

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

Progetto di edifici antisismici in c.a.

3 - Spettri di risposta elastica

Spoletto
11-13 novembre 2010
Aurelio Ghersi

In che modo valutiamo
l'effetto del sisma su una struttura?

Risposta sismica

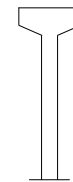
Schemi a un grado di libertà
in campo elastico

Struttura a un grado di libertà

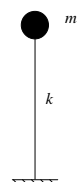
Serbatoio pensile



Foto



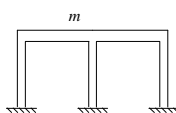
Disegno
schematico



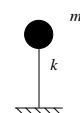
Modello
di calcolo

Struttura a un grado di libertà

Telaio monopiano

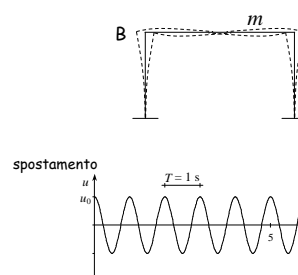


Disegno
schematico



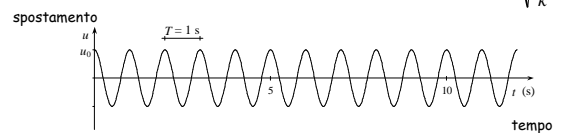
Modello di
calcolo

**Oscillazioni libere
telaio monopiano**



Il telaio oscilla con un
periodo ben preciso,
legato alla massa ed
anche alla rigidità del
telaio

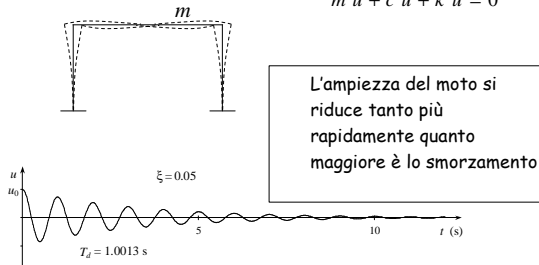
$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$



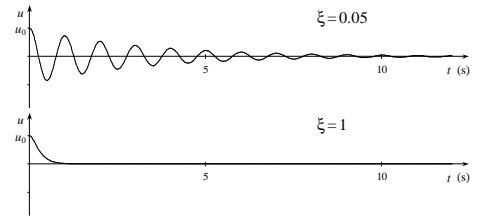
Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano

Equazione del moto:

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



Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano



Si indica col termine "smorzamento critico" quel valore per il quale il sistema raggiunge lo stato di quiete senza oscillare

Lo smorzamento viene di solito indicato come percentuale ξ dello smorzamento critico

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{k m}}$$

Smorzamento - negli edifici

Dipende da:

- Elementi non strutturali (tramezzi, rompagnì) molto
- Non linearità del materiale di meno

Edifici in cemento armato, con tramezzi in muratura:

- Si può assumere un valore di smorzamento percentuale $\xi = 0.05$

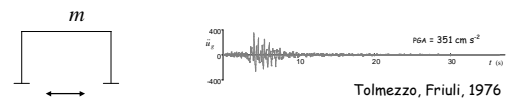
Edifici in acciaio, con tramezzatura leggera:

- È consigliabile usare un valore minore di $\xi = 0.05$

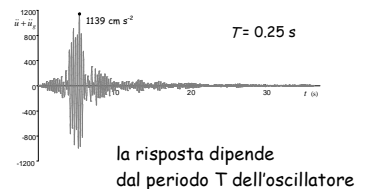
Edifici isolati alla base, con isolatori in gomma:

- Si può usare un valore maggiore di $\xi = 0.05$

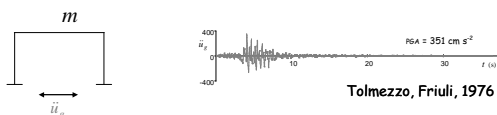
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



