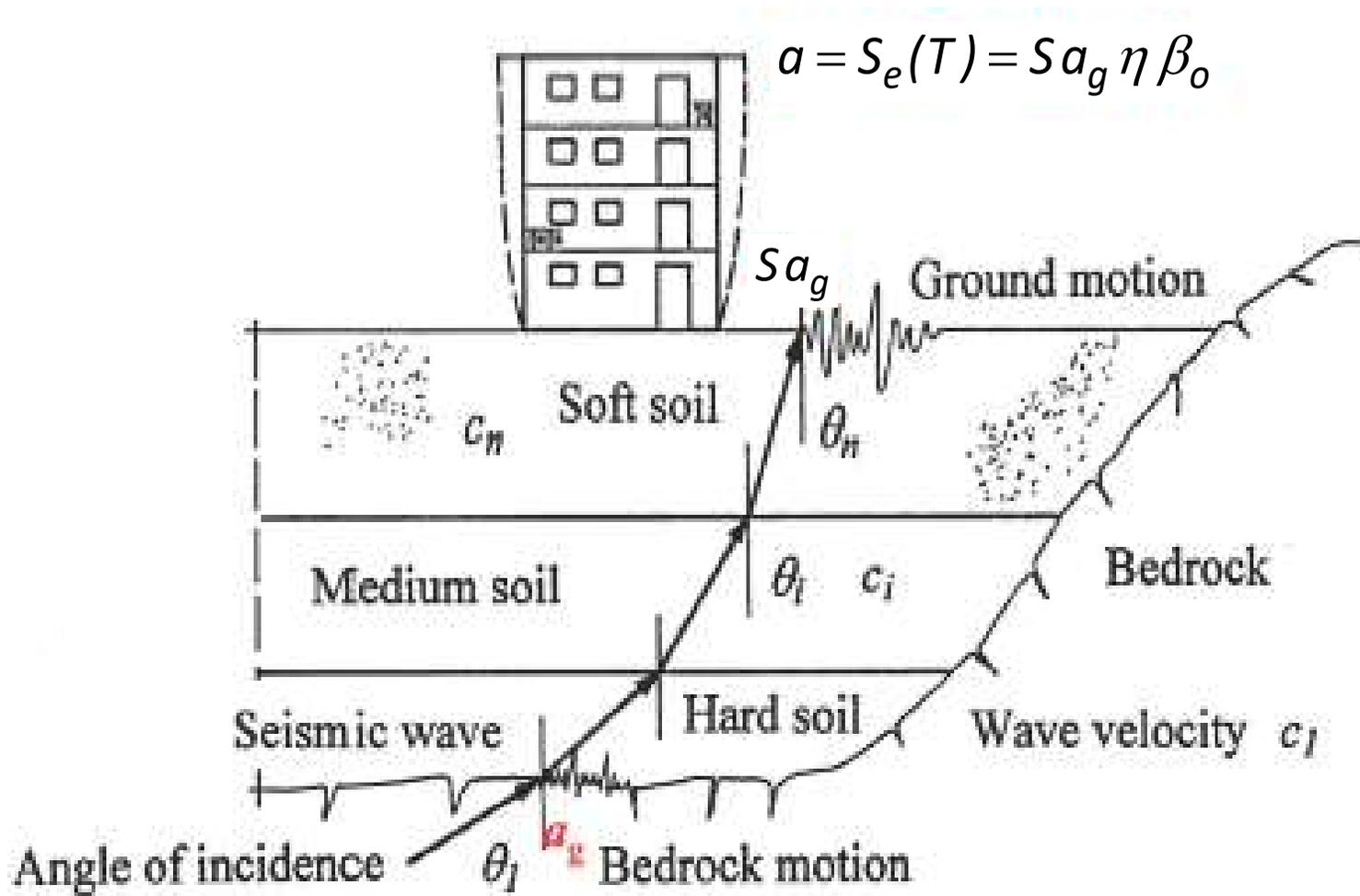


$$T = 2\pi \sqrt{m/k} = 0.59 \text{ s}$$

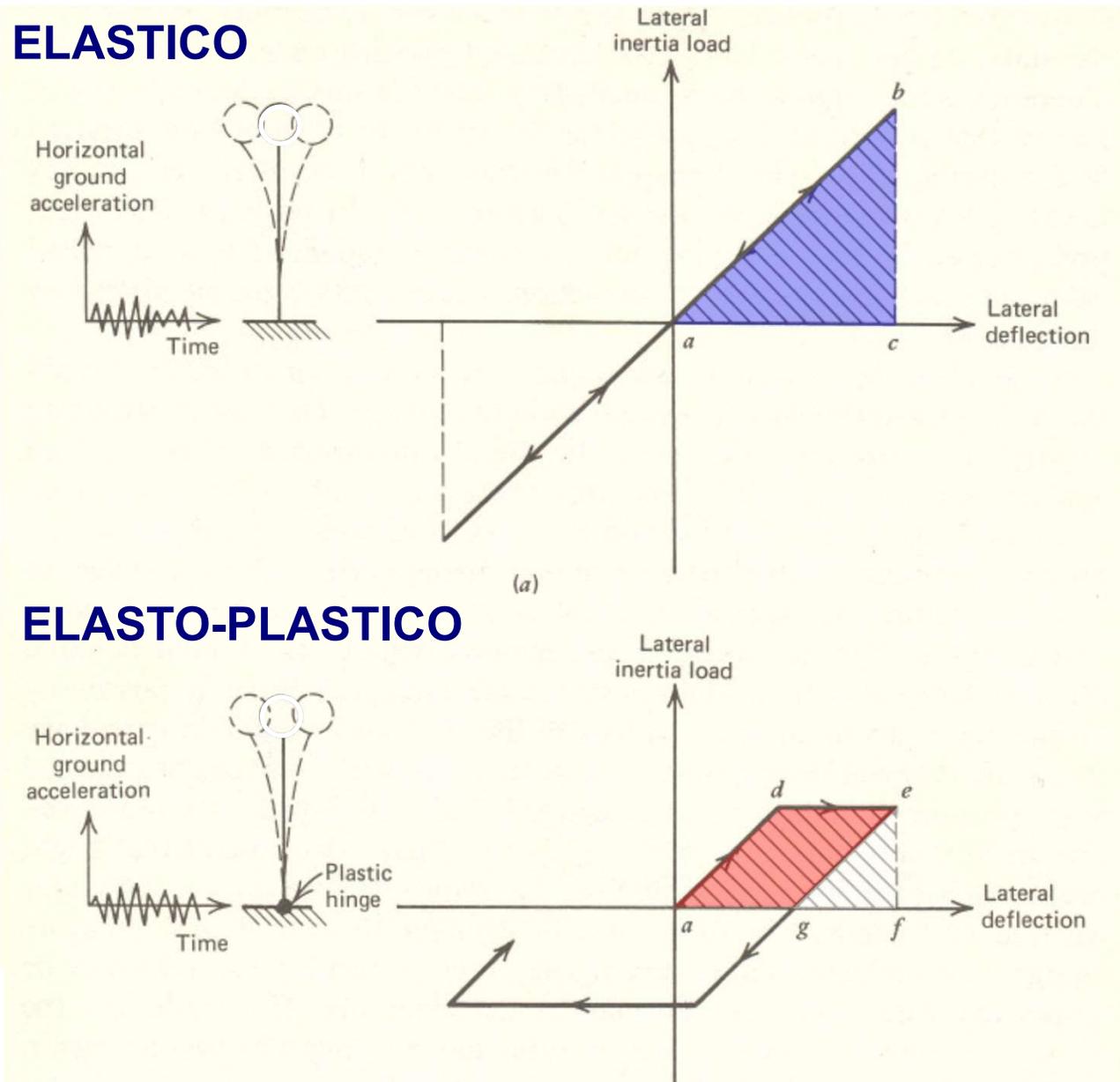
$$k = \frac{3EI}{h^3}$$

PROPAGAZIONE DELLE ONDE SISMICHE

Il valore di accelerazione della massa dipende dalla frequenza propria



COMPORTAMENTO STRUTTURALE REALE



AZIONI SISMICHE

Le **azioni sismiche di progetto**, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “**pericolosità sismica di base**” del sito di costruzione e sono funzione delle **caratteristiche morfologiche e stratigrafiche** che determinano la risposta sismica locale.

La **pericolosità sismica** è definita in termini di **accelerazione orizzontale massima attesa a_g** in condizioni di campo libero su **sito di riferimento rigido** con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello **spettro di risposta elastico in accelerazione** ad essa corrispondente **$S_e(T)$** , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento **V_R** , come definito nel § 2.4.

In alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica locale dell'area della costruzione.

AZIONI SISMICHE

Le condizioni di pericolosità sismica possono ritenersi soddisfatte se i risultati dello studio di pericolosità forniscono:

- I valori di accelerazione orizzontale massima a_g e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sito di riferimento sopra definite in corrispondenza dei punti di un reticolo (**reticolo di riferimento**) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non più di 10 km);
- Questi valori devono essere forniti **per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno T_R** ricadenti in un intervallo di riferimento compreso tra 30 e 2450 anni.

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata, nei modi precisati nelle NTC, per tener conto delle modifiche prodotte dalle **condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente nel sito della costruzione e della morfologia di superficie**. Tali modifiche caratterizzano la **risposta sismica locale**.

AZIONI SISMICHE

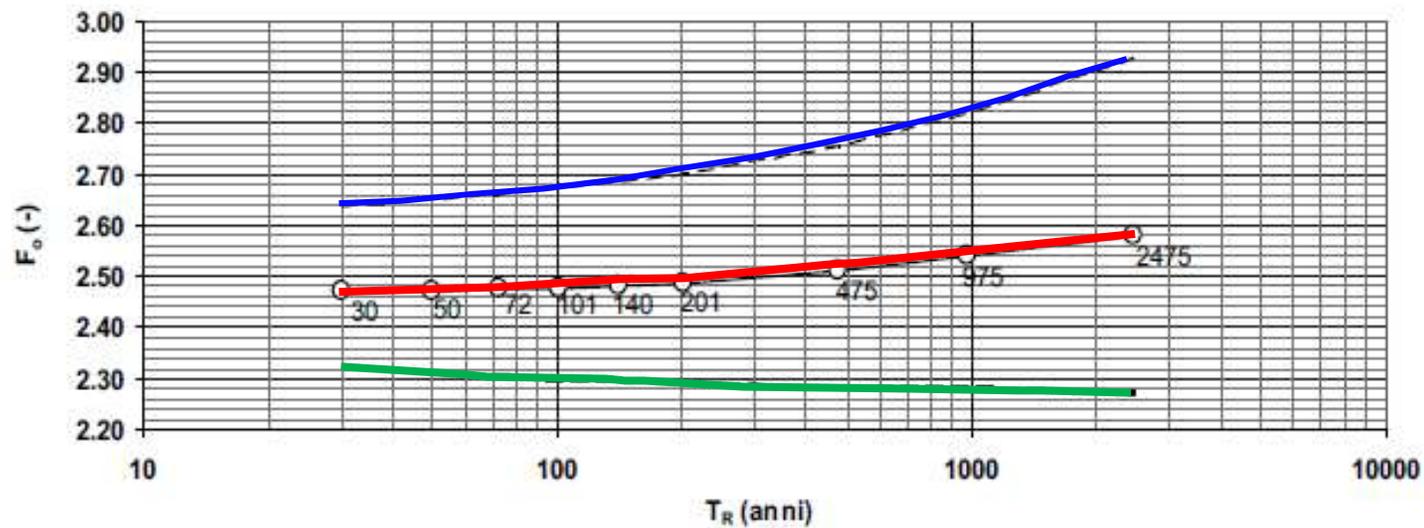
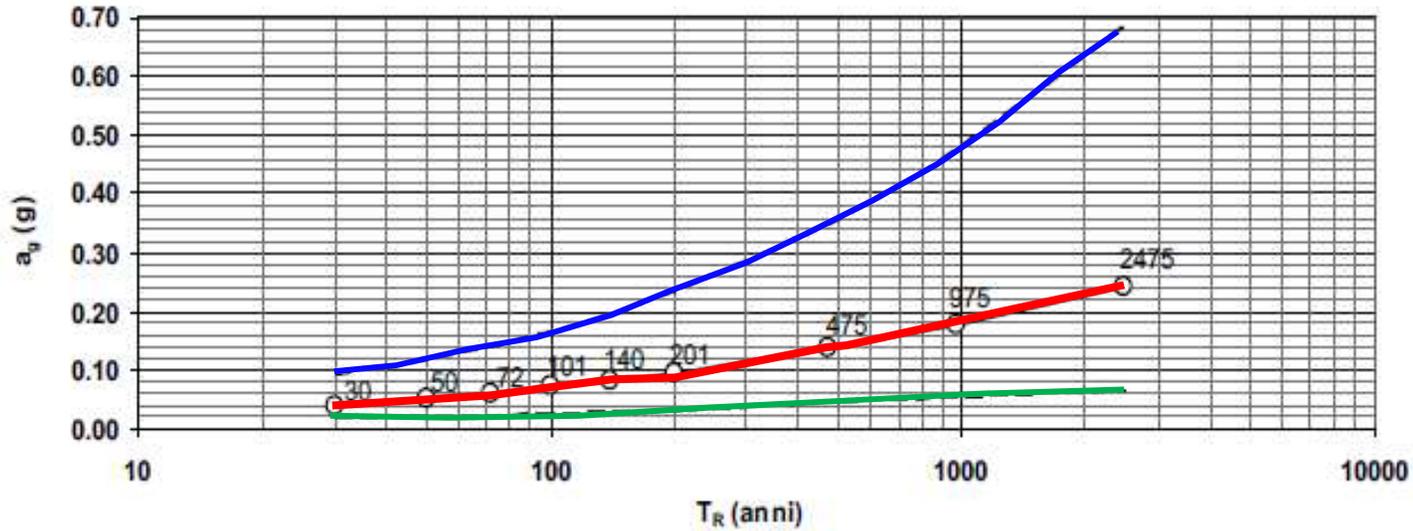
Ai fini della presente normativa le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_o valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per i valori di a_g , F_o e T_c^* , necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli [Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008](#), pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29, ed eventuali successivi aggiornamenti.

