

Anno accademico 2009-10

Laboratorio di Tecnica delle costruzioni 2

**Progetto e verifica di edifici antisismici in c.a.**

2 - Spettri di risposta elastica

Catania

9 giugno 2010

Aurelio Gheresi

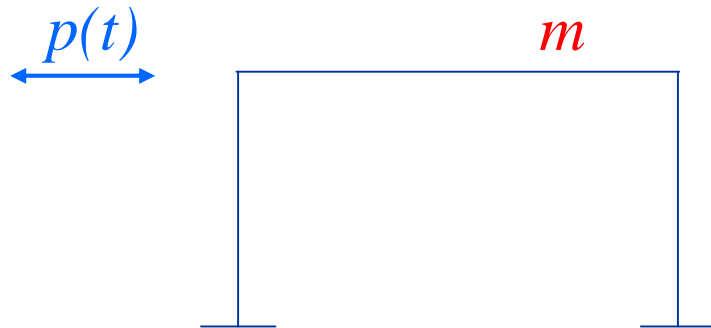
# Oscillazioni forzate

Esempio: altalena



Dando (in maniera periodica) una piccola spinta al sedile dell'altalena, le oscillazioni si amplificano sempre di più

# Oscillazioni forzate telaio monopiano

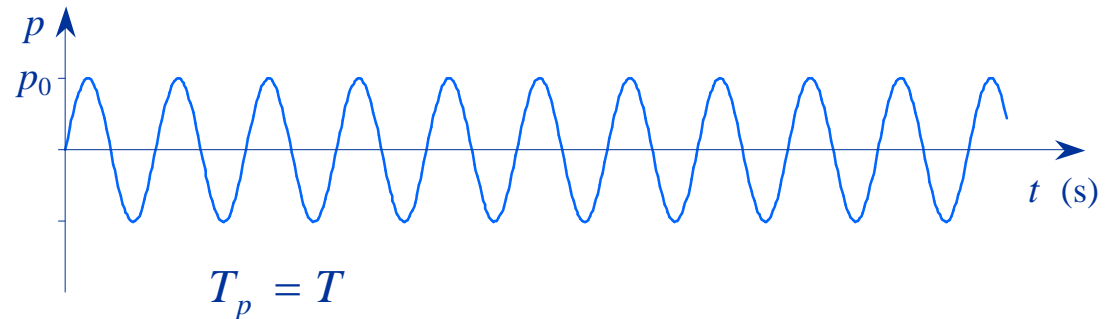
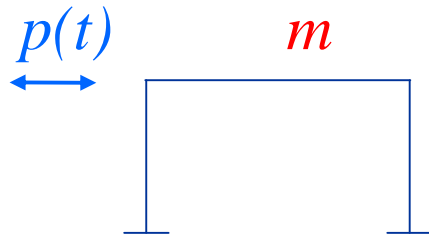


Equazione del moto:

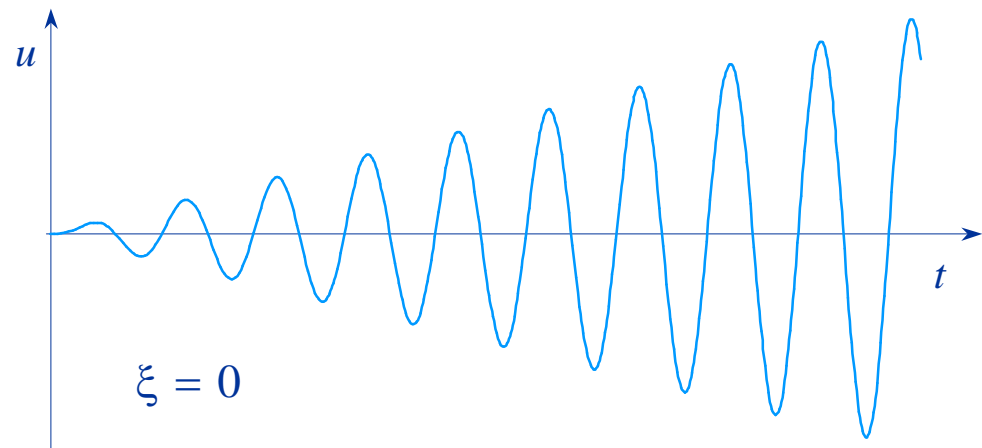
$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = p(t)$$

Nell'equazione del moto  
compare un nuovo termine  
(l'azione forzante)

# Oscillazioni forzate telaio monopiano

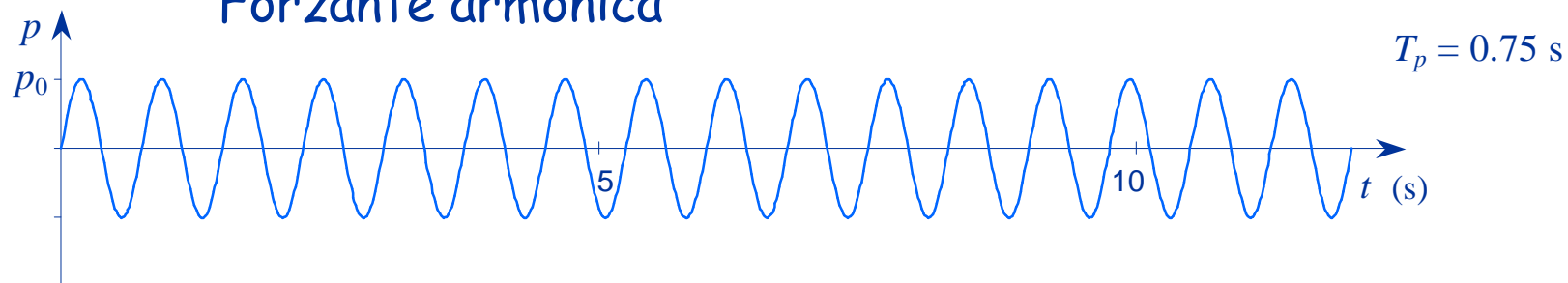


Se il periodo della  
forzante coincide con  
quello del sistema,  
in assenza di  
smorzamento  
il moto si amplifica  
sempre più

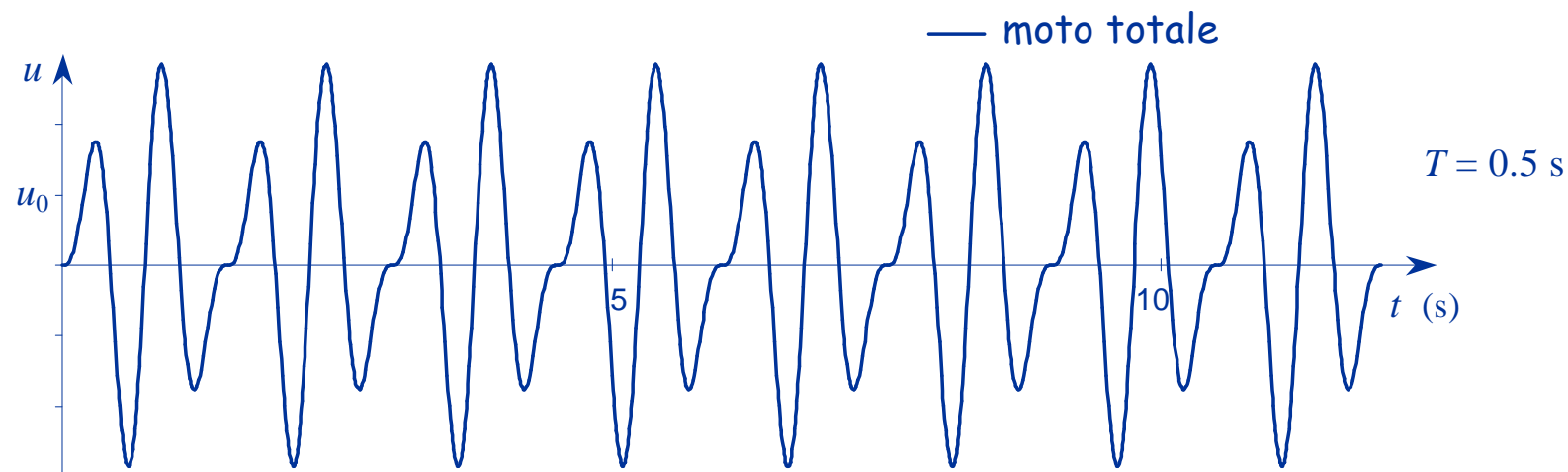


risonanza

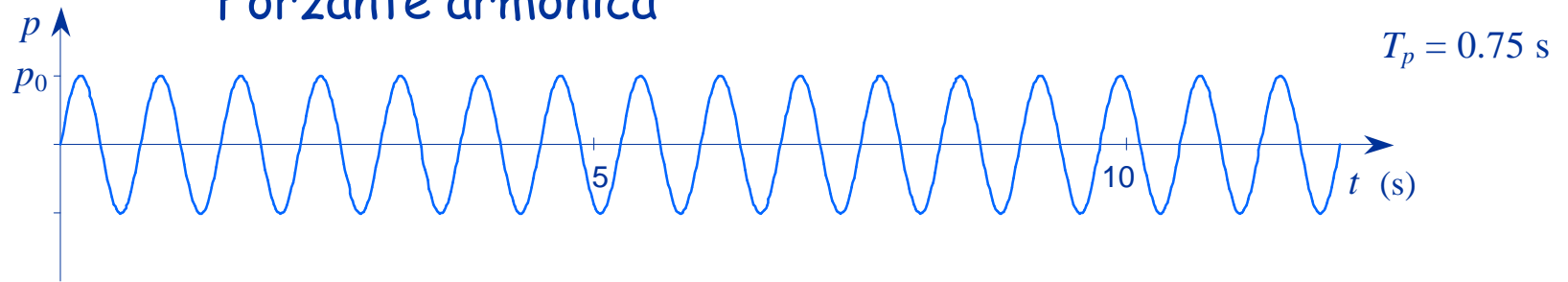
## Forzante armonica



## Risposta, senza smorzamento

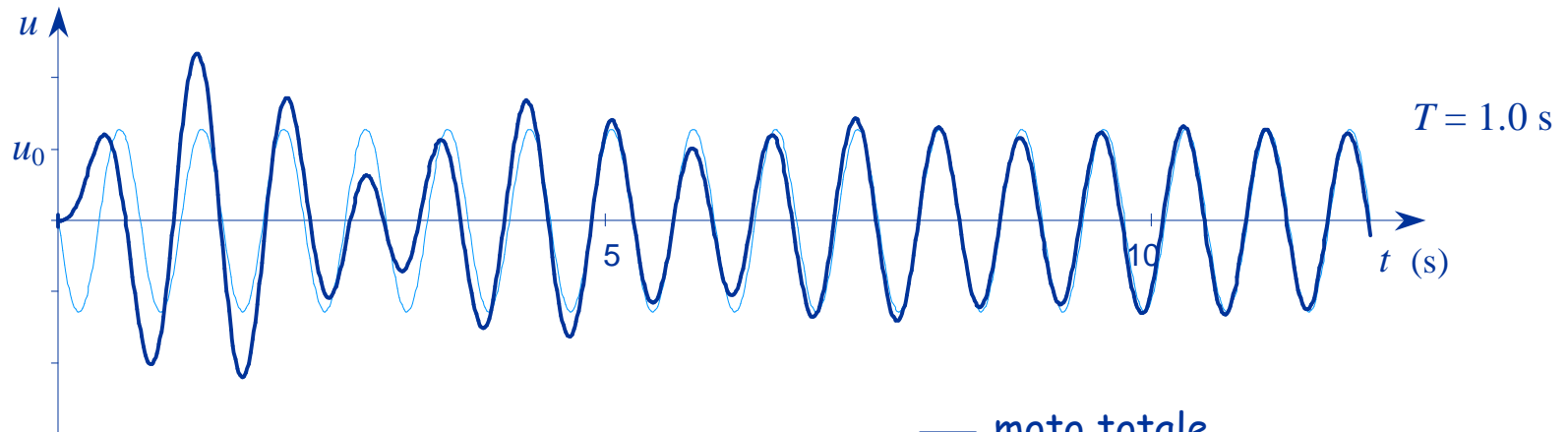


## Forzante armonica



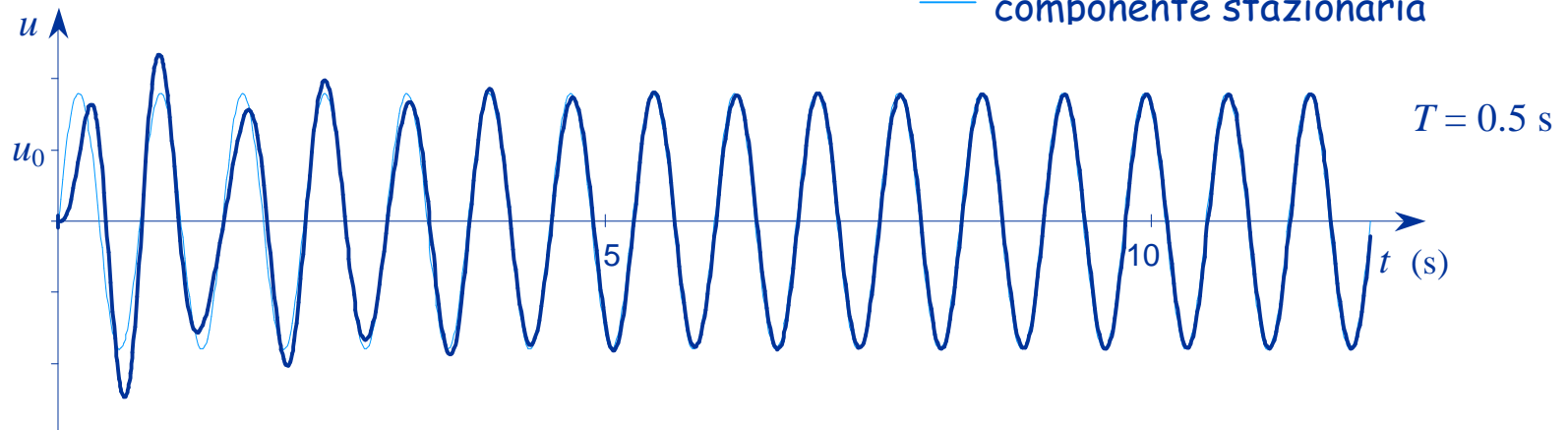
## Risposta, con smorzamento $\xi = 5\%$

$$T_p \neq T$$

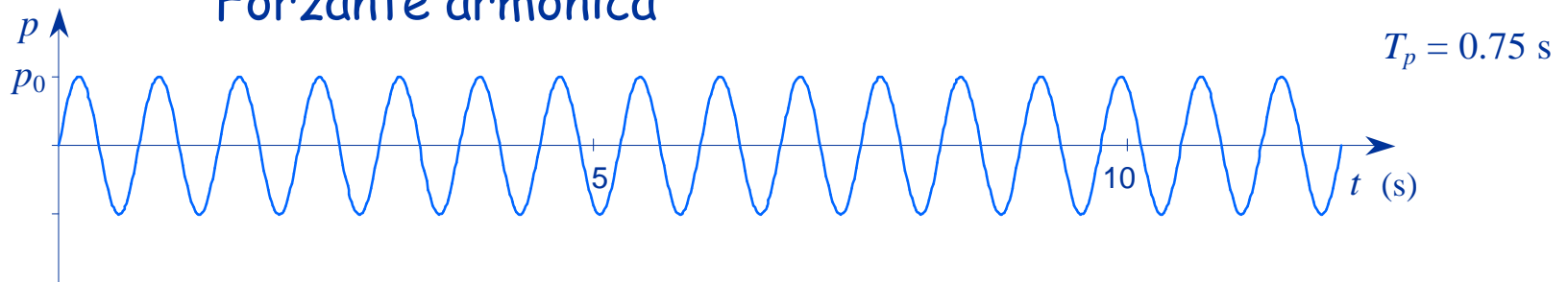


— moto totale

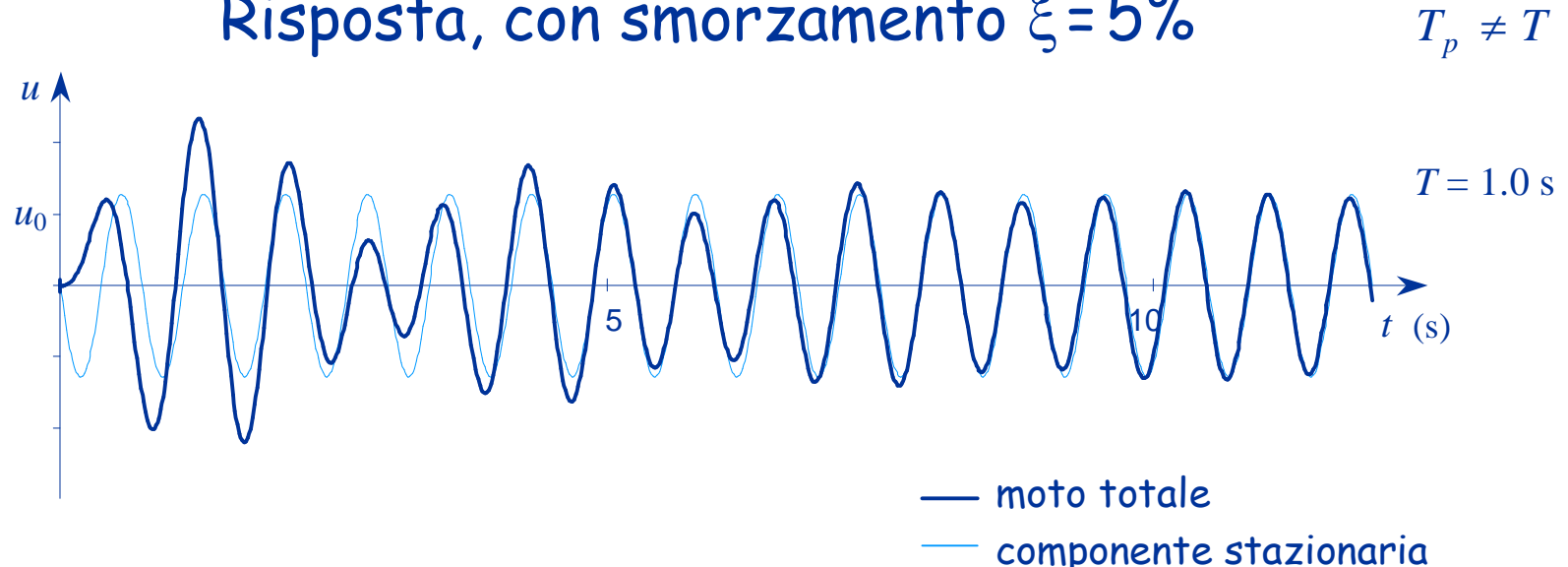
— componente stazionaria



## Forzante armonica

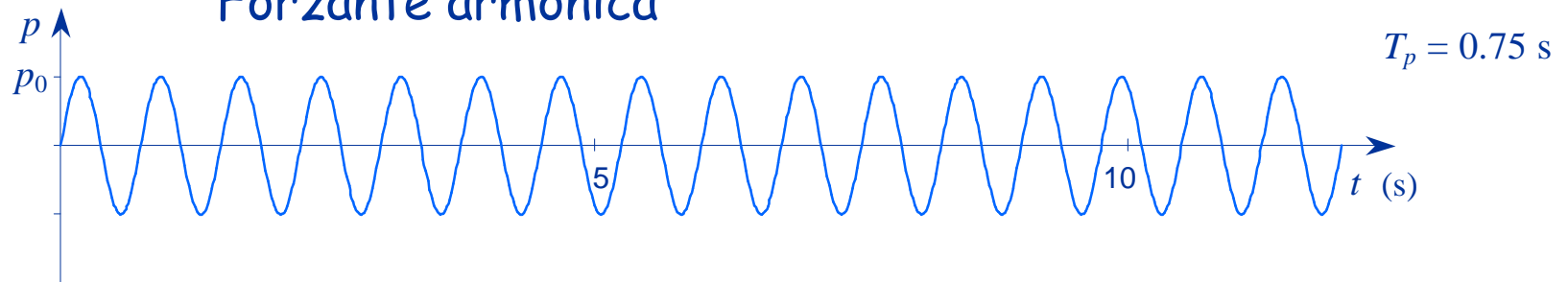


## Risposta, con smorzamento $\xi = 5\%$

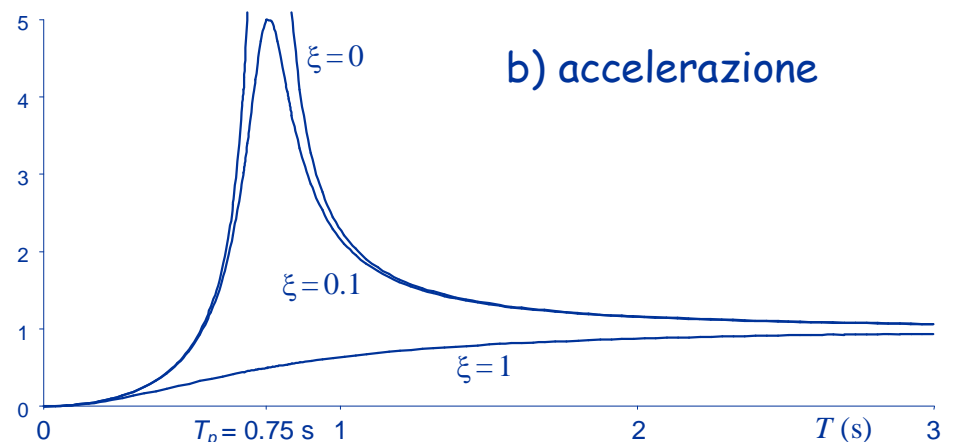
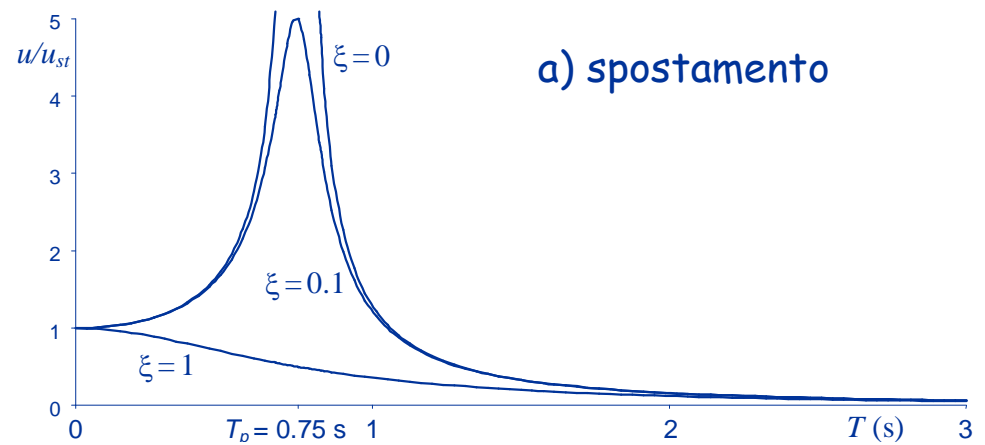