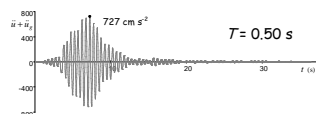
È possibile determinare numericamente la risposta ad un accelerogramma



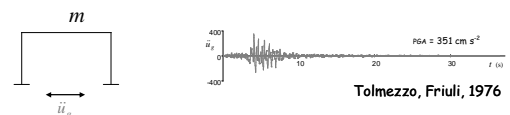
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



Cambiando il periodo dell'oscillatore, cambia la risposta



Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

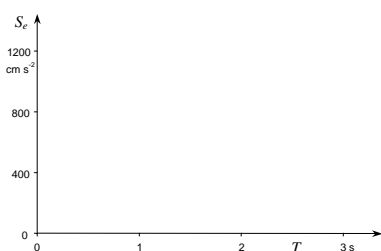


Cambiando il periodo dell'oscillatore, cambia la risposta



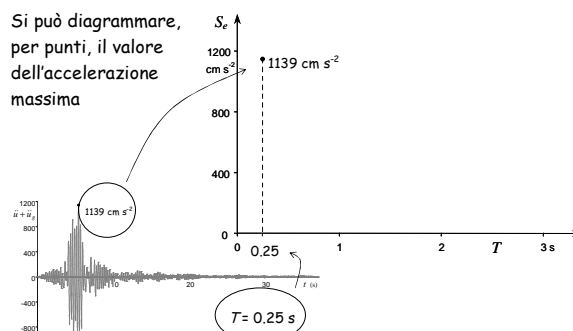
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



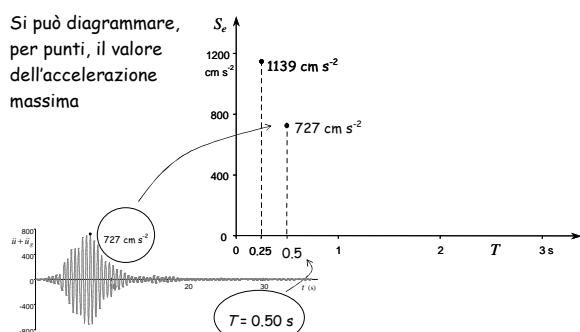
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



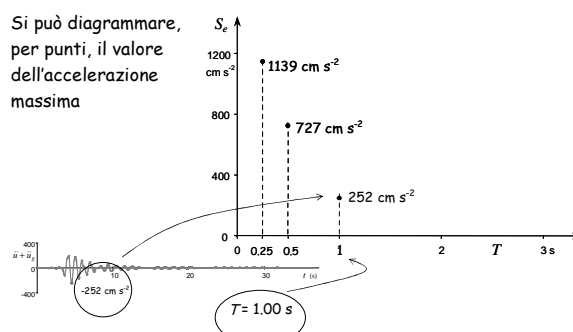
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



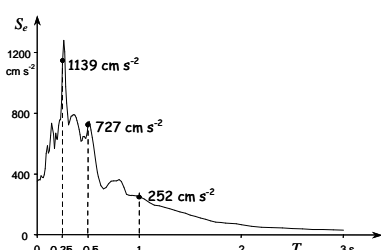
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



Oscillazioni forzate Spettro di risposta

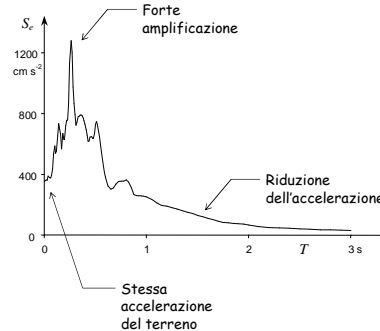
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



Il diagramma ottenuto unendo i vari punti viene detto "spettro di risposta" (in termini di accelerazione)