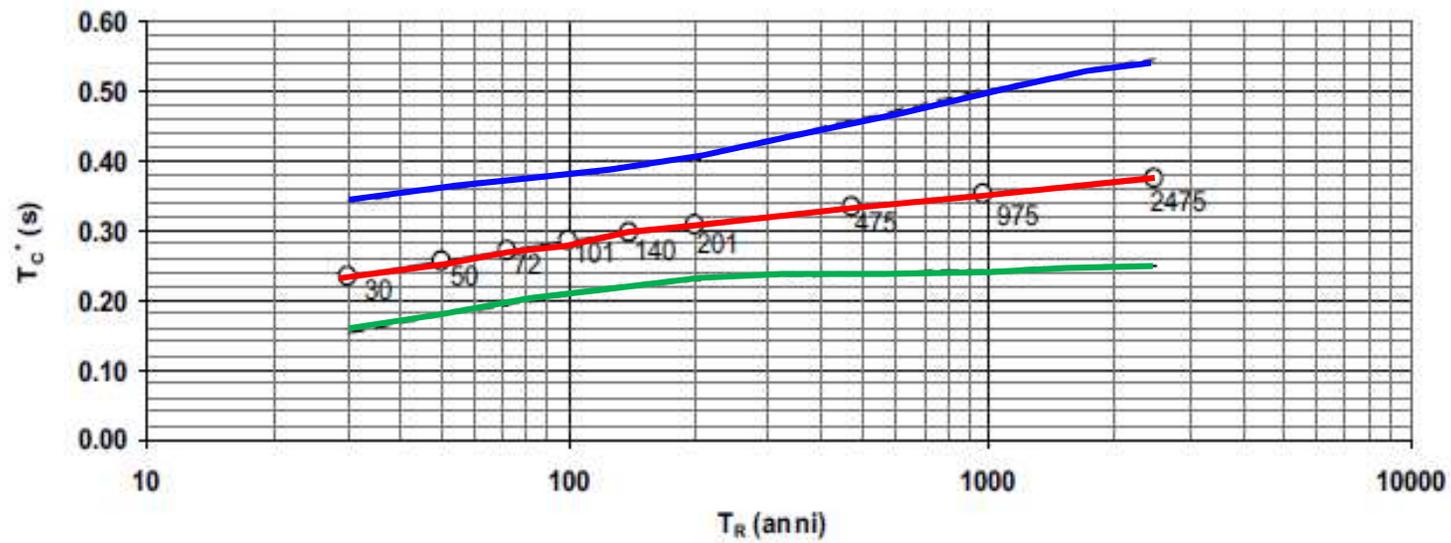
VARIABILITA' PARAMETRI

Si riportano graficamente le variabilità dei valori di a_g e F_o



VARIABILITA' PARAMETRI

Si riportano graficamente le variabilità dei valori di T_C^*



VITA NOMINALE EDIFICIO

Tale operazione deve essere possibile per tutte le vite di riferimento e tutti gli stati limite considerati dalle NTC. A tal fine è conveniente utilizzare, come parametro caratterizzante la pericolosità sismica, il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R espresso in anni.

La vita nominale di progetto V_N di un'opera è convenzionalmente definita come numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purchè soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali.

I valori di V_N da adottare per i diversi tipi di costruzione sono riportati nella tabella seguente.

Per un'opera la cui fase di realizzazione richieda un tempo pari a P_N , la vita nominale di tale fase di costruzione, per valutare le azioni sismiche è $> P_N$ e > 5 .

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

CLASSI D'USO DELLA COSTRUZIONE

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 DM 5/11/2001, 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.

VITA DI RIFERIMENTO

Le azioni sismiche sulle costruzioni vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale di progetto V_N per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in tabella

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

VITA DI RIFERIMENTO – VITA NOMINALE

VITA NOMINALE V_N	VALORI DI V_R			
	CLASSE D'USO			
	I	II	III	IV
≤ 10	35	35	35	35
≥ 50	≥ 35	≥ 50	≥ 75	≥ 100
≥ 100	≥ 70	≥ 100	≥ 150	≥ 200

STATI LIMITE

Nei confronti delle azioni sismiche, sia gli Stati limite di esercizio (SLE) che gli Stati limite ultimi (SLU) sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

Gli Stati Limite di esercizio (SLE) comprendono:

- **Stato Limite di Operatività (SLO):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti in relazione alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- **Stato Limite di Danno (SLD):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

STATI LIMITE

Gli Stati Limite Ultimi (SLU) comprendono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

PROBABILITA' DI SUPERAMENTO

Le probabilità di superamento nel **periodo di riferimento P_{V_R}** , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella tabella

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%

Qualora la protezione nei confronti degli stati limite di esercizio sia di prioritaria importanza, i valori di P_{V_R} forniti in tabella devono essere ridotti in funzione del grado di protezione che si vuole raggiungere.

Per ciascuno stato limite e relativa probabilità di eccedenza P_{V_R} nel periodo di riferimento V_R si ricava il **periodo di ritorno T_R del sisma** utilizzando la relazione:

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

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	$(^1)30 \text{ anni} \leq T_R = 0,60 \cdot V_R$
	SLD	$T_R = V_R$
Stati Limite	SLV	$T_R = 9,50 \cdot V_R$
Ultimi (SLU)	SLC	$T_R = 19,50 \cdot V_R \leq 2475 \text{ anni } (^1)$

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 $a_g S$

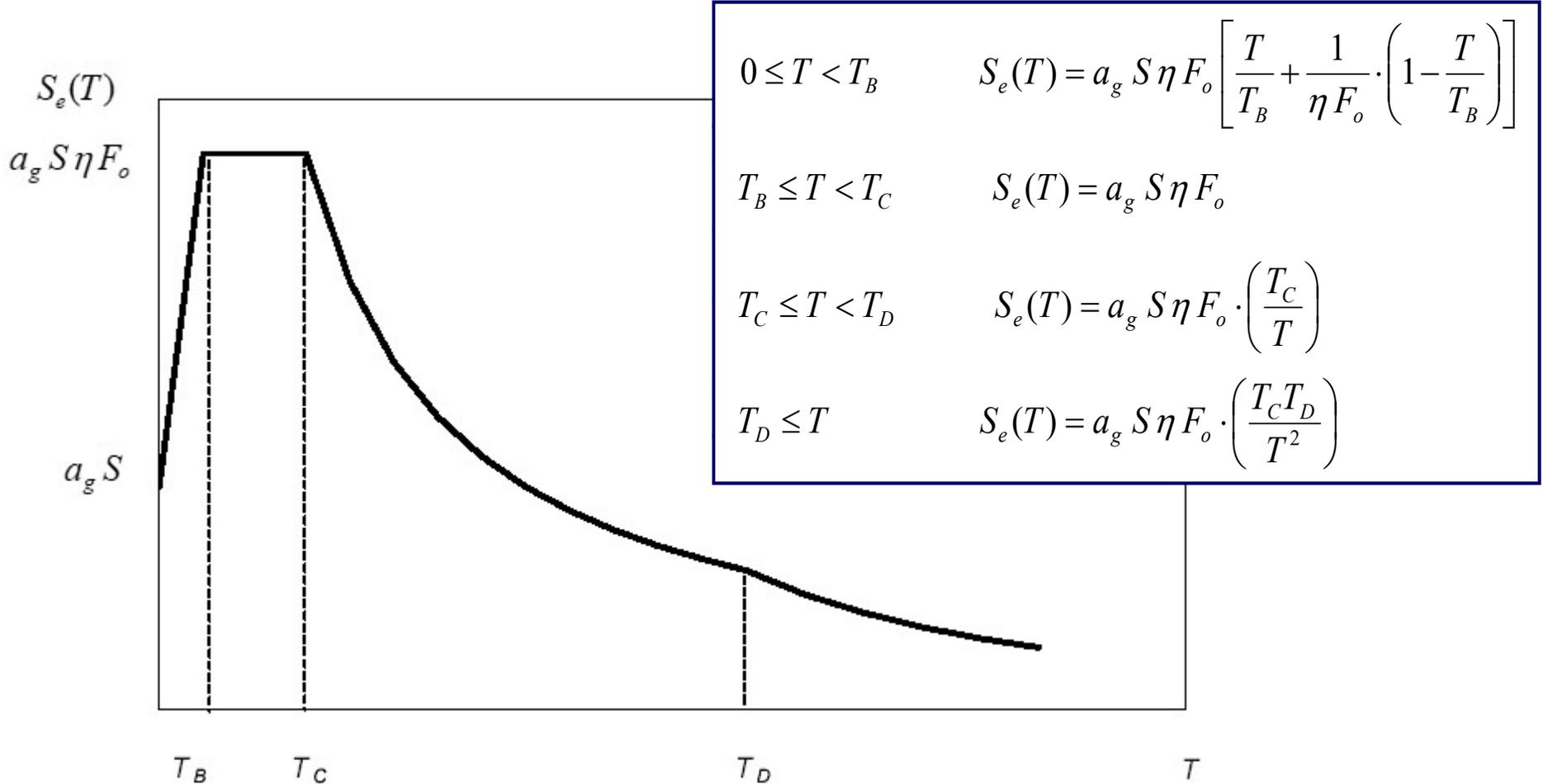
Un altro parametro che influenza lo spettro elastico è lo smorzamento viscoso del sistema ξ .

$\xi = 2\div 3\%$ per strutture in acciaio

$\xi = 3\div 7\%$ per strutture in calcestruzzo armato

$\xi = 7\div 10\%$ per strutture in muratura

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO ORIZZONTALE

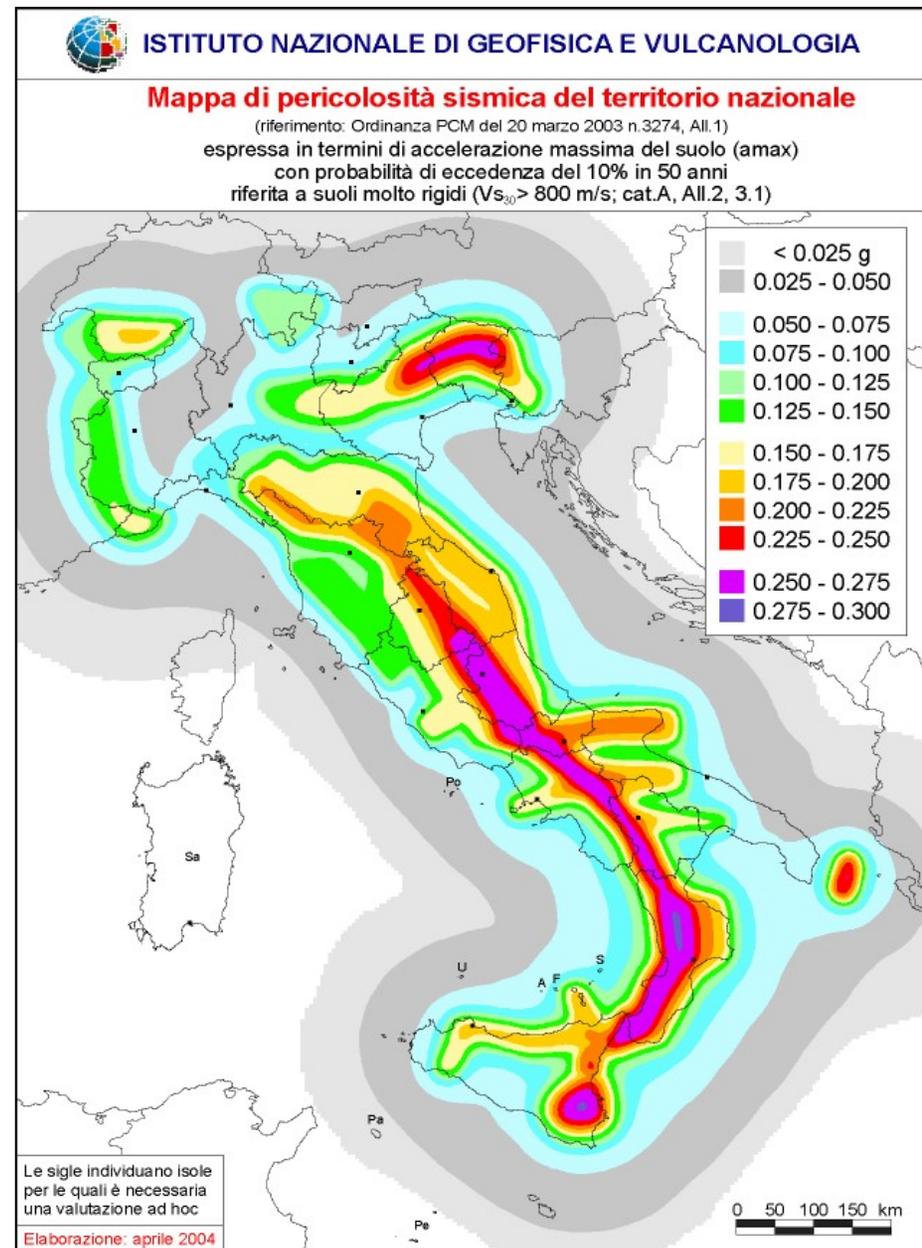


- a_g accelerazione del terreno di progetto per terreni Tipo A;
- $\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55$ fattore di correzione per $\xi \neq 5\%$ ($\xi =$ coefficiente di smorzamento viscoso)
- S parametro che dipende dalle caratteristiche del terreno; ($S = S_s \cdot S_T$)
- T_B, T_C limiti del tratto ad accelerazione costante;
- T_D limite del tratto a spostamento costante

ACCELERAZIONE DI PICCO AL SUOLO

L'accelerazione di picco al suolo è associata alla localizzazione del sito.

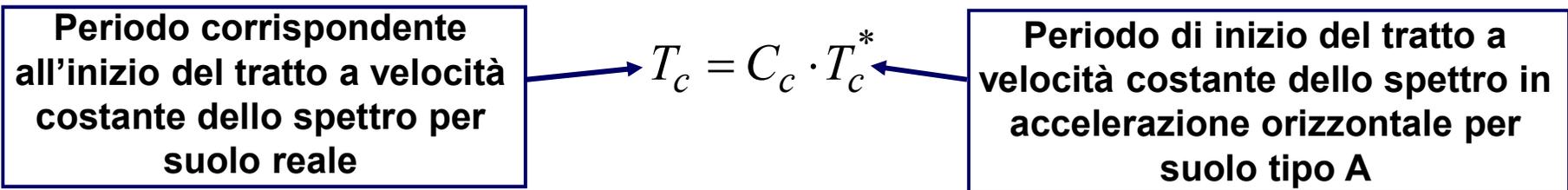
Nella mappa di pericolosità a fianco sono evidenziati in colore i diversi valori di pericolosità sismica espressi in termini di accelerazione di picco al suolo.



PARAMETRI DELLO SPETTRO ELASTICO

I parametri che consentono di definire lo spettro sono di seguito riportati.