Il moto è somma di una componente armonica che ha lo stesso periodo della forzante ed ampiezza costante (componente stazionaria) e di una componente che ha lo stesso periodo del sistema ma ampiezza che si riduce man mano (componente transitoria)

## Forzante armonica

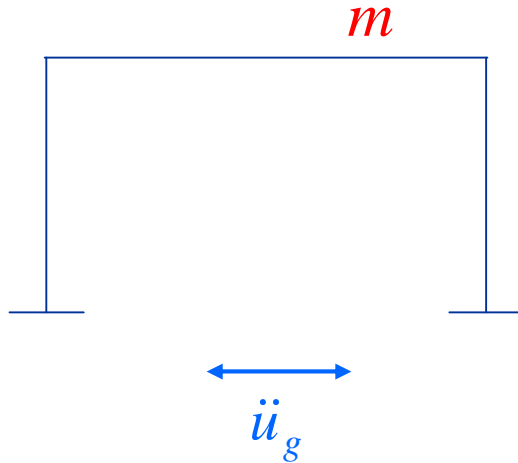


Il moto viene  
amplificato o ridotto,  
in funzione  
del periodo proprio  
e dello smorzamento  
del sistema





# Oscillazioni forzate (moto del terreno)



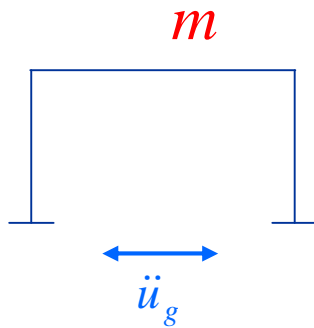
Equazione del moto:

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

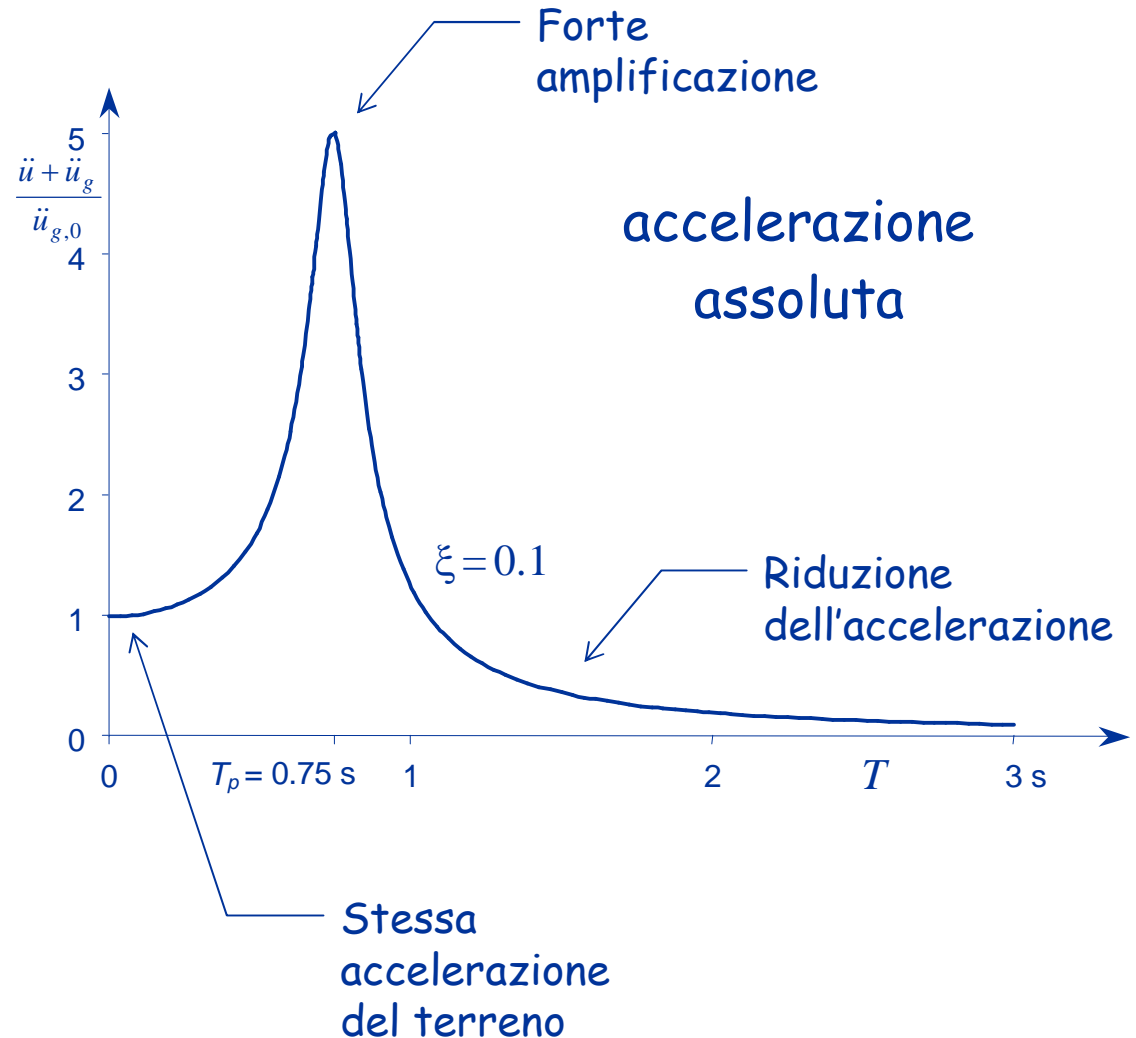
Cambia (formalmente)  
il termine noto  
nell'equazione del moto

Il problema è sostanzialmente  
identico a quello del moto con  
forzante applicata al traverso

# Oscillazioni forzate (moto del terreno - armonico)



Si noti, in particolare,  
l'andamento  
dell'accelerazione  
massima in funzione  
del periodo proprio



# Relazione tra i valori massimi di spostamento relativo e accelerazione assoluta

Equazione del moto:

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

Quando lo spostamento relativo  $u$   
è massimo la sua derivata è nulla

$$u = u_{\max} \quad \Rightarrow \quad \dot{u} = 0$$

Si ha allora:

$$m \ddot{u} + k u_{\max} = -m \ddot{u}_g$$

$$k u_{\max} = -m (\ddot{u} + \ddot{u}_g)$$

$$\left| \ddot{u} + \ddot{u}_g \right| = \frac{k}{m} u_{\max} = \left( \frac{2 \pi}{T} \right)^2 u_{\max}$$

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

# Relazione tra i valori massimi di spostamento relativo e accelerazione assoluta

La quantità  $\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 u$   
viene detta pseudoaccelerazione

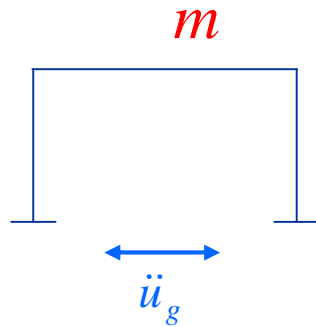
Essa coincide con l'accelerazione  
assoluta quando lo smorzamento  
è nullo

L'accelerazione assoluta massima e la pseudoaccelerazione massima  
a rigore sono diverse, ma in sostanza sono praticamente coincidenti

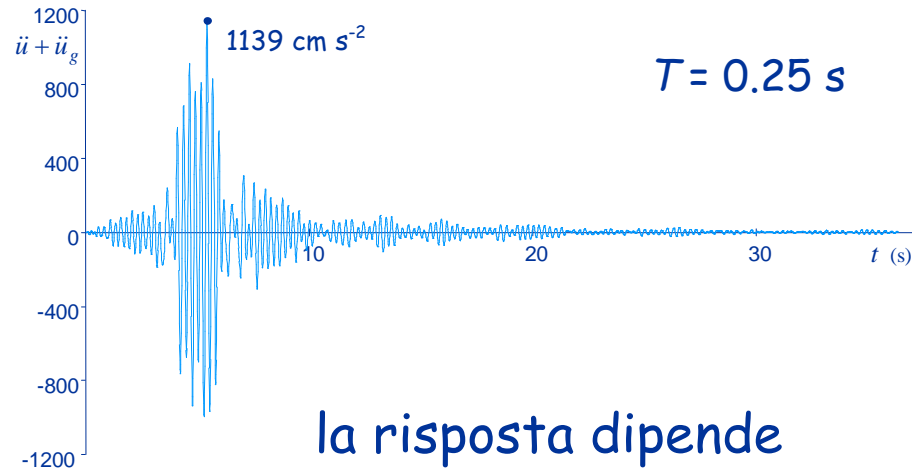
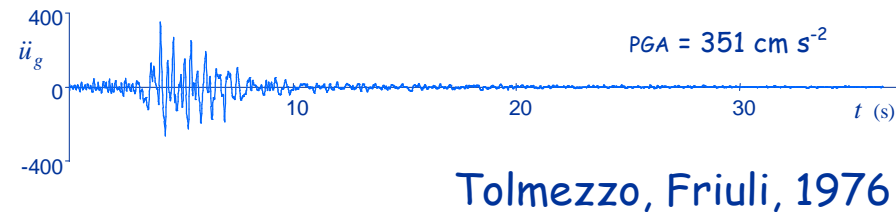
La relazione  $|\ddot{u} + \ddot{u}_g| = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 u$

consente di passare dai valori massimi dello spostamento a quelli  
massimi dell'accelerazione assoluta, e viceversa

# Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

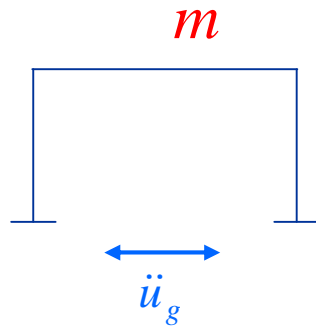


È possibile  
determinare  
numericamente  
la risposta ad un  
accelerogramma

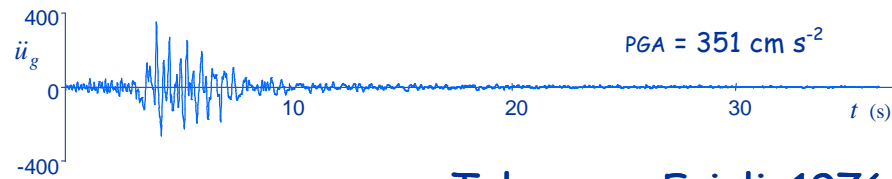


la risposta dipende  
dal periodo  $T$  dell'oscillatore

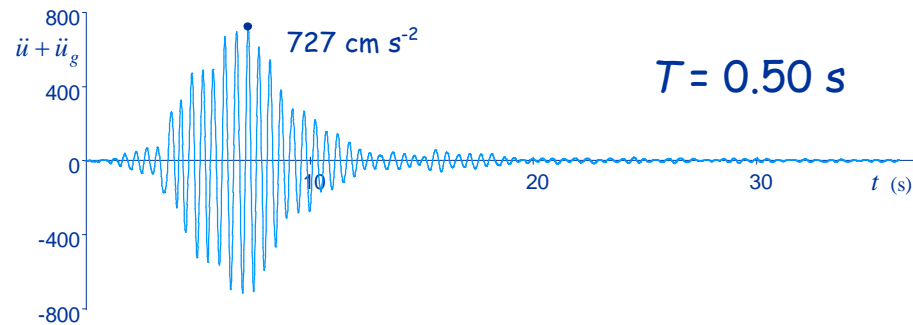
# Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



Cambiando il periodo  
dell'oscillatore,  
cambia la risposta

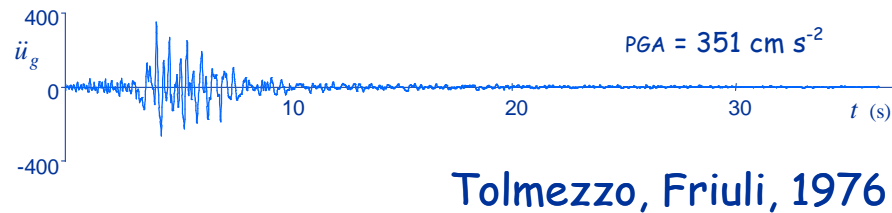
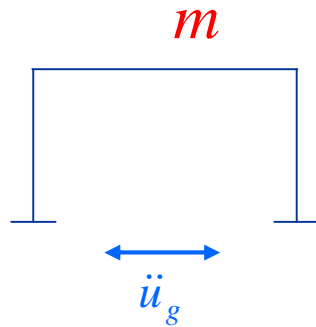


Tolmezzo, Friuli, 1976

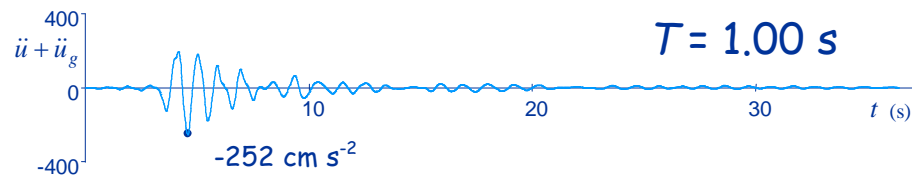


# Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)



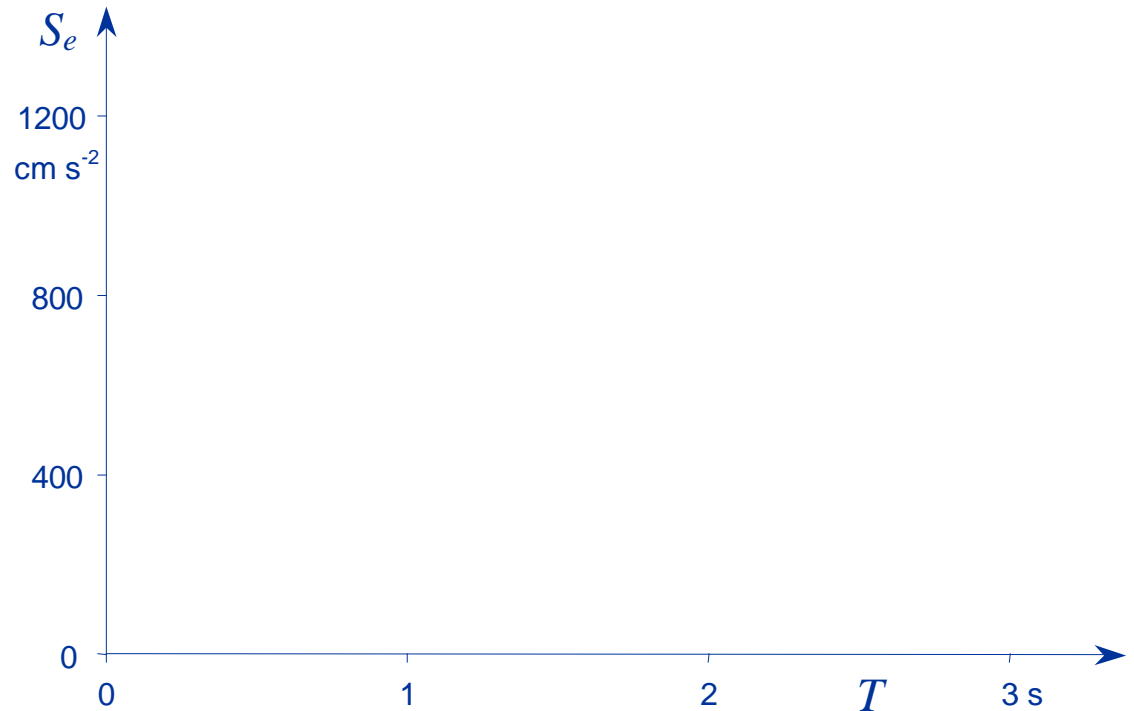
Cambiando il periodo  
dell'oscillatore,  
cambia la risposta



# Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)

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

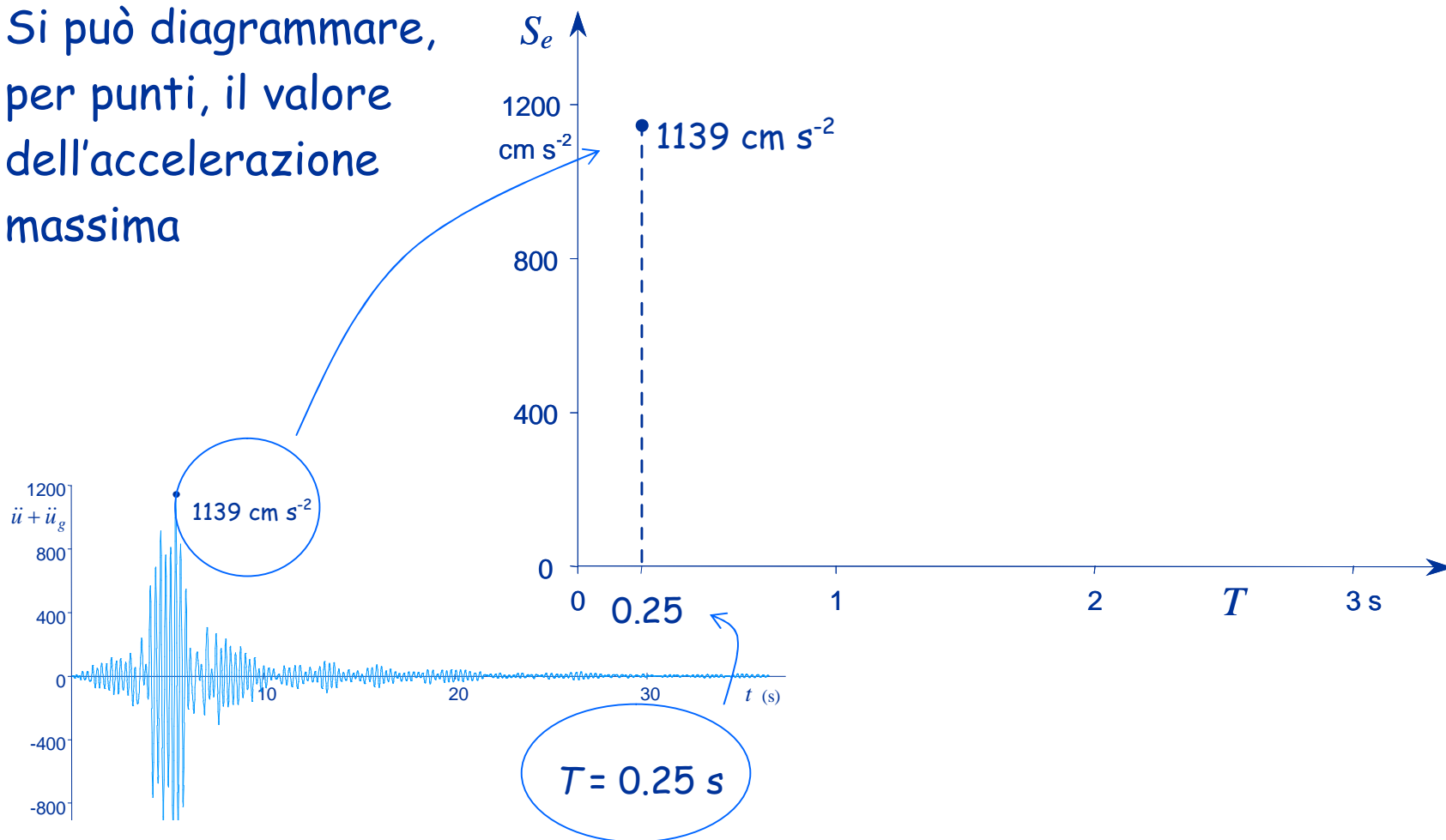




# Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)

