

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 Gheresi

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

Risposta sismica

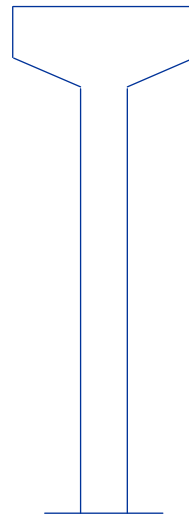
Schemi a un grado di libertà
in campo elastico

Struttura a un grado di libertà

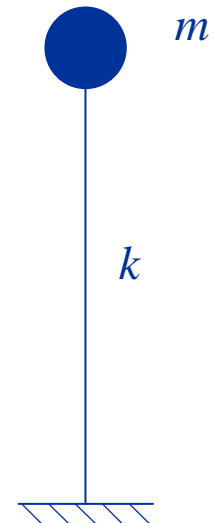
Serbatoio pensile



Foto



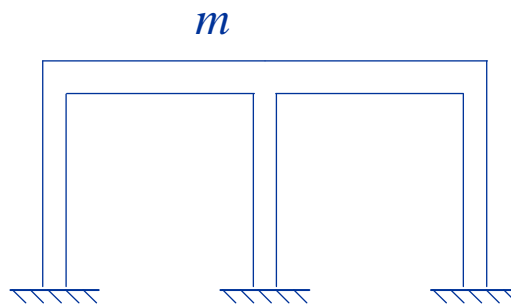
Disegno
schematico



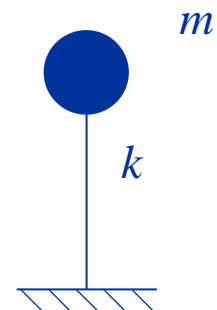
Modello
di calcolo

Struttura a un grado di libertà

Telaio monopiano



Disegno
schematico

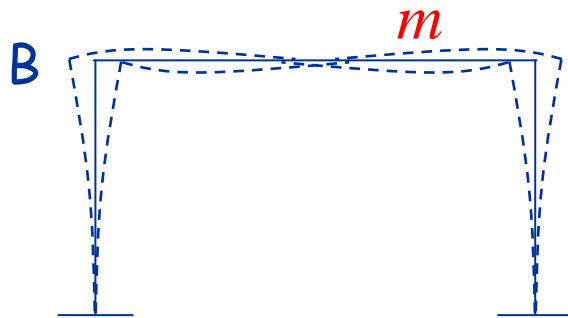


Modello di
calcolo

Oscillazioni libere

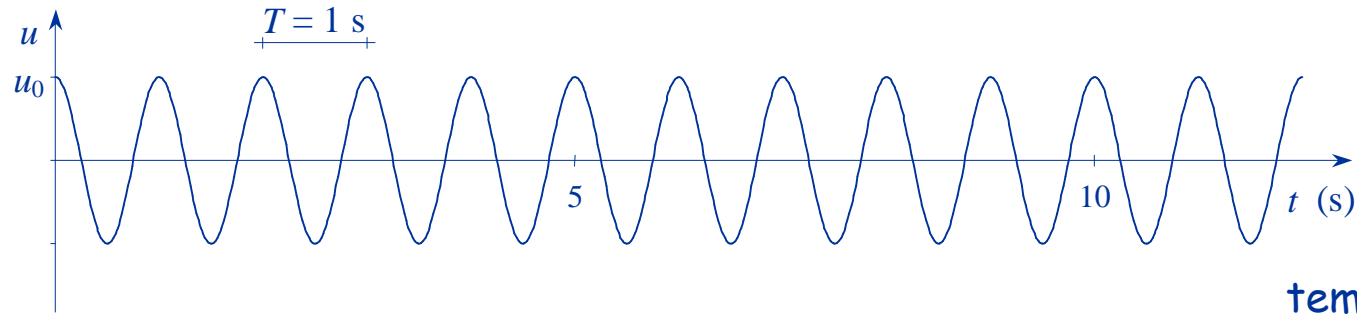
telaio monopiano

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



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

spostamento



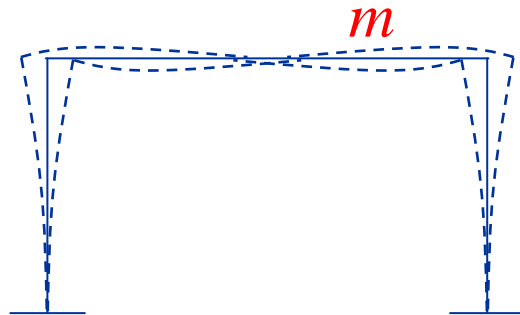
tempo

Oscillazioni libere con smorzamento

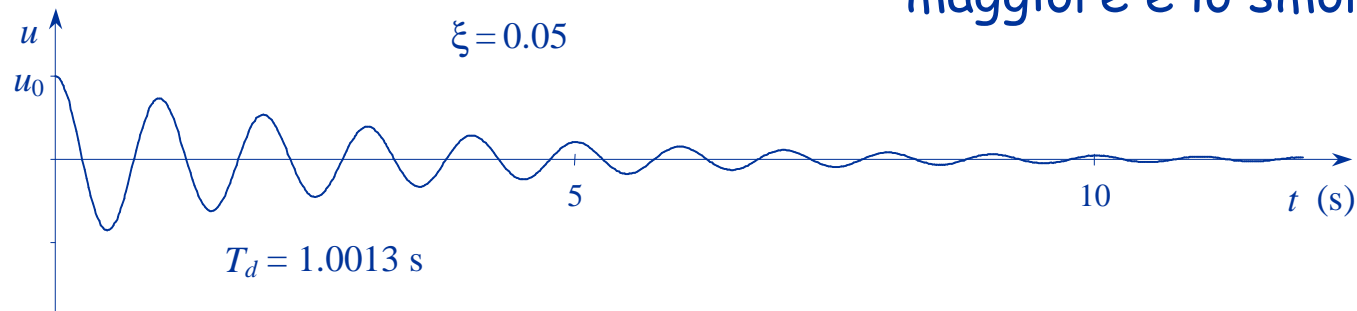
telaio monopiano

Equazione del moto:

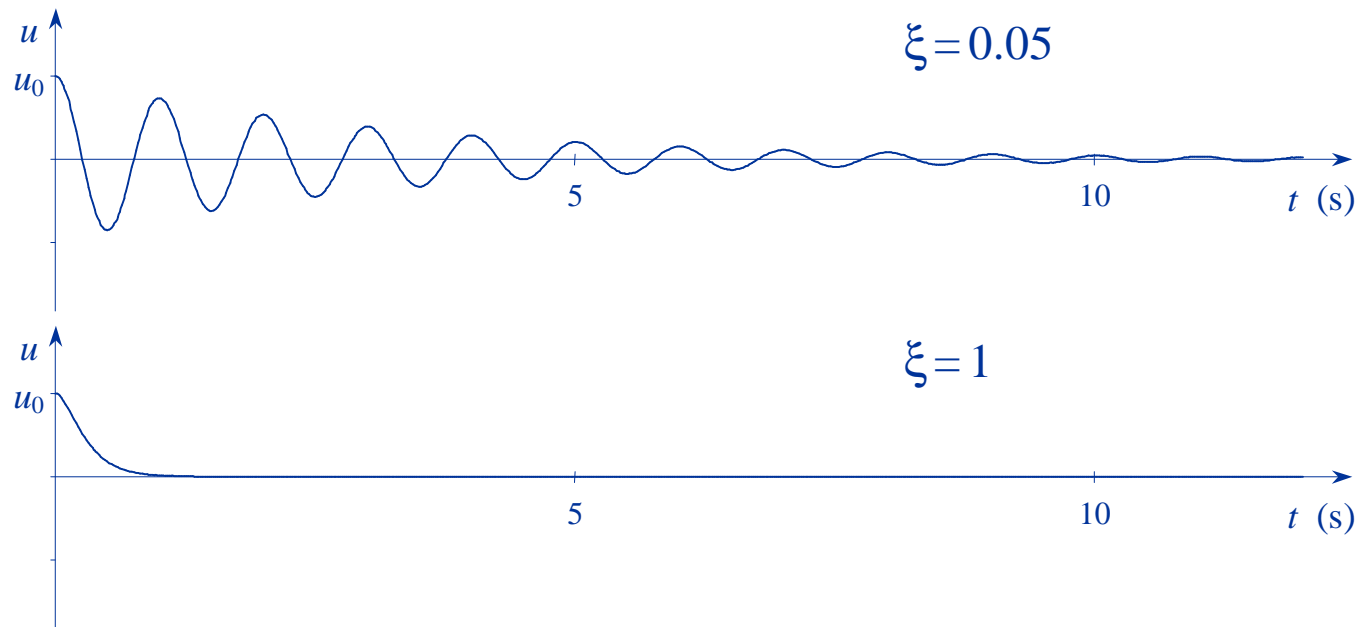
$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = 0$$



L'ampiezza del moto si riduce tanto più rapidamente quanto maggiore è lo smorzamento



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, tompagni) molto
- Non linearità del materiale di meno

Edifici in cemento armato, con tramezzi in muratura:

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

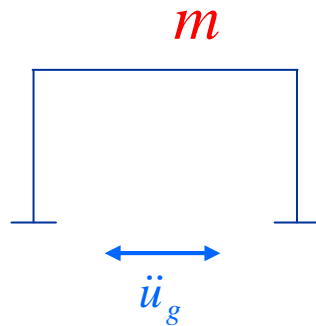
Edifici in acciaio, con tramezzatura leggera:

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

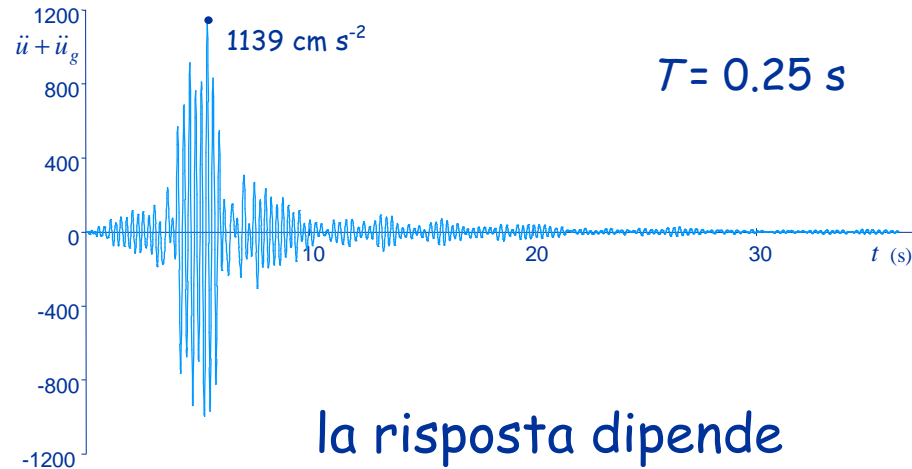
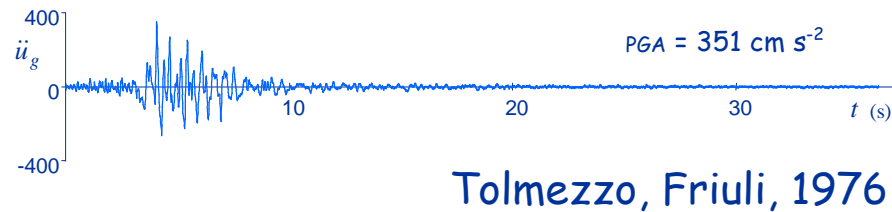
Edifici isolati alla base, con isolatori in gomma:

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

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

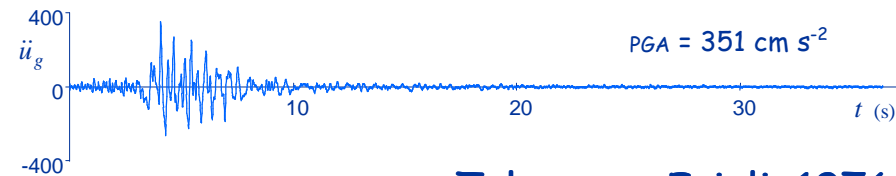
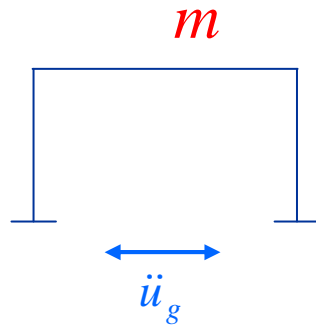