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.



$$T_B = T_c / 3$$

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

VARI TIPI DI SUOLO DI FONDAZIONE

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> 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	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , 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	<i>Deposit</i> i 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	<i>Deposit</i> i 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	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

VALORI VELOCITA' EQUIV. ONDE DI TAGLIO

I valori di V_S sono ottenuti mediante specifiche prove.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per le **fondazioni superficiali**, la profondità del substrato è riferita al **piano di imposta** delle stesse, mentre per le **fondazioni su pali** è riferita alla **testa dei pali**,

Per **depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m**, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

VALORI VELOCITA' EQUIV. ONDE DI TAGLIO

I valori di V_s , con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, possono essere valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad [esempio le prove penetrometriche dinamiche](#) per i terreni a grana grossa e le [prove penetrometriche statiche](#).

$$N_{SPT,30} = \frac{\sum_{i=1}^M h_i}{\sum_{i=1}^M \frac{h_i}{N_{SPT,i}}}$$

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$N_{SPT,i}$ numero di colpi N_{SPT} nell'i-esimo strato;

M numero di strati di terreni a grana grossa nei primi 30 m;

$c_{u,i}$ resistenza non drenata dell'i-esimo strato;

K numero di strati di terreno a grana fina nei primi 30 m.

$$c_{u,30} = \frac{\sum_{i=1}^K h_i}{\sum_{i=1}^K \frac{h_i}{c_{u,i}}}$$

Tipo di suolo	A	B	C	D
$V_{s,30}$ (m/s)	>800	360-800	180-360	<180
$N_{SPT,30}$ (n.)		>50	15-50	<15
$c_{u,30}$ (kPa)		>250	70-250	<70

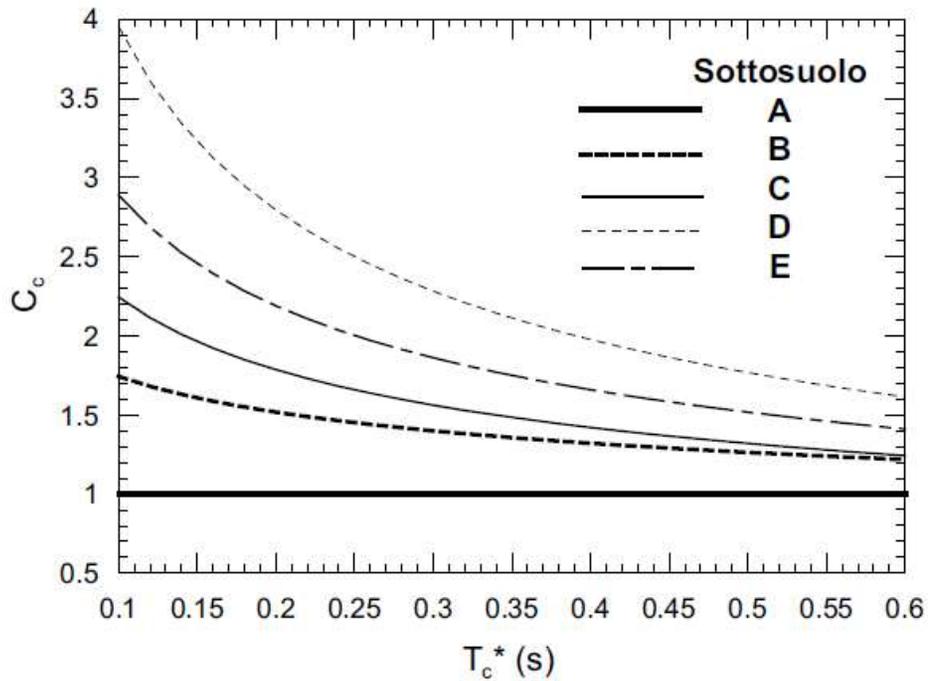
PARAMETRI DELLO SPETTRO ELASTICO

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

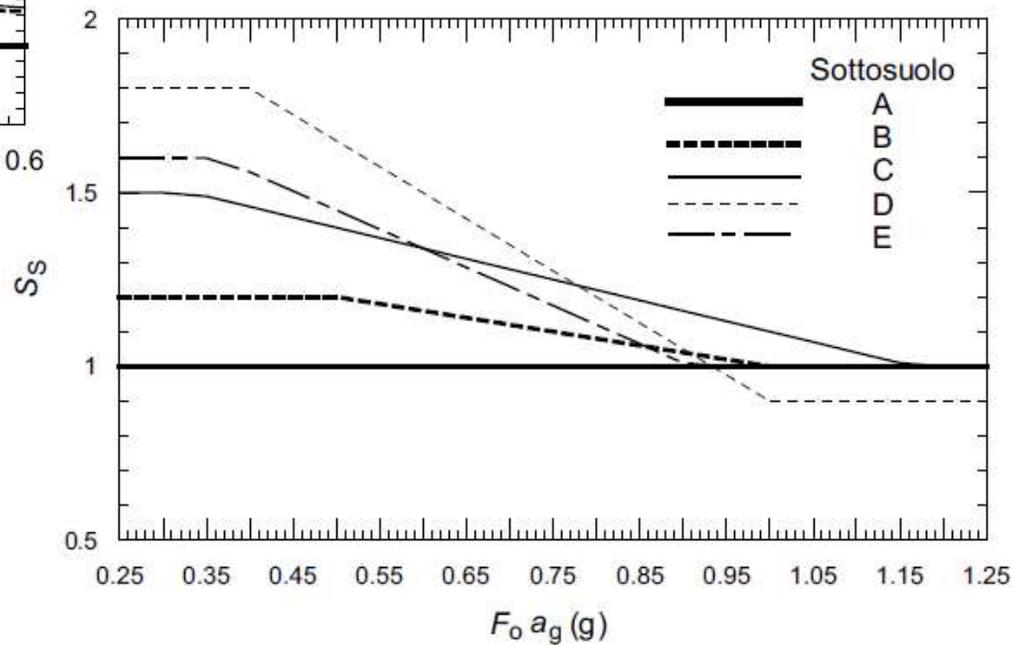
Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

COEFFICIENTI S_s e C_c

Coefficiente che dipende dal tipo di suolo



Coefficiente di amplificazione stratigrafica



PARAMETRI DELLO SPETTRO ELASTICO

I valori del coefficiente di amplificazione topografica S_T sono:

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

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

Coefficiente che tiene conto delle caratteristiche del terreno

$$(S = S_s \cdot S_T)$$

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO VERTICALE

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione della componente verticale del moto sismico, S_{ve} , è definito dalle espressioni:

$$0 \leq T < T_B \quad S_{ve}(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_c} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_{ve}(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_{ve}(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_{ve}(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

T è il periodo proprio di vibrazione (in direzione verticale);

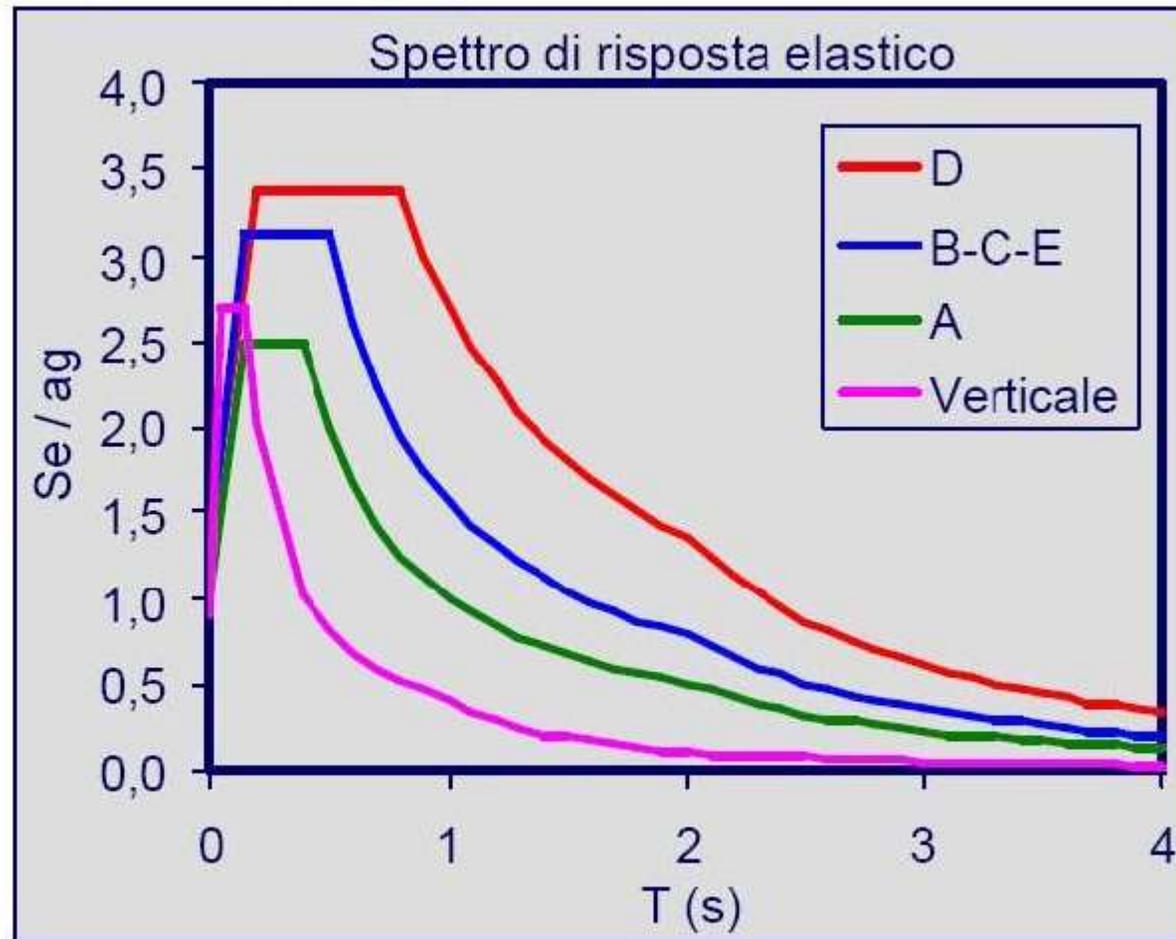
F_v è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, in termini di accelerazione orizzontale massima del terreno a_g su sito di riferimento rigido orizzontale, mediante la relazione:

$$F_v = 1.35 \cdot F_o \cdot \left(\frac{a_g}{g} \right)^{0.5}$$

Categoria di sottosuolo	S_s	T_B	T_C	T_D
A, B, C, D, E	1,0	0,05 s	0,15 s	1,0 s

SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI

Probabilità di superamento del 10% in 50 anni



CURVE EUROCODICE

SPETTRO ELASTICO IN SPOSTAMENTO

Lo spettro di risposta elastico dello spostamento si ottiene dalla

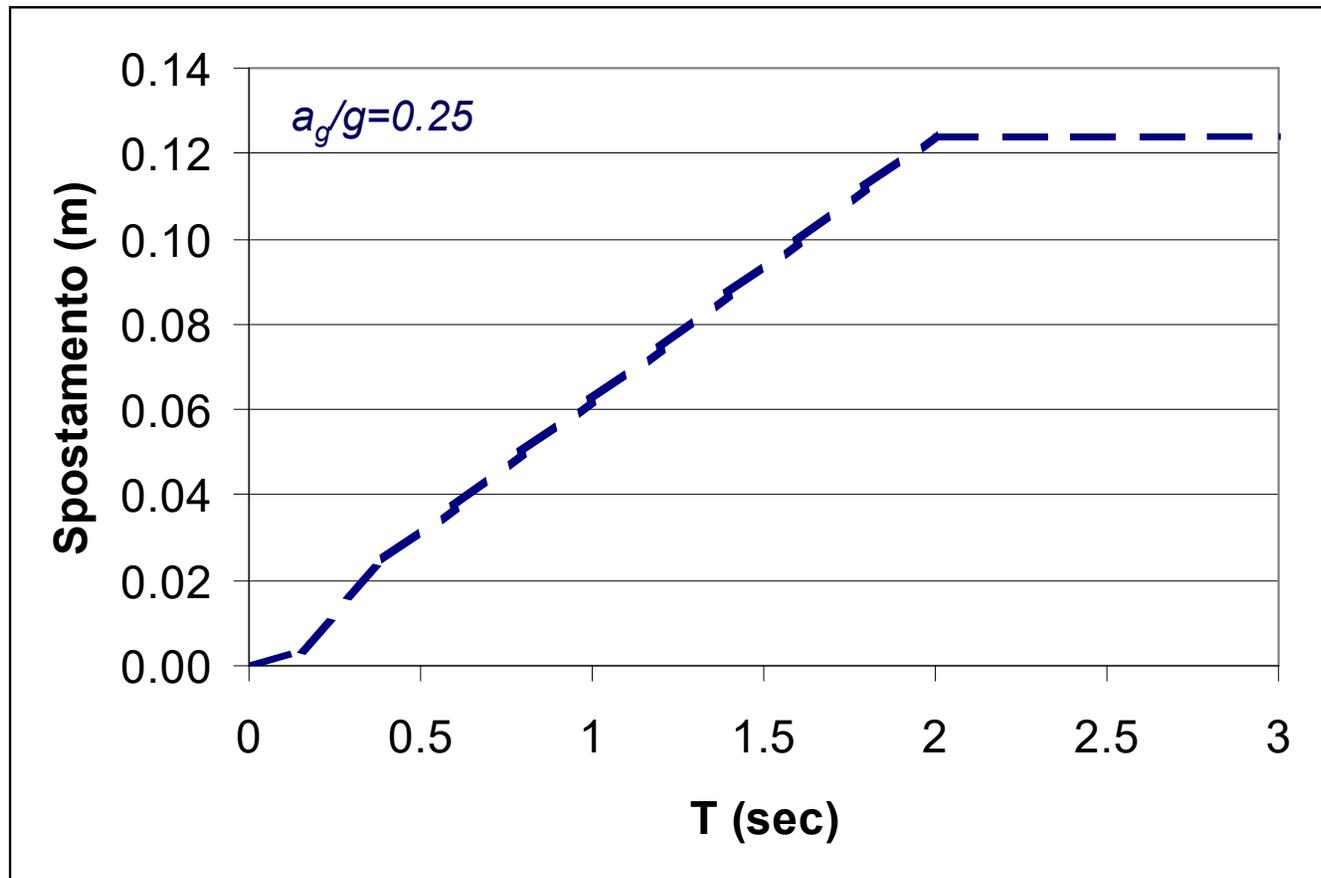
$$\begin{aligned} \text{per } T \leq T_E & \quad S_{De}(T) = S_e(T) \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \\ \text{per } T_E < T \leq T_F & \quad S_{De}(T) = 0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \left[F_o \eta + (1 - F_o \eta) \cdot \frac{T - T_E}{T_F - T_E} \right] \\ \text{per } T > T_F & \quad S_{De}(T) = d_g \end{aligned}$$

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

Spostamento orizzontale max del terreno.