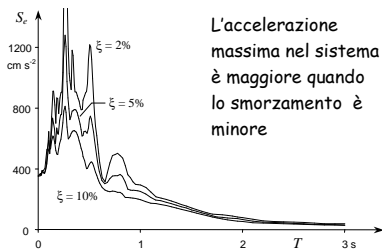
Oscillazioni forzate Spettro di risposta (accelerazione)

L'andamento dell'accelerazione massima in funzione del periodo proprio ha un andamento ben preciso



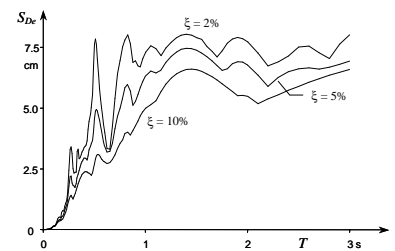
Oscillazioni forzate Spettro di risposta (accelerazione)

Al variare dello smorzamento si ottengono diverse curve



Oscillazioni forzate Spettro di risposta (spostamento)

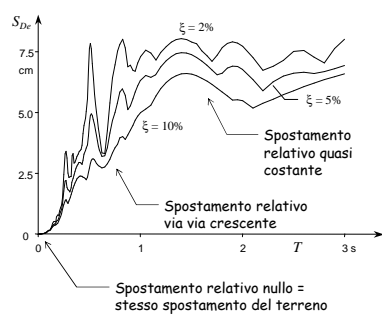
Allo stesso modo si può diagrammare lo spostamento relativo massimo in funzione del periodo



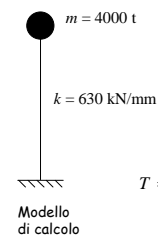
Il diagramma così ottenuto viene detto "spettro di risposta" (in termini di spostamento)

Oscillazioni forzate Spettro di risposta (spostamento)

Si noti l'andamento dello spostamento relativo massimo in funzione del periodo proprio



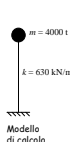
A cosa servono gli spettri?



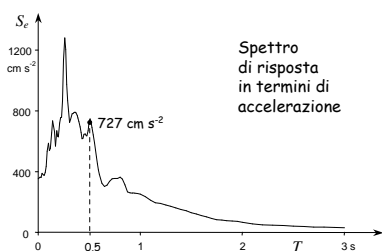
Conoscendo massa e rigidità possiamo determinare il periodo proprio

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{4000 \times 10^3}{630 \times 10^6}} = 0.5 \text{ s}$$

A cosa servono gli spettri?

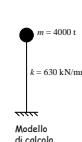


$$T = 0.5 \text{ s}$$

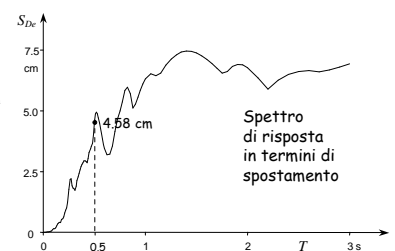


Noto il periodo proprio, possiamo leggere dallo spettro l'accelerazione assoluta massima $a_{\max} = 7.27 \text{ m/s}^2 = 0.74 \text{ g}$

A cosa servono gli spettri?

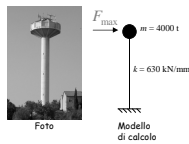


$$T = 0.5 \text{ s}$$



Noto il periodo proprio, possiamo leggere dallo spettro l'accelerazione assoluta massima o lo spostamento relativo massimo $a_{\max} = 7.27 \text{ m/s}^2 = 0.74 \text{ g}$
 $u_{\max} = 4.58 \text{ cm}$

A cosa servono gli spettri?