È possibile
determinare
numericamente
la risposta ad un
accelerogramma

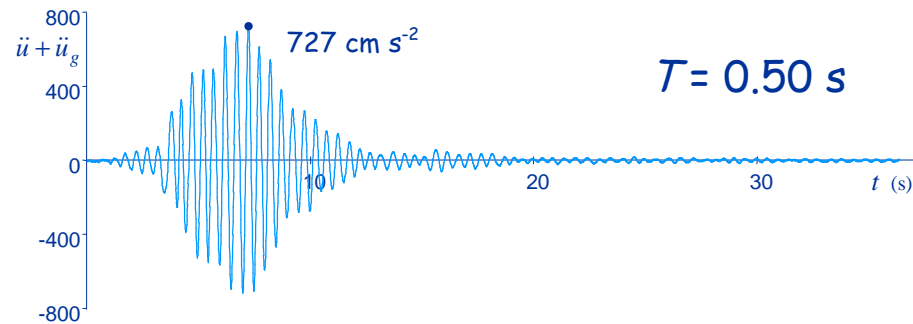


la risposta dipende
dal periodo T dell'oscillatore

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



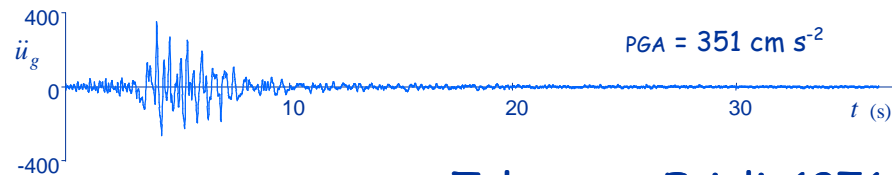
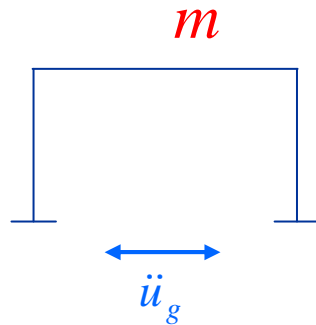
Tolmezzo, Friuli, 1976



Cambiando il periodo
dell'oscillatore,
cambia la risposta

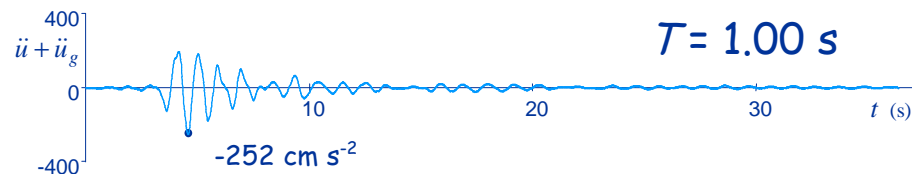
Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)



Tolmezzo, Friuli, 1976

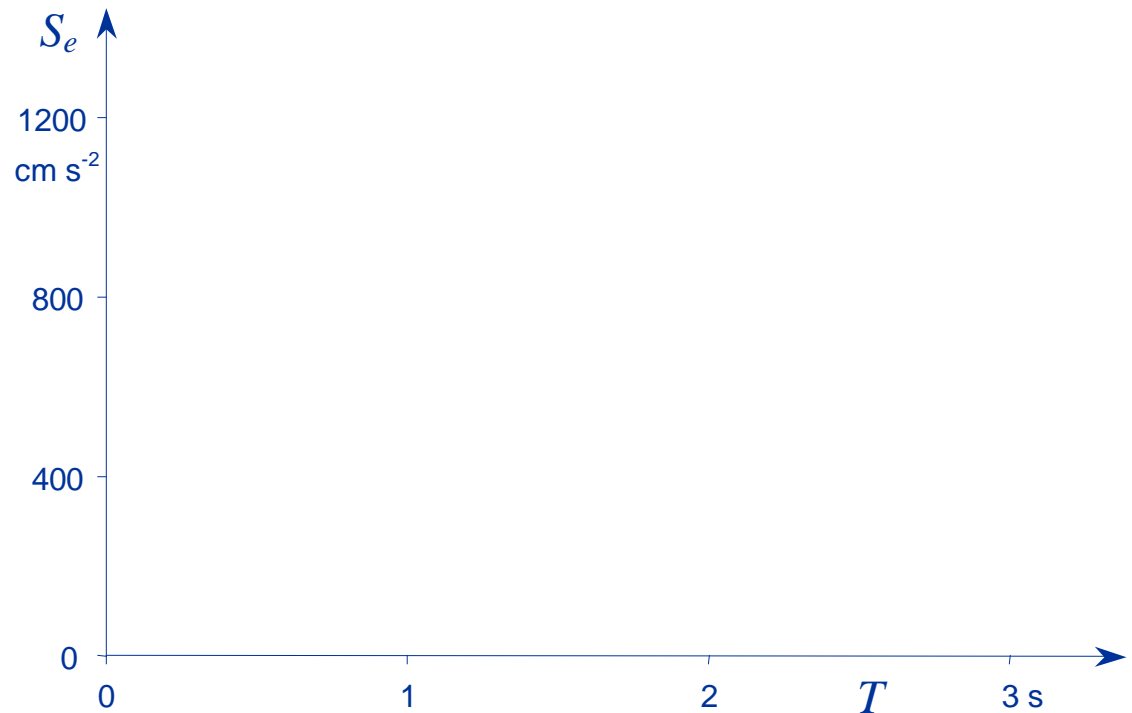
Cambiando il periodo
dell'oscillatore,
cambia la risposta



Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)

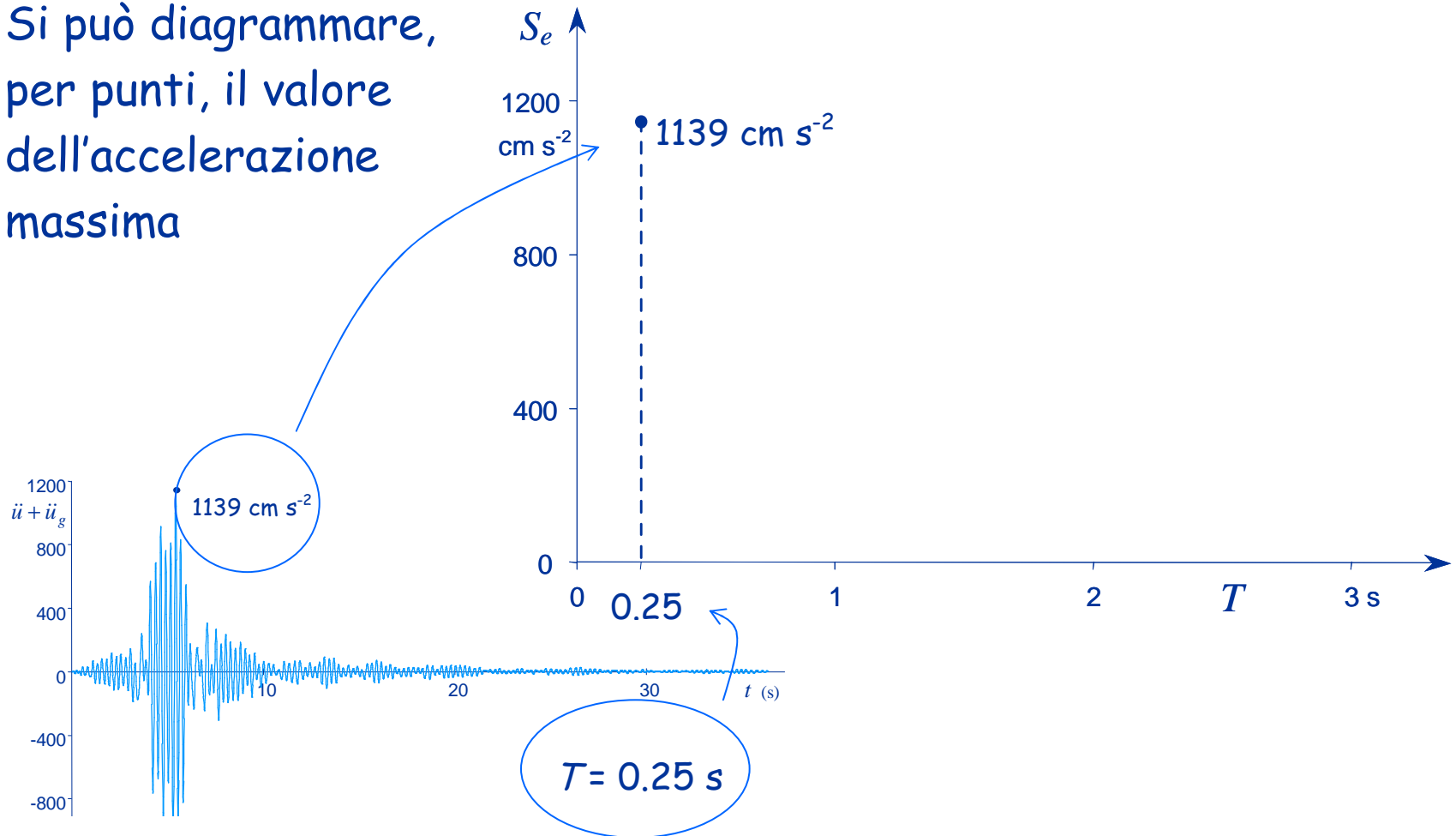
Si può diagrammare,
per punti, il valore
dell'accelerazione
massima



Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)

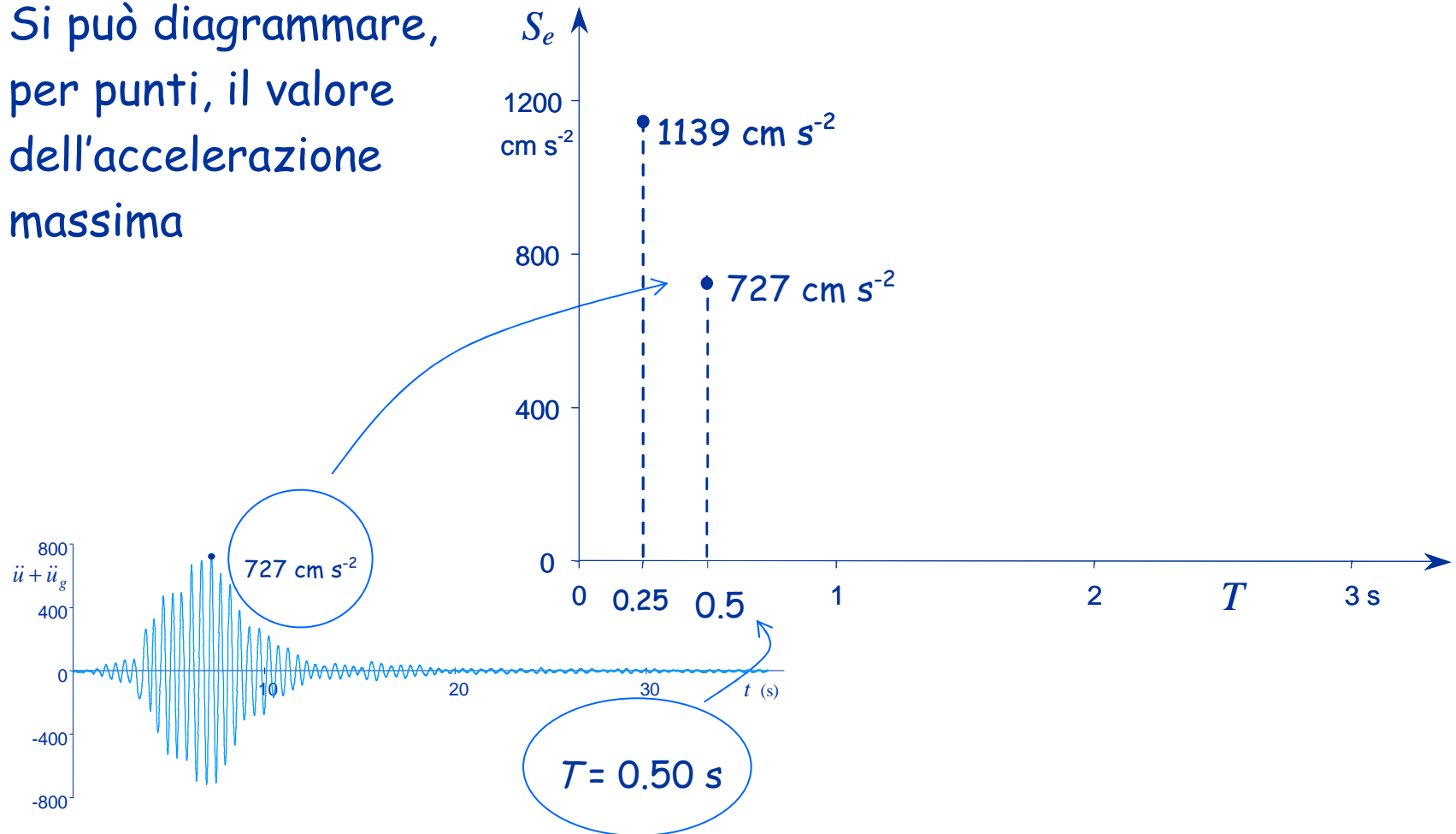
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)