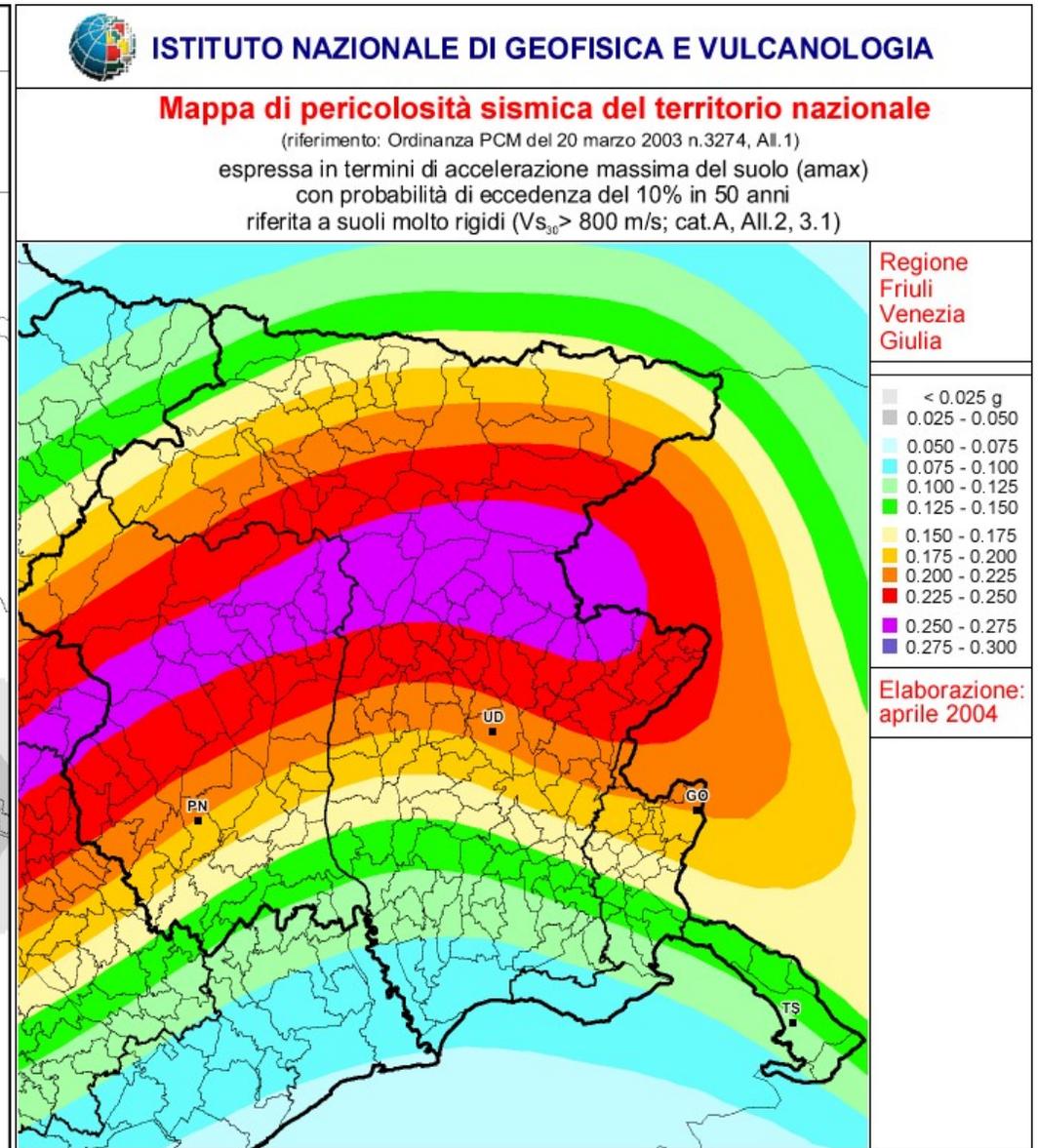
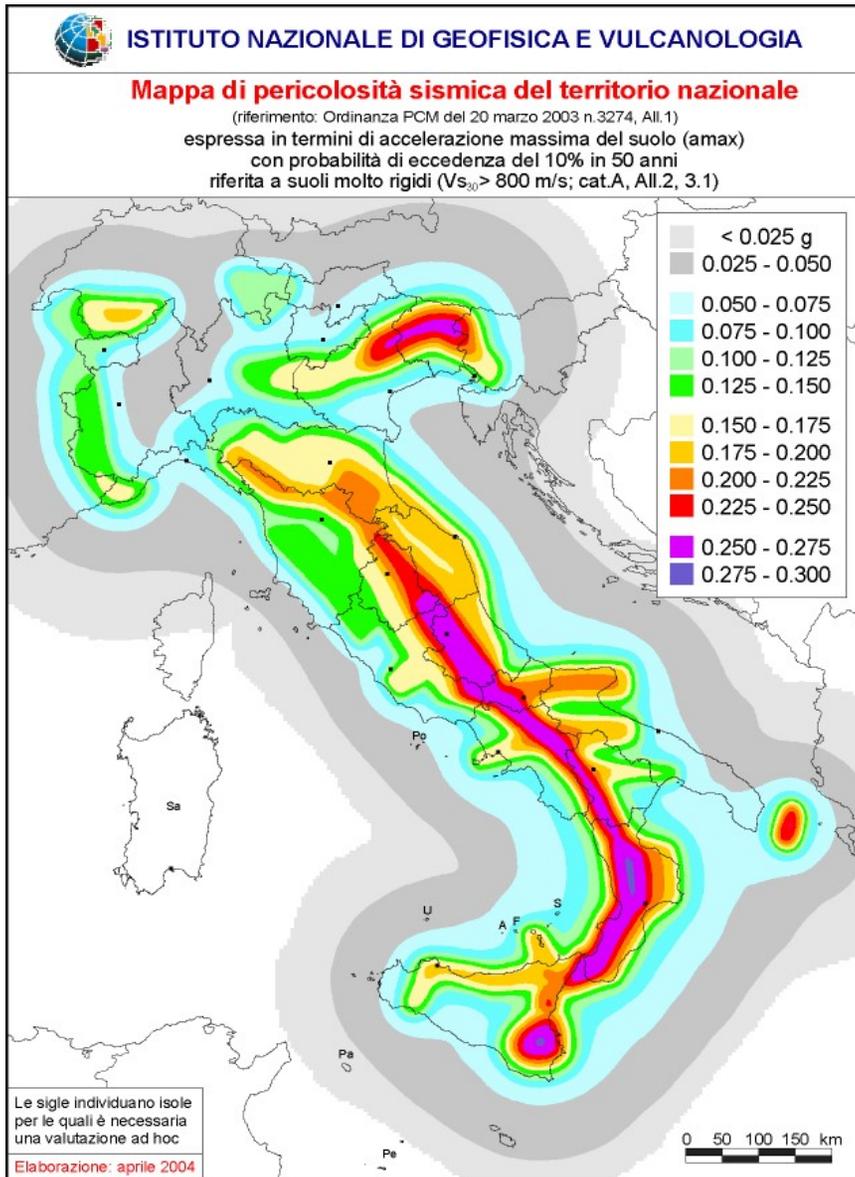
Categoria sottosuolo	T_E [s]	T_F [s]
A	4,5	10,0
B	5,0	10,0
C, D, E	6,0	10,0

SPETTRO ELASTICO DELLO SPOSTAMENTO

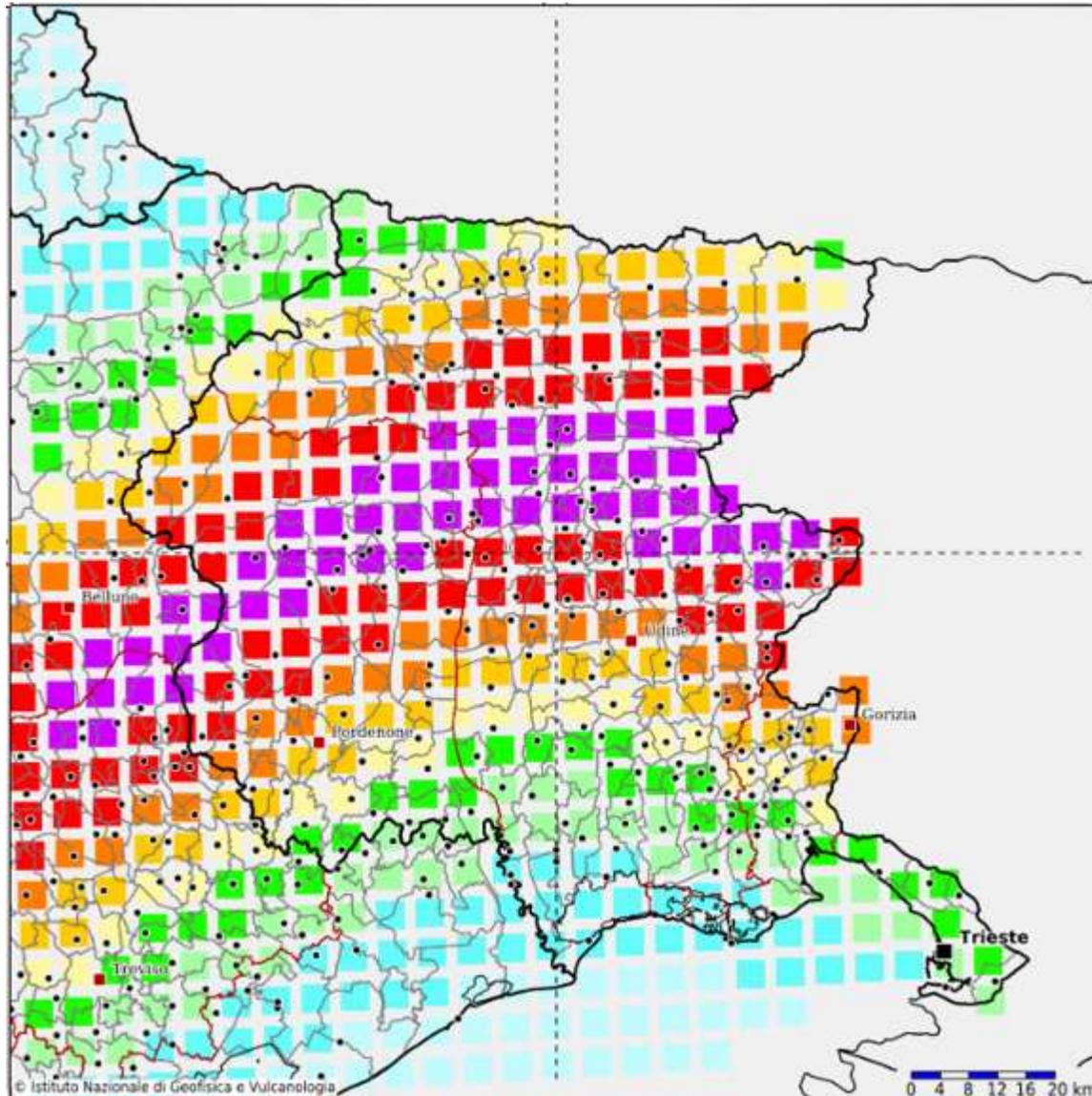


Serve quando si usa l'analisi statica non lineare

VALORI PGA PER SLU IN ITALIA E FVG



VALORI PGA GRIGLIA FVG



INTERPOLAZIONE GRANDEZZE SISMICHE PER VALORI INTERMEDI DEL TEMPO DI RITORNO

Indicato con p il generico parametro di interesse da determinare e corrispondente al generico tempo di ritorno T_R compreso tra i periodi di ritorno T_{R1} e T_{R2} contemplati dalla documentazione di cui si dispone, esso può essere così calcolato (*logaritmo base 10*):

$$\log(p) = \log(p_1) + \frac{\log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \log\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right)}{\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)}$$

p_1 e p_2 sono i valori del parametro corrispondente ai tempi di ritorno T_{R1} e T_{R2}

VALUTAZIONE PUNTUALE DELLA PERICOLOSITA'

Per ciascun punto del territorio nazionale, i parametri di interesse per la definizione dell'azione sismica di progetto sono calcolati come media pesata sui valori dei parametri nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto ed i quattro vertici della maglia:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

p è il valore del parametro di interesse nel punto in esame

p_i è il valore del parametro di interesse nell' i -esimo punto della maglia elementare contenente il punto in esame

d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo punto della maglia suddetta

SPETTRI DI RISPOSTA

Esiste un software (*Spettri di risposta*) che fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontale e verticale) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale.

INTRO

D.M. 14 gennaio 2008 - Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

Spettri di risposta ver. 1.0.3

Il documento Excel **SPETTRI-NTC** fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticale) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale. La definizione degli spettri di risposta relativi ad uno Stato Limite è articolata in 3 fasi, ciascuna delle quali prevede la scelta dei valori di alcuni parametri da parte dell'utente:

FASE 1. Individuazione della pericolosità del sito (sulla base dei risultati del progetto S1 - INGV);

FASE 2. Scelta della strategia di progettazione;

FASE 3. Determinazione dell'azione di progetto.

La schermata relativa a ciascuna fase è suddivisa in sotto-schermate: l'utente può intervenire nelle sotto-schermate con sfondo grigio scuro mentre quelle con sfondo grigio chiaro consentono un immediato controllo grafico delle scelte effettuate. In ogni singola fase l'utente può visualizzare e stampare i risultati delle elaborazioni -in forma sia grafica che numerica- nonché i relativi riferimenti alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008 pubblicate nella G.U. n.29 del 04.02.2008 Suppl. Ord. n.30 e scaricabile dal sito www.cslp.it

Programma ottimizzato per una visualizzazione schermo 1024 x 768

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

INTRO**FASE 1****FASE 2****FASE 3**

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE

LATITUDINE

12,7077

46,1689

Ricerca per comune

REGIONE

PROVINCIA

COMUNE

Friuli-Venezia Giulia

Pordenone

Maniago

Elaborazioni grafiche

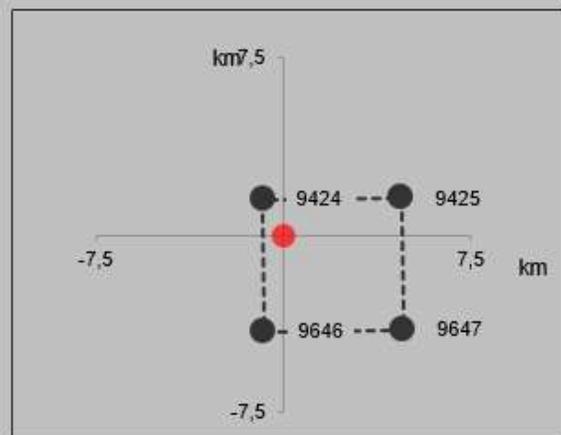
Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento

Controllo sul reticolo

- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta

Interpolazione

media ponderata

La "**Ricerca per comune**" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "**Ricerca per coordinate**".

INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) - V_N info

Coefficiente d'uso della costruzione - c_U info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) - V_R info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) - T_R info

Stati limite di esercizio - SLE	$\left\{ \begin{array}{l} \text{SLO} - P_{VR} = 81\% \\ \text{SLD} - P_{VR} = 63\% \end{array} \right.$	<input type="text" value="30"/>
		<input type="text" value="50"/>
Stati limite ultimi - SLU	$\left\{ \begin{array}{l} \text{SLV} - P_{VR} = 10\% \\ \text{SLC} - P_{VR} = 5\% \end{array} \right.$	<input type="text" value="475"/>
		<input type="text" value="975"/>

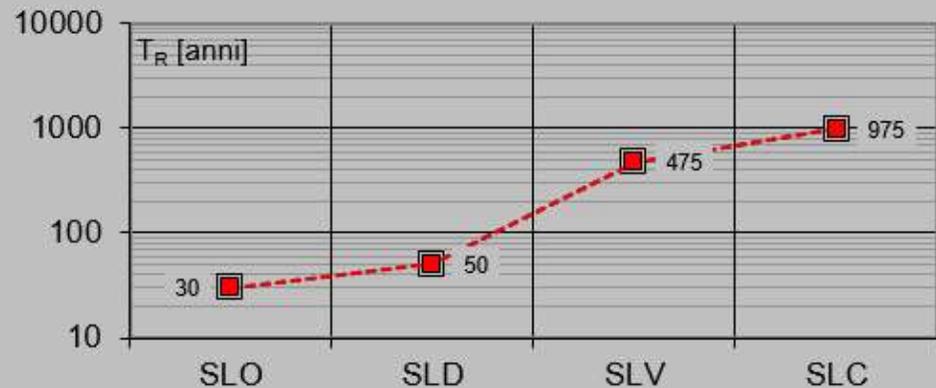
Elaborazioni

Grafici parametri azione 

Grafici spettri di risposta 

Tabella parametri azione 

Strategia di progettazione



LEGENDA GRAFICO

---□--- Strategia per costruzioni ordinarie

---■--- Strategia scelta

INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite

Stato Limite considerato **SLV** ▼ info

Risposta sismica locale

Categoria di sottosuolo **C** ▼ info

$S_S =$ **1,335**

$C_C =$ **1,513** info

Categoria topografica **T1** ▼ info

$h/H =$ **0,000**

$S_T =$ **1,000** info

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

Compon. orizzontale

Spettro di progetto elastico (SLE)

Smorzamento ξ (%) **5**

$\eta =$ **1,000** info

Spettro di progetto inelastico (SLU)