$$T = 0.5 \text{ s}$$

Ma dall'accelerazione possiamo ricavare anche la massima forza d'inerzia

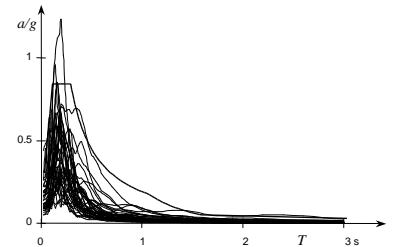
$$F_{\max} = m a_{\max} = 4000 \times 7.27 = 29000 \text{ kN}$$

e quindi le massime sollecitazioni nella struttura

Noto il periodo proprio, possiamo leggere dallo spettro l'accelerazione assoluta massima $a_{\max} = 7.27 \text{ m s}^{-2} = 0.74 \text{ g}$ o lo spostamento relativo massimo $u_{\max} = 4.58 \text{ cm}$

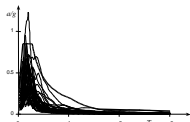
Spettri di risposta

L'analisi di oscillatori semplici può essere ripetuta per diversi accelerogrammi (con un assegnato smorzamento)

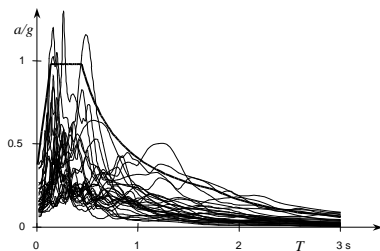


Si può quindi definire una curva che involupa tutti gli spettri di risposta, o che viene superata solo occasionalmente

Spettri di risposta

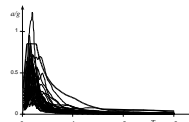


In zone differenti e su terreni differenti si otterranno risultati diversi

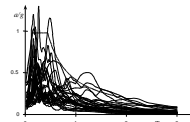


Si può quindi definire una curva che involupa tutti gli spettri di risposta, o che viene superata solo occasionalmente

Spettri di risposta



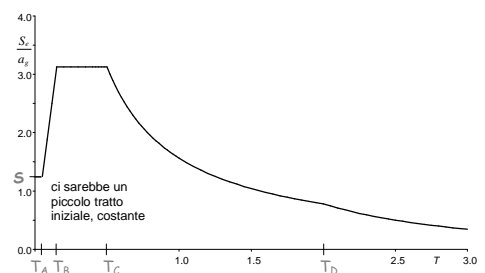
In zone differenti e su terreni differenti si otterranno risultati diversi



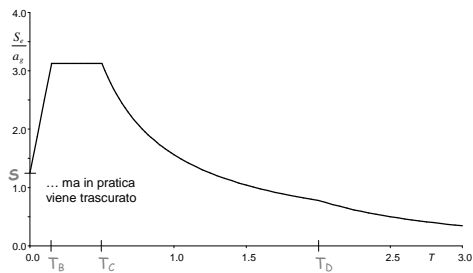
La normativa fornisce quindi spettri di risposta differenziati in funzione delle caratteristiche del suolo e della zona in cui è ubicata la struttura

Spettri di risposta elastica NTC 08 (D.M. 14/1/2008)

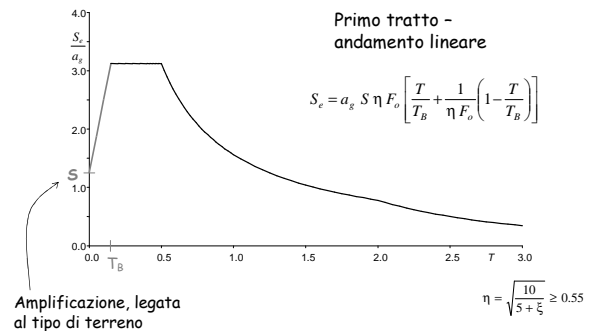
Forma generale degli spettri di risposta elastica



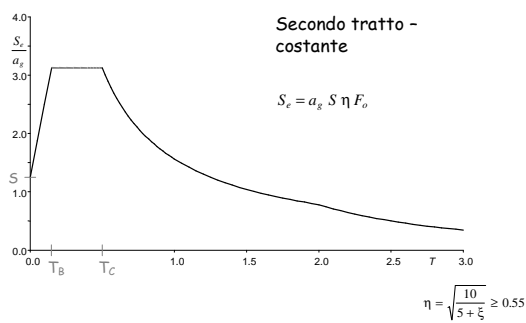
Forma generale degli spettri di risposta elastica