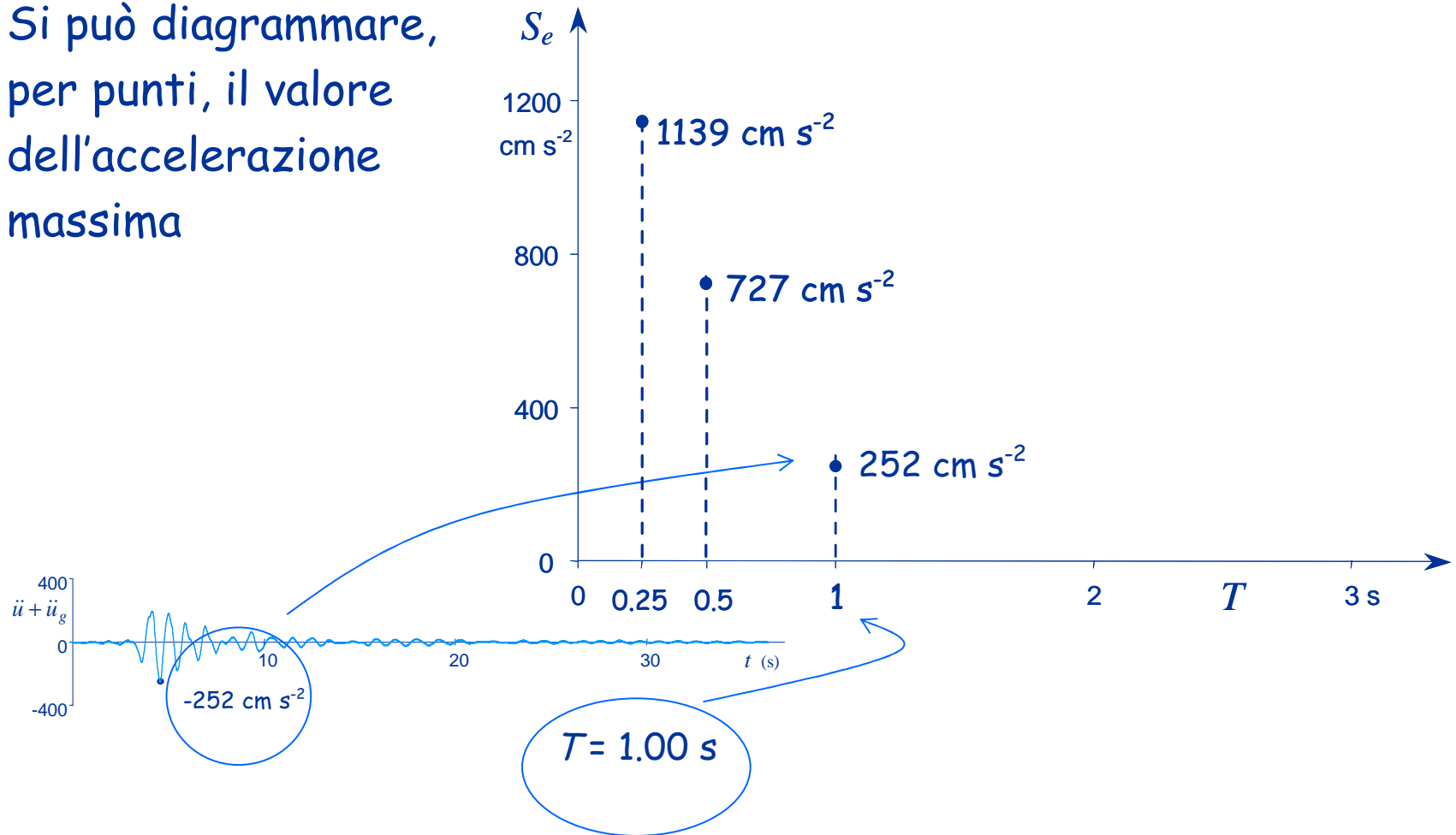
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)

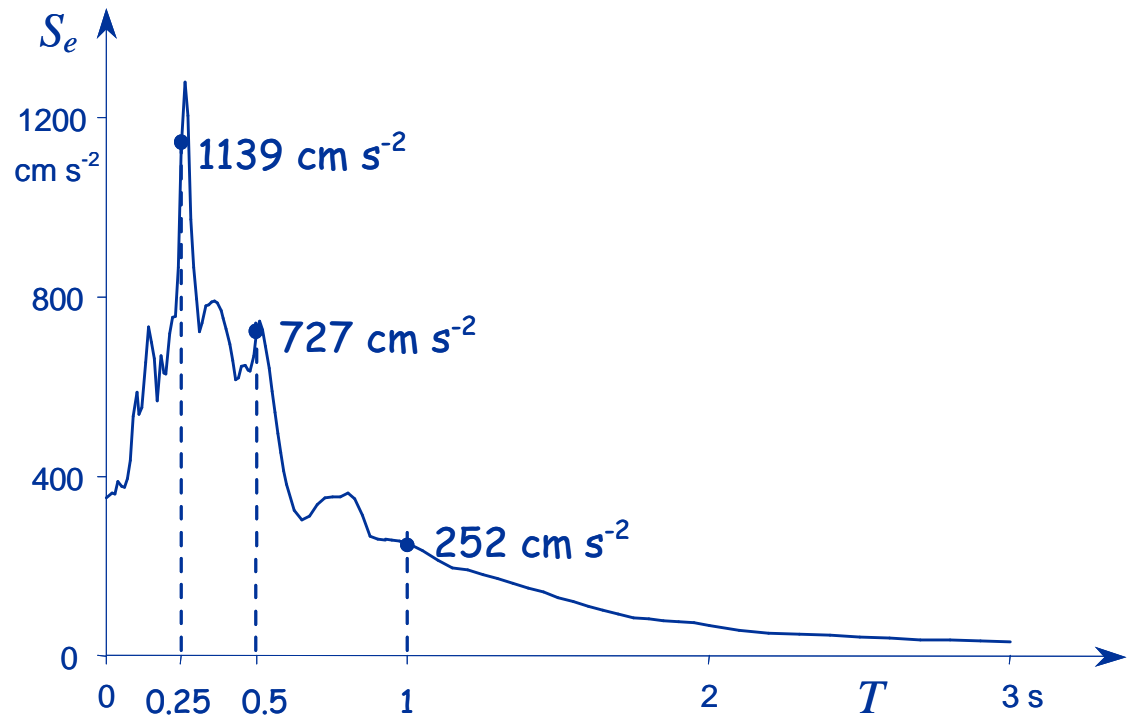
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



Oscillazioni forzate

Spettro di risposta

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

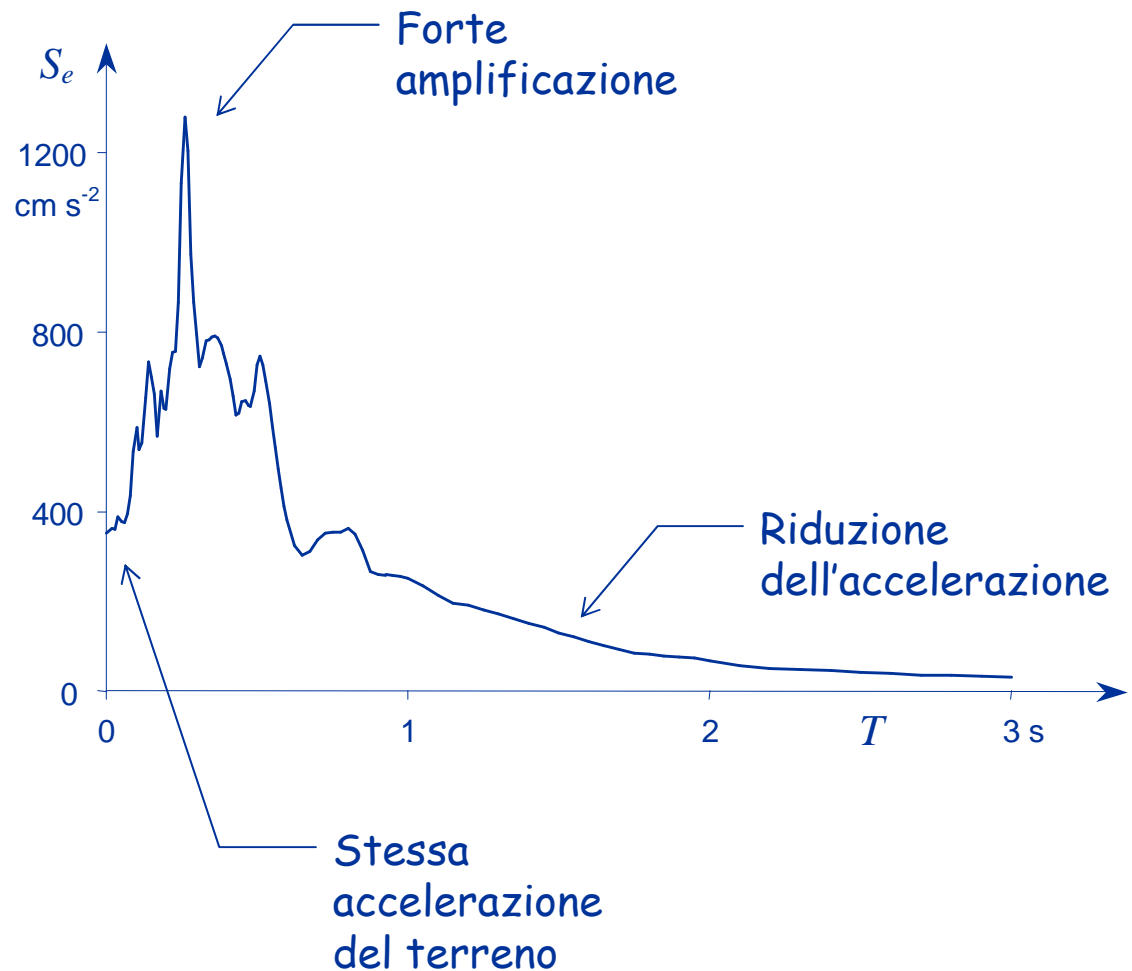


Il diagramma ottenuto unendo i vari punti viene detto "spettro di risposta" (in termini di accelerazione)