Fattore q_o **3**

Regol. in altezza **no** ▼ info

Compon. verticale

Spettro di progetto

Fattore q **1,5**

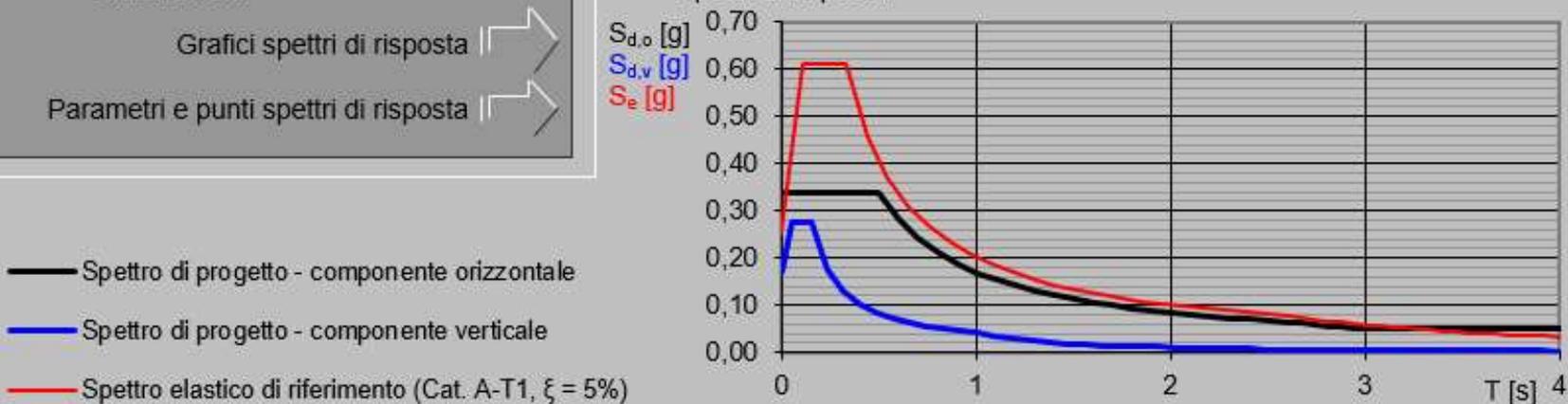
$\eta =$ **0,667** info

Elaborazioni

Grafici spettri di risposta

Parametri e punti spettri di risposta

Spettri di risposta



INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato SLV

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_g	0,252 g
F_0	2,414
T_C	0,330 s
S_S	1,335
C_C	1,513
S_T	1,000
q	1,000

Parametri dipendenti

S	1,335
η	1,000
T_B	0,167 s
T_C	0,500 s
T_D	2,609 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

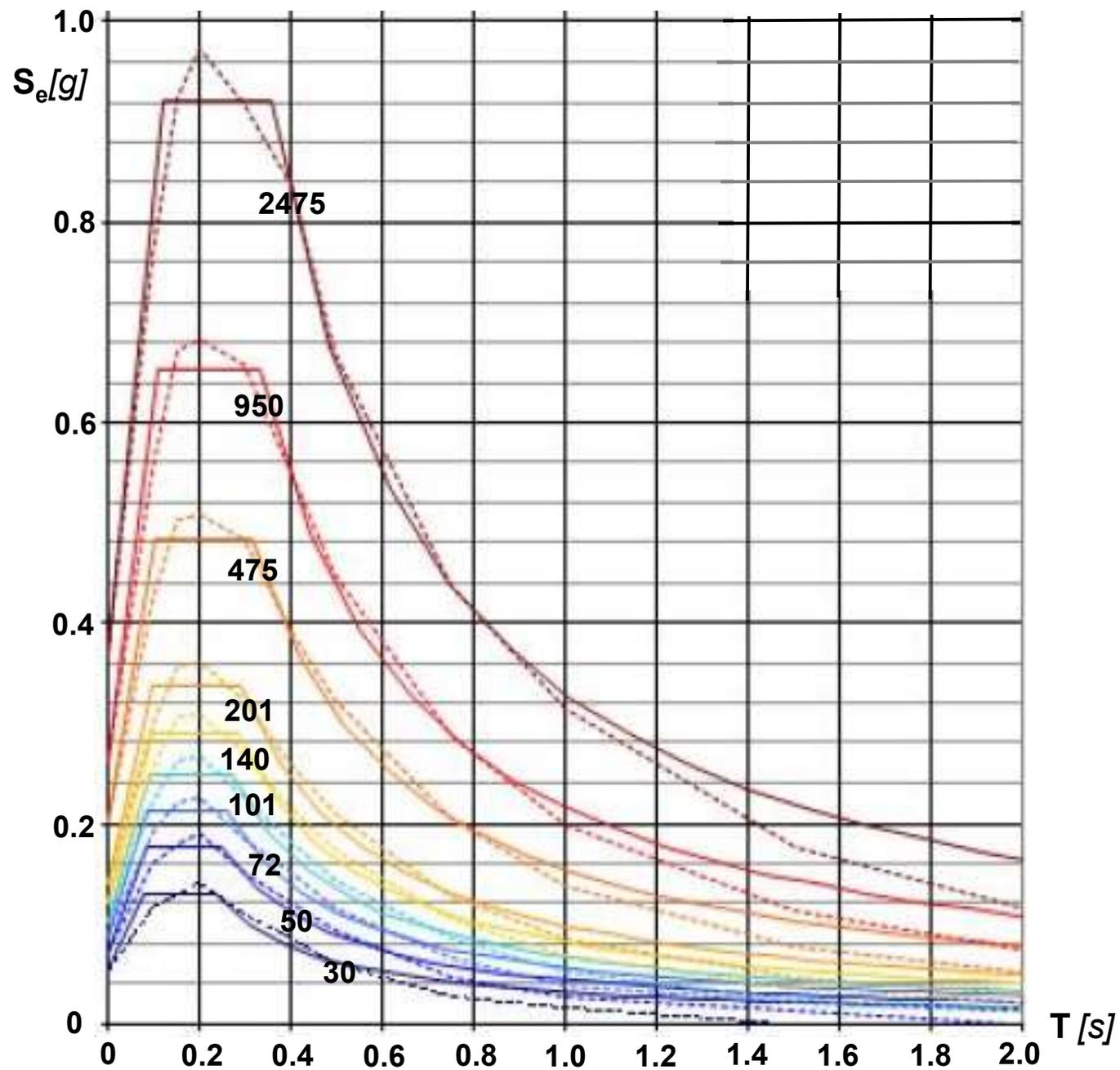
$$T_D \leq T \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_c(T)$ sostituendo η con η/q , dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

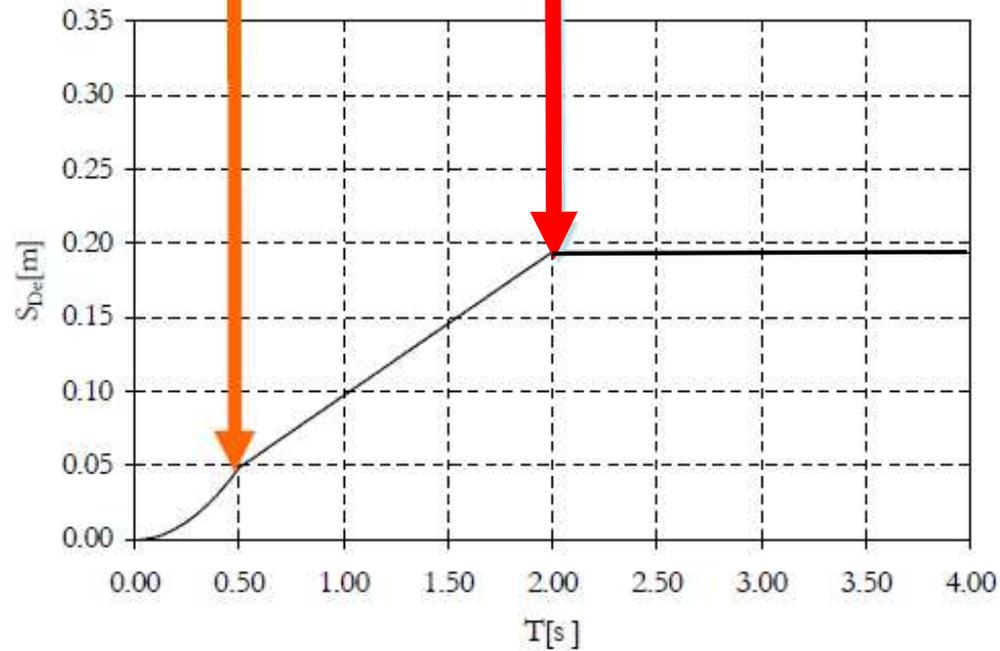
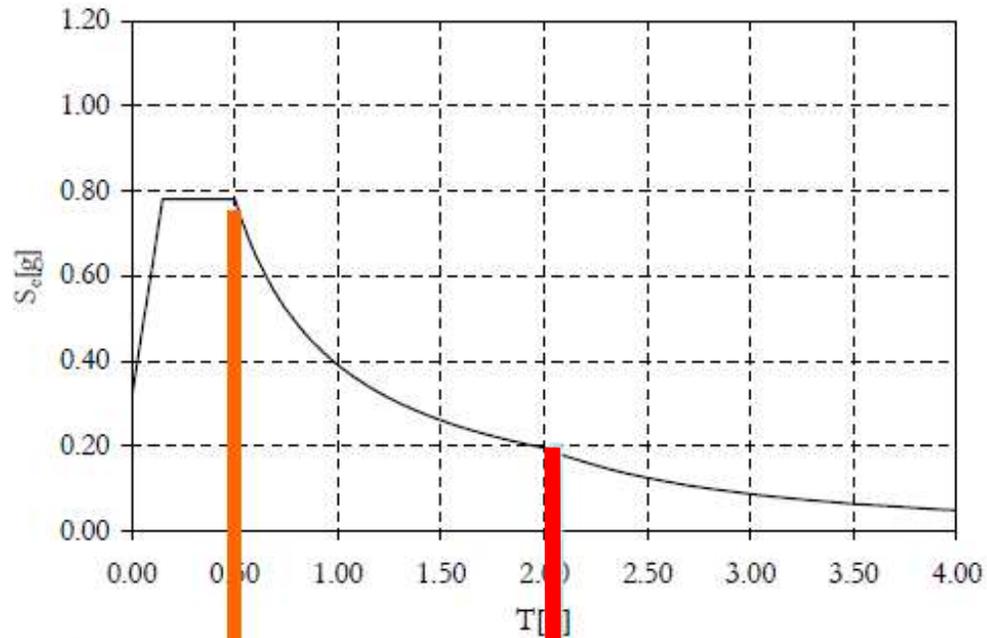
Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0,000	0,337
$T_B \leftarrow$	0,167	0,813
$T_C \leftarrow$	0,500	0,813
	0,600	0,677
	0,701	0,580
	0,801	0,507
	0,902	0,451
	1,002	0,406
	1,103	0,369
	1,203	0,338
	1,303	0,312
	1,404	0,289
	1,504	0,270
	1,605	0,253
	1,705	0,238
	1,805	0,225
	1,906	0,213
	2,006	0,203
	2,107	0,193
	2,207	0,184
	2,308	0,176
	2,408	0,169
	2,508	0,162
$T_D \leftarrow$	2,609	0,156
	2,675	0,148
	2,741	0,141
	2,808	0,134
	2,874	0,128
	2,940	0,123
	3,006	0,117
	3,073	0,112
	3,139	0,108
	3,205	0,103
	3,271	0,099
	3,338	0,095
	3,404	0,092
	3,470	0,088
	3,536	0,085
	3,603	0,082
	3,669	0,079
	3,735	0,076
	3,801	0,073
	3,868	0,071
	3,934	0,069
	4,000	0,066

SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI PER I PERIODI DI RITORNO T_R DI RIFERIMENTO



SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI IN ACCELERAZIONE E IN SPOSTAMENTO



$$S_e = \omega^2 S_d = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d$$

$$T \geq T_D \quad S_e = S a_g \eta F_o \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

Per $T \geq T_D$

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_e = S a_g \eta \frac{F_o}{4\pi^2} T_C T_D = \text{costante}$$

CALCOLO SPOSTAMENTO MASSIMO

Esempio di Terreno Tipo C

$$S=1.25$$

$$a_g = 0.25g$$

$$F_o = 2.5$$

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_e = S a_g \eta \frac{F_o}{4\pi^2} T_C T_D = 1.25 \cdot 0.25 \cdot 981 \cdot \frac{2.5}{4\pi^2} \cdot 0.5 \cdot 2.0 = 19.4 \text{ cm}$$

Se una struttura è in grado di sopportare spostamenti di 19.4 cm, è in grado di superare in ogni caso il terremoto

SPETTRO DI PROGETTO PER ANALISI LINEARE

Per evitare di dover compiere analisi non lineari in fase progettuale, allo scopo di mettere in conto la **capacità di dissipare energia** sotto forma plastica, la norma consente di effettuare le verifiche mediante un'analisi LINEARE, basata su uno spettro di risposta ridotto, detto «**Spettro di Progetto**» ed indicato con $\mathbf{S}_d(T)$

Questa riduzione è ottenuta introducendo il **fattore di comportamento q** nello spettro elastico:

$$q = \frac{a_u}{a_y}$$

Per definizione q dovrebbe essere il rapporto tra l'accelerazione a_u del terreno che porta la struttura al collasso e l'accelerazione del terreno che porta la struttura al limite elastico a_y . Il coefficiente di struttura **q dipende dalla capacità della struttura di dissipare energia.**

$$q = \frac{Q_e}{Q_d}$$

Q_e è la forza sismica calcolata su una struttura elastica lineare ($\xi=5\%$)
 Q_d è la forza di progetto per la struttura considerata dissipativa (elasto-plastica), per la quale si effettua ancora un'analisi lineare supponendo $\xi=5\%$

q nell'Eurocodice e nelle NTC è ritenuto costante per $T \geq T_B$

SPETTRO ELASTICO E SPETTRI DI PROGETTO

Nella progettazione si fa riferimento allo spettro di progetto, che tiene conto della capacità dissipativa della struttura.