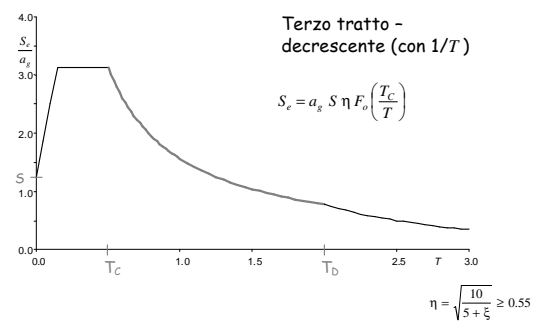
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



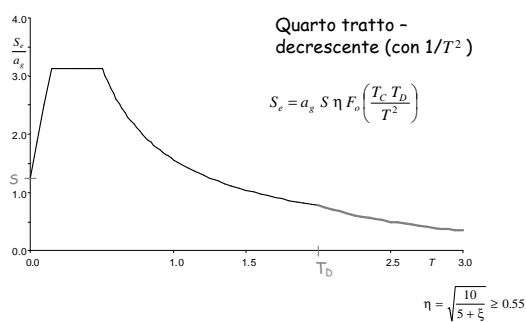
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali

Per definire uno spettro di risposta elastico
occorre indicare i parametri

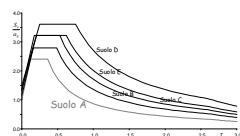
- a_g accelerazione del terreno (su roccia)
- S amplificazione dovuta al tipo di terreno
- T_B T_C T_D periodi che separano i diversi tratti
- ξ smorzamento della struttura

S T_B T_C T_D si ricavano a partire dai tre parametri

$$a_g \quad F_o \quad T_C^*$$

(che sono legati al sito e al periodo di ritorno T_r)
e dipendono anche dalle caratteristiche del terreno

Classificazione dei suoli e spettri di risposta



Suolo A

Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi

$$V_{S30} > 800 \text{ m/s}$$

$$S = 1 \quad T_B = 0.15 \text{ s} \quad T_C = 0.4 \text{ s} \quad T_D = 2.5 \text{ s}$$

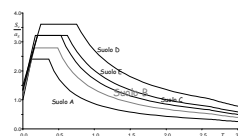
Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

Velocità media di propagazione delle onde di taglio nei 30 m superiori del suolo

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum V_{Si}}$$

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno



Suolo B

Depositi di sabbie e ghiaie molto addensate o argille molto consistenti

$$360 \text{ m/s} < V_{S30} < 800 \text{ m/s}$$

Resistenza penetrometrica $N_{SPT} > 50$

Coesione non drenata $c_u > 250 \text{ kPa}$

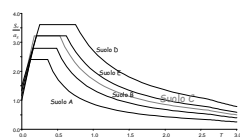
$$S = 1.20 \quad T_B = 0.15 \text{ s} \quad T_C = 0.5 \text{ s}$$

Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

Velocità media di propagazione delle onde di taglio nei 30 m superiori del suolo

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno



Suolo C

Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza

$$180 \text{ m/s} < V_{S30} < 360 \text{ m/s}$$

Resistenza penetrometrica $15 < N_{SPT} < 50$

Coesione non drenata $70 < c_u < 250 \text{ kPa}$

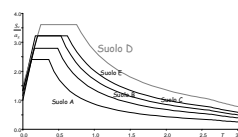
$$S = 1.30 \quad T_B = 0.15 \text{ s} \quad T_C = 0.5 \text{ s}$$

Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

Velocità media di propagazione delle onde di taglio nei 30 m superiori del suolo

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno



Suolo D

Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti

$$V_{S30} < 180 \text{ m/s}$$

Resistenza penetrometrica $N_{SPT} < 15$

Coesione non drenata $c_u < 70 \text{ kPa}$

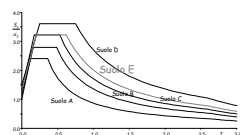
$$S = 1.45 \quad T_B = 0.25 \text{ s} \quad T_C = 0.8 \text{ s}$$

Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

Velocità media di propagazione delle onde di taglio nei 30 m superiori del suolo

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno



Suolo E

Strati superficiali alluvionali, di caratteristiche simili ai tipi C e D e spessore tra 5 e 20 m, su un substrato più rigido con $V_{S30} > 800 \text{ m/s}$

$$S = 1.30 \quad T_B = 0.2 \text{ s} \quad T_C = 0.6 \text{ s}$$

Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

Velocità media di propagazione delle onde di taglio nei 30 m superiori del suolo

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno

Suolo S1

Depositi con strato di almeno 10 m di argille di bassa consistenza ed elevato indice di plasticità e contenuto di acqua

$$V_{S30} < 100 \text{ m/s}$$

Coesione non drenata $10 < c_u < 20 \text{ kPa}$

Suolo S2

Depositi di terreni soggetti a liquefazione

Per questi tipi di terreno occorrono studi speciali

Esempio

Dall'alto:

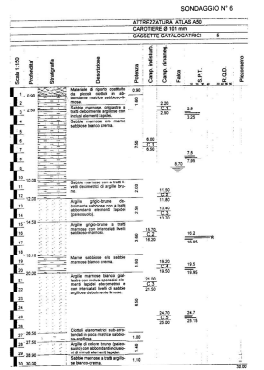
12 m - sabbie marnose
 $N_{SPT} = 26$

6.1 m - argille grigio-brune
 $N_{SPT} = 47$

1.9 m - marne sabbiose
 $N_{SPT} = 16$

6.5 m - argille marnose
 $N_{SPT} = 18$

3.5 m - ciottoli, argille brune
 $N_{SPT} = 40$



Esempio

Dall'alto:

12 m - sabbie marnose
 $N_{SPT} = 26$

6.1 m - argille grigio-brune
 $N_{SPT} = 47$

1.9 m - marne sabbiose
 $N_{SPT} = 16$

6.5 m - argille marnose
 $N_{SPT} = 18$

3.5 m - ciottoli, argille brune
 $N_{SPT} = 40$

$$N_{SPT} = \frac{30}{\frac{12}{26} + \frac{6.1}{47} + \frac{1.9}{16} + \frac{6.5}{18} + \frac{3.5}{40}}$$

$$N_{SPT} = 25.9$$

Si può considerare
suolo di tipo C, perché
 $15 < N_{SPT} < 50$

NTC08, punto 3.2.2

Classificazione sismica oggi (NTC 08)

La normativa fornisce a_g, F_o, T_c^*

A che servono?

- consentono di definire lo spettro di risposta

I valori sono forniti per ogni punto e per qualsiasi
periodo di ritorno

Serve veramente tutta questa precisione?

Determinazione dei dati sismici

Periodo di riferimento V_R

EdiLus-MS
Mappe Sismiche

indirizzo classe vita nominale

EdiLus-MS è il software ACCA per individuare la pericolosità sismica di tutte le località italiane direttamente dalla mappa. Sono fornito e/o spostato il segnale sul sito che ti interessa e ottieni direttamente tutti i parametri di pericolosità sismica.

via di Villa Redenta, Spoleto (PG)

Cerca

Periodo di riferimento per l'azione sismica V_R

Parametri di pericolosità Sismica

"Stato Limite"	T_r [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_c^* [s]
Operatività	30	0.071	2.422	0.270
Danno	50	0.089	2.416	0.280
Salvaguardia Vita	475	0.222	2.385	0.320
Prevenzione Collasso	975	0.284	2.392	0.332