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

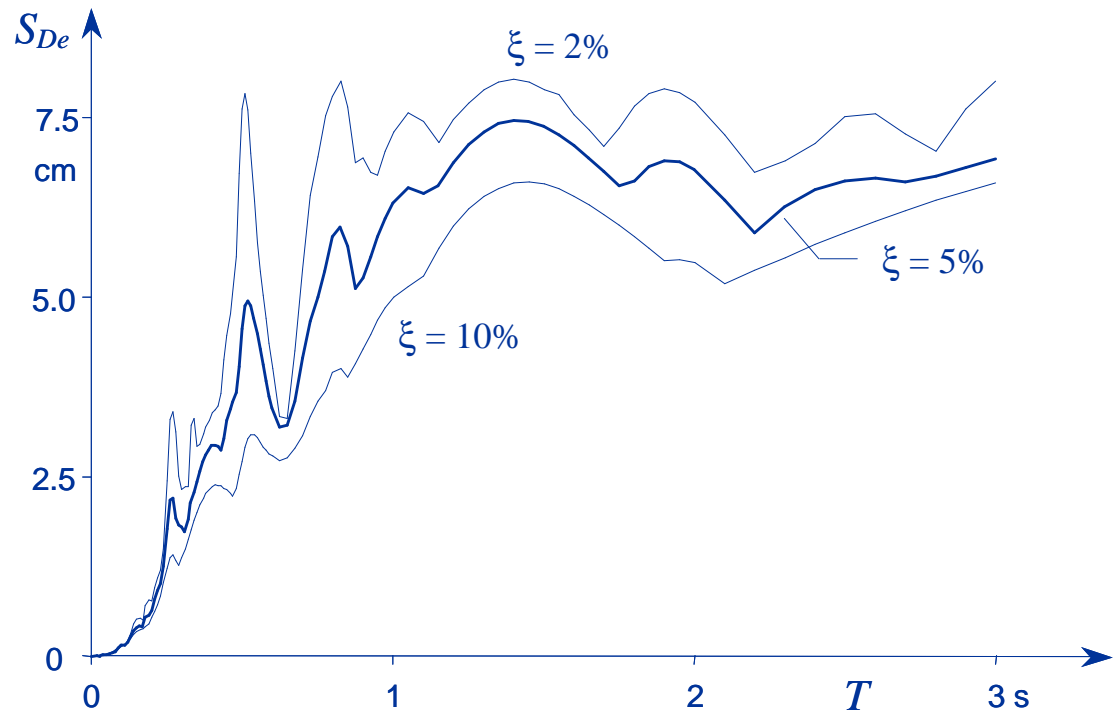


L'accelerazione massima nel sistema è maggiore quando lo smorzamento è minore

Oscillazioni forzate

Spettro di risposta (spostamento)

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



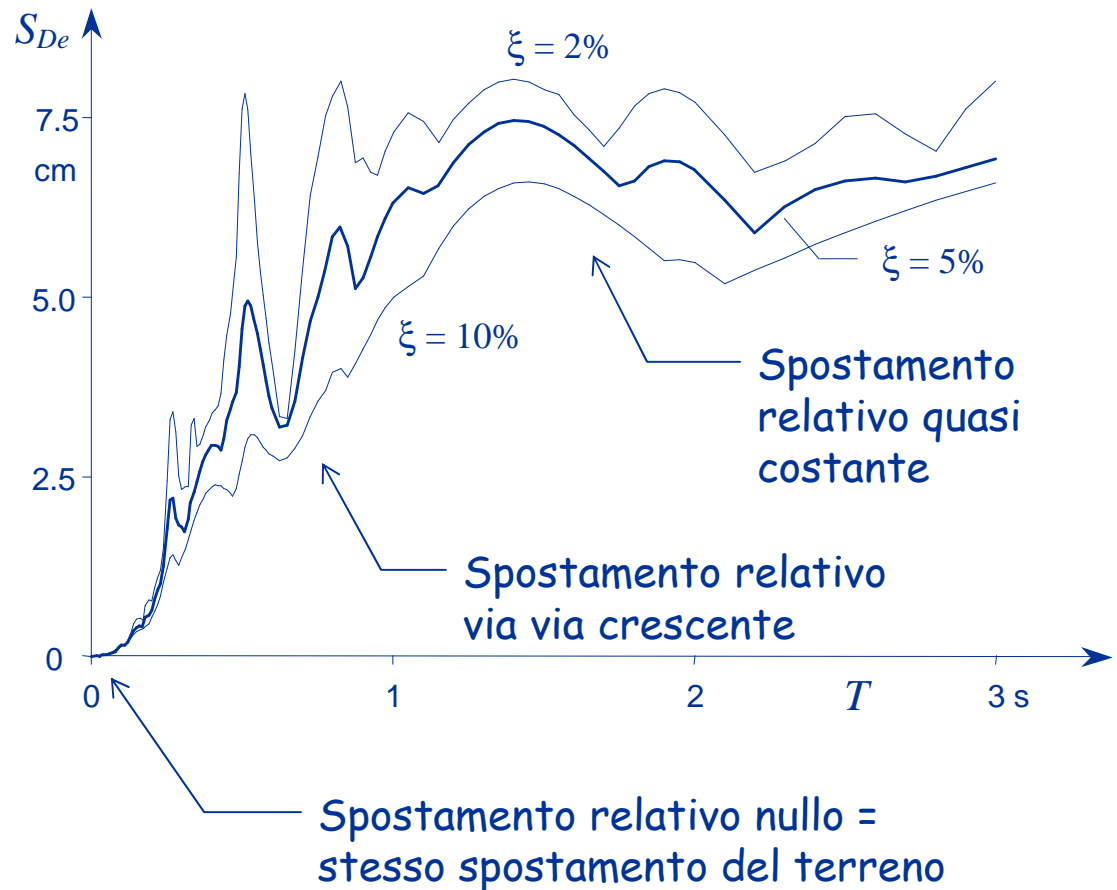
Il diagramma così ottenuto viene detto "spettro di risposta" (in termini di spostamento)

Oscillazioni forzate

Spettro di risposta (spostamento)

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

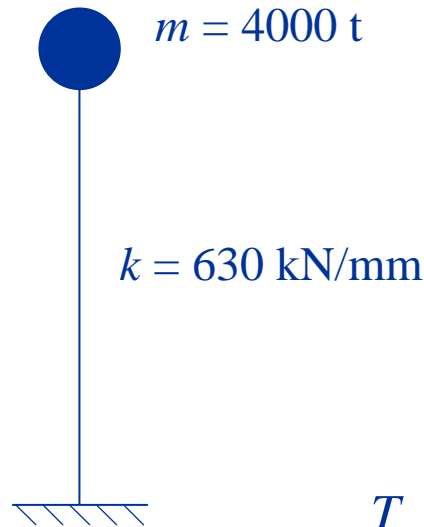
Lo spostamento massimo nel sistema è maggiore quando lo smorzamento è minore



A cosa servono gli spettri?



Foto



Modello
di calcolo

Conoscendo
massa e rigidezza
possiamo
determinare il
periodo proprio

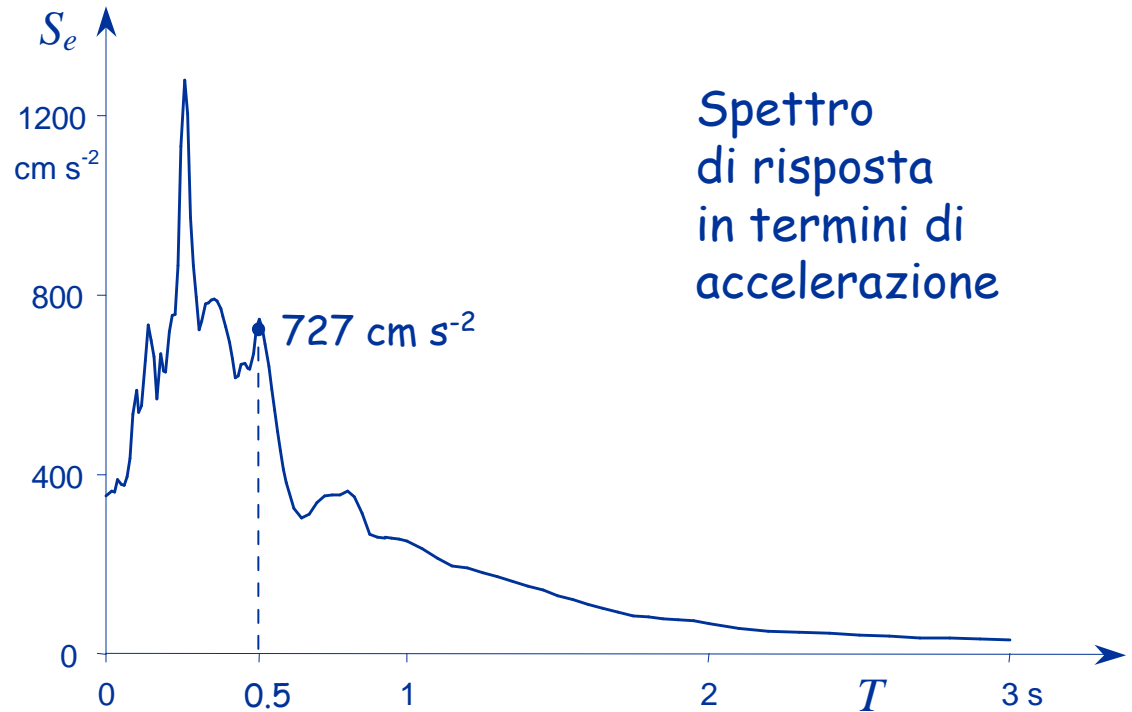
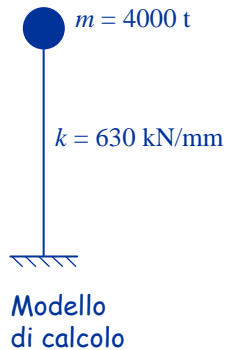
$$\begin{aligned} T &= 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \\ &= 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{4000 \times 10^3}{630 \times 10^6}} = \\ &= 0.5 \text{ s} \end{aligned}$$

A cosa servono gli spettri?



Foto

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



Spettro
di risposta
in termini di
accelerazione

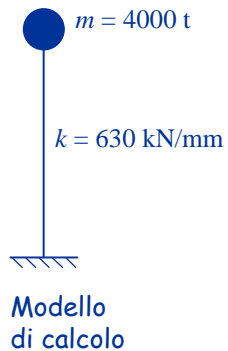
Noto il periodo proprio, possiamo leggere
dallo spettro l'accelerazione assoluta massima

$$a_{\max} = 7.27 \text{ m s}^{-2} = 0.74 \text{ g}$$

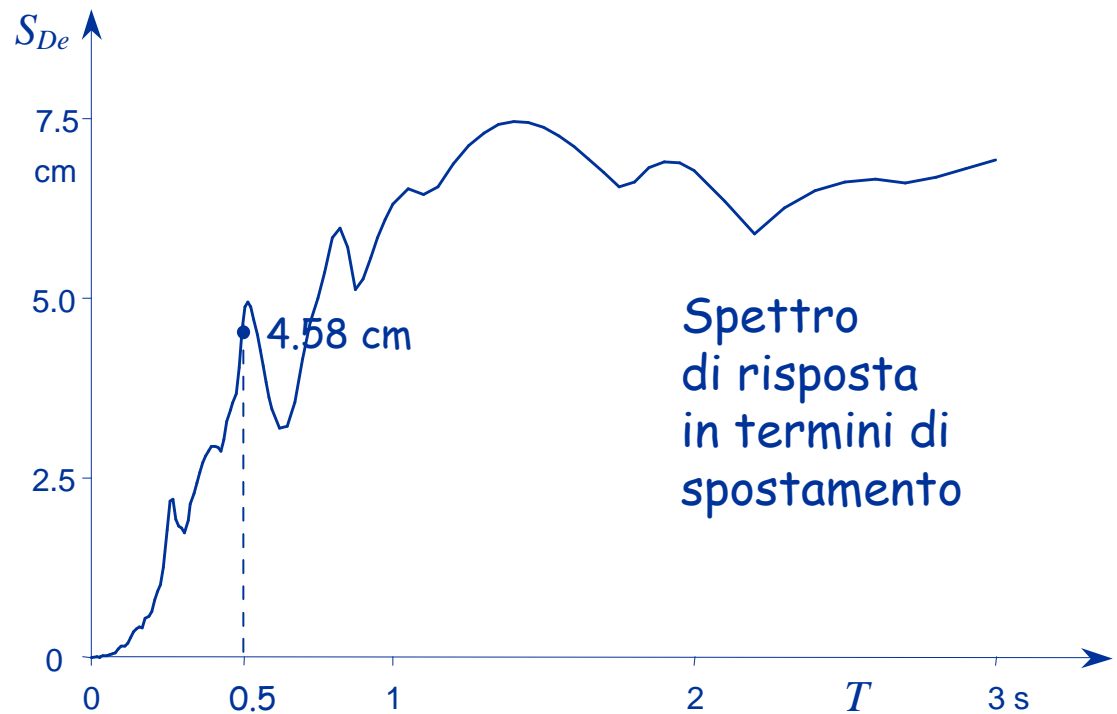
A cosa servono gli spettri?