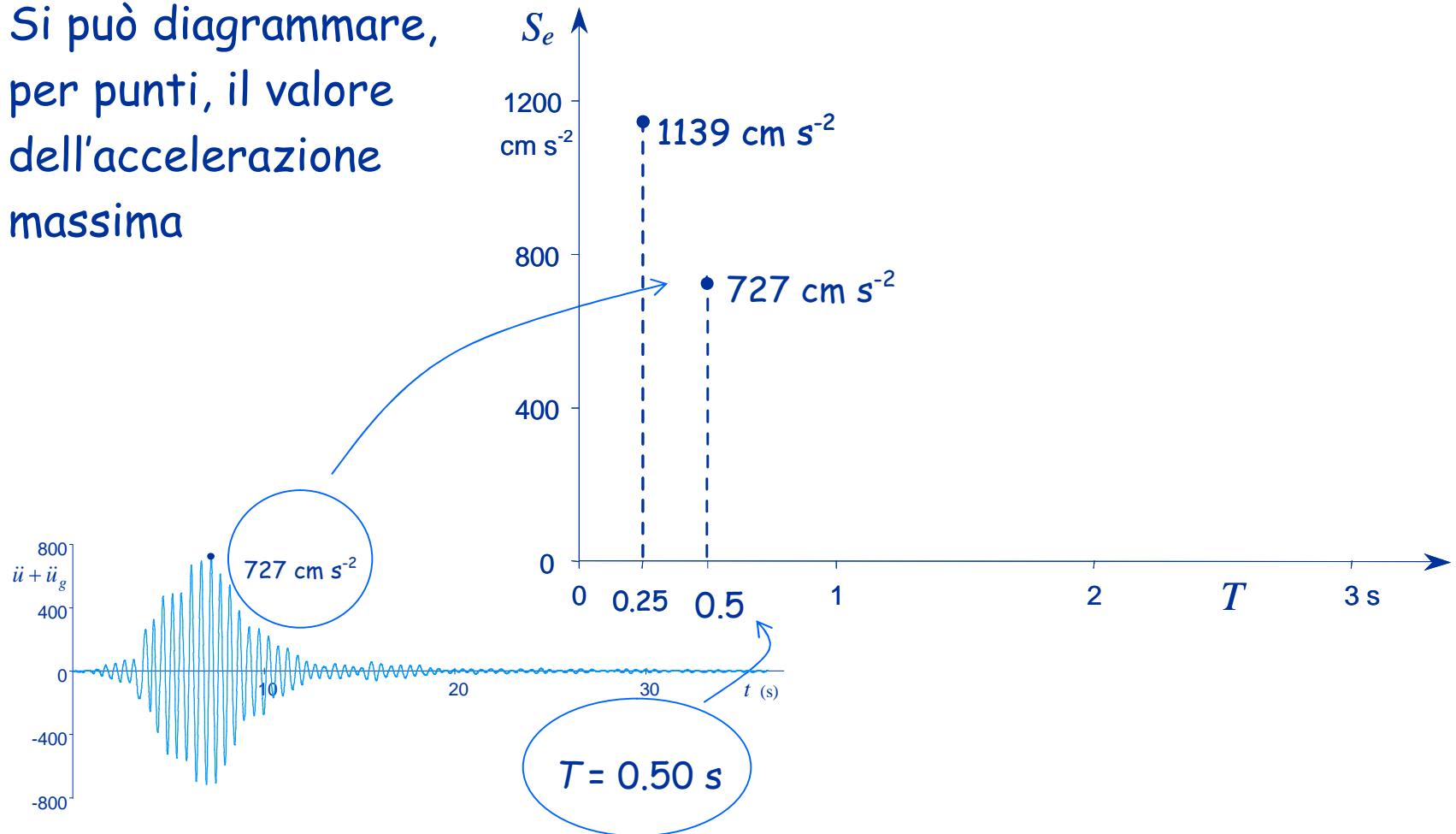
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



# Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)

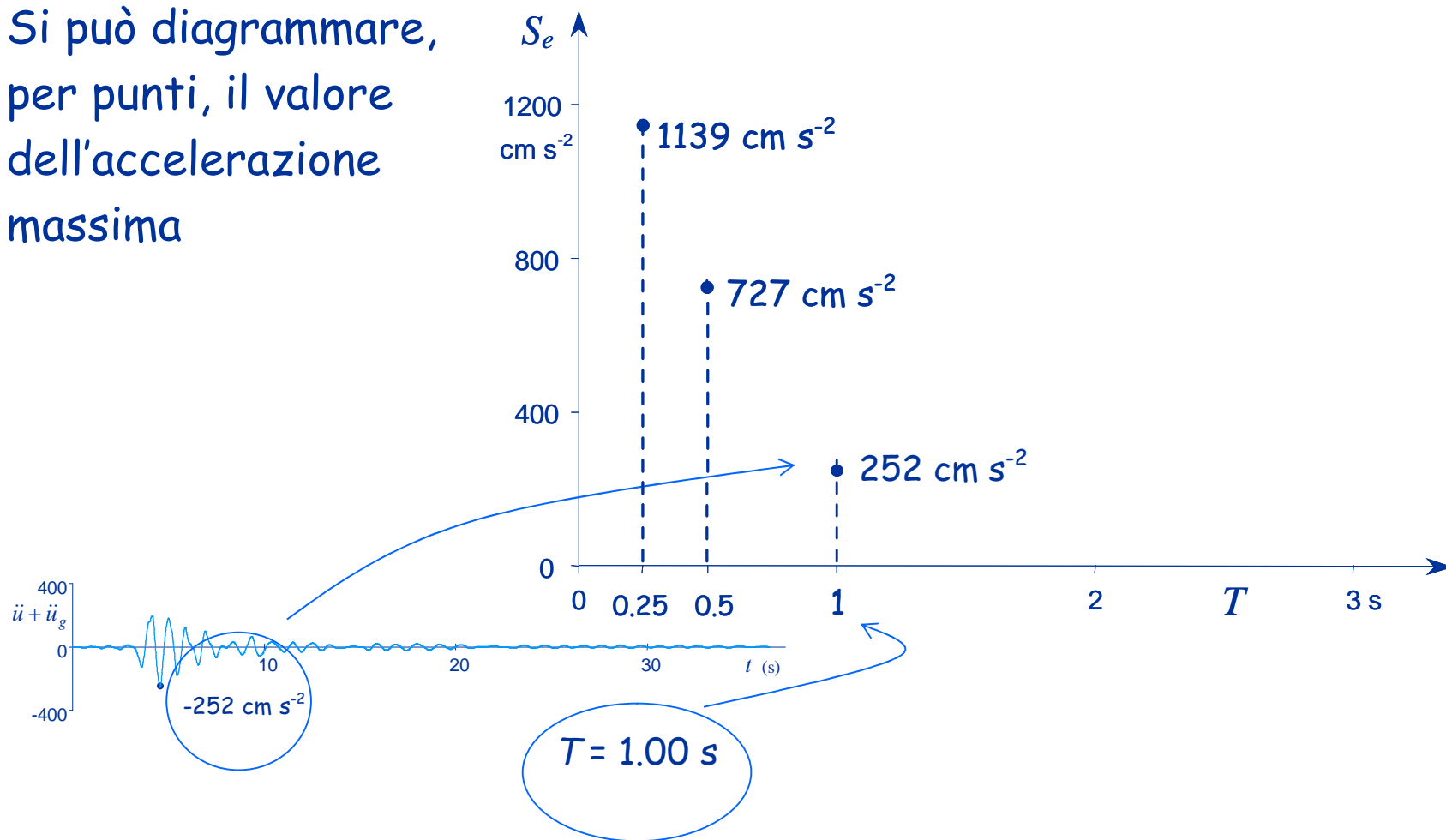
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



# Oscillazioni forzate

(moto del terreno - accelerogramma)

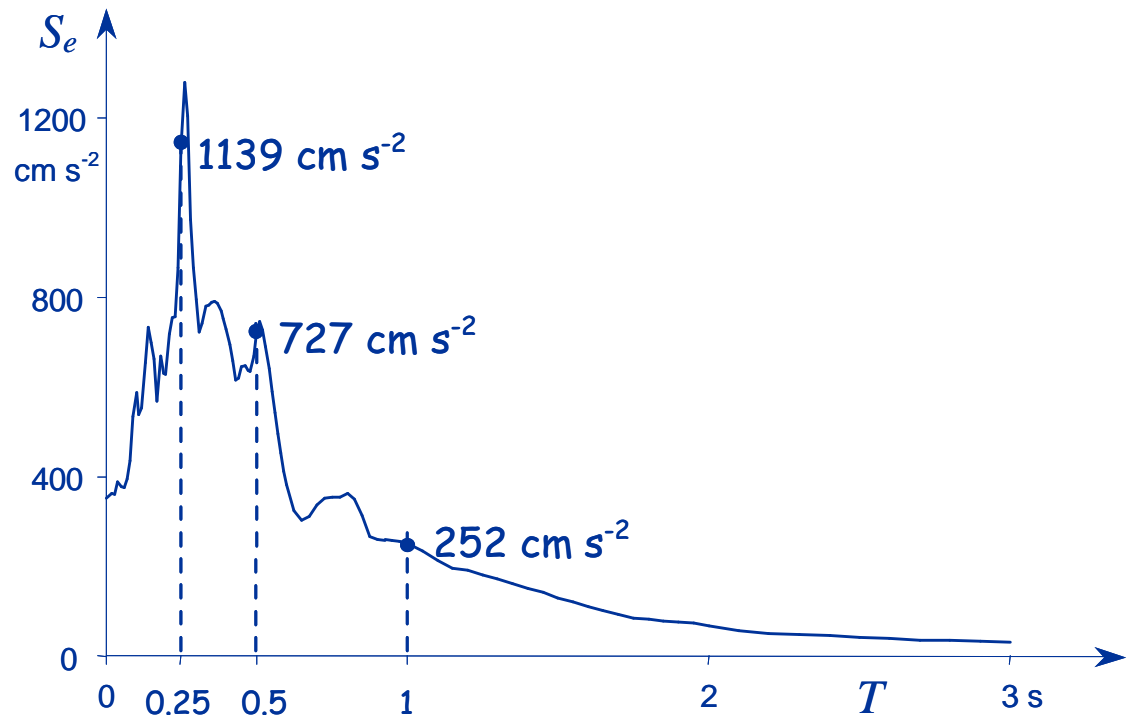
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



# Oscillazioni forzate

## Spettro di risposta

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

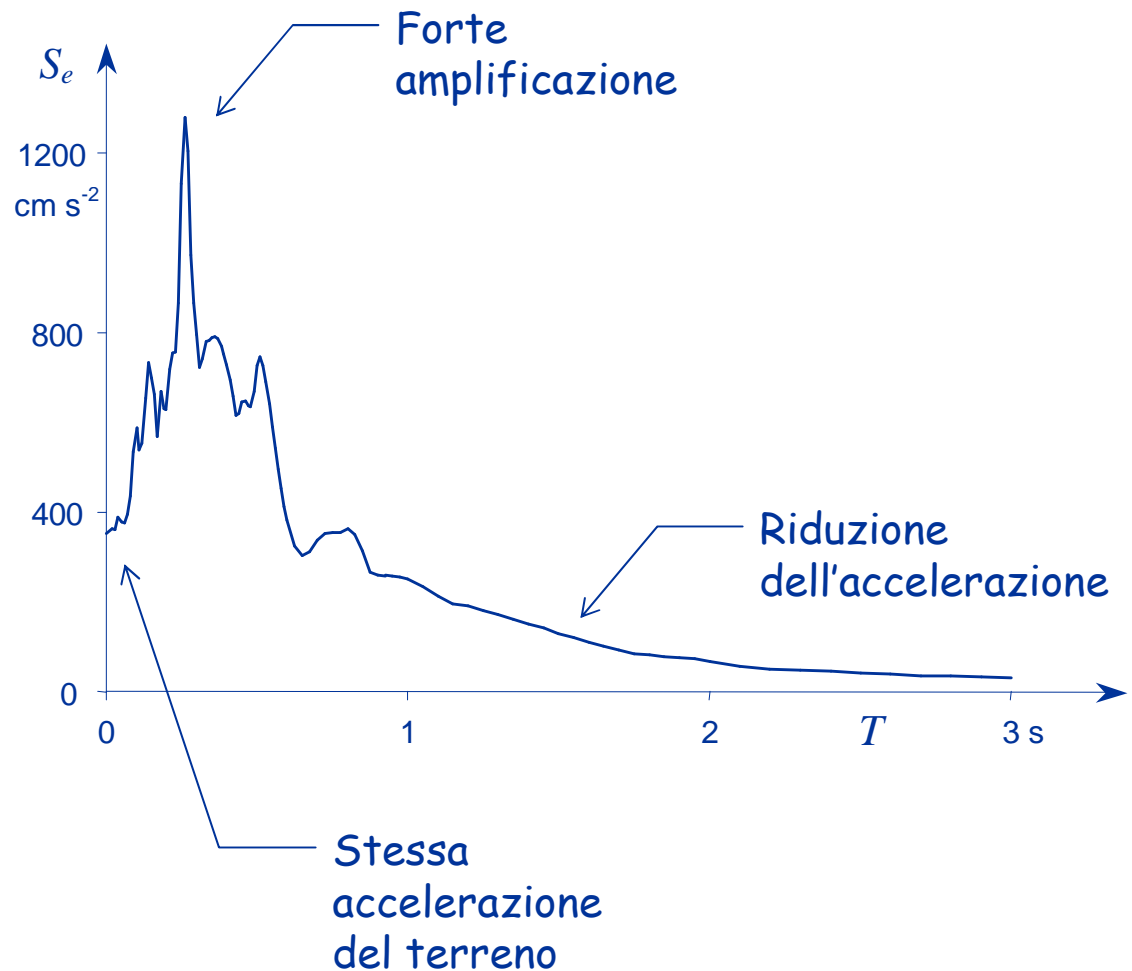


Il diagramma ottenuto unendo i vari punti viene detto "spettro di risposta" (in termini di accelerazione)

# 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

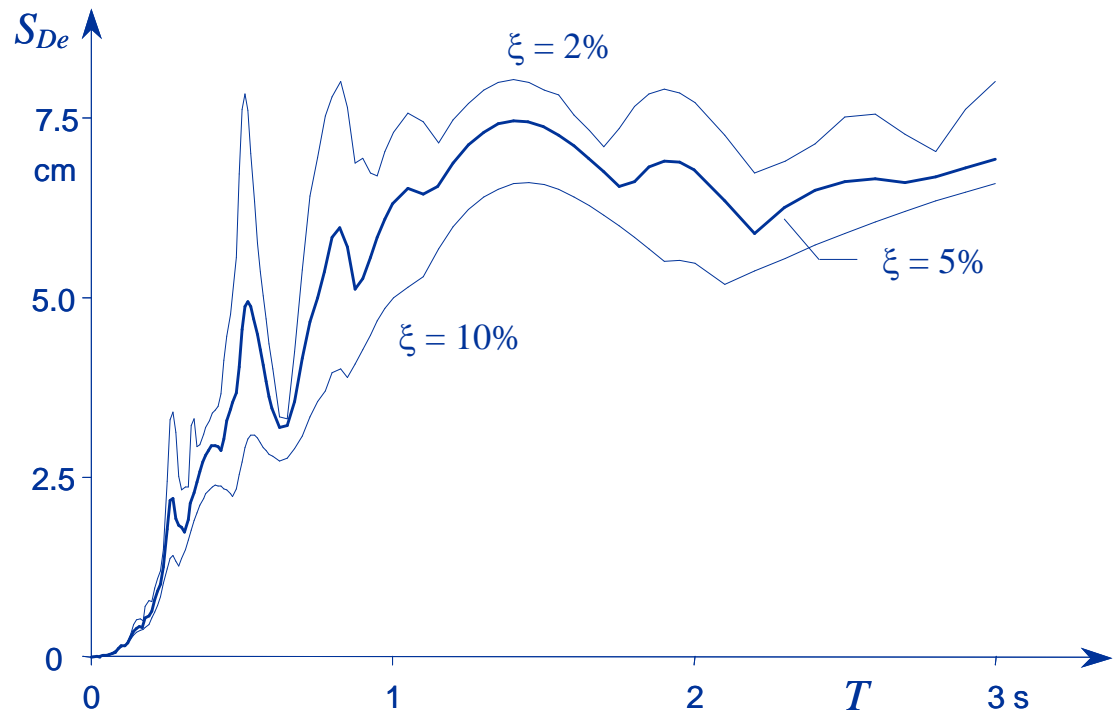


L'accelerazione massima nel sistema è maggiore quando lo smorzamento è minore

# Oscillazioni forzate

## Spettro di risposta (spostamento)

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



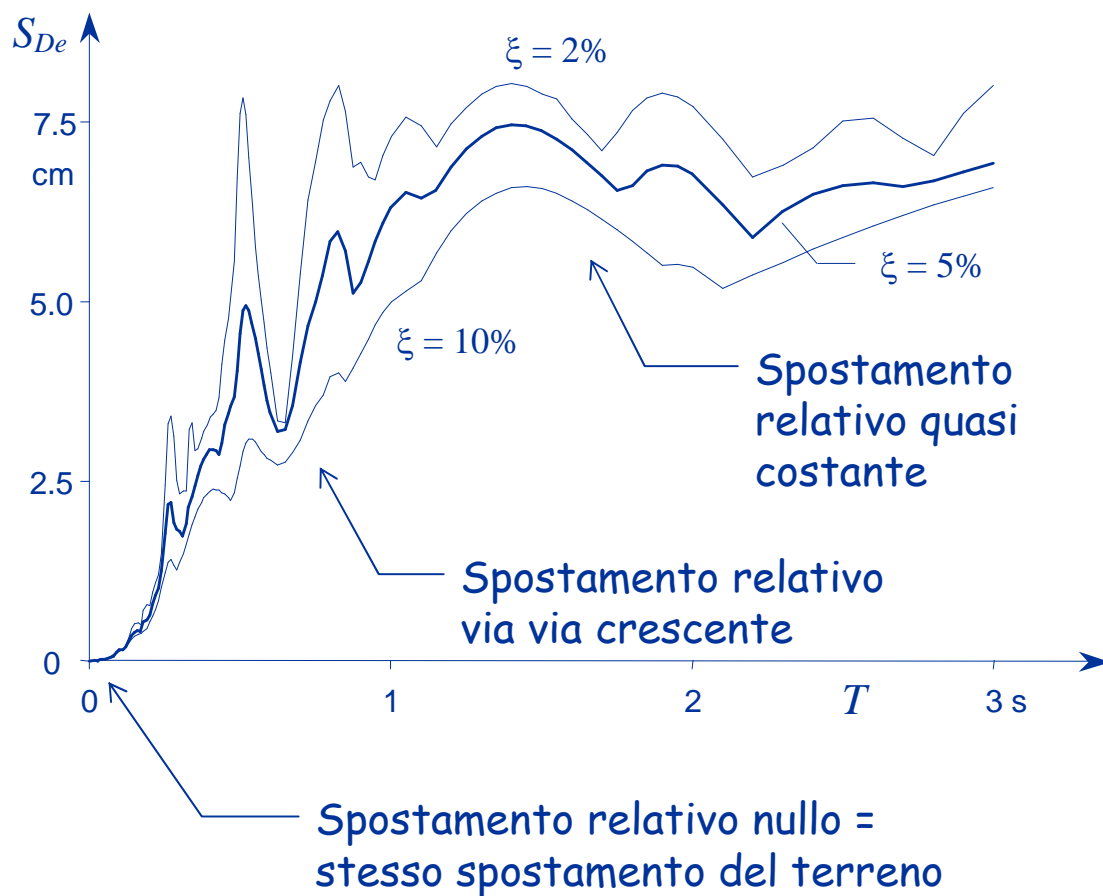
Il diagramma così ottenuto viene detto "spettro di risposta" (in termini di spostamento)

# 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

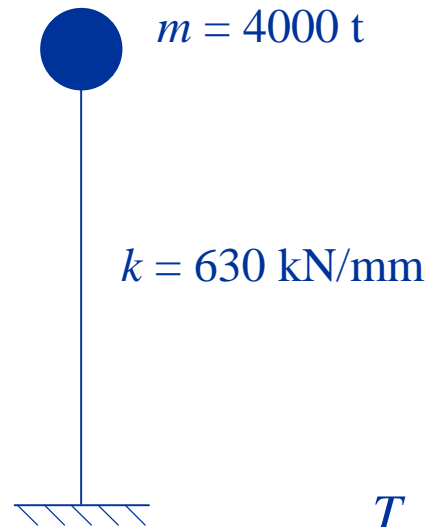




# A cosa servono gli spettri?



Foto



Modello  
di calcolo

Conoscendo  
massa e rigidezza  
possiamo  
determinare il  
periodo proprio

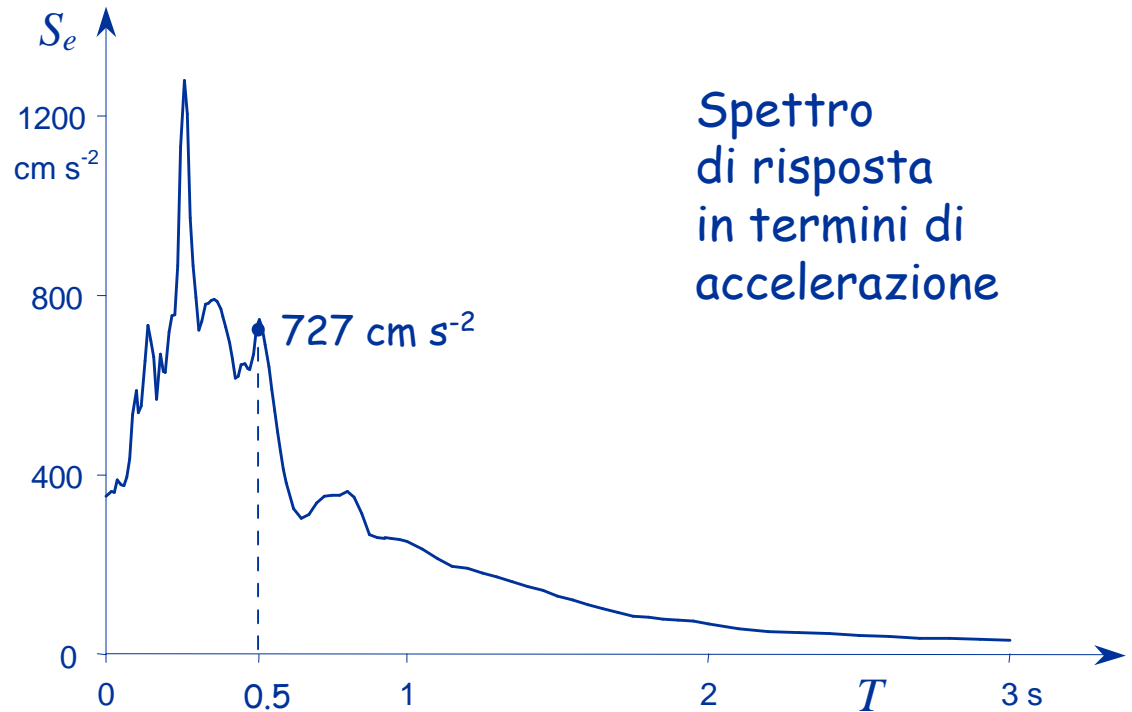
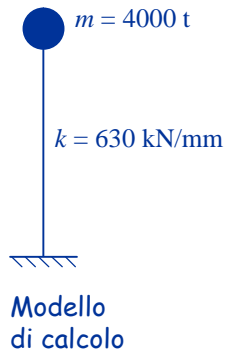
$$\begin{aligned} T &= 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \\ &= 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{4000 \times 10^3}{630 \times 10^6}} = \\ &= 0.5 \text{ s} \end{aligned}$$