$$S_e(T) = S a_g \eta \beta_o$$

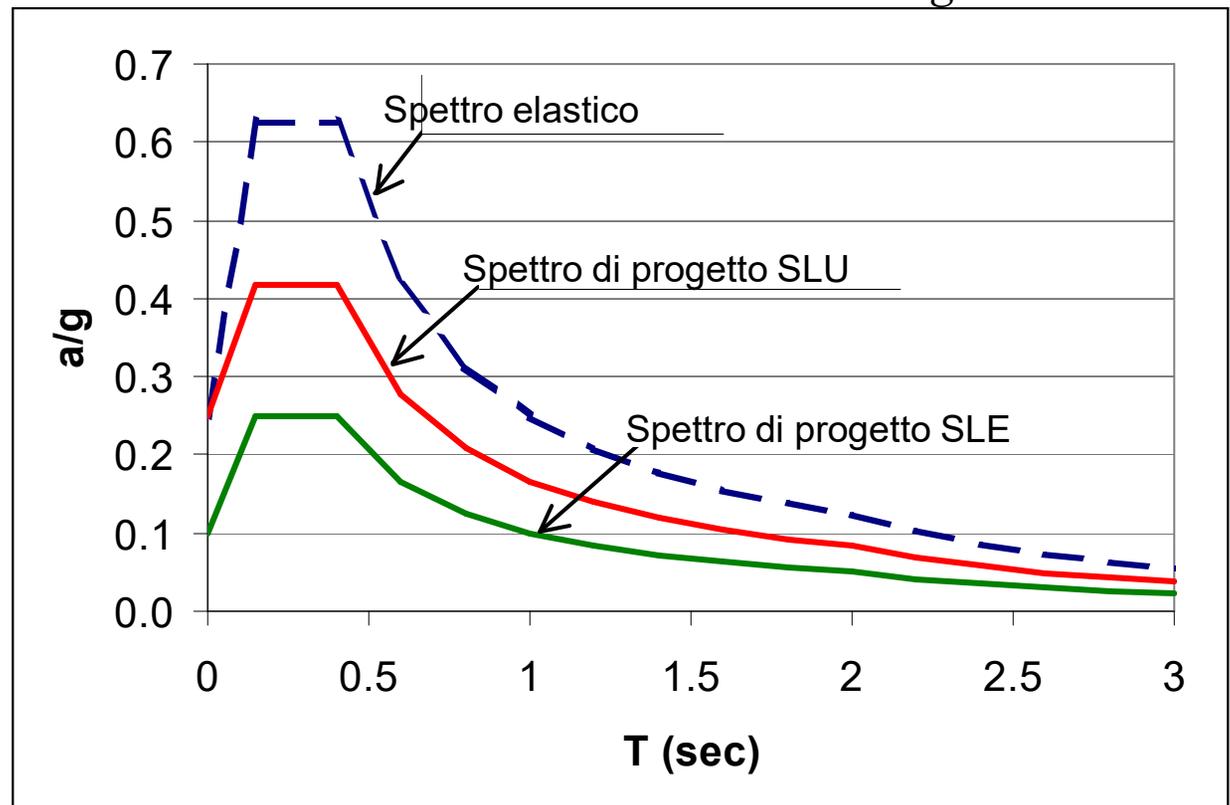
Forma spettrale

$$S_d(T) = S a_g \frac{\beta_o}{q}$$

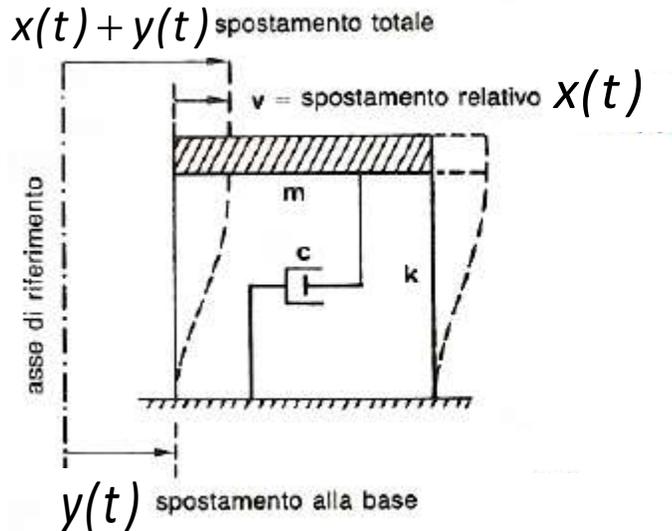
Il fattore di struttura
tiene conto di:

- Duttilità
- Sovreresistenza
- Forma

$$a_g = PGA$$



SISTEMA A UN GRADO DI LIBERTA' (SDOF)



$m =$ massa

$k =$ costante elastica (rigidezza) del sistema

$c =$ costante di viscosità

In ogni istante, se il supporto si muove, si ha equilibrio tra:

Forze d'inerzia $F_i = -m \frac{d^2}{dt^2} (x(t) + y(t)) = -m(\ddot{x} + \ddot{y})$

Forze viscose $F_v = -c \frac{d}{dx} x(t) = -c(\dot{x})$

Forze elastiche $F_e = -k x$

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + c\dot{x} + kx = 0$$

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + c\dot{x} + kx = F \text{ equivalente al moto sismico}$$

MOTO IN OSCILLAZIONE LIBERA SMORZATA

Posto:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T} = \text{frequenza circolare}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = \text{periodo fondamentale}$$

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} = \frac{c}{2m \cdot \omega} = \text{smorzamento meccanico rispetto al critico}$$

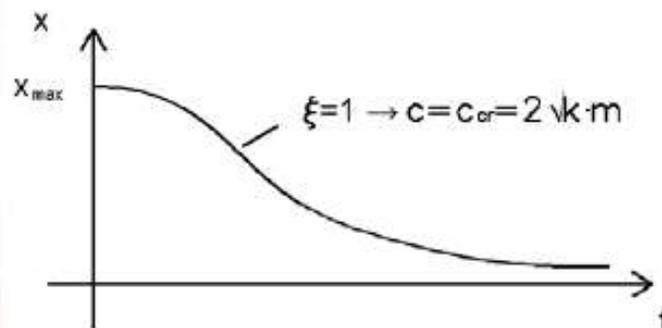
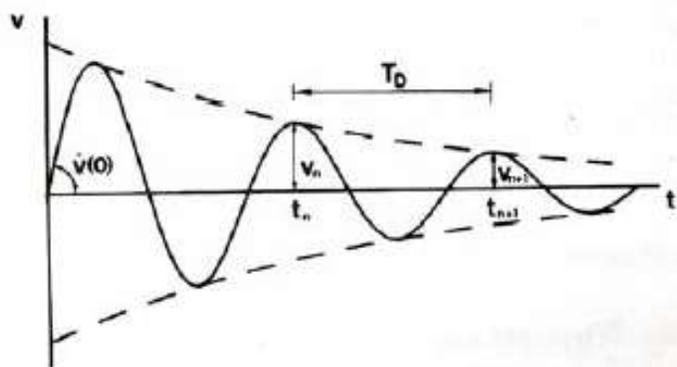
(1) $\rightarrow \boxed{\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{y}}$ ← equazione del moto in forma canonica

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2 x = 0$$

$$x(t) = e^{\zeta\omega t} \{A \cos \omega_1 t + B \sin \omega_1 t\}$$

$$\omega_1 = \omega\sqrt{1-\zeta^2} \rightarrow \text{pulsazione naturale smorzata}$$

$$T_1 = 2\pi/\omega_1 \rightarrow \text{periodo del sistema smorzato}$$



ECCITAZIONE ARMONICA

$$\frac{F}{m} = a_0 = \text{forza statica equivalente per unit\`a di massa}$$

$$F(t) = m \cdot a_0 \cdot \cos \Omega t$$

\Rightarrow eq. del moto diventa

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = a_0 \cdot \cos \Omega t$$

$$x(t) = a_0 M(\Omega, \omega, \xi) \cos(\Omega t - \rho) \quad (\text{A REGIME})$$

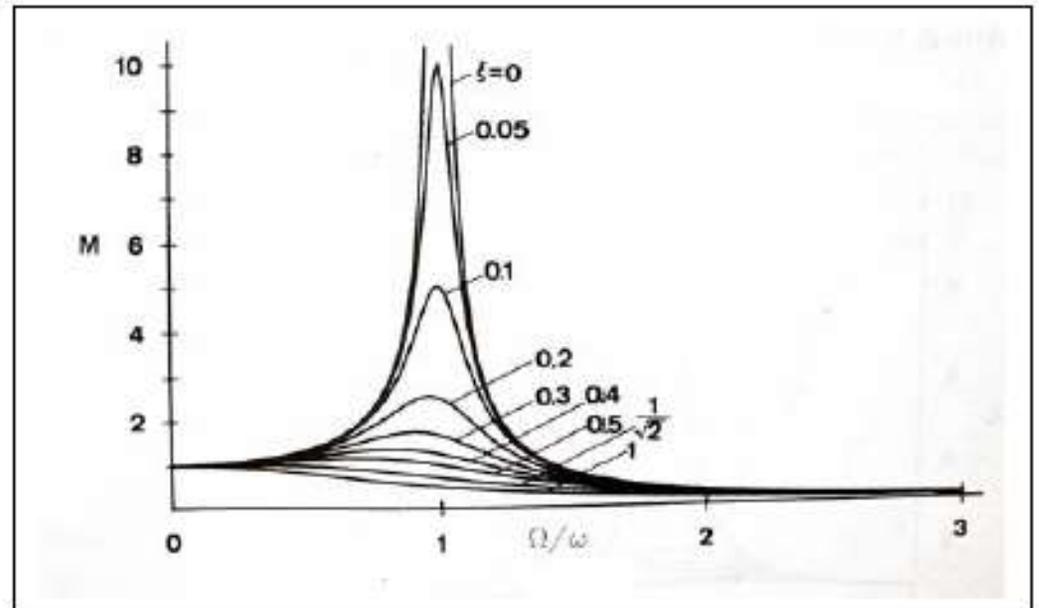
$$\rho = \arctg \frac{2\xi\omega\Omega}{\omega^2 - \Omega^2} \quad \text{angolo di sfasamento}$$

$$M(\Omega, \omega, \xi) = \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\Omega^2}} \quad \text{fattore di amplificazione}$$

In condizioni di risonanza

$$\Rightarrow \omega = \Omega$$

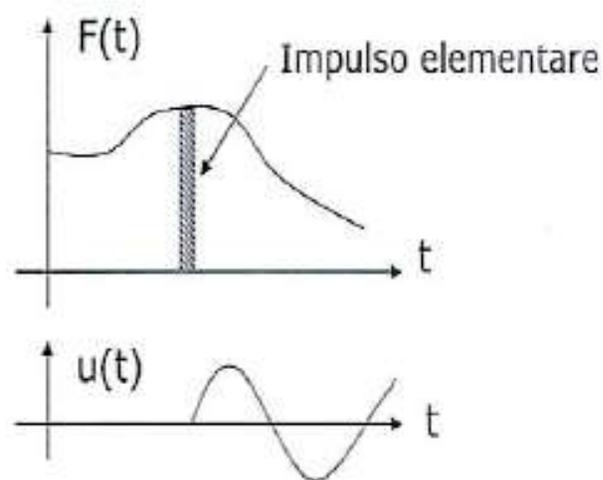
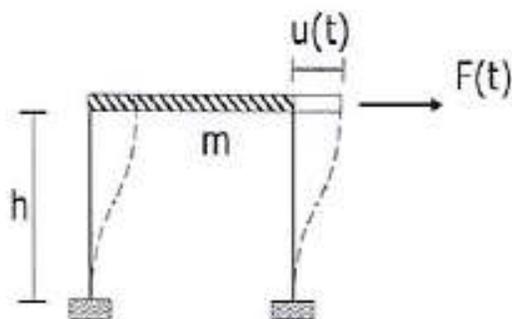
$$x_{\max} = \frac{a_0}{2\xi\omega^2} \quad (x_{\max} = a_0 \cdot M)$$



SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO

Nella valutazione dello spettro di risposta elastico si considera la risposta di un sistema elastico lineare ad un grado di libertà (SDOF)

S_d : rappresenta i max spostamenti della struttura sotto un sisma e si ottiene integrando le equazioni del moto per un prefissato accelerogramma.



$$\ddot{u}(t) + 2 \xi \omega \dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = F(t)/m$$

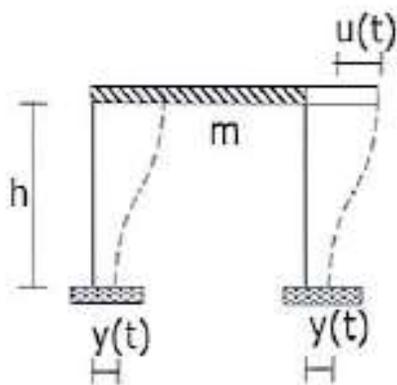
(vibrazioni smorzate forzate)

$$u(t) \cong \frac{1}{\omega} \int_0^t \frac{F(\tau)}{m} \exp[-\xi \omega (t-\tau)] \sin [\omega (t-\tau)] d\tau \cong \frac{1}{\omega} V(t, \xi)$$

vale per bassi
valori di ξ (1-5%)

$V(t)$: è una velocità = PSEUDO VELOCITA' (PSV)

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO



$$m (\ddot{u} + \ddot{y}) + c \dot{u} + k u = 0$$

$$\ddot{u}(t) + 2 \xi \omega \dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = -\ddot{y}(t)$$

$$u(t) \cong \frac{1}{\omega} V(t) \quad \text{legge del moto}$$

$$V(t) = - \int_0^t \ddot{y}(\tau) \exp[-\xi \omega (t-\tau)] \sin [\omega (t-\tau)] d\tau$$

$\ddot{y}(t)$: ACCELEROGRAMMA



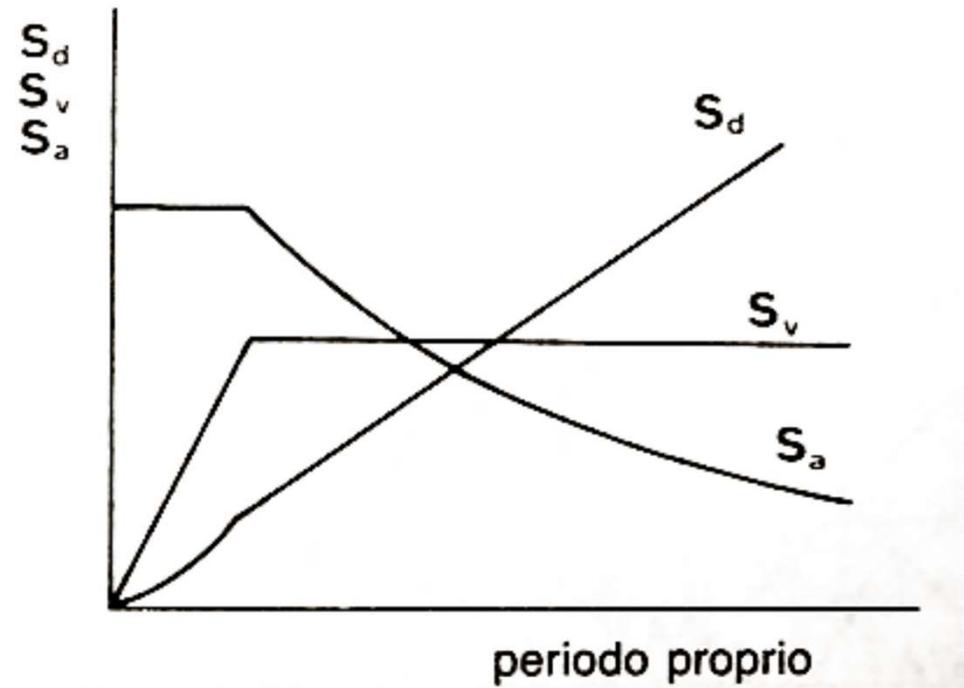
SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO

S_v , S_a : rappresentano le max pseudo - velocità e pseudo-accelerazione della struttura supposta in oscillazione libera non smorzata in corrispondenza del max spostamento strutturale, retta dell'equazione

$$\dot{u}_{\max} = \omega \cdot u_{\max} \quad \ddot{u}_{\max} = \omega^2 \cdot u_{\max}$$