Foto



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



Noto il periodo proprio, possiamo leggere dallo spettro l'accelerazione assoluta massima o lo spostamento relativo massimo

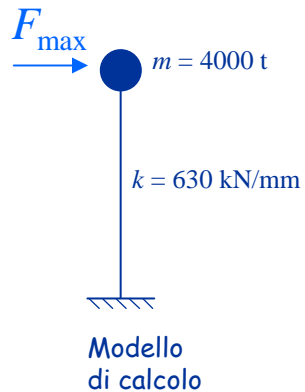
$$a_{\max} = 7.27 \text{ m s}^{-2} = 0.74 \text{ g}$$

$$u_{\max} = 4.58 \text{ cm}$$

A cosa servono gli spettri?



Foto



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

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

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

e quindi le massime
sollecitazioni nella struttura

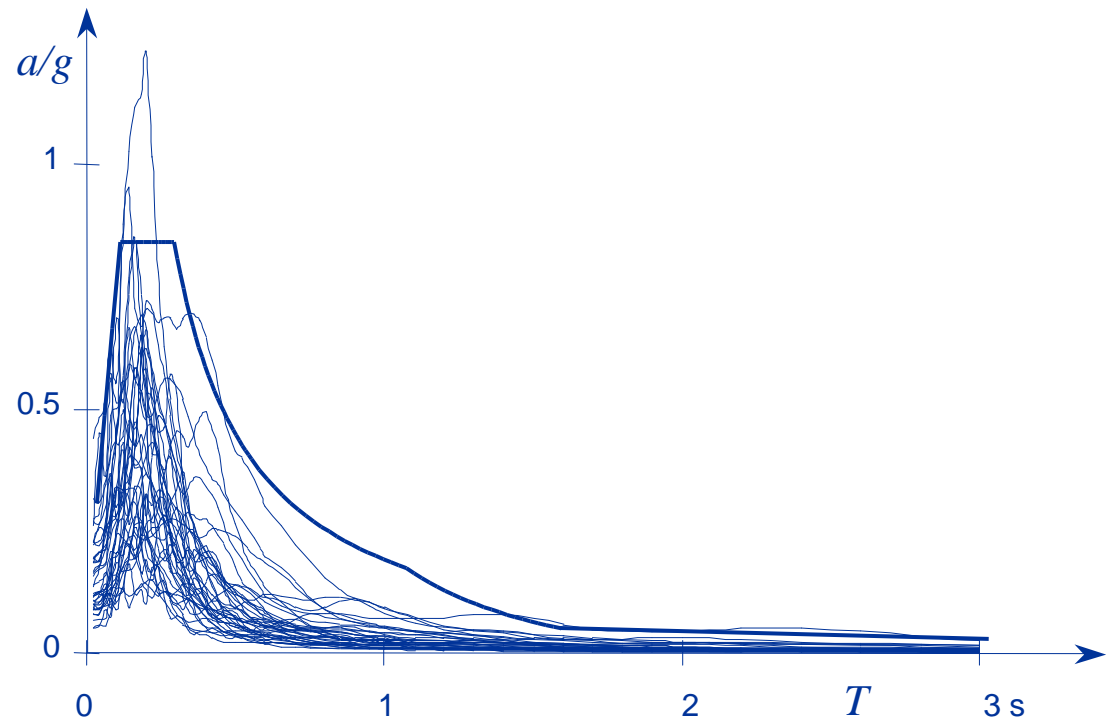
Noto il periodo proprio, possiamo leggere
dallo spettro l'accelerazione assoluta massima
o lo spostamento relativo massimo

$$a_{\max} = 7.27 \text{ m s}^{-2} = 0.74 \text{ g}$$

$$u_{\max} = 4.58 \text{ cm}$$

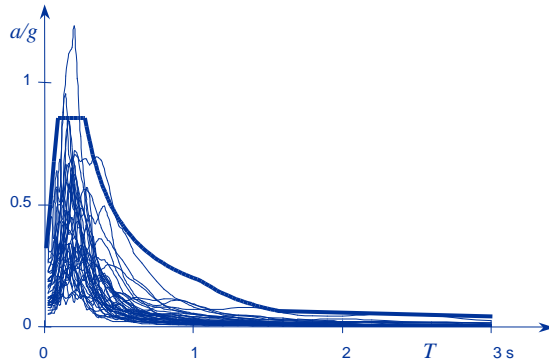
Spettri di risposta

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

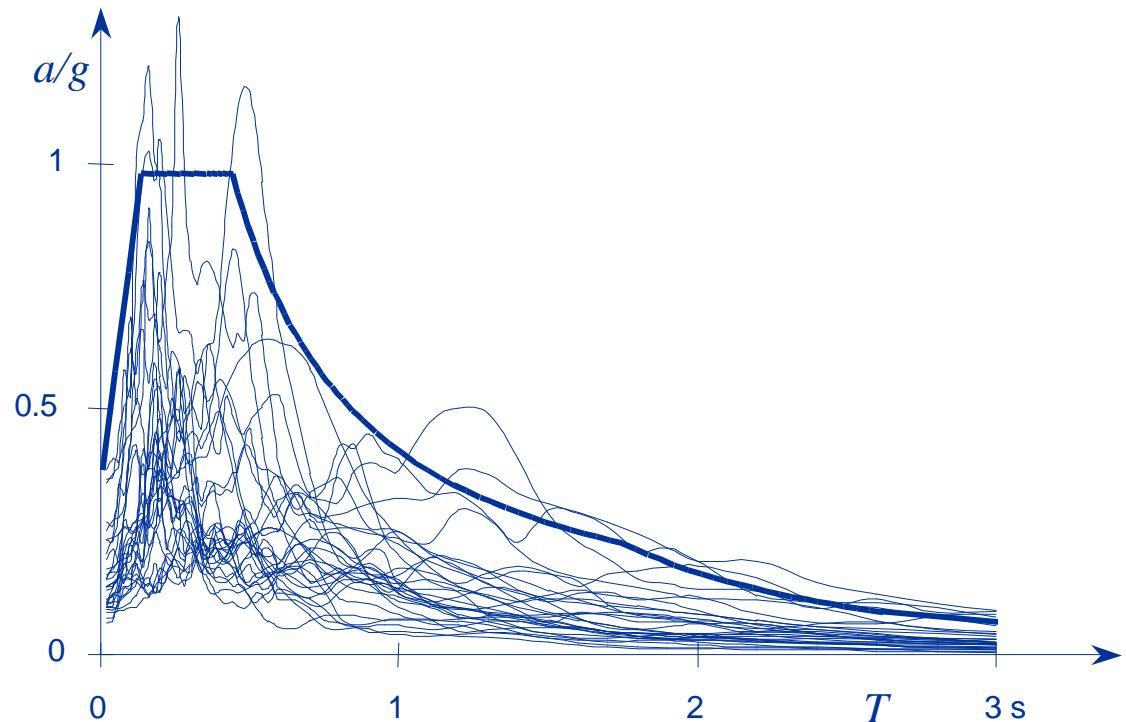


Si può quindi definire una curva che inviluppa tutti gli spettri di risposta, o che viene superata solo occasionalmente

Spettri di risposta

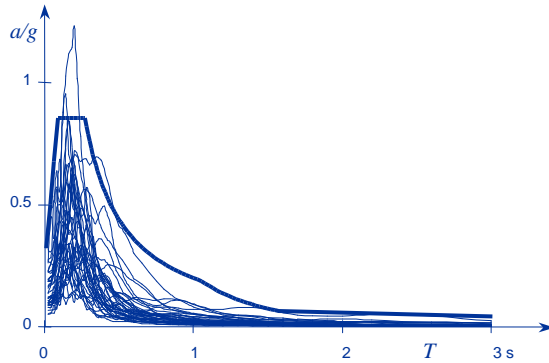


In zone differenti
e su terreni
differenti
si otterranno
risultati diversi

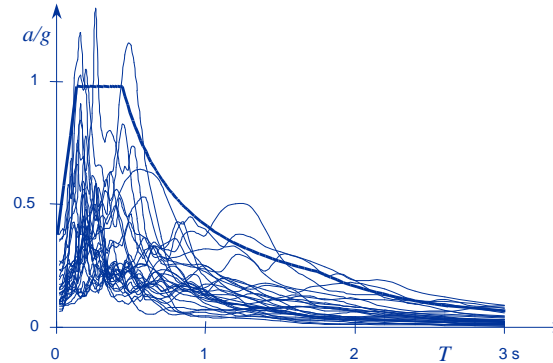


Si può quindi definire una curva che inviluppa tutti gli spettri di risposta, o che viene superata solo occasionalmente

Spettri di risposta



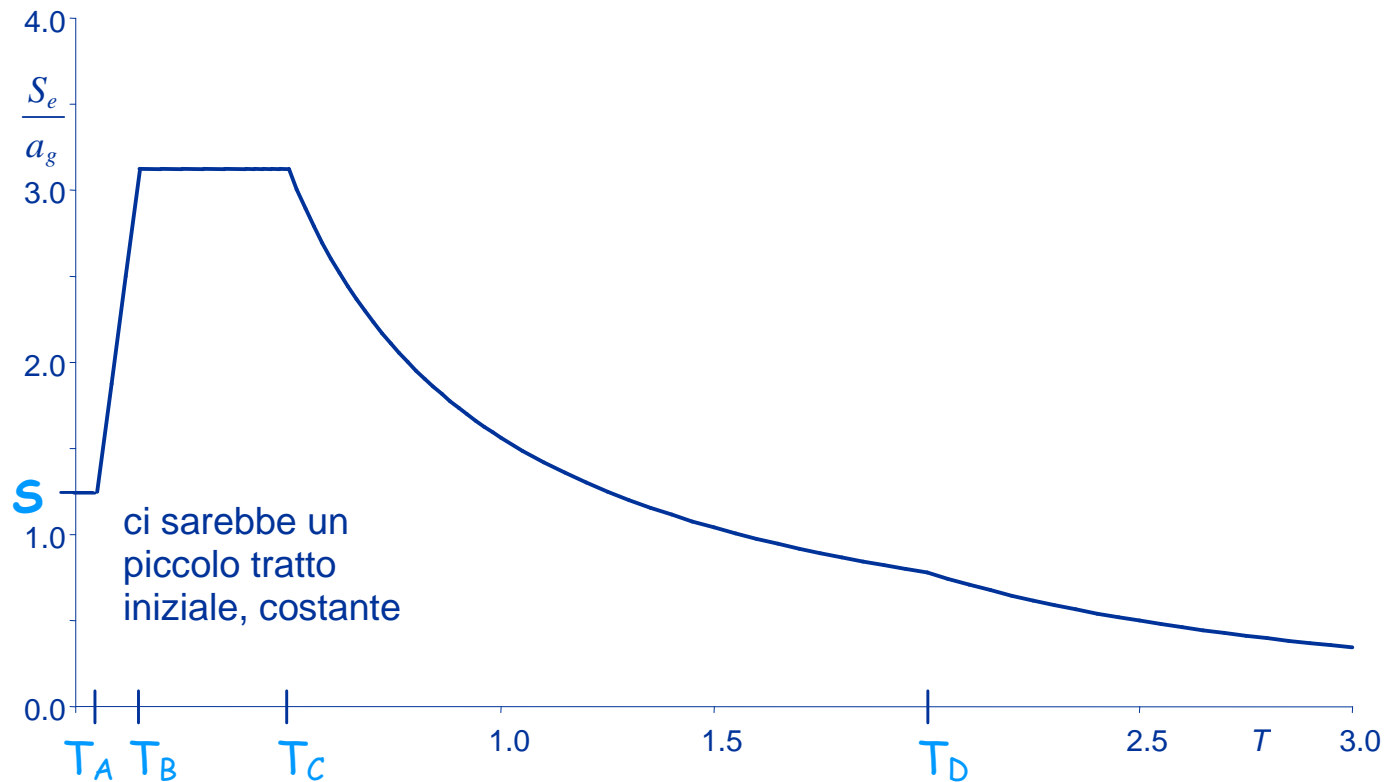
In zone differenti
e su terreni
differenti
si otterranno
risultati diversi