# A cosa servono gli spettri?



Foto

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



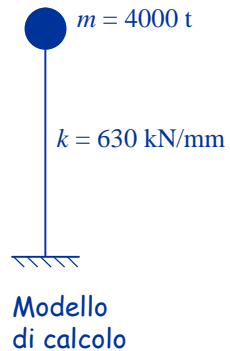
Noto il periodo proprio, possiamo leggere dallo spettro l'accelerazione assoluta massima

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

# A cosa servono gli spettri?

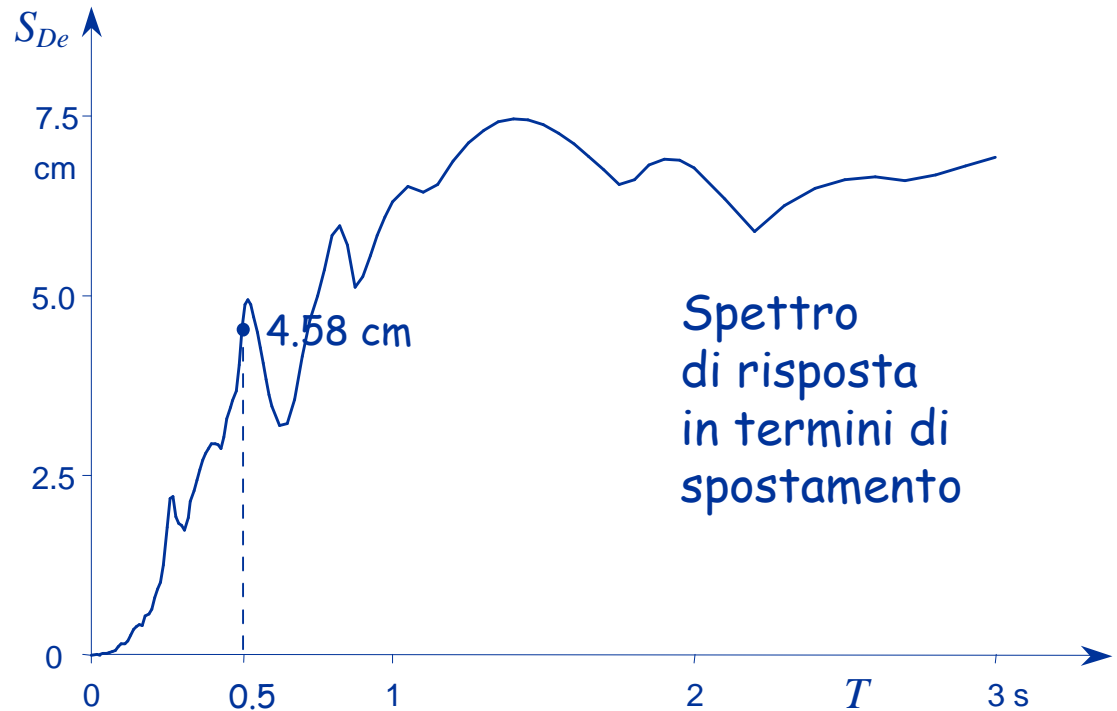


Foto



Modello  
di calcolo

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



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

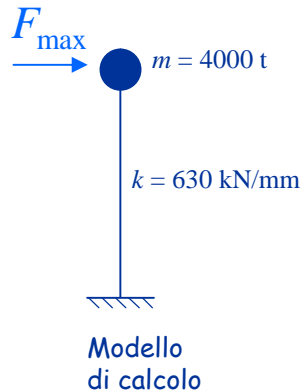
$$a_{\max} = 7.27 \text{ m s}^{-2} = 0.74 \text{ g}$$

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

# 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

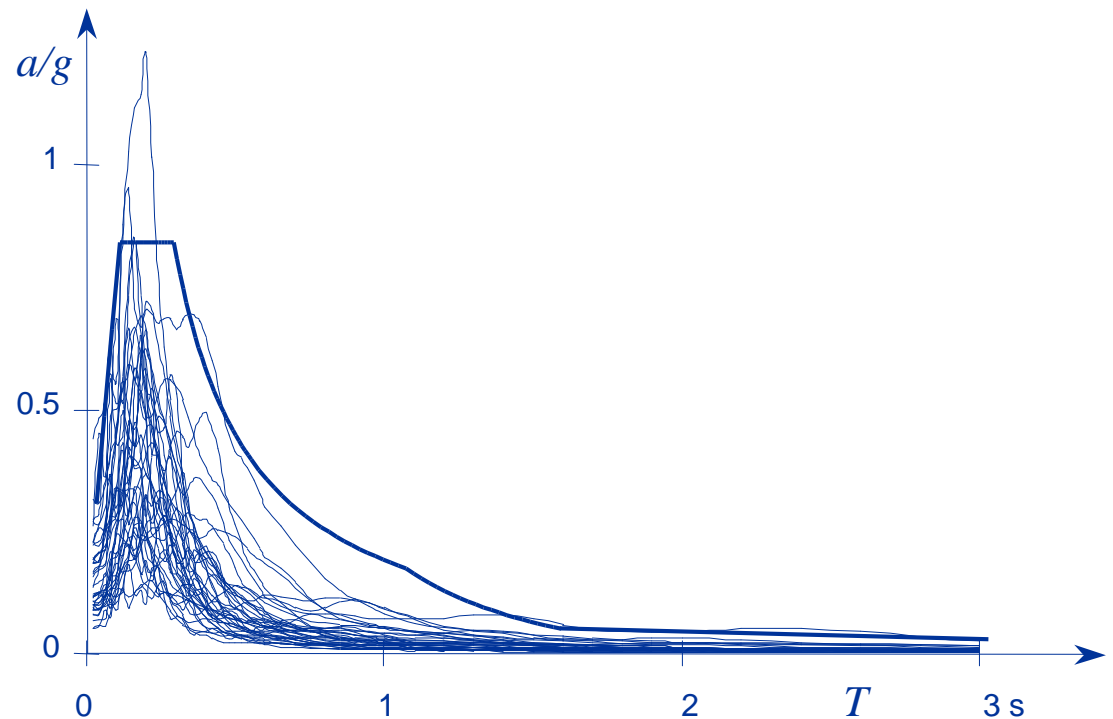
Noto il periodo proprio, possiamo leggere  
dallo spettro l'accelerazione assoluta massima  
o lo spostamento relativo massimo

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

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

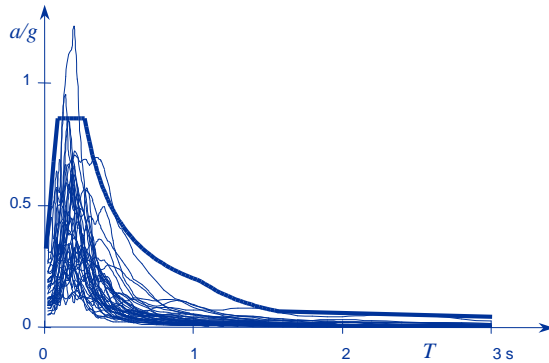
# Spettri di risposta

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

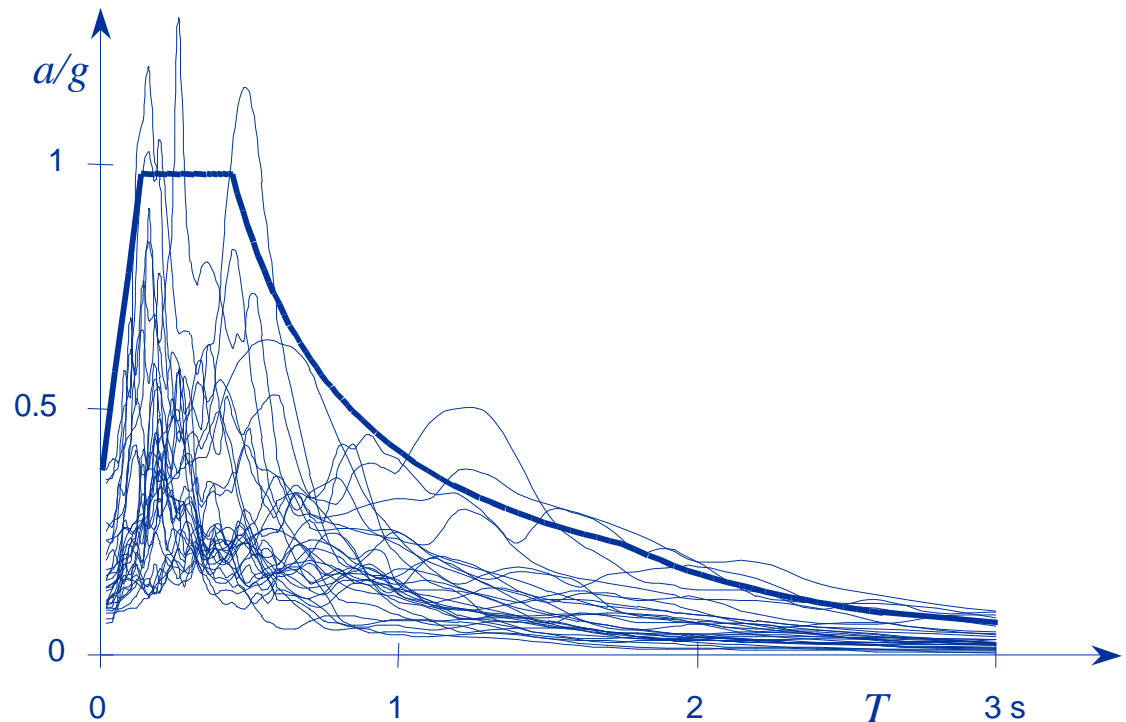


Si può quindi definire una curva che inviluppa tutti gli spettri di risposta, o che viene superata solo occasionalmente

# Spettri di risposta

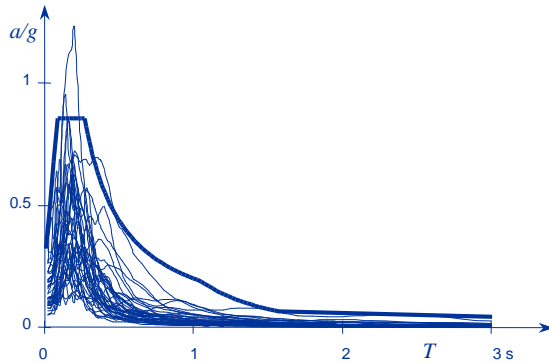


In zone differenti  
e su terreni  
differenti  
si otterranno  
risultati diversi

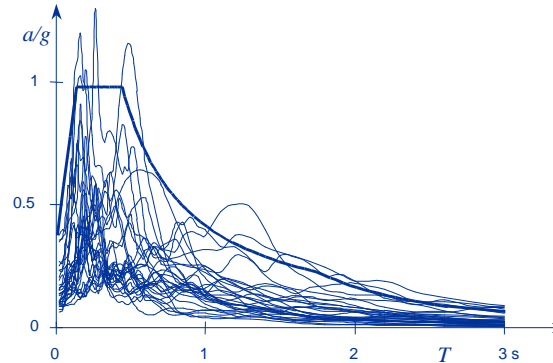


Si può quindi definire una curva che inviluppa tutti gli spettri di risposta, o che viene superata solo occasionalmente

# Spettri di risposta



In zone differenti  
e su terreni  
differenti  
si otterranno  
risultati diversi

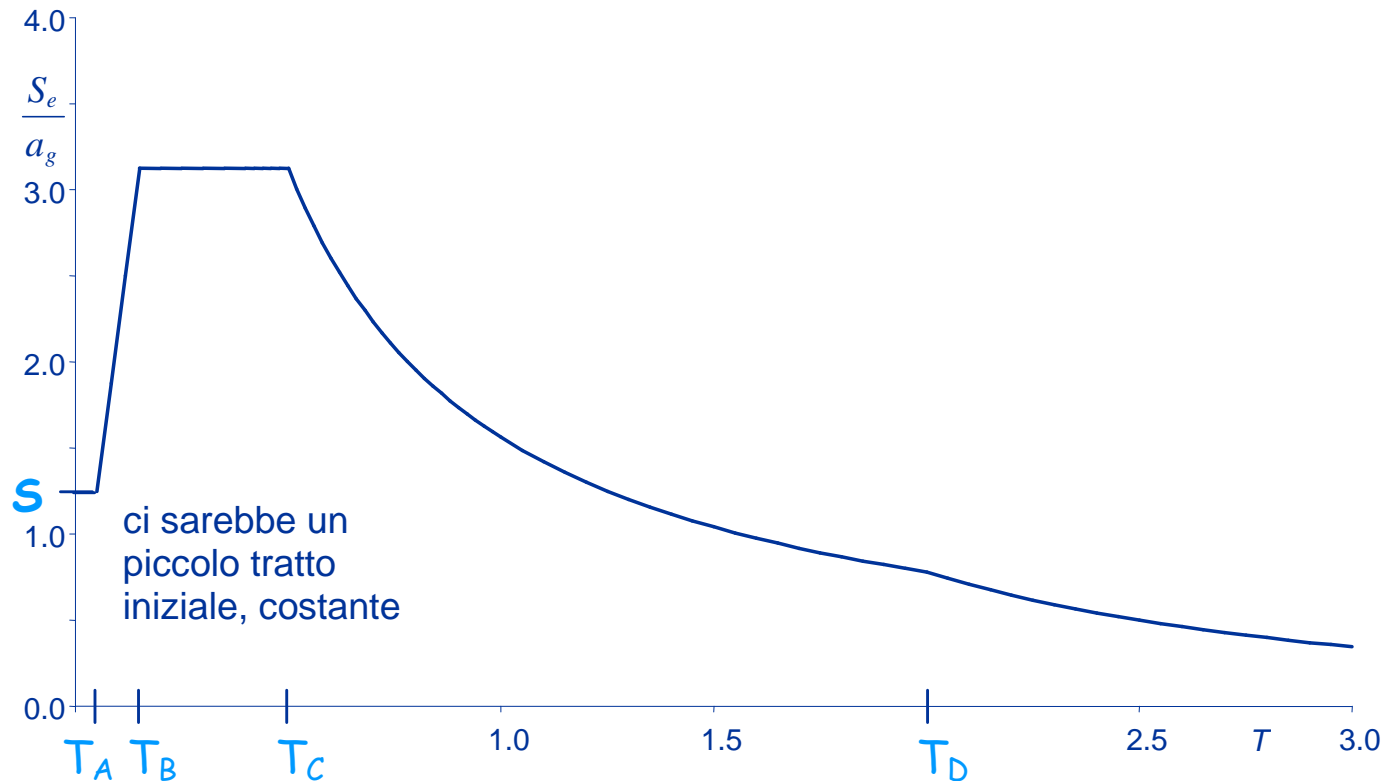


La normativa fornisce quindi spettri di  
risposta differenziati in funzione delle  
caratteristiche del suolo e della zona in  
cui è ubicata la struttura

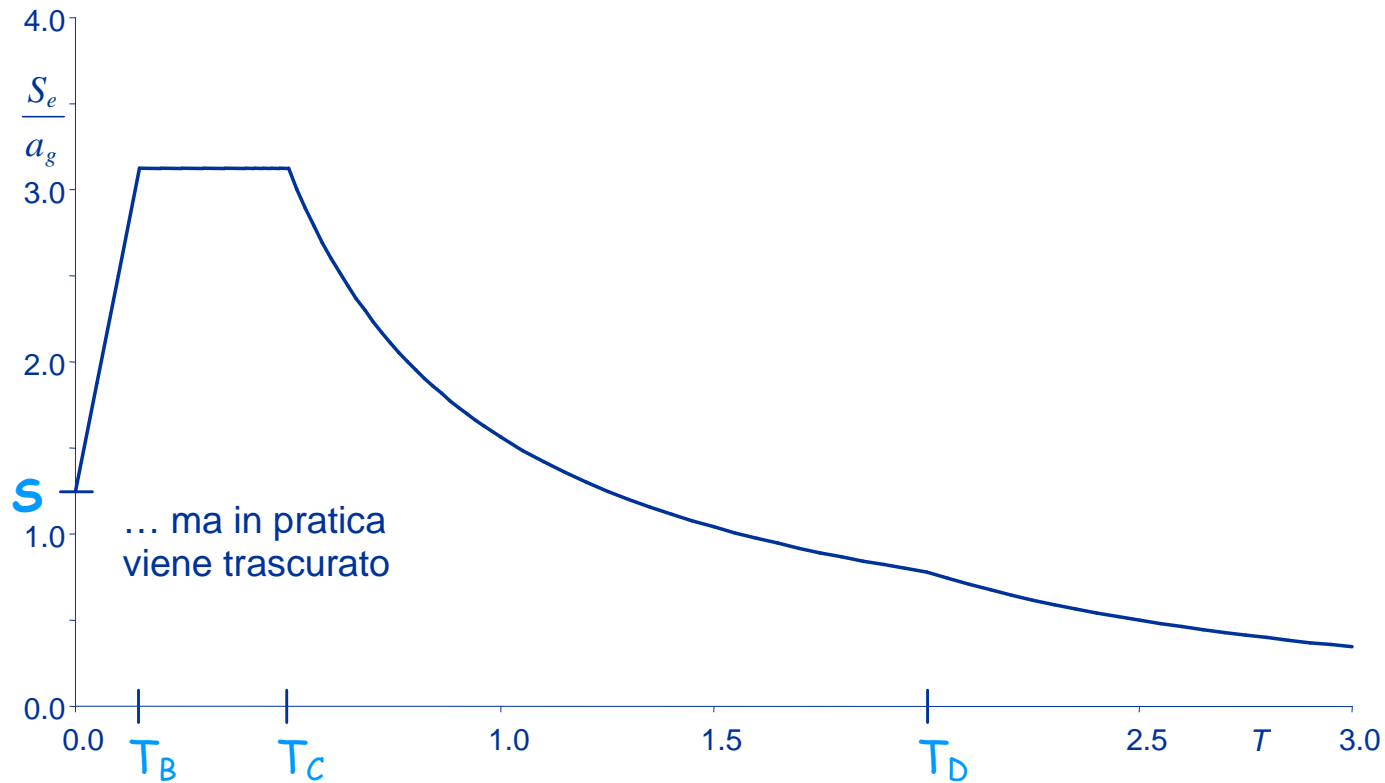
# Spettri di risposta elastica NTC 08 (D.M. 14/1/2008)