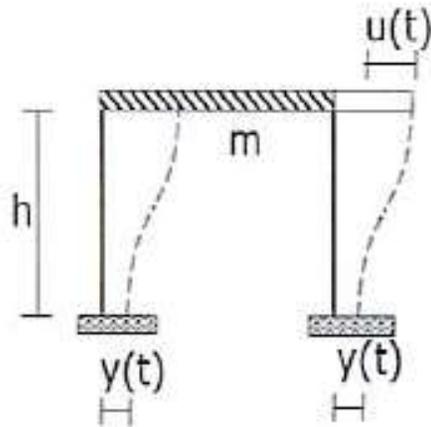
$$S_v = \omega \cdot S_d$$

$$S_a = \omega^2 \cdot S_d = \omega \cdot S_v = \frac{2\pi}{T} \cdot S_v$$



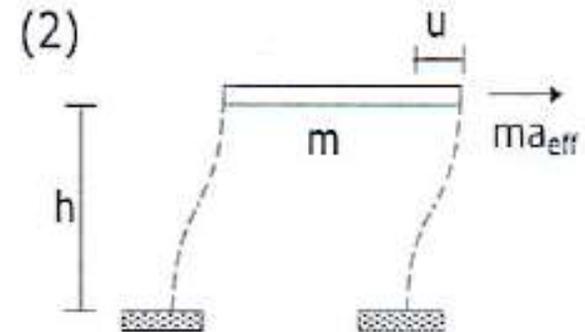
Per **Pseudo-velocità** e **Pseudo accelerazione** si intendono la max velocità e accelerazione che subisce il sistema una volta lasciato in oscillazione libera non smorzata a partire dalla configurazione di max spostamento sotto sisma

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO



Quale forza d'inerzia ($m a_{\text{eff}}$), agendo staticamente, provoca in ogni istante lo spostamento $u(t)$?

$$m a_{\text{eff}}(t) = k u(t)$$
$$F_{\text{inerzia}} = F_{\text{elastica}}$$

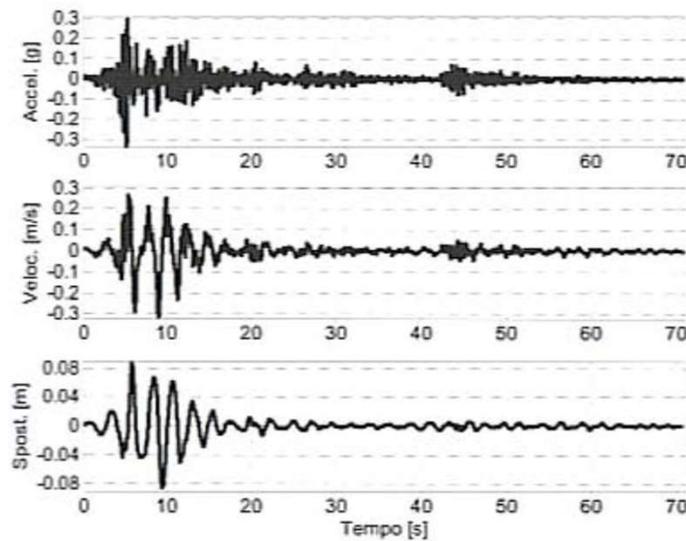


Le sollecitazioni della struttura sono legate al valore della forza elastica F_{elastica} .

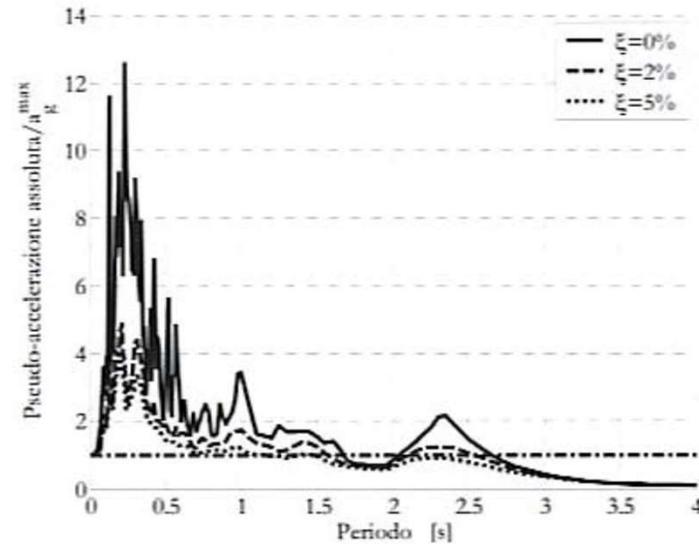
Attraverso la relazione (2) si trasforma il problema dinamico in un problema statico. Se conosco $a_{\text{eff max}}$ posso calcolare le massime sollecitazioni della struttura indotte dal sisma.

$$a_{\text{eff}}(t) = \frac{k}{m} u(t) = \omega^2 u(t) = \omega V(t)$$

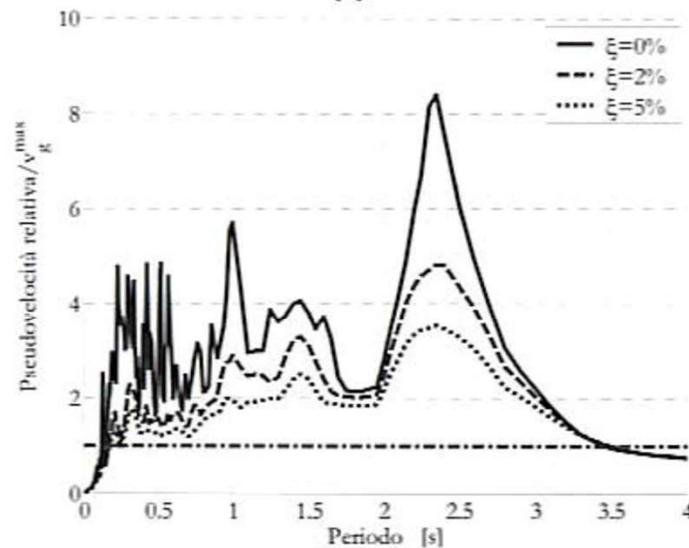
**L'accelerazione efficace max coincide quindi con la pseudo-
accelerazione**



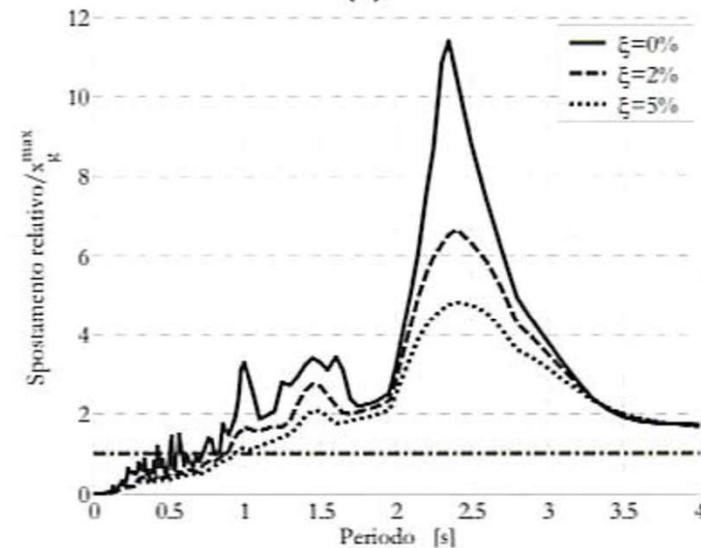
(a)



(b)

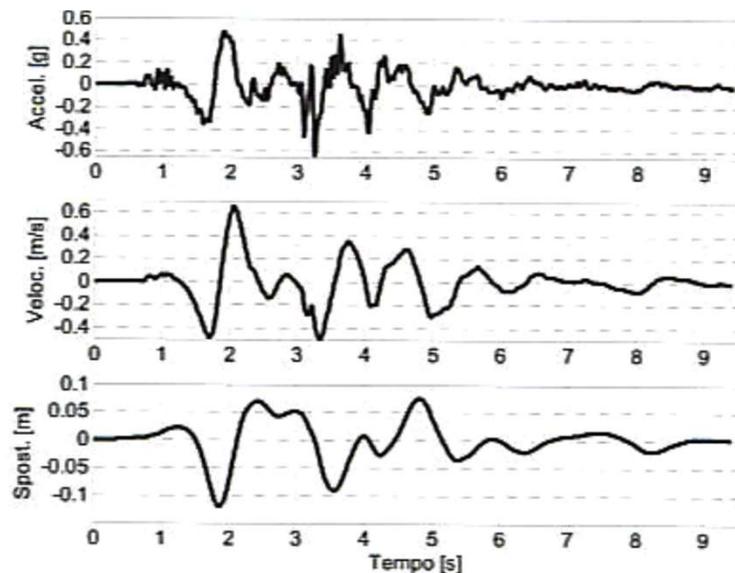


(c)

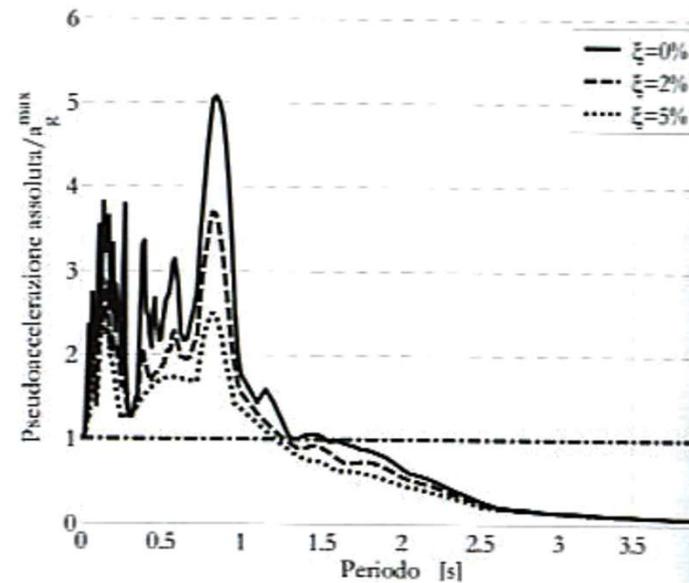


(d)

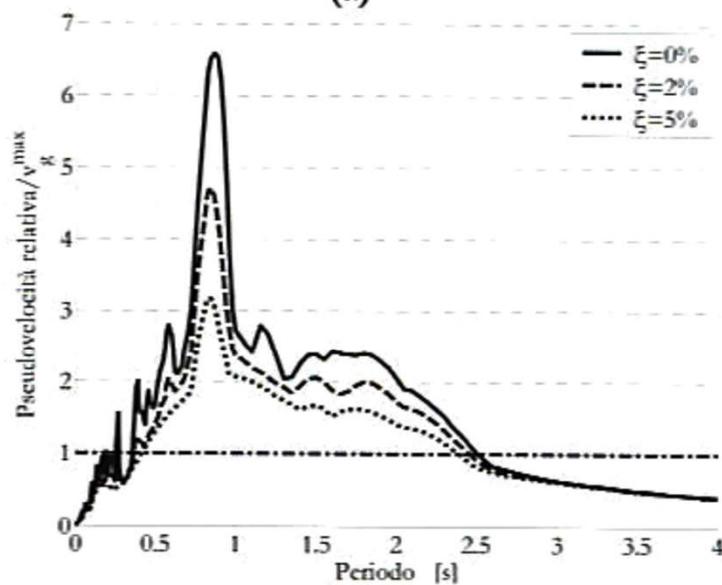
Terremoto Campano-Lucano registrato a Sturno (23-11-1980) componente est-ovest: (a) accelerazione ($a_g^{\max} = 0.3328g$), velocità ($v_g^{\max} = 0.3135$ m/s) e spostamento ($x_g^{\max} = 0.0864$ m) del terreno. Spettri di risposta elastici di: (b) pseudo-accelerazione; (c) pseudo-velocità; (d) spostamento



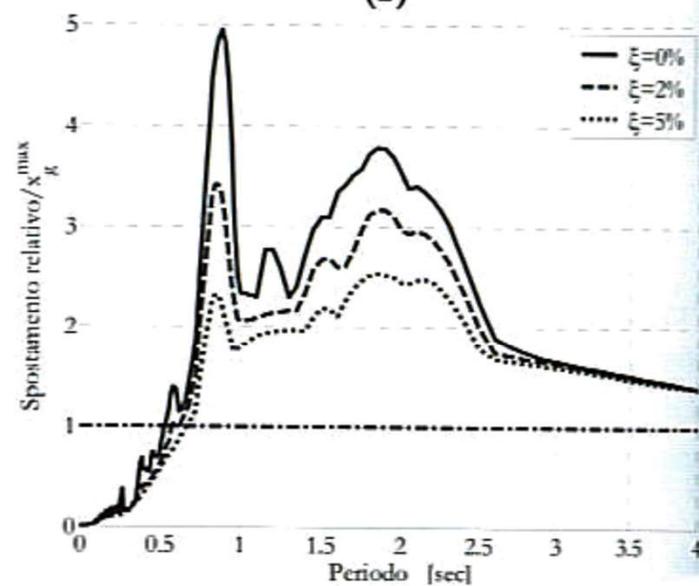
(a)



(b)



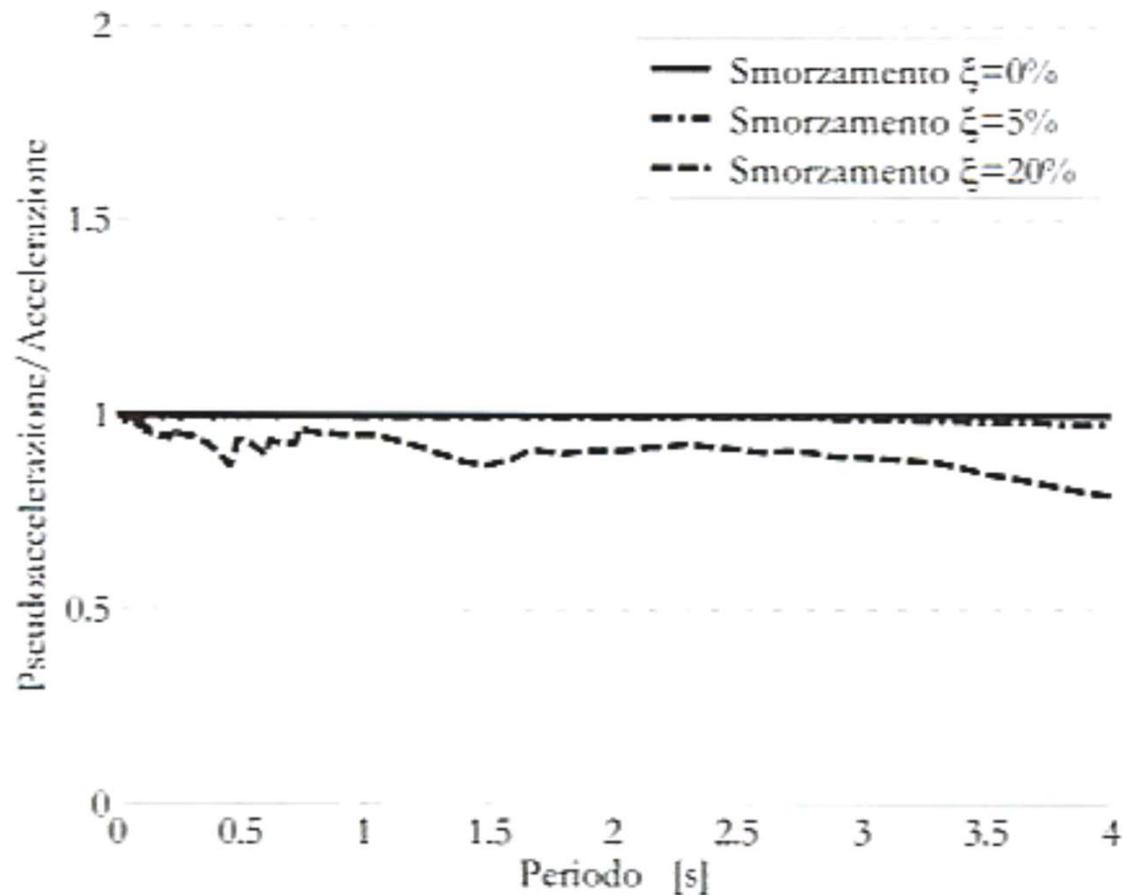
(c)