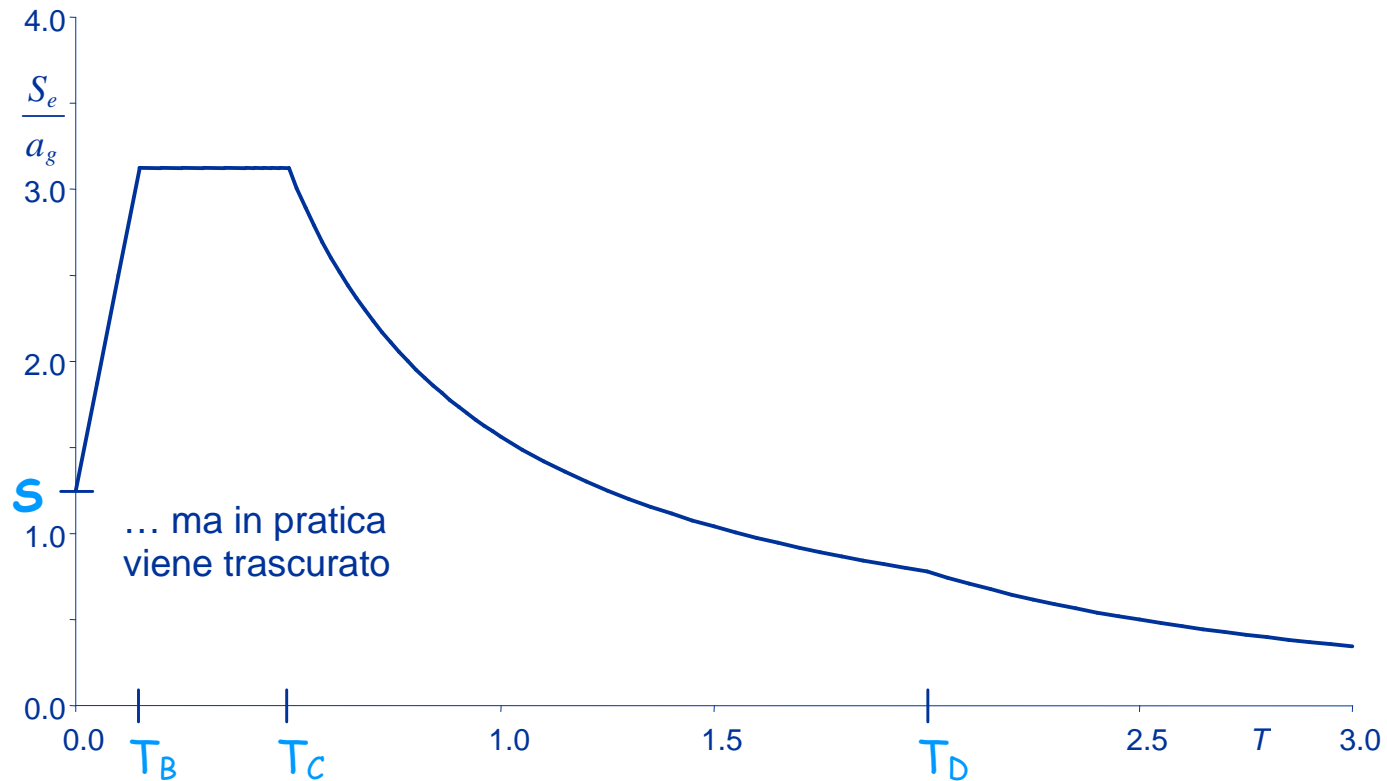
La normativa fornisce quindi spettri di
risposta differenziati in funzione delle
caratteristiche del suolo e della zona in
cui è ubicata la struttura

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

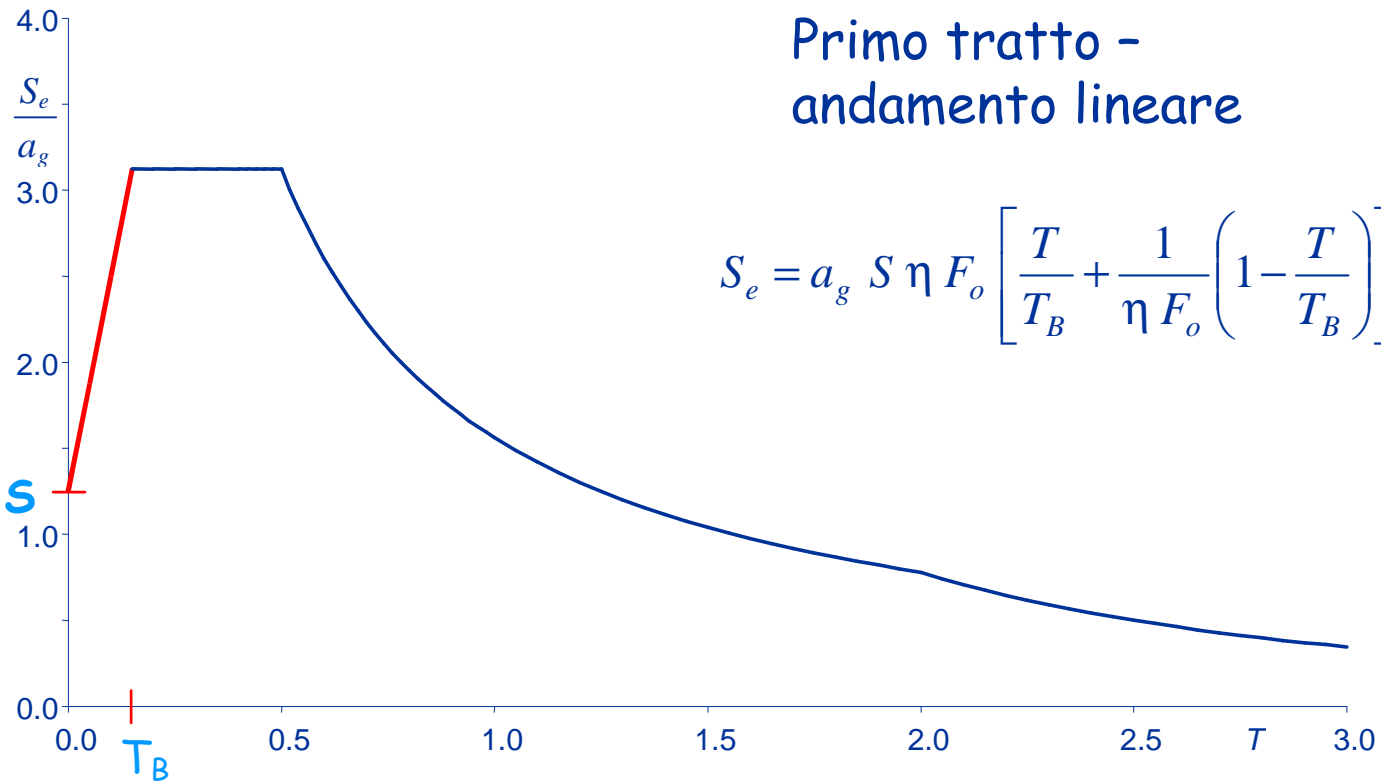
Forma generale degli spettri di risposta elastica



Forma generale degli spettri di risposta elastica



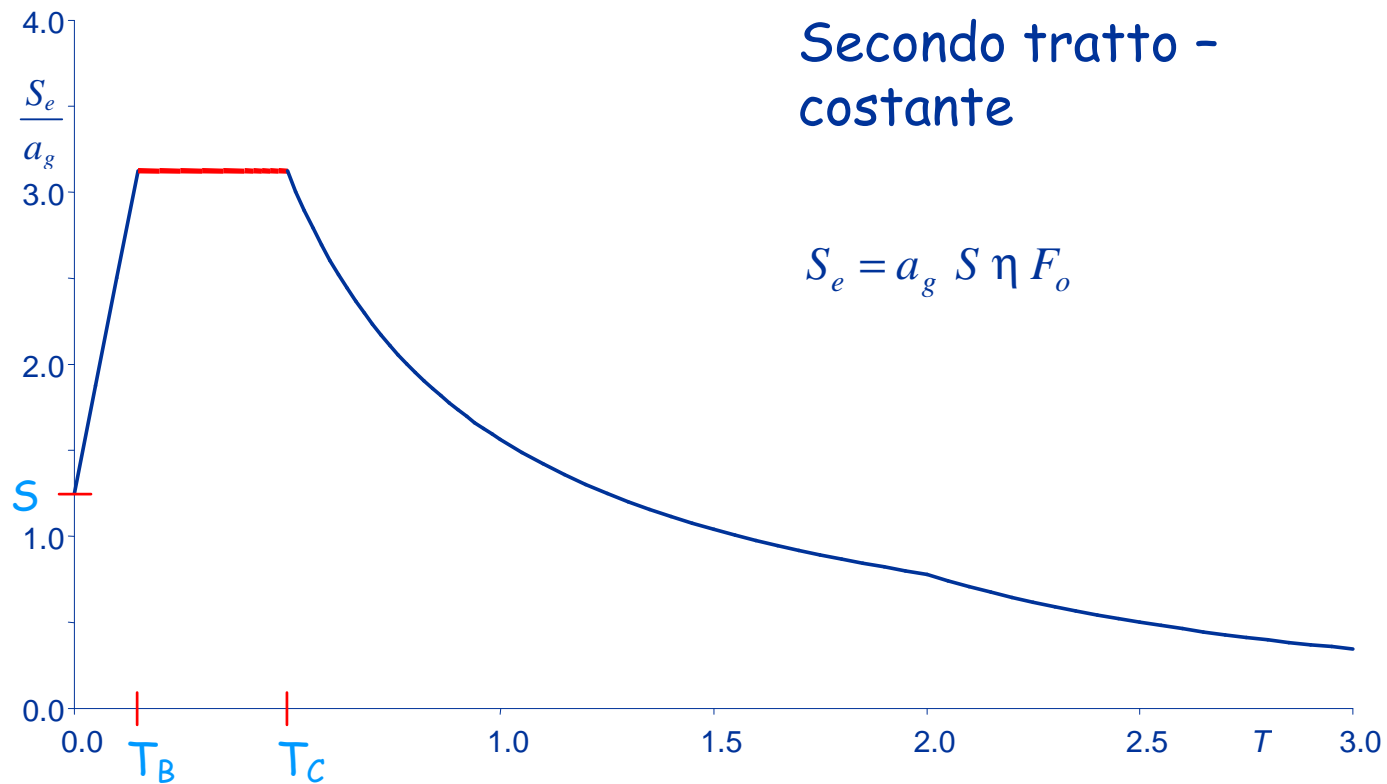
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