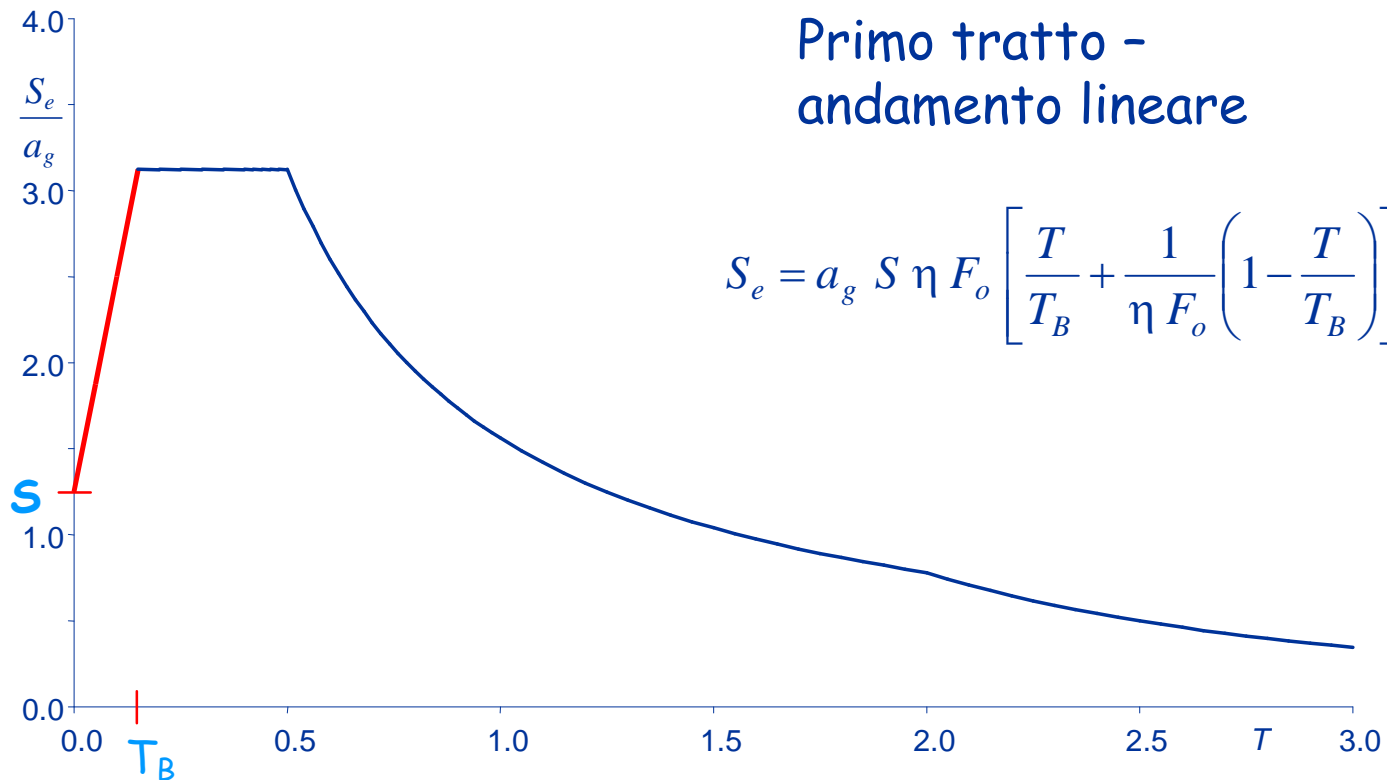
# Forma generale degli spettri di risposta elastica



# Forma generale degli spettri di risposta elastica



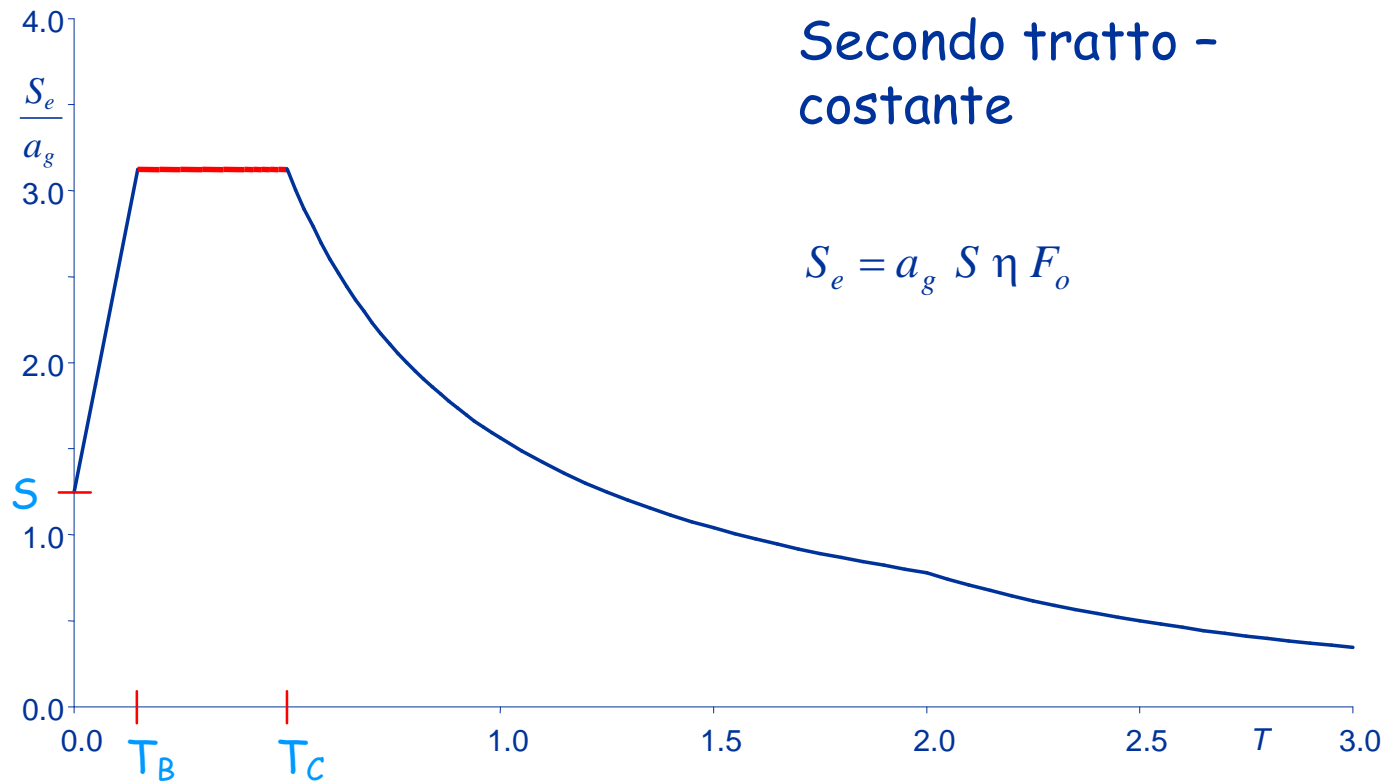
# Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



Amplificazione, legata  
al tipo di terreno

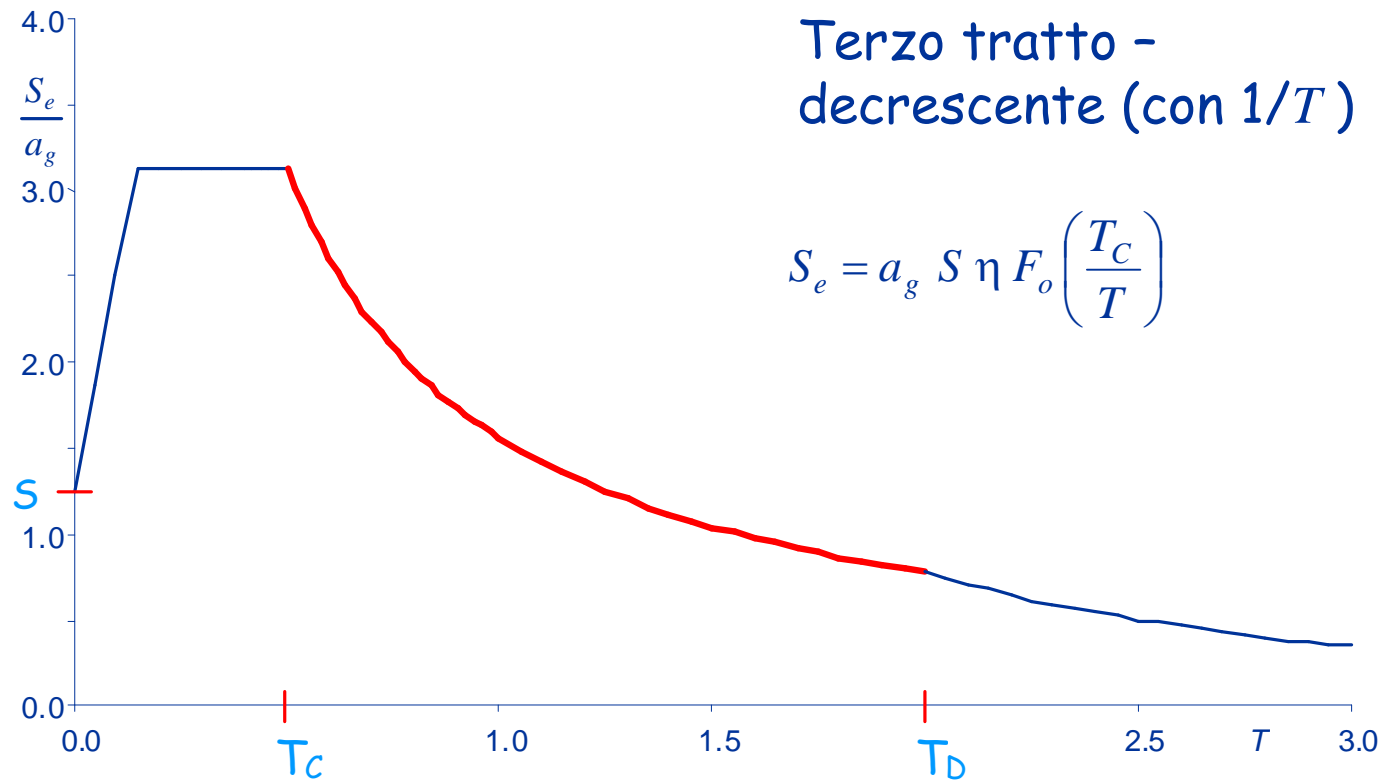
$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0.55$$

# Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



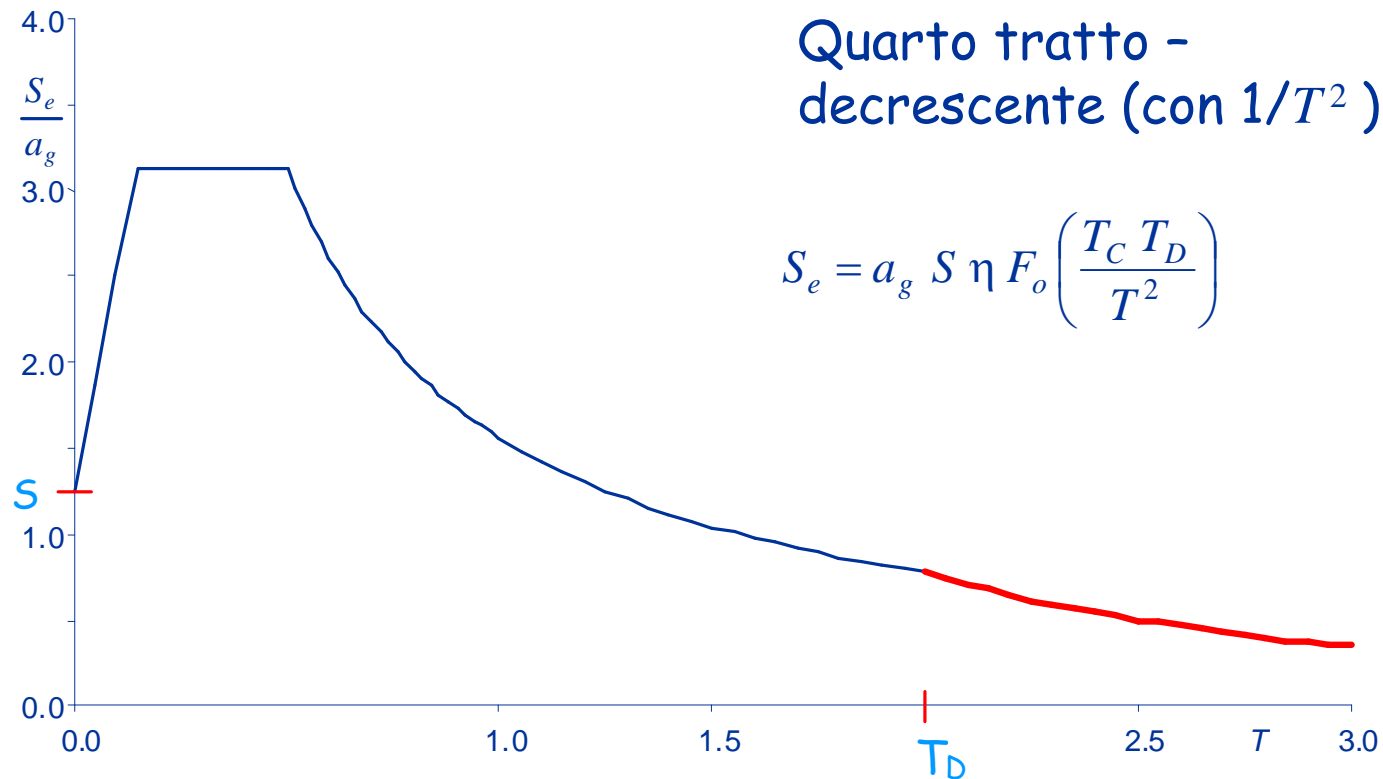
$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0.55$$

# 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
- $\xi$  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 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

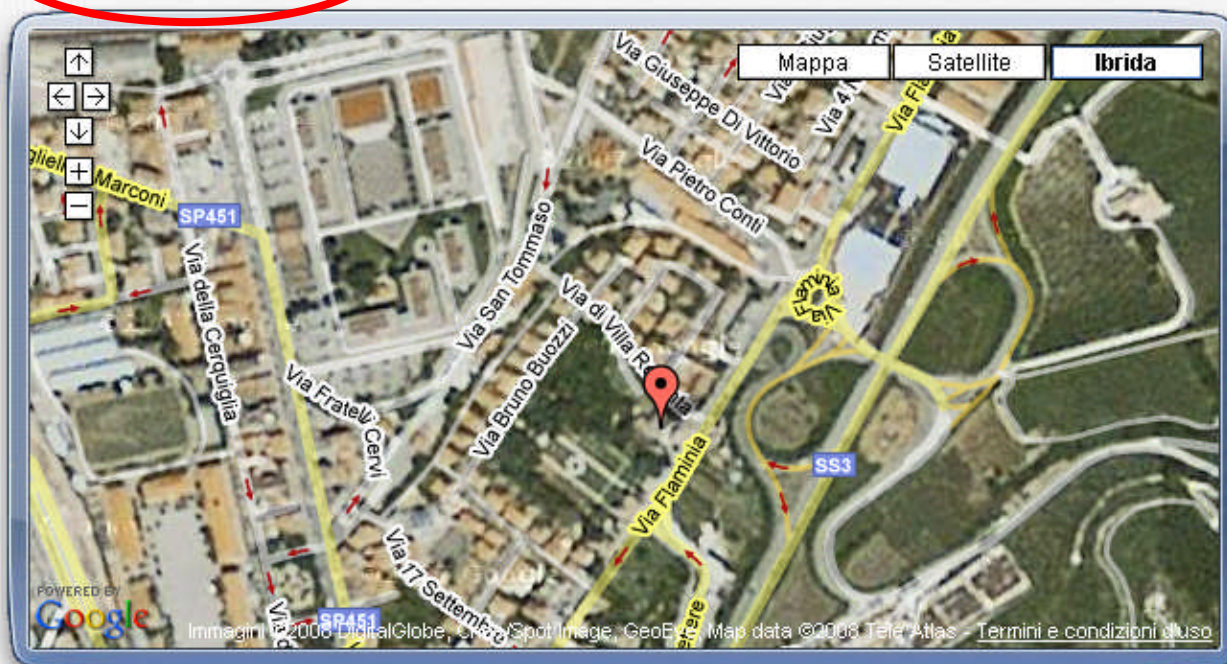
12.74130821

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

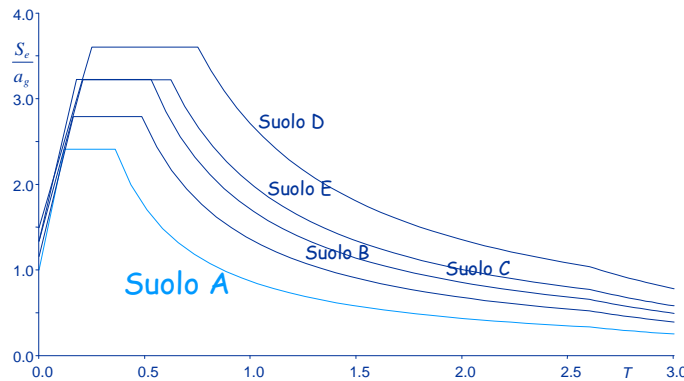
Stato limite e  
periodo di ritorno

### 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

# 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

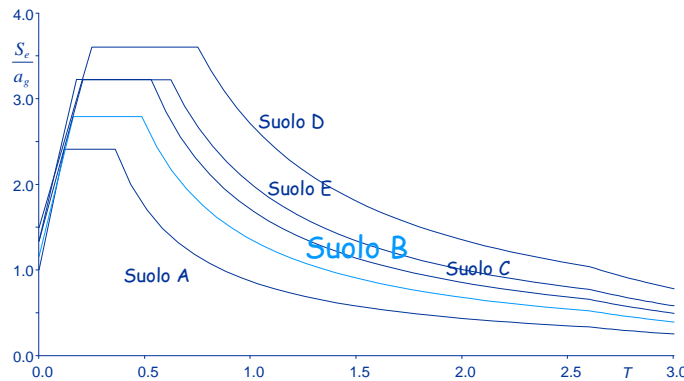
$$V_{S30}$$

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

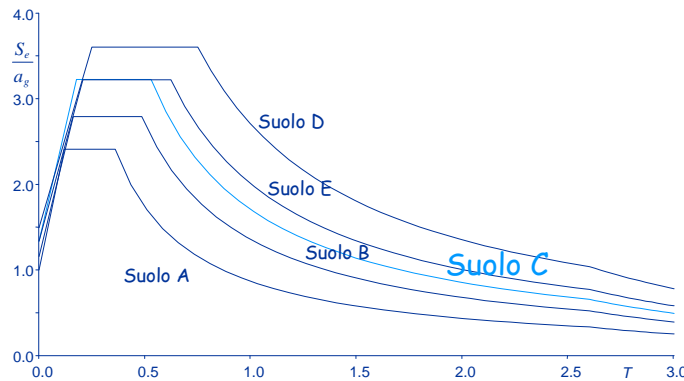
Depositi di sabbie e ghiaie  
molto addensate o argille  
molto consistenti

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

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

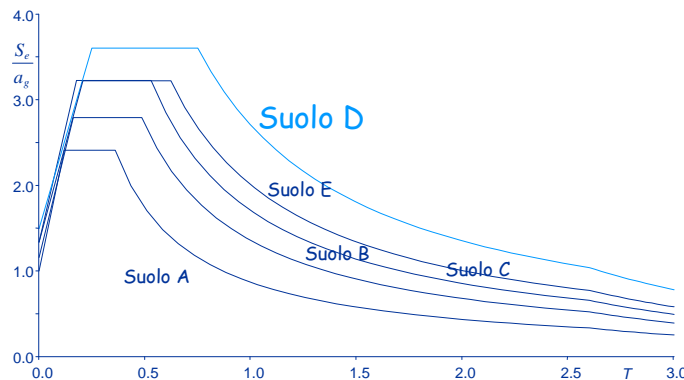
Depositi di sabbie e ghiaie  
mediamente addensate o  
argille di media consistenza

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

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

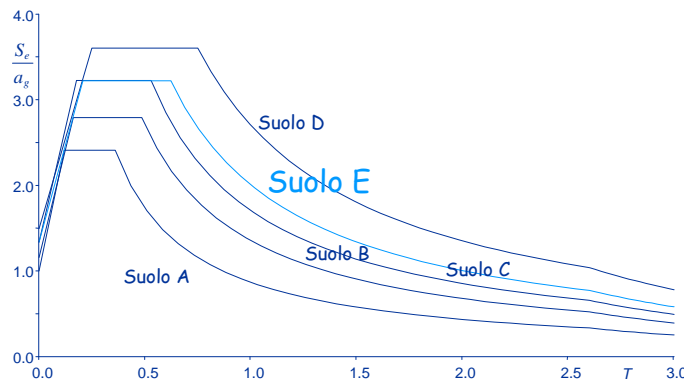
Depositi di terreni granulari da  
sciolti a poco addensati oppure  
coesivi da poco a  
mediamente consistenti

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

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. rimaneg.	Falda	S.P.T.	R.Q.D.	Piezometro
1	0.00		Materiale di riporto costituito da piccoli ciottoli in abbondante matrice sabbioso-limosa.	0.00						
2				1.80			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					
9								7.5		
10							6.70	7.95		
11	10.00		Sabbie marnose con a tratti livelli decimetrici di argille brune.							
12	12.00			2.00			11.50			
13			Argille grigio-brune debolmente sabbiose con a tratti abbondanti elementi lapidei (paleosuolo).				C.2			
14				2.50			11.80			
15	14.50						13.40			
16			Argille grigio-brune a tratti marnose con intercalati livelli sabbioso-marnosi.				C.3			
17				3.80	15.70		13.70			
18					C.2					
19	18.10		Marne sabbiose e/o sabbie marnose bianco crema.		16.20		16.2			
20	20.00			1.90			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					
25					C.3					
26					21.50					
27	26.50		Ciottoli eterometrici sub-arrotondati in poca matrice sabbiosa-argillosa.							
28	27.50			1.00						
29	28.90		Argille di colore bruno (paleosuolo) con abbondanti inclusi di minuti elementi lapidei.							
30	30.00		Sabbie marnose a tratti argillose bianco-crema.	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  
 $15 < N_{SPT} < 50$

# 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: località Spoleto

Vedere foglio  
Excel "Spettri"  
per applicazioni

Ad esempio, nel punto di Lat. 42.732 e Long. 12.673 sito nel comune di Spoleto (PG) si ha:

per  $T_R = 475$  anni:  $a_g = 0.1938 \text{ g}$   $F_o = 2.42$   $T_C^* = 0.32 \text{ s}$

per  $T_R = 50$  anni:  $a_g = 0.0803 \text{ g}$   $F_o = 2.46$   $T_C^* = 0.28 \text{ s}$

Tab. 7. Valori dei coefficienti che definiscono lo spettro di risposta elastico:  
accelerazioni orizzontali, terremoto con  $T_R=475$  anni (SLV), Spoleto, D.M. 14/1/08