(d)

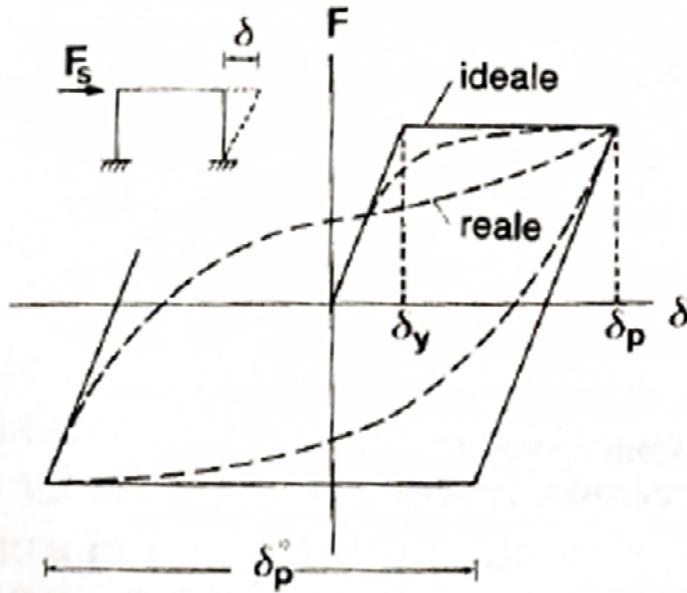
Terremoto del Friuli registrato a Gemona (15-9-1976) componente est-ovest:
 (a) accelerazione ($a_g^{\max} = 0.6351g$), velocità ($v_g^{\max} = 0.6478 \text{ m/s}$) e spostamento ($x_g^{\max} = 0.1198 \text{ m}$) del terreno. Spettri di risposta elastici di: (b) pseudo-accelerazione; (c) pseudo-velocità; (d) spostamento

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO



Rapporto fra gli spettri di pseudo-accelerazione ed accelerazione per l'accelerogramma di Sturno (23-11-1980) componente est-ovest

SPETTRO DI RISPOSTA ANELASTICO



Modello EPP (elastico-perfettamente plastico)

$\mu = \frac{\delta_p}{\delta_y}$ Duttilità strutturale da cui dipende la risposta della struttura

$\mu = 2$ (bassa)

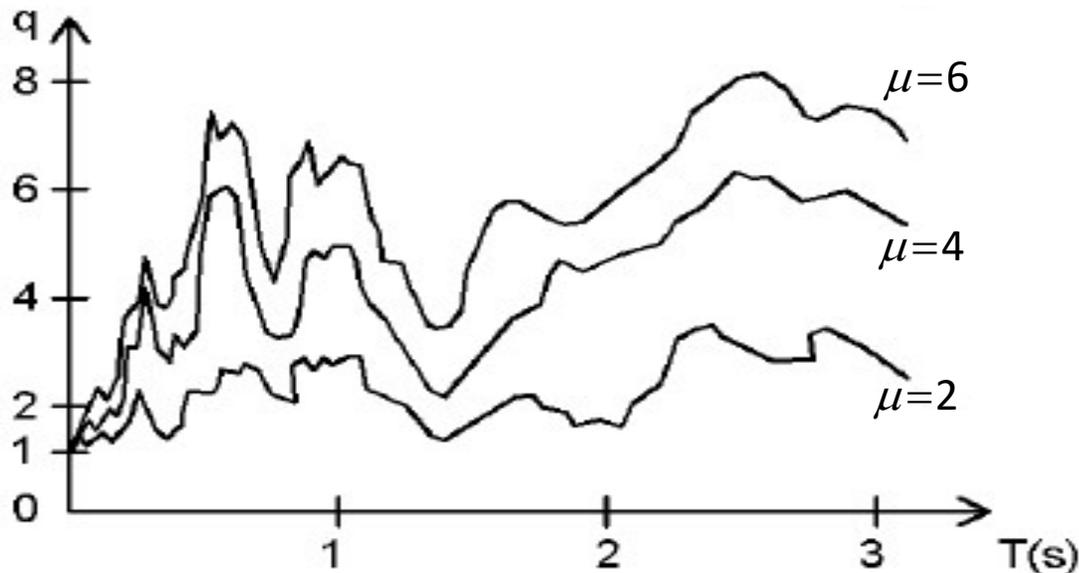
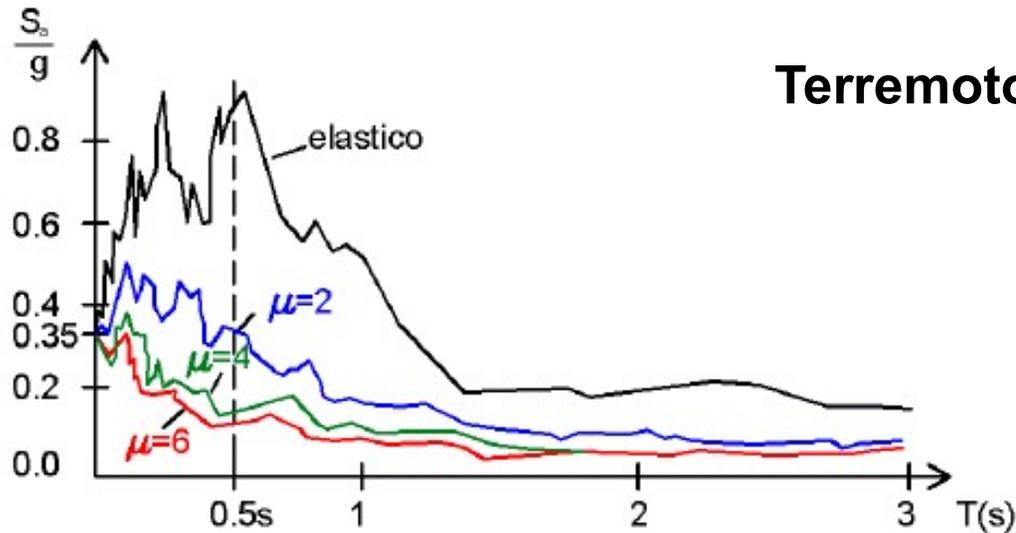
$\mu = 4$ (media)

$\mu = 6$ (alta)

$$q = \frac{S_{e,el}}{S_{e,pl}}$$

Fattore di struttura

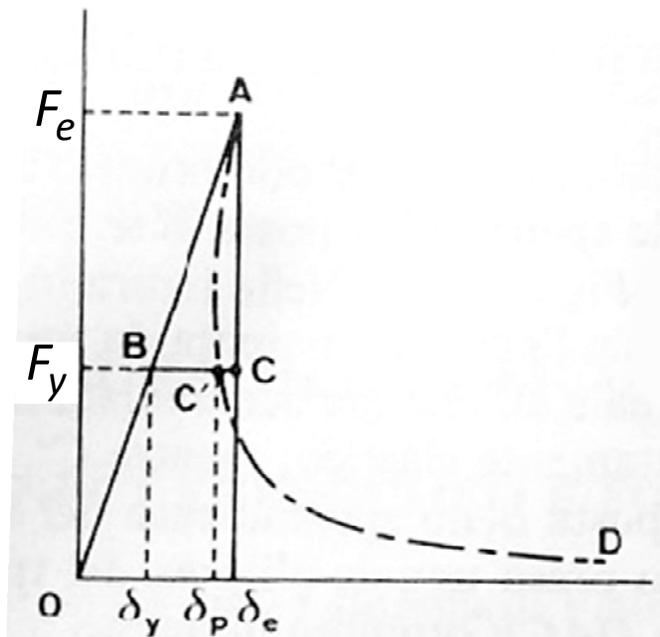
SPETTRO DI RISPOSTA ANELASTICO



**Andamento del
fattore di struttura
con il periodo**

FATTORE DI STRUTTURA

Ipotesi di Newmark sul Fattore di Struttura



Uguaglianza degli spostamenti: Per elevati periodi ($S_v = \text{cost.} \Rightarrow (T > T_C)$) un sistema elastico ed uno elasto-plastico, assoggettati allo stesso sisma presentano all'incirca lo stesso spostamento max al variare di F_y

Per similitudine dei triangoli

$$q = \frac{F_e}{F_y} = \frac{\text{f. per resistere in campo el.}}{\text{f. per resistere in campo el.-pl.}}$$

$$\Rightarrow q = \frac{F_e}{F_y} = \mu = \frac{\delta_p}{\delta_y} \cong \frac{\delta_e}{\delta_y}$$

FATTORE DI STRUTTURA

Ipotesi di Newmark sul Fattore di Struttura

Uguaglianza delle energie

Per piccoli periodi strutturali $\Rightarrow S_a = \text{cost}$. $T_B < T < T_C$ si osserva che al variare di F_y i due sistemi presentano uno spostamento tale da comprendere all'incirca la stessa energia assorbita sotto forma elastica o elasto-plastica.

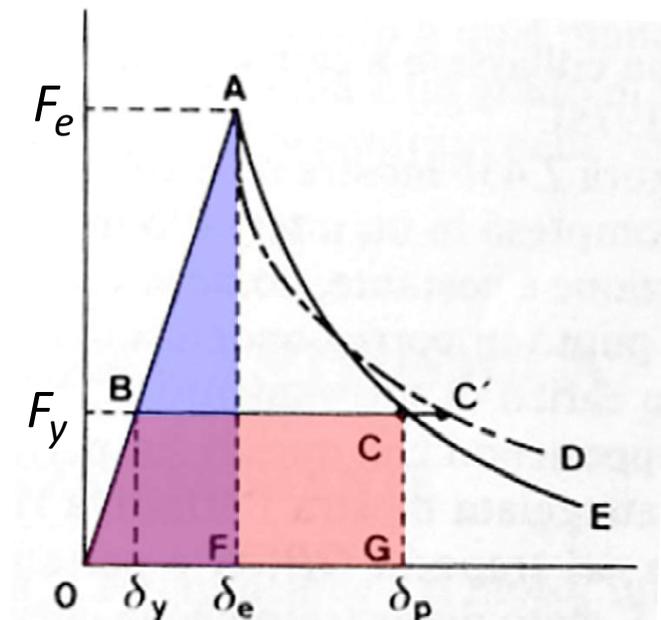
$$\Rightarrow \frac{1}{2} F_e \delta e \cong \frac{1}{2} F_y \delta y + F_y (\delta p - \delta y)$$

$$\text{con } \delta e = \frac{F_e}{F_y} \delta y$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} \frac{F_e^2}{F_y} \delta y = \frac{1}{2} F_y \delta y + F_y \delta y (\mu - 1)$$

$$\Rightarrow q^2 = \left(\frac{F_e}{F_y} \right)^2 = 1 + 2(\mu - 1)$$

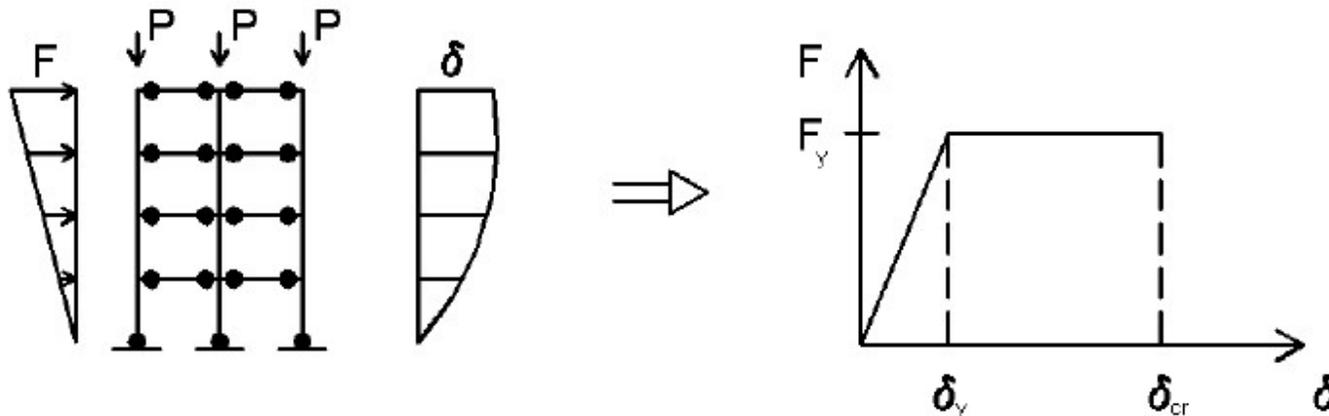
$$\Rightarrow \boxed{q = \sqrt{2\mu - 1}} \quad (\text{Newmark})$$



LIMITI USO FATTORE DI STRUTTURA

Possiamo comprendere i limiti di questa trattazione se si considera che:

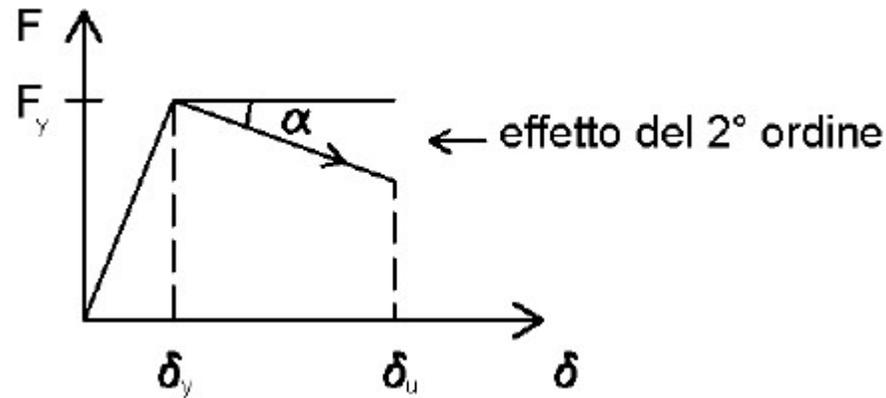
- il comportamento di una struttura anche ad un grado di libertà dipende dal comportamento meccanico della stessa: in presenza di **incrudimento del materiale** o di **degrado isteretico** il **fattore di struttura può cambiare in maniera significativa**;
- In presenza di un **sistema a più gradi di libertà** il fattore di struttura dipende
 - a) dal **numero di autovalori significativi** (*il primo modo di vibrare non sempre rappresenta il moto della struttura*)



- b) Risulta molto importante la **sequenza di formazione delle cerniere plastiche** (*se si formano contemporaneamente ci avviciniamo al sistema elasto-plastico*)

LIMITI USO FATTORE DI STRUTTURA

c) Possono risultare influenti gli **effetti del second'ordine**



d) il **comportamento ciclico della struttura può essere molto diverso da quello del materiale componente** e la sua previsione risulta molto complessa

e) la **tipologia strutturale influenza molto il fattore q**

Per superare questi limiti, nelle NTC e nell'EC8 sono possibili **metodi di analisi più sofisticati** basati su **analisi non lineari statiche** (push-over) o **dinamiche** (IDA)

Il **grosso vantaggio** offerto dall'uso del fattore di struttura è quello di permettere ancora l'uso di **un'analisi lineare statica** (analisi semplificata) o **dinamica lineare** (analisi multimodale)