Amplificazione, legata
al tipo di terreno

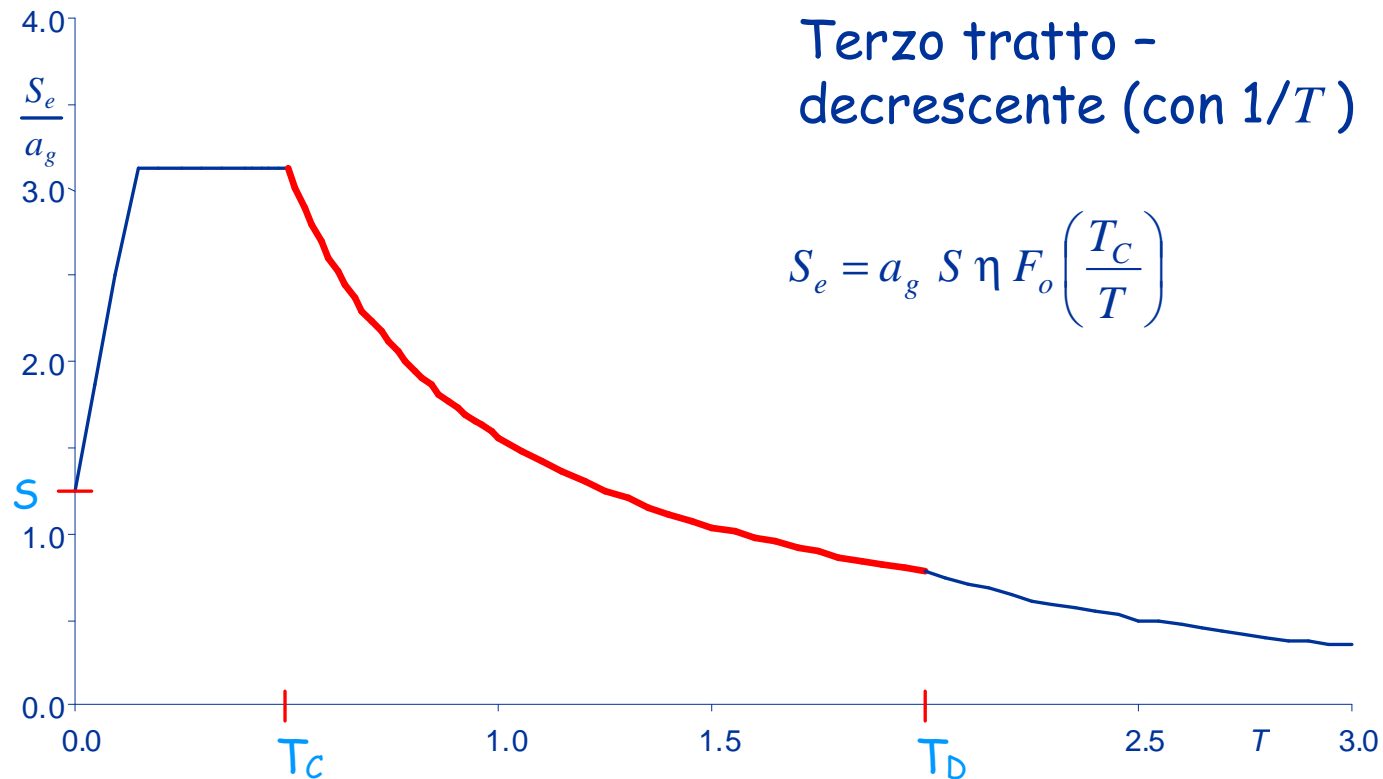
$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0.55$$

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



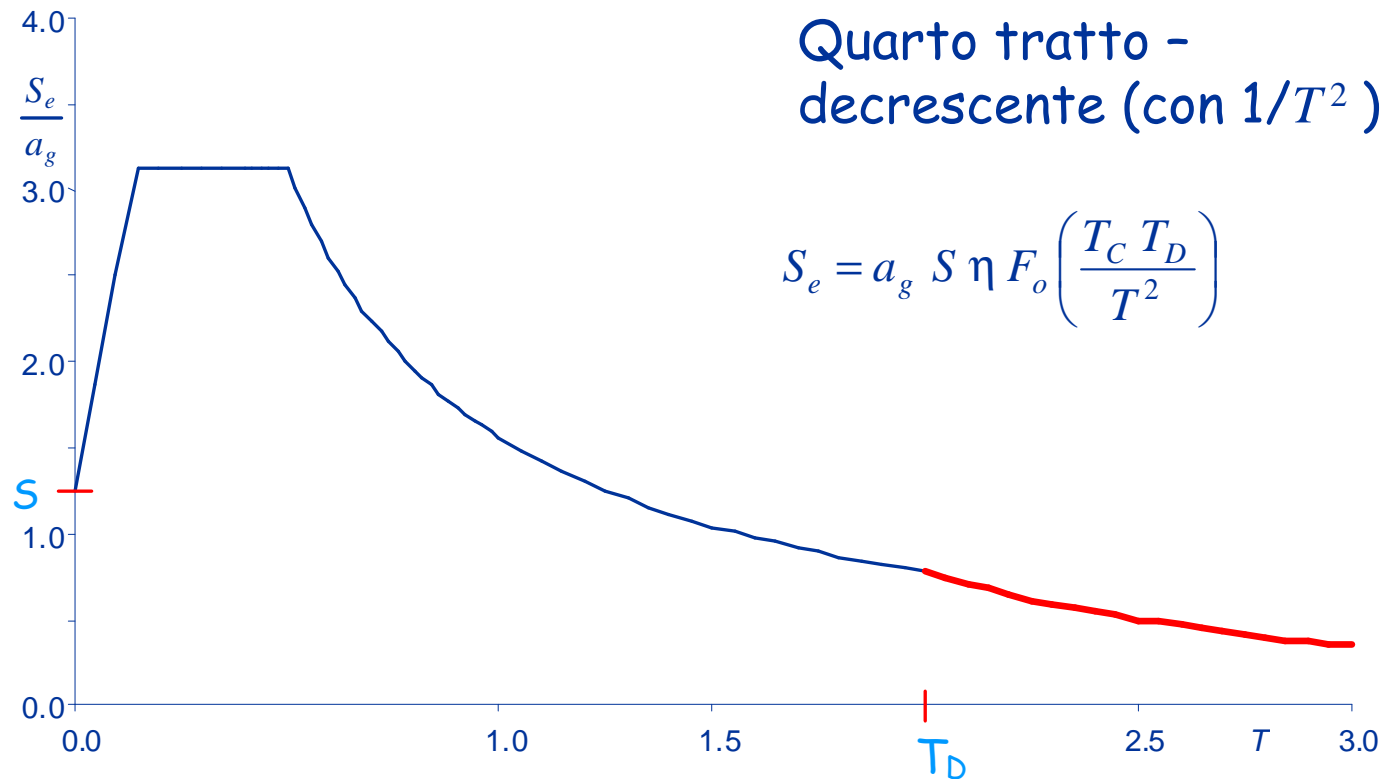
$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0.55$$

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0.55$$

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0.55$$

Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali

Per definire uno spettro di risposta elastico occorre indicare i parametri

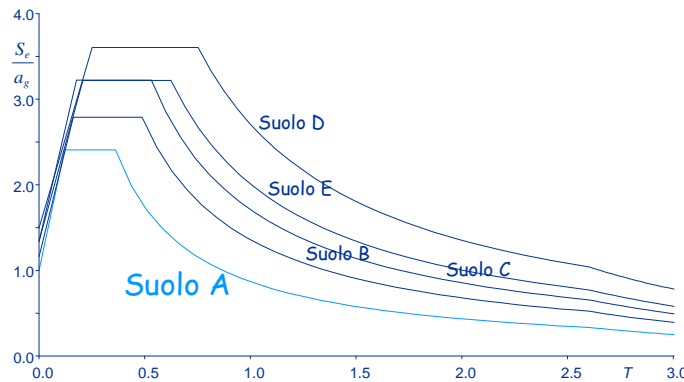
- a_g accelerazione del terreno (su roccia)
- S amplificazione dovuta al tipo di terreno
- T_B T_C T_D periodi che separano i diversi tratti
- ξ smorzamento della struttura

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

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

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

$$T_D = 2.5 \text{ s}$$

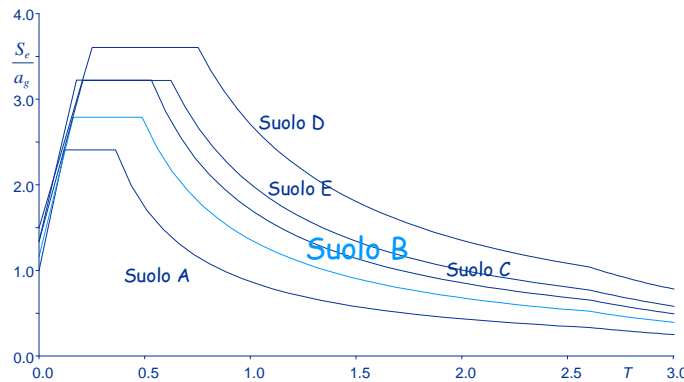
Valori orientativi per terremoti
con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

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

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

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



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

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

Suolo B

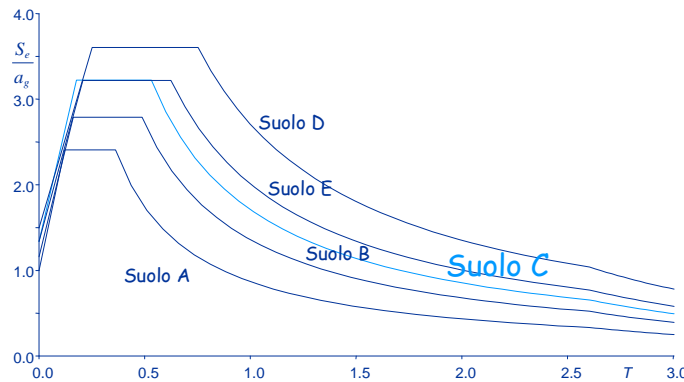
Depositi di sabbie e ghiaie
molto addensate o argille
molto consistenti

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

Resistenza penetrometrica
 $N_{SPT} > 50$

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

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



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

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

Suolo C

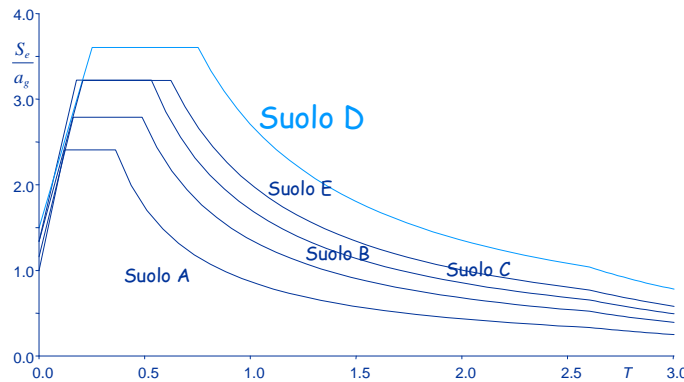
Depositi di sabbie e ghiaie
mediamente addensate o
argille di media consistenza

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

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

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

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



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

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

Suolo D

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

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

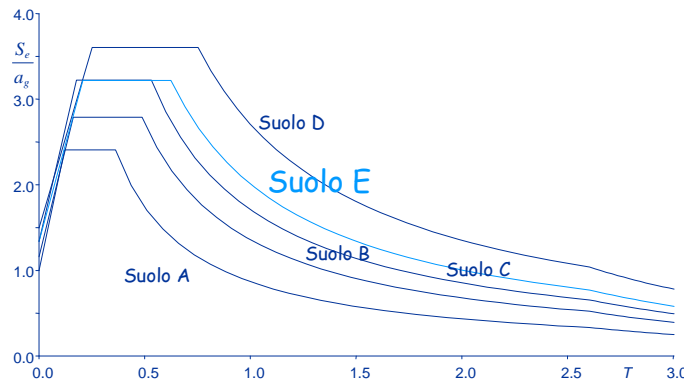
Resistenza penetrometrica

$$N_{SPT} < 15$$

Coesione non drenata

$$c_u < 70 \text{ kPa}$$

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
 $V_{S30} > 800$ 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

$$N_{SPT} = 40$$

SONDAGGIO N° 6

ATTREZZATURA ATLAS A50

CAROTIERE Ø 101 mm

CASSETTE CATALOGATRICI

5

Scala 1:150	Profondità'	Stratigrafia	Descrizione	Potenza	Camp. indisturb.	Camp. rinaneg.	Falda	S.P.T.	R.Q.D.	Piezometro
1	0.90		Materiale di riporto costituito da piccoli ciottoli in abbondante matrice sabbioso-limosa.	0.90						
2				1.60			2.20			
3	2.50		Sabbie marnose, grigiastre a tratti debolmente argillose con inclusi elementi lapidei.				C.1	2.8		
4			Sabbie marnose e/o marne sabbiose bianco crema.				2.50	3.25		
5										
6				7.50	6.00					
7					C.1					
8					6.50			7.5		
9								7.95		
10	10.00		Sabbie marnose con a tratti livelli decimetrici di argille brune.				6.70			
11										
12	12.00		Argille grigio-brune debolmente sabbiose con a tratti abbondanti elementi lapidei (paleosuolo).				11.50			
13							C.2			
14				2.50			11.80			
15	14.50		Argille grigio-brune a tratti marnose con intercalati livelli sabbioso-marnosi.				13.40			
16							C.3			
17							13.70			
18	18.10		Marne sabbiose e/o sabbie marnose bianco crema.							
19				3.60	15.70		16.2			
20	20.00				C.2		16.20	16.65		
21										
22			Argille marnose bianco giallastre con inclusi sporadici elementi lapidei eterometrici e con intercalati livelli di sabbie argillose debolmente limose.				19.20	19.5		
23							C.4	19.95		
24				6.50	21.00		19.50			
25					C.3					
26					21.50					
27	26.50		Ciottoli eterometrici sub-arrotolati in poca matrice sabbioso-argillosa.				24.70	24.7		
28	27.50		Argille di colore bruno (paleosuolo) con abbondanti inclusi di minuti elementi lapidei.				C.5	25.15		
29	28.90		Sabbie marnose a tratti argillose bianco-crema.				25.00			
30	30.00			1.10						