Categoria suolo	accelerazione orizzontale	$S$	$F_o$	$T_B$	$T_C$	$T_D$
A	0.194 g	1.00	2.42	0.107 s	0.320 s	2.375 s
B	0.194 g	1.20	2.42	0.147 s	0.442 s	2.375 s
C	0.194 g	1.42	2.42	0.163 s	0.489 s	2.375 s
D	0.194 g	1.70	2.42	0.236 s	0.707 s	2.375 s
E	0.194 g	1.48	2.42	0.193 s	0.580 s	2.375 s

# Spettri di risposta NTC 08

## Esempio: località Spoleto

Vedere foglio  
Excel "Spettri"  
per applicazioni

Ad esempio, nel punto di Lat. 42.732 e Long. 12.673 sito nel comune di Spoleto (PG) si ha:

per  $T_R = 475$  anni:  $a_g = 0.1938 \text{ g}$   $F_o = 2.42$   $T_C^* = 0.32 \text{ s}$

per  $T_R = 50$  anni:  $a_g = 0.0803 \text{ g}$   $F_o = 2.46$   $T_C^* = 0.28 \text{ s}$

Tab. 8. Valori dei coefficienti che definiscono lo spettro di risposta elastico:  
accelerazioni orizzontali, terremoto con  $T_R=50$  anni (SLD), Spoleto, D.M. 14/1/08

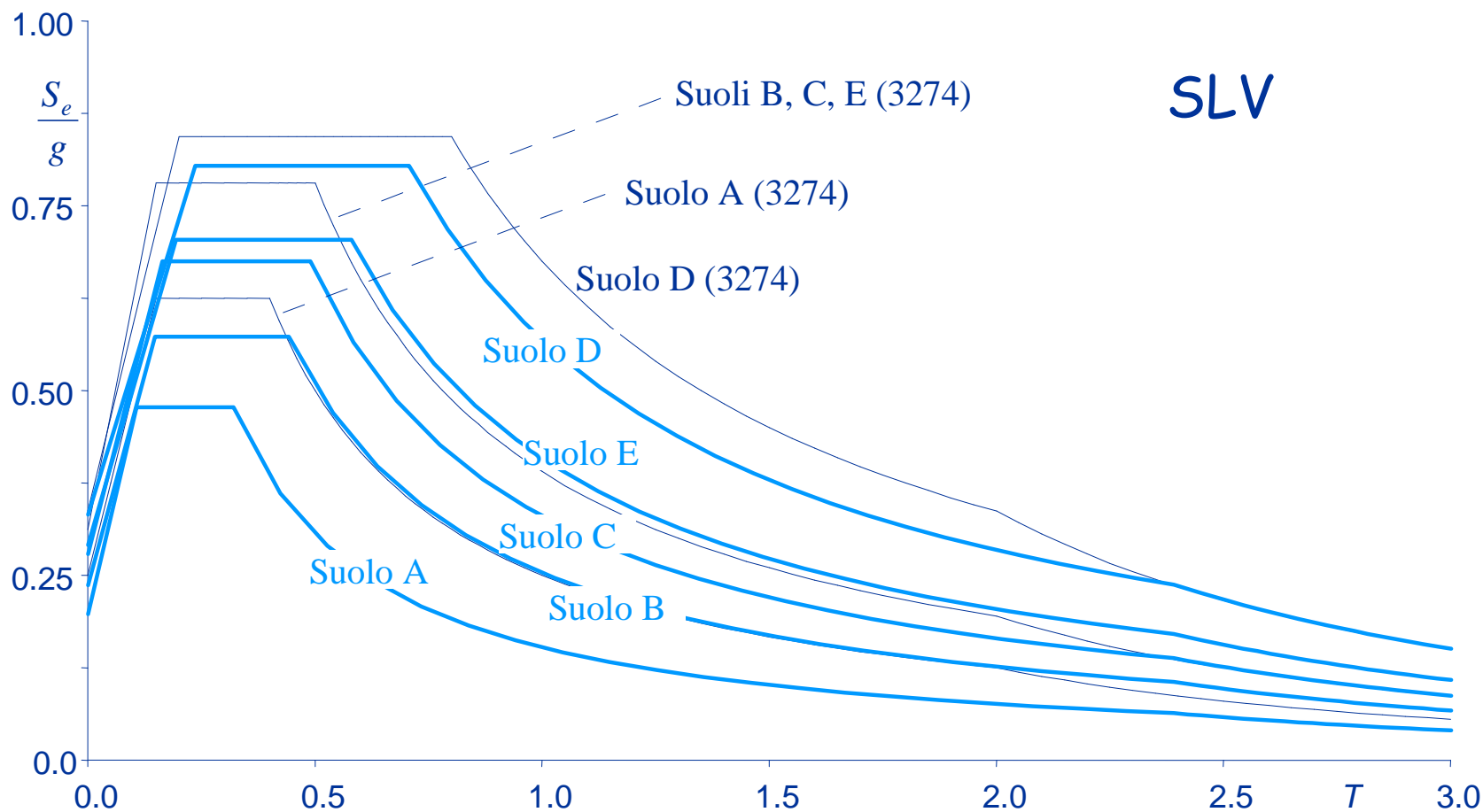
Categoria suolo	accelerazione orizzontale	$S$	$F_o$	$T_B$	$T_C$	$T_D$
A	0.080 g	1.00	2.46	0.093 s	0.280 s	1.921 s
B	0.080 g	1.20	2.46	0.132 s	0.397 s	1.921 s
C	0.080 g	1.50	2.46	0.149 s	0.447 s	1.921 s
D	0.080 g	1.80	2.46	0.220 s	0.661 s	1.921 s
E	0.080 g	1.60	2.46	0.179 s	0.536 s	1.921 s



# Spettri di risposta NTC 08

## Esempio: località Spoleto

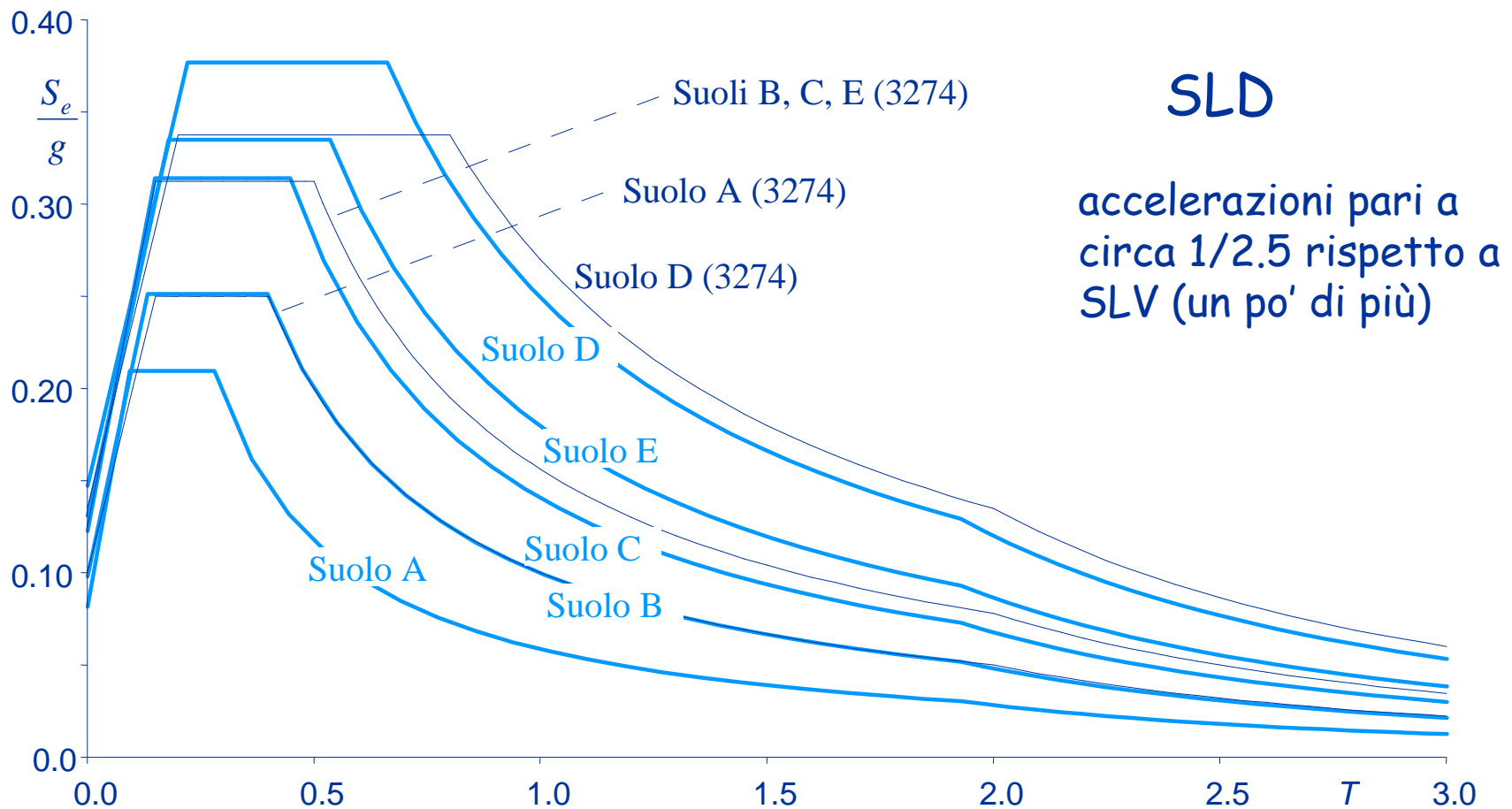
Vedere foglio  
Excel "Spettri"  
per applicazioni



# Spettri di risposta NTC 08

## Esempio: località Spoleto

Vedere foglio  
Excel "Spettri"  
per applicazioni



# Spettri di risposta NTC08

## accelerazioni verticali

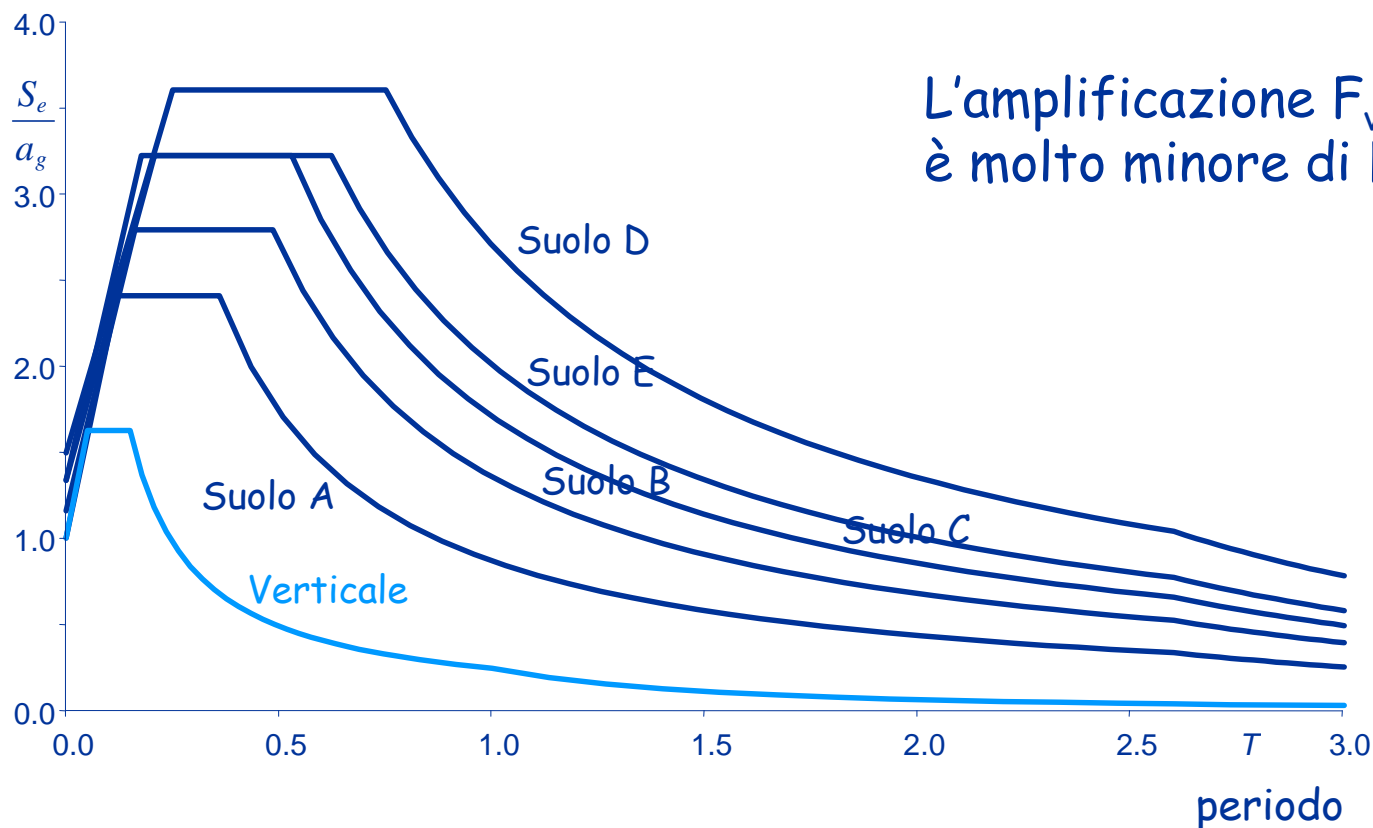
- Lo spettro ha la stessa forma, cambiano i parametri

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

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

# Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali e verticali, alto periodo di ritorno

accelerazione (normalizzata)



Anno accademico 2009-10

Laboratorio di Tecnica delle costruzioni 2

**Progetto e verifica di edifici antisismici in c.a.**

3 - Spettri di progetto

Catania

9 giugno 2010

Aurelio Gheresi

# Risposta sismica

Schemi a un grado di libertà  
in campo plastico

È possibile progettare le strutture  
in modo che rimangano in campo elastico?

L'accelerazione massima del suolo, per terremoti  
con elevato periodo di ritorno, è molto forte (0.35 g  
in zone ad alta sismicità)

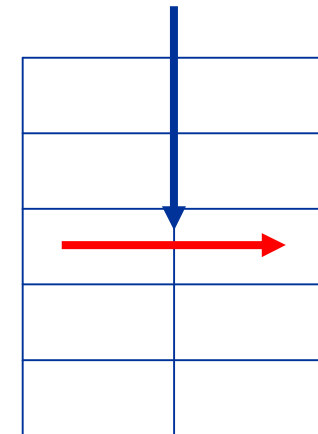
Per strutture con periodo medio-bassi si ha una  
notevole amplificazione dell'accelerazione, rispetto  
a quella del suolo (circa 2.5 volte)

Le azioni inerziali (forze orizzontali indotte dal  
sisma) possono essere comparabili con le azioni  
verticali

È possibile progettare le strutture  
in modo che rimangano in campo elastico?

Azioni orizzontali comparabili  
con le azioni verticali

Le sollecitazioni provocate  
dalle azioni orizzontali sono  
molto forti

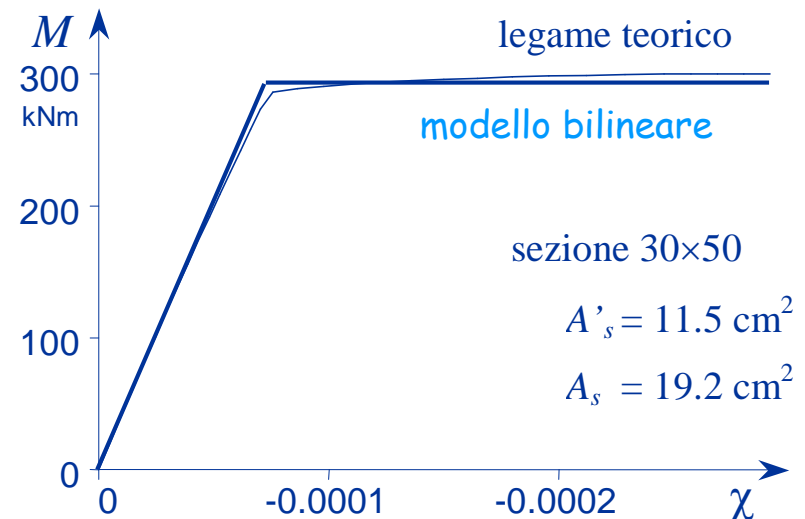
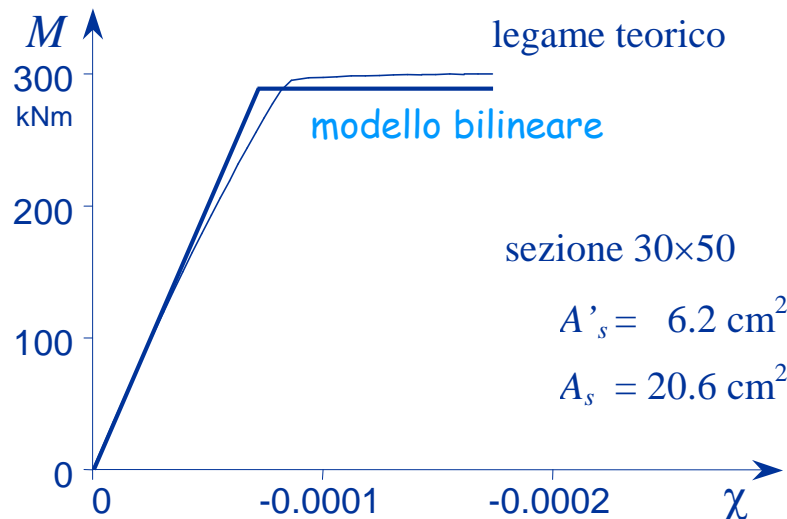


Non è economicamente conveniente progettare la  
struttura in modo che rimanga in campo elastico



# Comportamento oltre il limite elastico

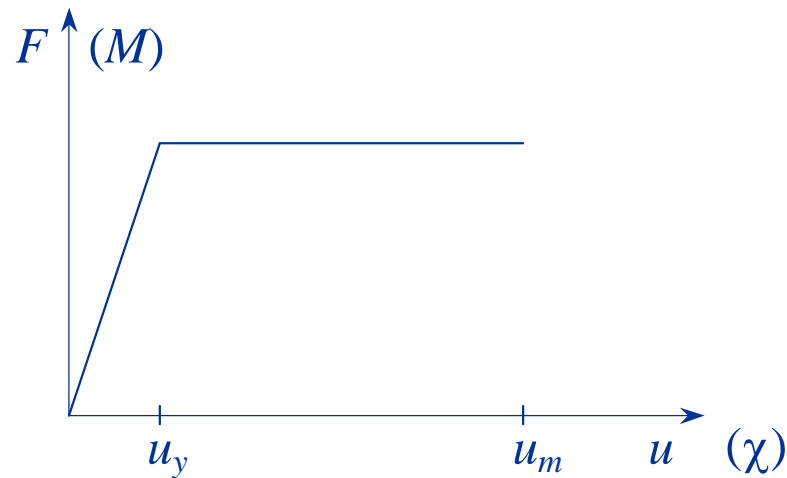
Occorre tener conto del comportamento non lineare delle singole sezioni



Il comportamento reale viene in genere rappresentato con un modello più semplice, bilineare (elastico-perfettamente plastico)

# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico

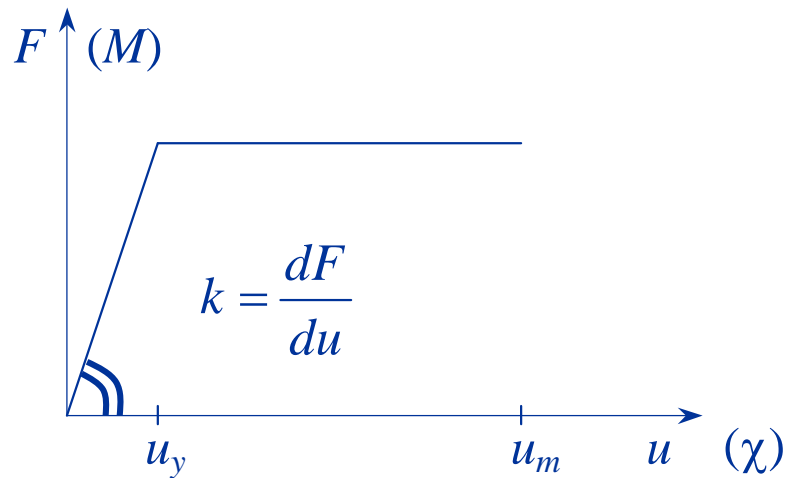


È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

# Comportamento oltre il limite elastico

## Legame elastico-perfettamente plastico



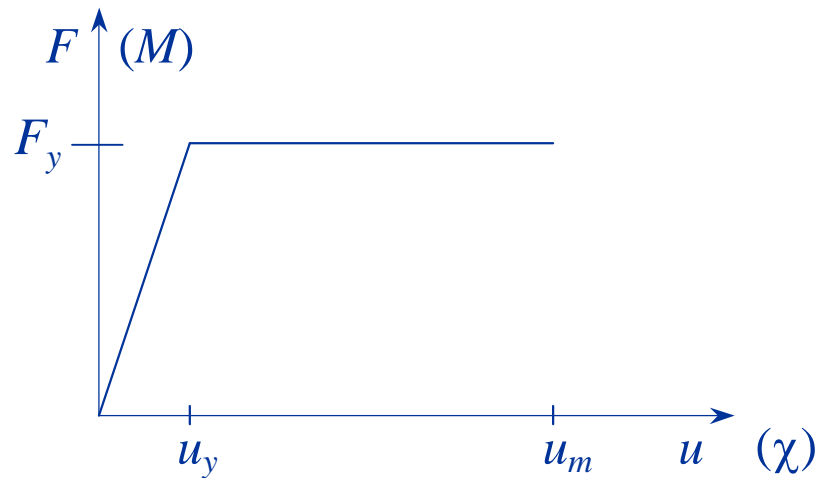
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Rigidezza = inclinazione del diagramma

# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



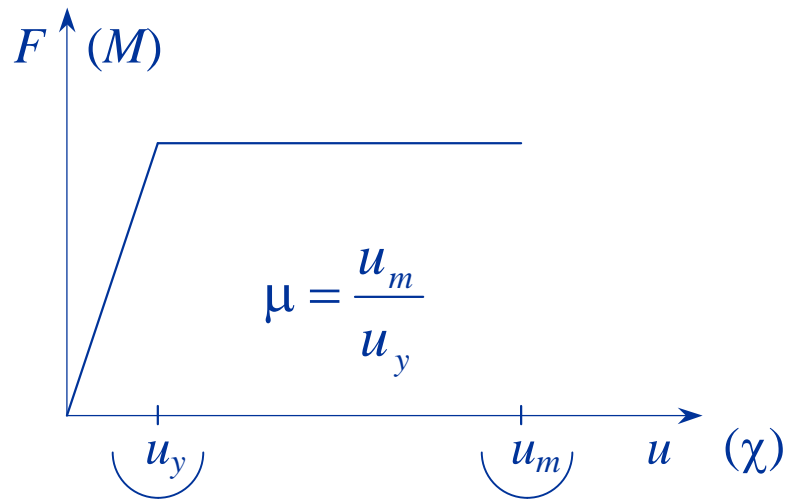
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Resistenza = soglia di plasticizzazione

# Comportamento oltre il limite elastico

## Legame elastico-perfettamente plastico



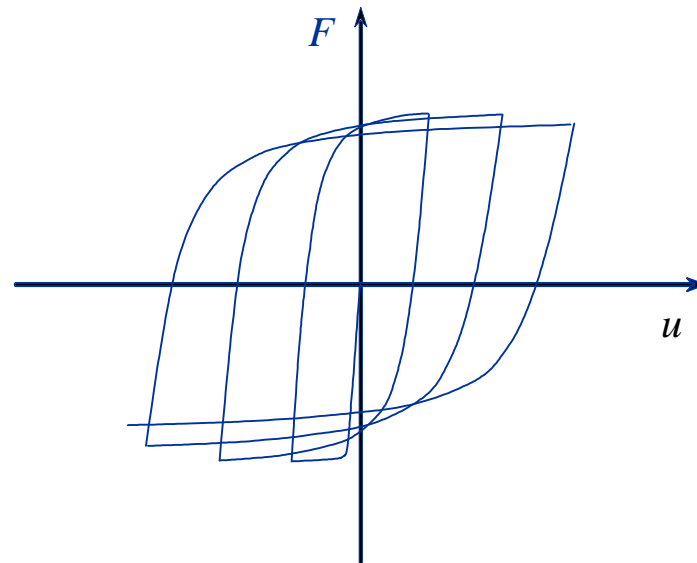
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente

# Comportamento oltre il limite elastico

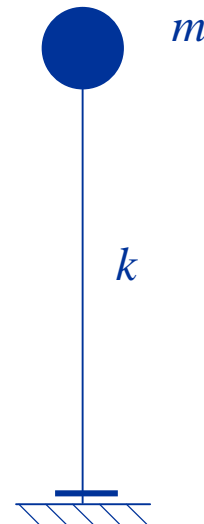
Per una valutazione della risposta sismica, occorre anche tener conto del comportamento ciclico, con i possibili degradi di rigidezza e resistenza



# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

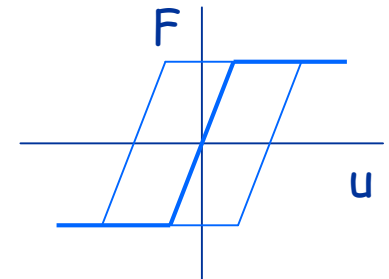


Foto

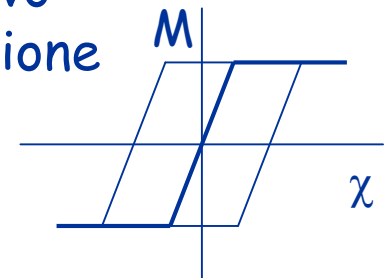


Modello  
di calcolo

Legame costitutivo  
della struttura



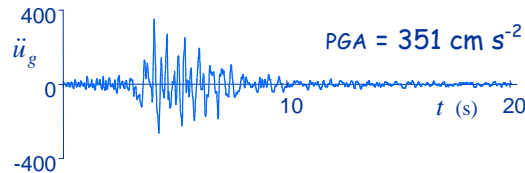
Legame  
costitutivo  
della sezione



# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

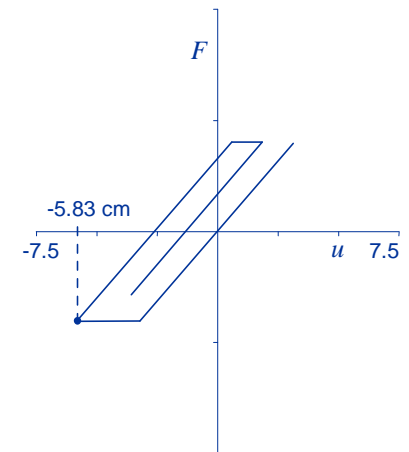
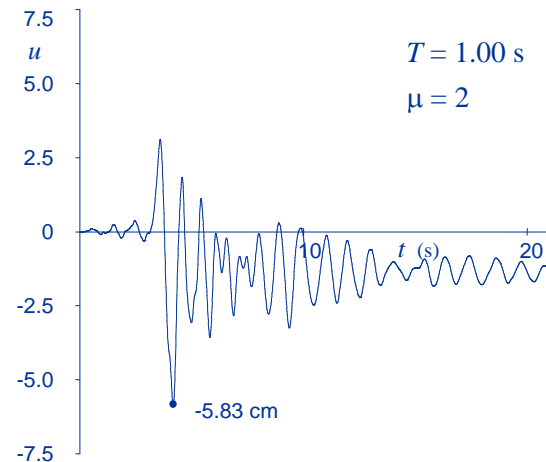
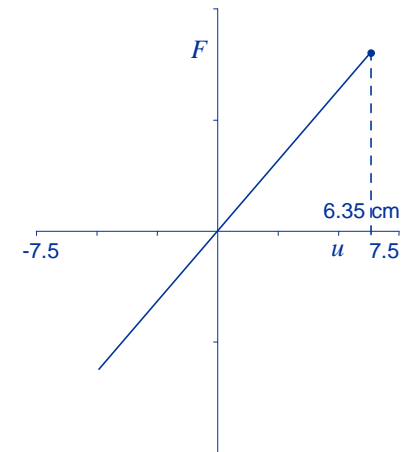
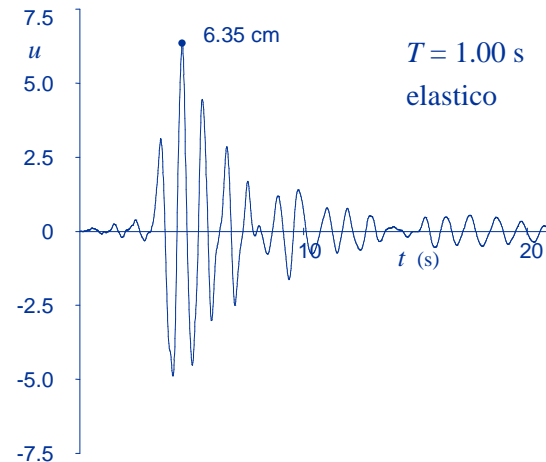
Risposta  
elastica

Input sismico



Tolmezzo, Friuli, 1976

Risposta  
elasto-plastica





# Richiesta di duttilità

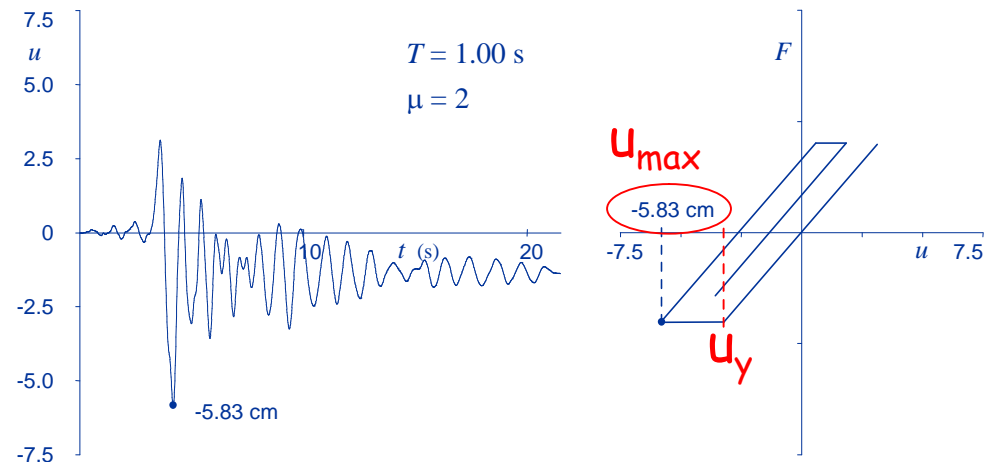
Il rapporto tra lo spostamento massimo  $u_{max}$  ottenuto come risposta al sisma

e lo spostamento  $u_y$  di plasticizzazione

è la duttilità necessaria al sistema per non collassare (richiesta di duttilità)

In genere, abbassando la resistenza aumenta la richiesta di duttilità

Risposta  
elasto-plastica



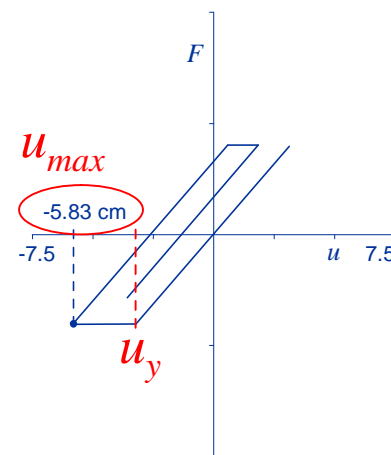
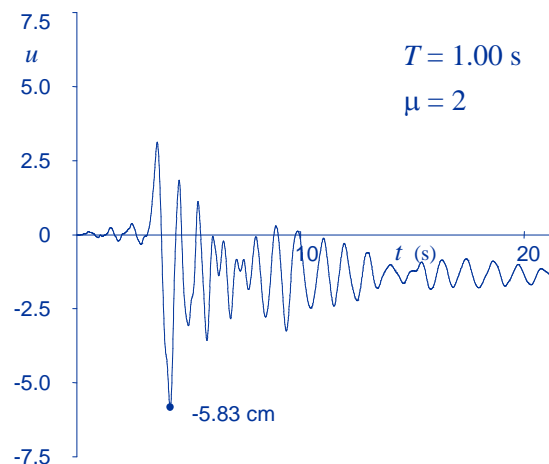
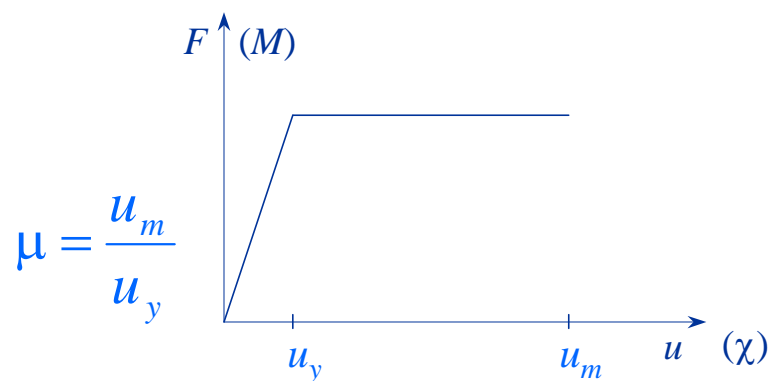
# Progettazione di strutture elasto-plastiche

È possibile progettare la  
struttura con una forza  
ridotta, accettando la sua  
plasticizzazione, purché la  
duttilità disponibile

sia maggiore di  
quella richiesta

$$\mu = \frac{u_{\max}}{u_y}$$

Risposta  
elasto-plastica



# Progettazione di strutture elasto-plastiche

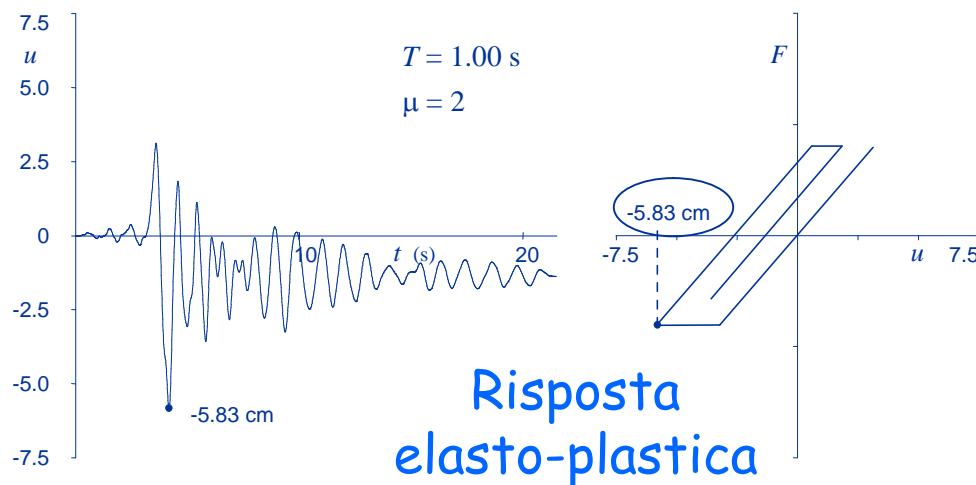
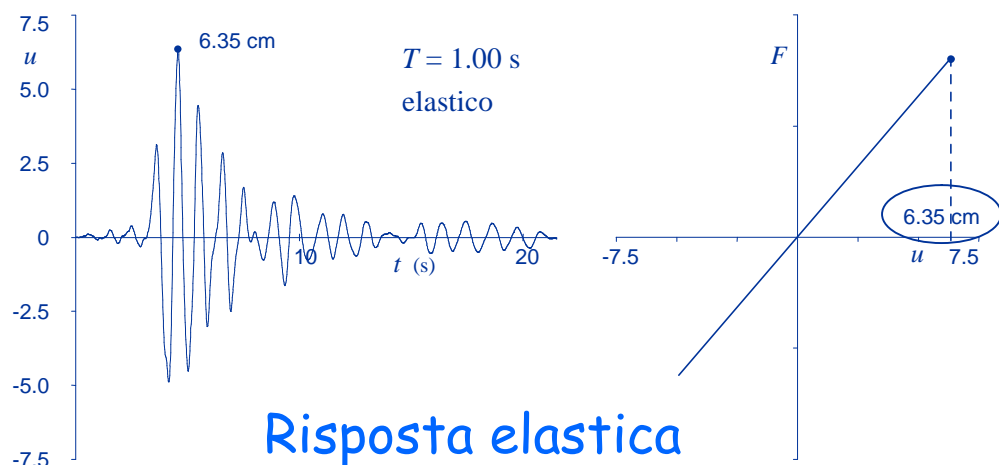
La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta



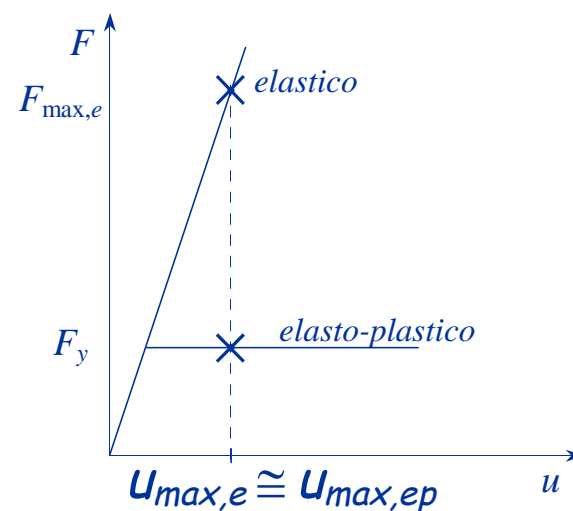
Ricordando che  $F = m a$ ,  
si può diagrammare in  
funzione del periodo  
l'accelerazione da usare  
nel progetto,  
per assegnati valori  
della duttilità  $\mu$

Spettro di risposta a duttilità assegnata

# Progettazione di strutture elasto-plastiche



Le analisi numeriche mostrano che lo spostamento di schemi elastici ed elasto-plastici è più o meno lo stesso



# Progettazione di strutture elasto-plastiche

La forza di progetto  
può essere ottenuta  
dividendo

$F_d$

la forza necessaria  
per mantenere la  
struttura in campo  
elastico

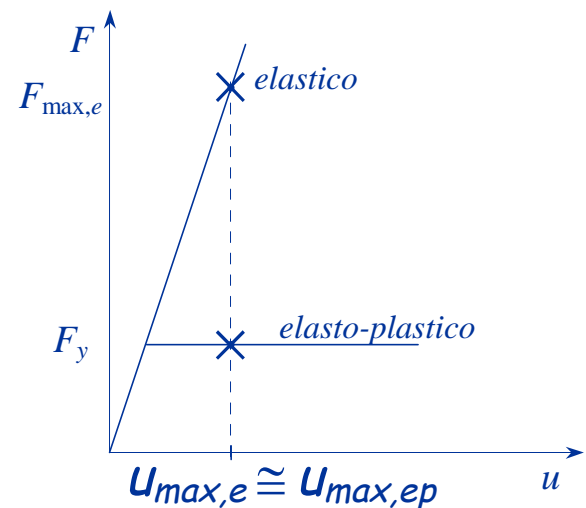
$F_{max,e}$

per la duttilità

$\mu$

$$F_d = F_y = \frac{F_{max,e}}{\mu}$$

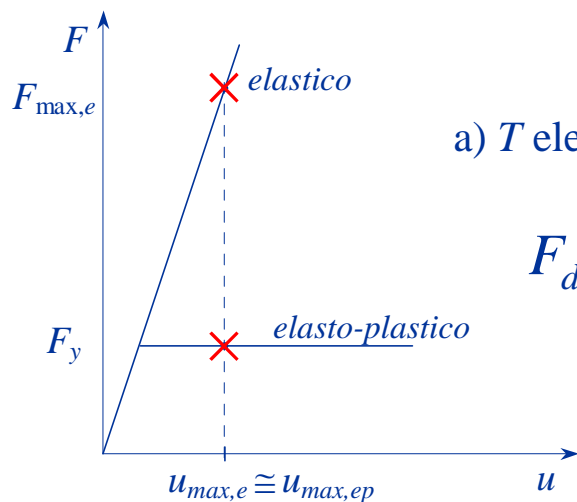
Le analisi numeriche  
mostrano che lo  
spostamento di  
schemi elastici ed  
elasto-plastici è più  
o meno lo stesso



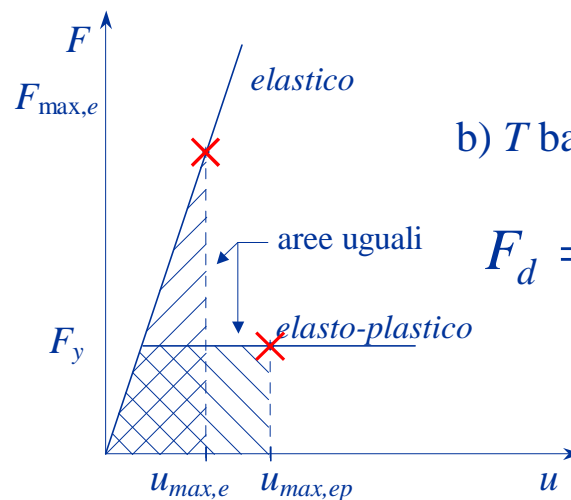
# Progettazione di strutture elasto-plastiche

Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo  
per strutture con periodo medio-alto

Per strutture con periodo basso si può pensare ad  
una uguaglianza in termini energetici