ACCA SOFTWARE
ACCA software S.p.A.
il software per l'edilizia
Tel.: 0827969.504 - Fax: 0827969.12.35
P. Via S. Vito 104/107 - Email: info@acca.it

Determinazione dei dati sismici

Periodo di riferimento V_R

EdiLus-MS
Mappe Sismiche

indirizzo classe vita nominale

EdiLus-MS è il software ACCA per individuare la pericolosità sismica di tutte le località italiane direttamente dalla mappa. Sono fornito e/o spostato il segnale sul sito che ti interessa e ottieni direttamente tutti i parametri di pericolosità sismica.

via di Villa Redenta, Spoleto (PG)

Cerca

Periodo di riferimento per l'azione sismica V_R

Dati corrispondenti

Stato limite e periodo di ritorno

Parametri di pericolosità Sismica

"Stato Limite"	T_r [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_c^* [s]
Operatività	30	0.071	2.422	0.270
Danno	50	0.089	2.416	0.280
Salvaguardia Vita	475	0.222	2.385	0.320
Prevenzione Collasso	975	0.284	2.392	0.332

ACCA SOFTWARE
ACCA software S.p.A.
il software per l'edilizia
Tel.: 0827969.504 - Fax: 0827969.12.35
P. Via S. Vito 104/107 - Email: info@acca.it

Spettri di risposta NTC08

S - amplificazione dovuta al terreno

- Dipende da
- S_S - Categoria di sottosuolo
- S_T - Categoria topografica

$$S = S_S \times S_T$$

Intervengono
anche F_o e a_g

Categoria sottosuolo	S_S
A	1.00
B	$1.00 \leq 1.4 - 0.4 F_o \frac{a_g}{g} \leq 1.20$
C	$1.00 \leq 1.7 - 0.6 F_o \frac{a_g}{g} \leq 1.50$
D	$0.90 \leq 2.4 - 1.5 F_o \frac{a_g}{g} \leq 1.80$
E	$1.00 \leq 2.0 - 1.1 F_o \frac{a_g}{g} \leq 1.60$

Vedere foglio
Excel "Spettri"
per applicazioni

Spettri di risposta NTC08 S - amplificazione dovuta al terreno

- Dipende da

S_S - Categoria di sottosuolo

S_T - Categoria topografica

$$S = S_S \times S_T$$

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	S_T
T1	---	1.0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1.2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1.2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1.4

Spettri di risposta NTC08 T_B, T_C, T_D - periodi

- T_C dipende dal suolo e da T_C^*

$$T_C = C_C \times T_C^*$$

Categoria sottosuolo	C_C
A	1.00
B	$1.10 (T_C^*)^{-0.20}$
C	$1.05 (T_C^*)^{-0.33}$
D	$1.25 (T_C^*)^{-0.50}$
E	$1.15 (T_C^*)^{-0.40}$

Vedere foglio Excel "Spettri" per applicazioni

Spettri di risposta NTC08 T_B, T_C, T_D - periodi

- T_C dipende dal suolo e da T_C^*

- T_B dipende da T_C $T_B = T_C / 3$

- T_D dipende da a_g $T_D = 4.0 \times \frac{a_g}{g} + 1.6$

Vedere foglio Excel "Spettri" per applicazioni

Spettri di risposta NTC 08 Esempio: Spoleto, Villa Redenta

Vedere foglio Excel "Spettri" per applicazioni

Per $T_r = 475$ anni: $a_g = 0.222 \text{ g}$ $F_o = 2.385$ $T_C^* = 0.320 \text{ s}$

Per $T_r = 50$ anni: $a_g = 0.071 \text{ g}$ $F_o = 2.422$ $T_C^* = 0.270 \text{ s}$

Valori che definiscono lo spettro di risposta elastico
Accelerazioni orizzontali, terremoto con $T_r = 475$ anni (SLV) secondo NTC 08