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
 $15 < N_{SPT} < 50$

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

Indirizzo <http://www.acca.it/EdiLus-MS/>

Vai Collegamenti

EdiLus-MS

Mappe Sismiche

EdiLus-MS è il software ACCA per individuare la pericolosità sismica di tutte le località italiane direttamente dalla mappa. Scrivi l'indirizzo e/o sposta il segnalino sul sito che ti interessa e otterrai dinamicamente tutti i parametri di pericolosità sismica.

ad es. "Via M. Giandulli, 114 MONTEFALCONE"

via di Villa Redenta, Spoleto (PG)

Cerca

classe

indirizzo

vita
nominale

Latitudine

42.74480607

Longitudine

12.74130821

Classe dell'edificio

II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti...

Vita Nominale: Struttura 50

Periodo di Riferimento per l'azione sismica 50



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 S.p.A.

il software per l'edilizia

Tel.: 0827/69.504 - Fax: 0827/60.12.35

P.IVA 01883740647 - E-mail: info@acca.it

42.74387633, 12.74042845

[Termini e Condizioni di utilizzo di EdilLus-MS](#)

Determinazione dei dati sismici

Periodo di riferimento V_R

Indirizzo <http://www.acca.it/EdiLus-MS/>

Vai Collegamenti

EdiLus-MS

Mappe Sismiche

EdiLus-MS è il software ACCA per individuare la pericolosità sismica di tutte le località italiane direttamente dalla mappa. Scrivi l'indirizzo e/o sposta il segnalino sul sito che ti interessa e otterrai dinamicamente tutti i parametri di pericolosità sismica.

ad es. "Via M. Giandulli, 114 MONTEFALCONE"

via di Villa Redenta, Spoleto (PG)

Cerca

classe

indirizzo

vita
nominale

Latitudine

42.74480607

Longitudine

12.74130821

Classe dell'edificio

II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti...

Vita Nominale: Struttura 50

Periodo di Riferimento per l'azione sismica 50

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

42.74387633, 12.74042845

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 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	$1.00 \leq 2.0 - 1.1 F_o \frac{a_g}{g} \leq 1.60$

Intervengono
anche F_o e a_g

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^*

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	$1.15 (T_C^*)^{-0.40}$

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

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: $a_g = 0.222$ g $F_o = 2.385$ $T_C^* = 0.320$ s

Per $T_r = 50$ anni: $a_g = 0.071$ g $F_o = 2.422$ $T_C^* = 0.270$ 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: $a_g = 0.222$ g $F_o = 2.385$ $T_C^* = 0.320$ s

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

Valori che definiscono lo spettro di risposta elastico

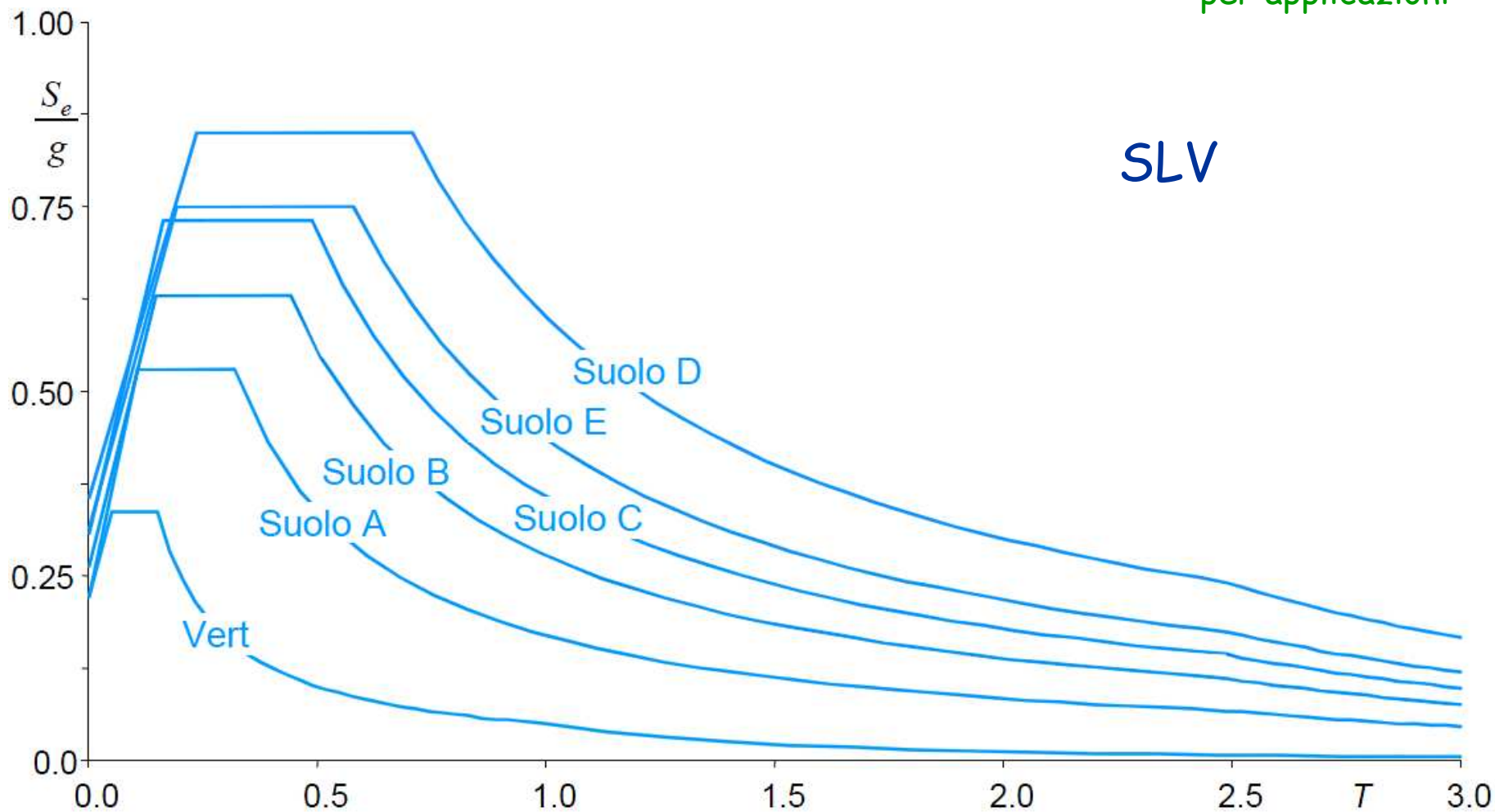
Accelerazioni orizzontali, terremoto con $T_r = 50$ anni (SLS) secondo NTC 08

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

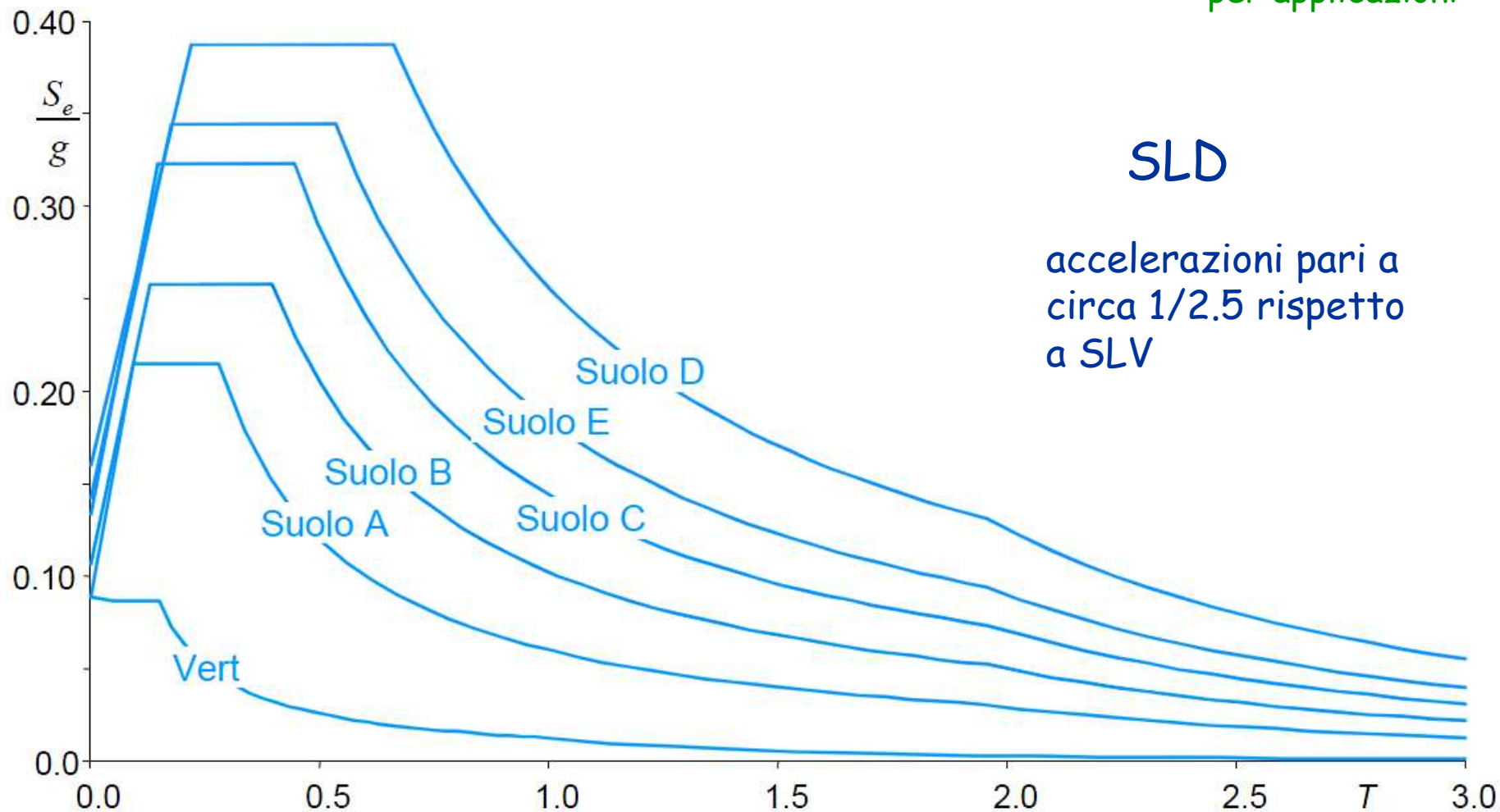
Vedere foglio
Excel "Spettri"
per applicazioni



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

$$F_v = 1,35 \cdot F_o \cdot \left(\frac{a_{\text{mg}}}{g} \right)^{0,5}$$