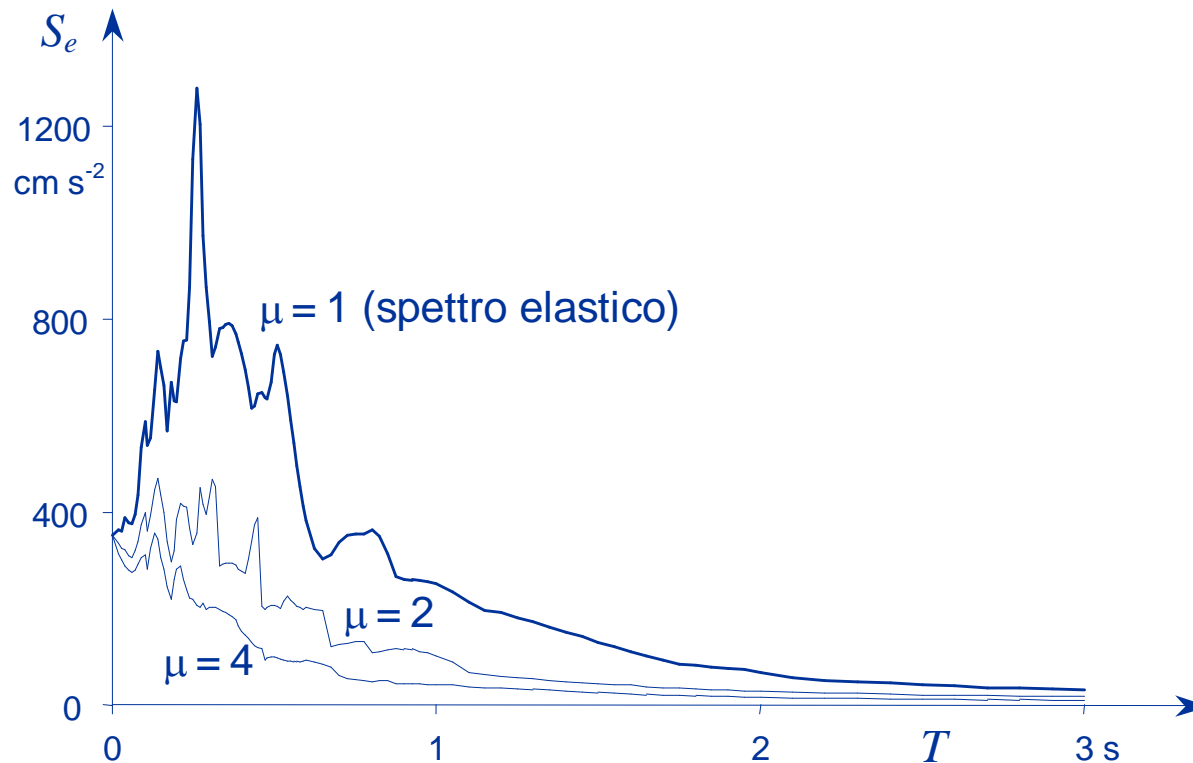
$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\mu}$$



$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\sqrt{2\mu - 1}}$$

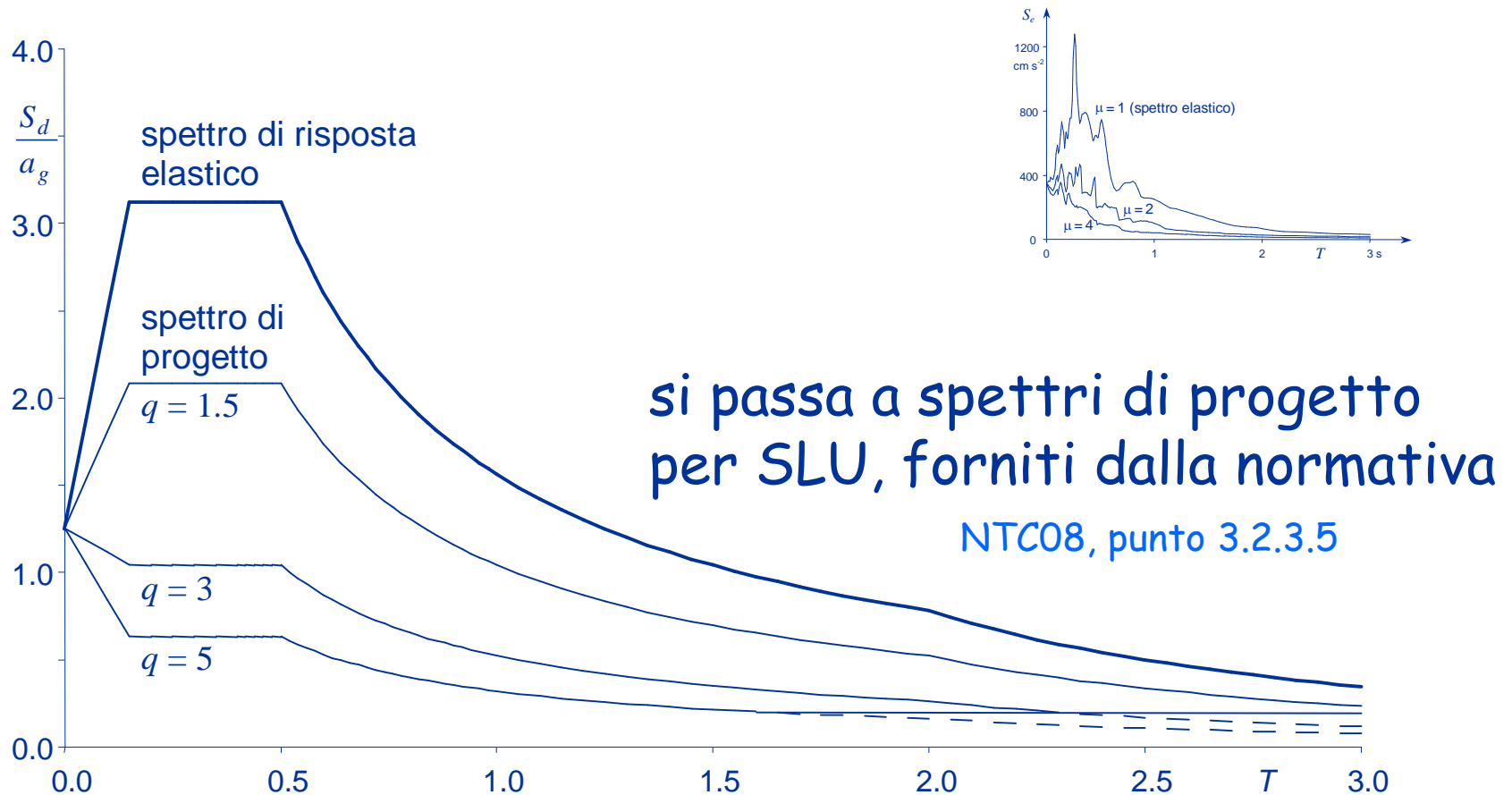
# Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



# Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



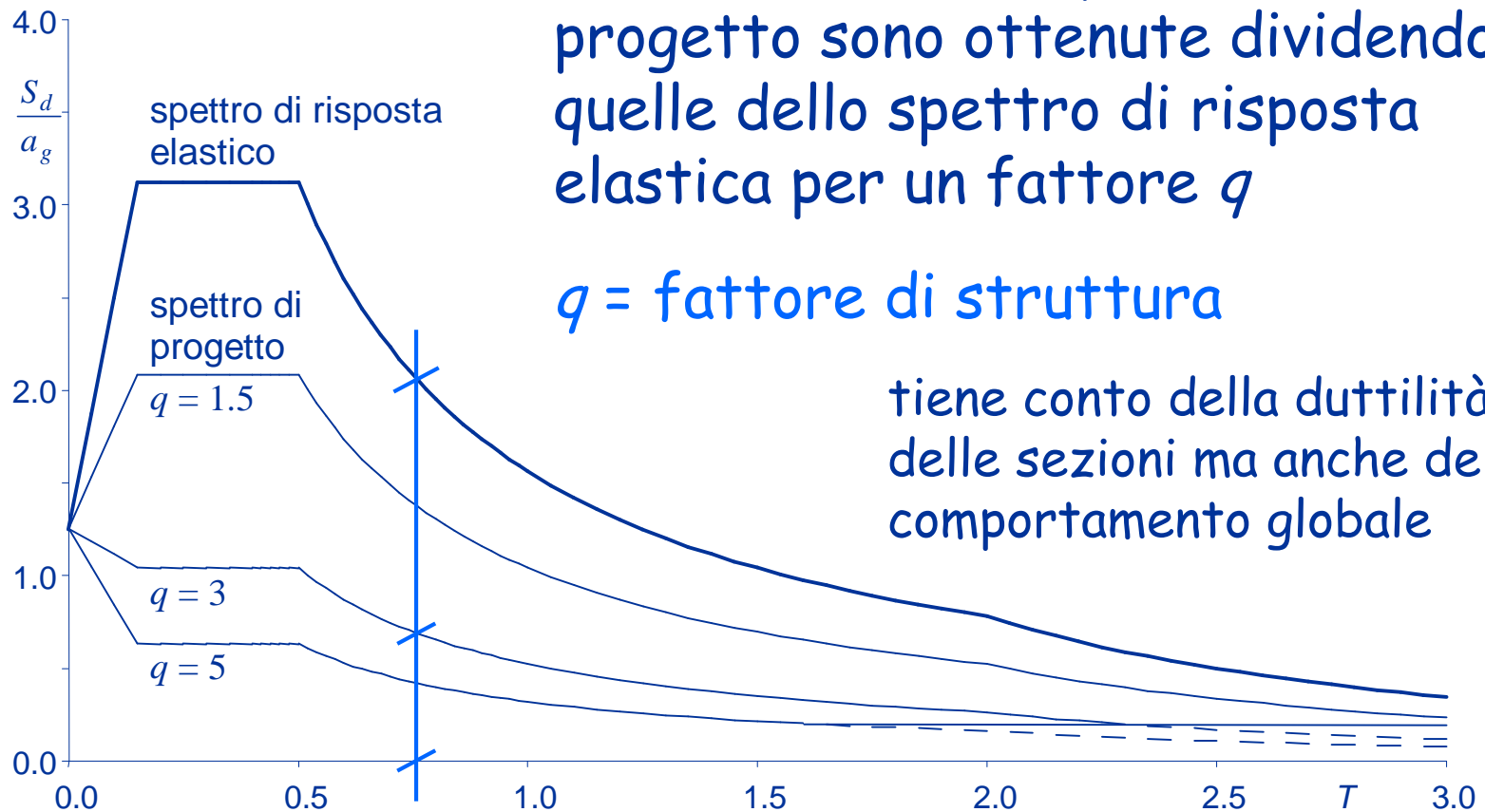


# Progetto a duttilità assegnata

- Nota la duttilità, si può ricavare l'accelerazione (e quindi le forze) di progetto dagli spettri di risposta a duttilità assegnata.
- Risolvendo lo schema strutturale soggetto a queste forze (con analisi lineare) si verificano le sezioni.
- Se la struttura sopporta queste azioni ed ha la duttilità prevista, può sopportare (in campo inelastico) il terremoto.

Spettri di progetto per SLV  
NTC 08 (D.M. 14/1/2008)

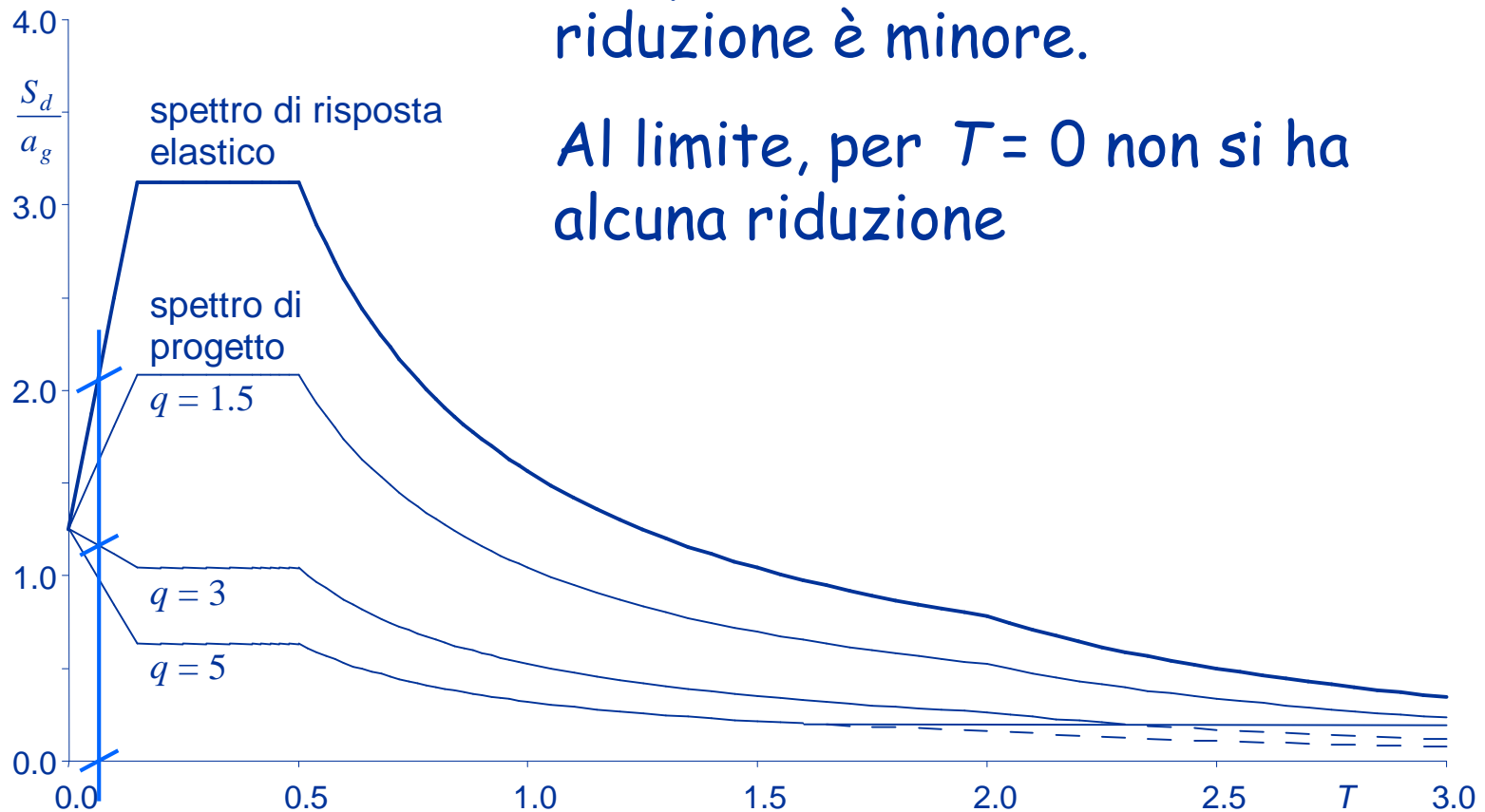
# Spettri di progetto di normativa



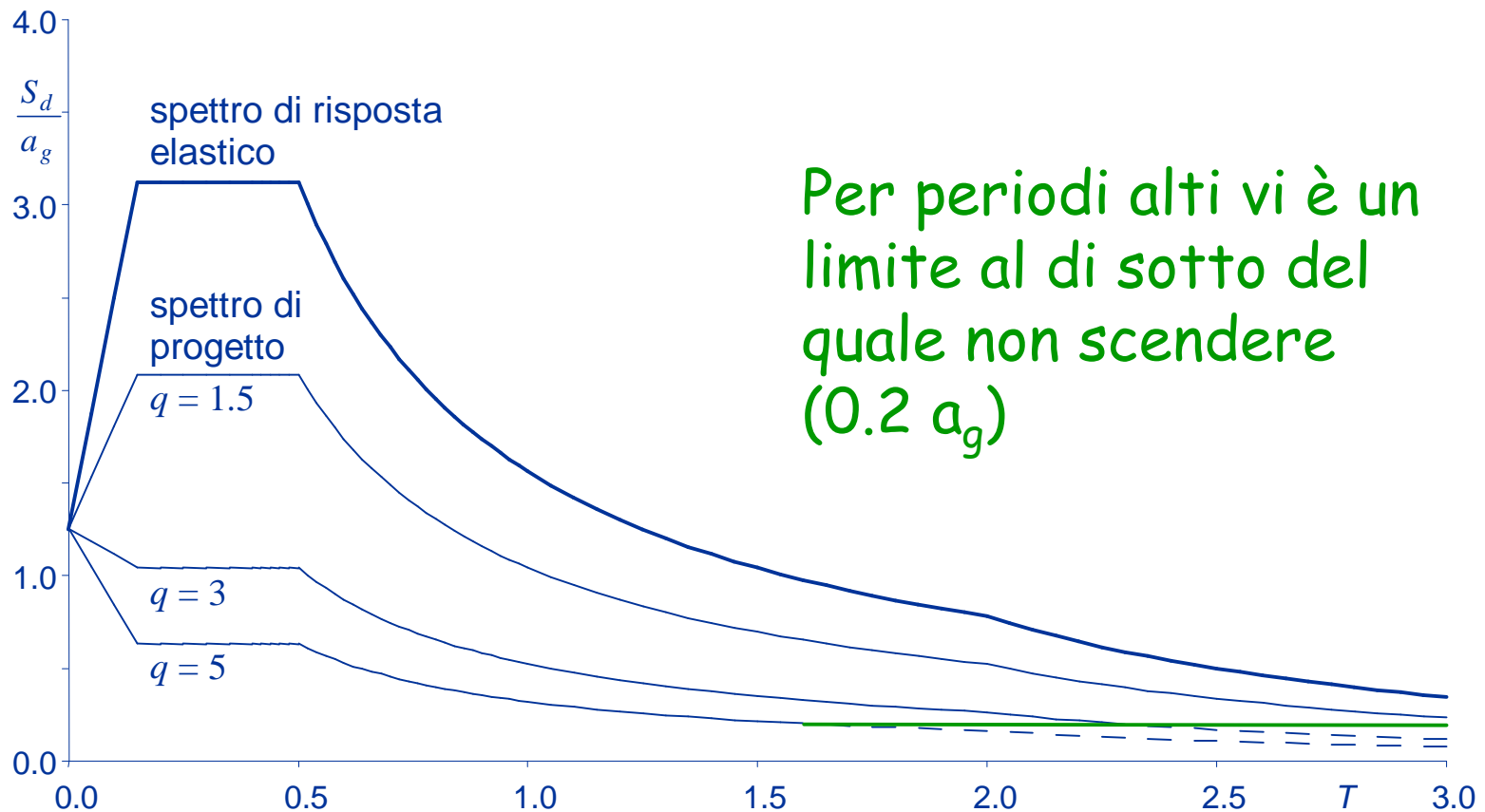
# Spettri di progetto di normativa

Per periodi molto bassi la riduzione è minore.

Al limite, per  $T = 0$  non si ha alcuna riduzione

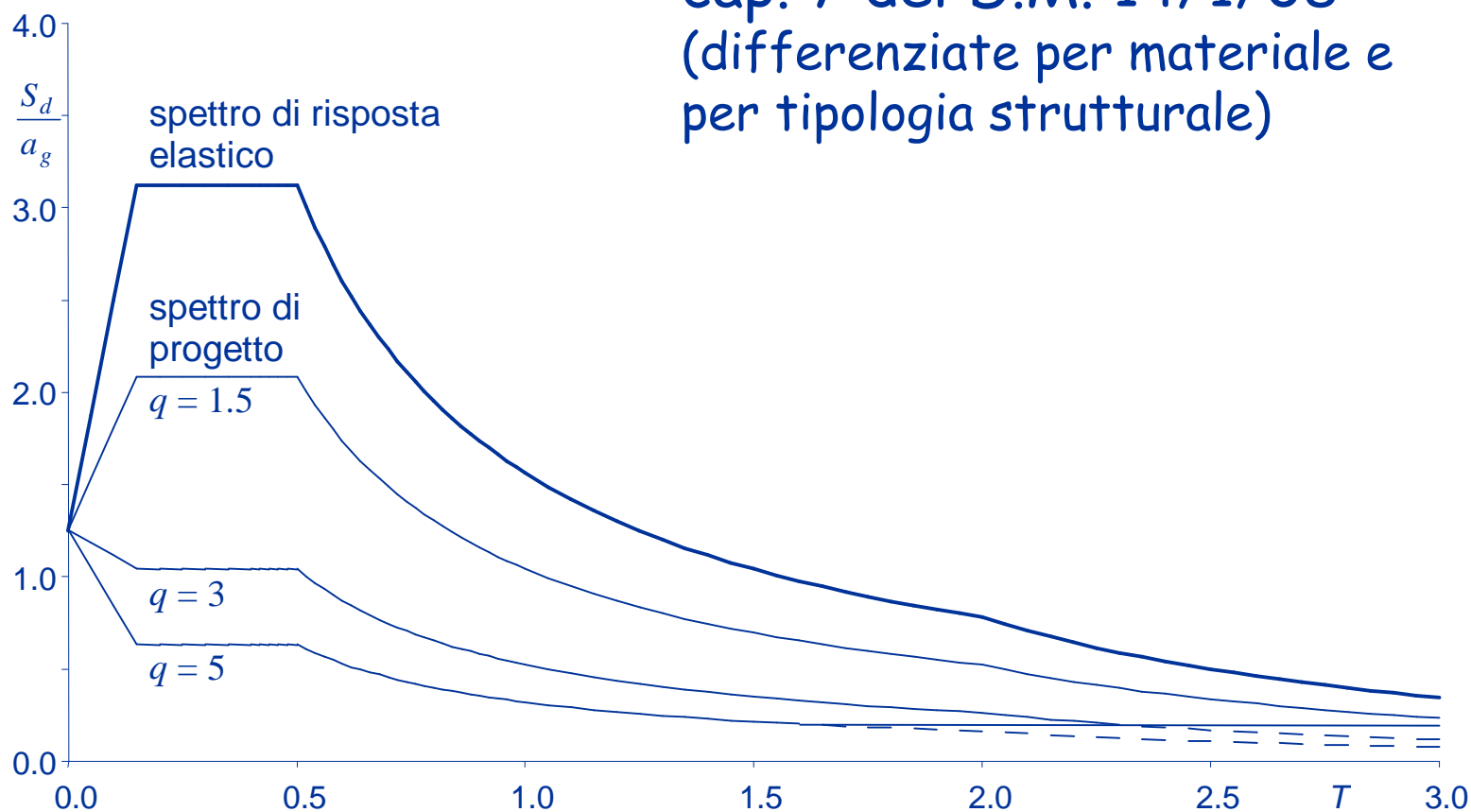


# Spettri di progetto di normativa



# Spettri di progetto di normativa accelerazioni orizzontali

Il valore del fattore di struttura  $q$  è definito nel cap. 7 del D.M. 14/1/08 (differenziate per materiale e per tipologia strutturale)



# Spettri di progetto di normativa accelerazioni verticali