Categoria suolo	PGA su roccia a_g	S	$S a_g$	F_o	T_B	T_C	T_D
A	0.222 g	1.000	0.222 g	2.385	0.107 s	0.320 s	2.488 s
B		1.188	0.264 g		0.147 s	0.442 s	2.488 s
C		1.382	0.307 g		0.163 s	0.489 s	2.488 s
D		1.606	0.356 g		0.236 s	0.707 s	2.488 s
E		1.418	0.315 g		0.193 s	0.580 s	2.488 s

Spettri di risposta NTC 08 Esempio: Spoleto, Villa Redenta

Vedere foglio Excel "Spettri" per applicazioni

Per $T_r = 475$ anni: $a_g = 0.222 \text{ g}$ $F_o = 2.385$ $T_C^* = 0.320 \text{ s}$

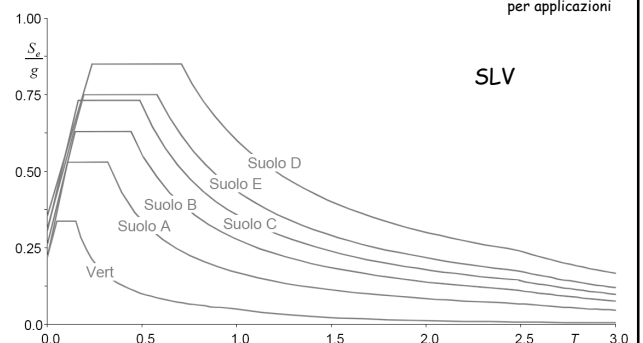
Per $T_r = 50$ anni: $a_g = 0.071 \text{ g}$ $F_o = 2.422$ $T_C^* = 0.270 \text{ s}$

Valori che definiscono lo spettro di risposta elastico
Accelerazioni orizzontali, terremoto con $T_r = 50$ anni (SLS) secondo NTC 08

Categoria suolo	PGA su roccia a_g	S	$S a_g$	F_o	T_B	T_C	T_D
A	0.071 g	1.000	0.071 g	2.422	0.090 s	0.270 s	1.884 s
B		1.200	0.085 g		0.129 s	0.386 s	1.884 s
C		1.500	0.107 g		0.146 s	0.437 s	1.884 s
D		1.800	0.128 g		0.217 s	0.650 s	1.884 s
E		1.600	0.114 g		0.175 s	0.524 s	1.884 s

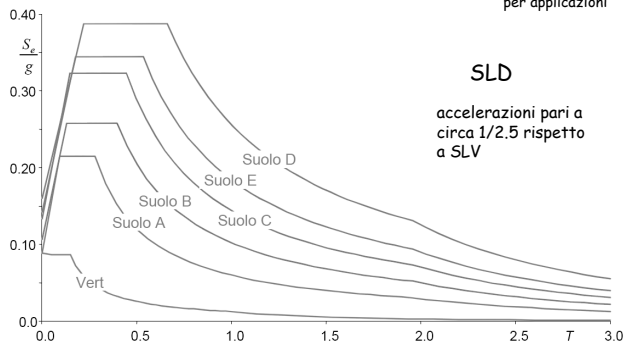
Spettri di risposta NTC 08 Esempio: Spoleto, Villa Redenta

Vedere foglio Excel "Spettri" per applicazioni



Spettri di risposta NTC 08 Esempio: Spoleto, Villa Redenta

Vedere foglio
Excel "Spettri"
per applicazioni



Spettri di risposta NTC08 accelerazioni verticali

- Lo spettro ha la stessa forma, cambiano i parametri

Categoria di sottosuolo	S_s	T_B	T_C	T_D
A, B, C, D, E	1.0	0.05	0.15	1.00

$$F_v = 1,35 \cdot F_0 \cdot \left(\frac{a_g}{g} \right)^{0,5}$$

NTC08, punto 3.2.3.23.2