

Modulo 1 - Sicurezza strutturale ed azioni

2. Azione sismica

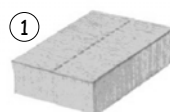
Ordine degli ingegneri, Catania
8, 10 ottobre 2008
Aurelio Ghersi

**Brevi richiami di
sismologia**

Zolle crostali e terremoti



**Il meccanismo che scatena un terremoto:
scorrimento lungo una faglia**



blocchi di crosta in riposo



scorrimento impedito: deformazione con accumulo di energia

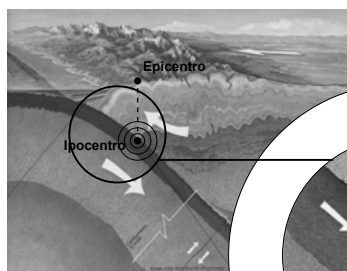


il momento della rottura:
rilascio dell'energia

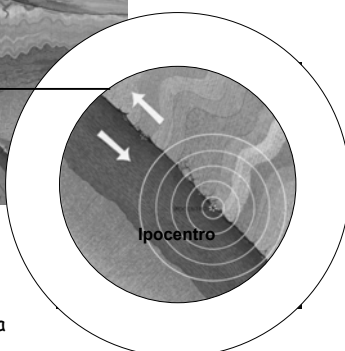


brusco scorrimento, verso un nuovo
equilibrio

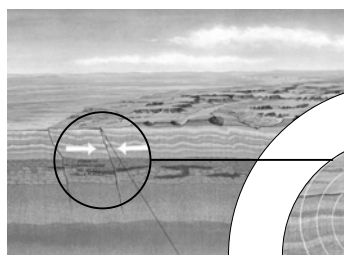
**Zone di
subduzione**



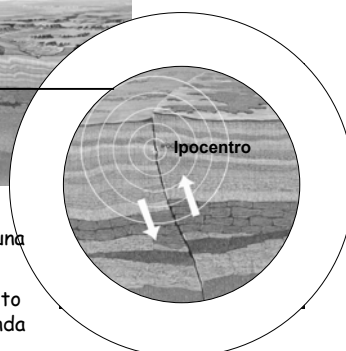
Zolle in movimento,
l'una verso l'altra:
la più leggera affonda
scorrendo sotto l'altra



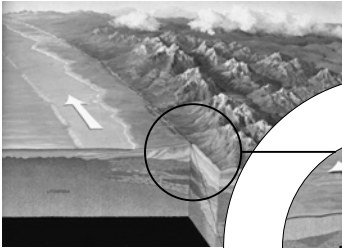
**Zolle
in collisione**



Zolle in movimento, l'una
verso l'altra:
se sono entrambe molto
spesse, nessuna affonda



Faglie trasformi



Zolle che scorrono orizzontalmente, l'una rispetto all'altra

Effetti permanenti dei terremoti

Scorrimenti della faglia



1999 - Turchia

Movimenti della faglia, smottamenti del terreno, frane



1999 - Turchia



1948 - Giappone



1999 - Turchia

Movimenti della faglia, smottamenti del terreno, frane



12/4/1998 - Slovenia



1999 - Turchia



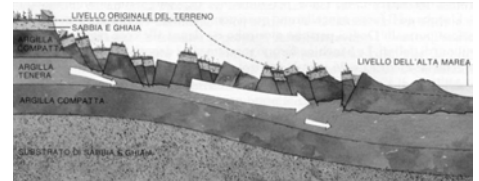
Cedimenti del terreno



1997 - Umbria



Liquefazione
di strati
sotterranei



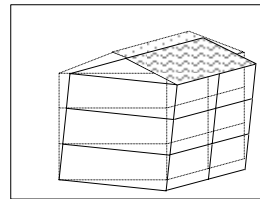
1964 - Alaska



Liquefazione del terreno

1999 - Turchia

Liquefazione del
terreno



1999 - Turchia



Liquefazione del terreno



1999 - Turchia

Liquefazione del terreno



1999 - Turchia

Liquefazione del terreno

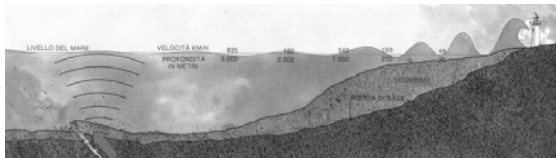


1999 – Turchia

Effetti transitori dei terremoti

- Maremoti, tsunami
- Moto del terreno

Maremoti, tsunami



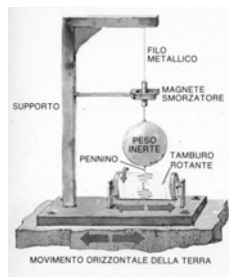
Dove l'acqua è profonda le onde viaggiano a velocità elevatissime (es. oltre 800 km/ora)

Al ridursi della profondità la velocità si riduce ma aumenta enormemente l'altezza dell'onda

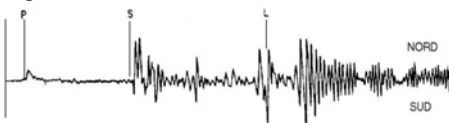
Sismologia: studio del moto del terreno

Registrazione del moto del terreno

Sismografo:
misura gli
spostamenti
del terreno



Sismogramma



Onde sismiche

L'energia liberata dal sisma si propaga in onde

Esistono più tipi di onda,
che si propagano con differente velocità
ed hanno un diverso contenuto energetico:

- onde di volume, che si propagano per tutto il volume terrestre (più veloci)
- onde di superficie, che si propagano solo nello strato superficiale (maggior contenuto energetico)

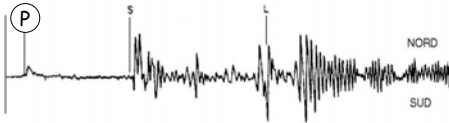
Onde di volume

Si hanno:

- Onde primarie (P)
onde longitudinali,
di compressione e dilatazione
sono le più veloci



$$v_p \approx 1.1 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{per roccia, } v_p \approx 5 \div 6 \text{ km/h}$$



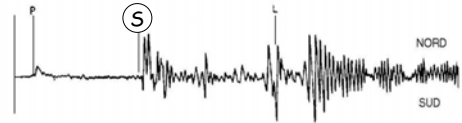
Onde di volume

Si hanno:

- Onde primarie (P)
onde trasversali, di taglio



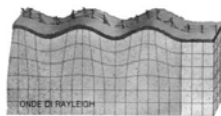
$$v_s = \frac{v_p}{\sqrt{3}} \quad \text{non si propagano nei liquidi}$$



Onde di superficie

Si hanno vari tipi, tra cui:

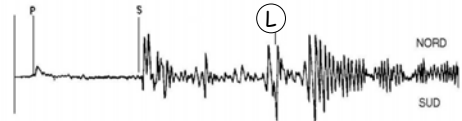
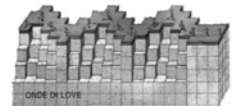
- Onde di Rayleigh (R)
con moto secondo un'ellisse
nel piano verticale



Onde di superficie

Si hanno vari tipi, tra cui:

- Onde di Rayleigh (R)
con moto secondo un'ellisse
nel piano verticale
- Onde di Love (L)
con moto tipo onde di taglio
nel piano orizzontale



Accelerogramma

Più interessante ai fini ingegneristici è rappresentare l'accelerazione in funzione del tempo



Accelerogramma

Primo parametro di interesse: accelerazione massima

Ma sono importanti anche: durata, contenuto energetico

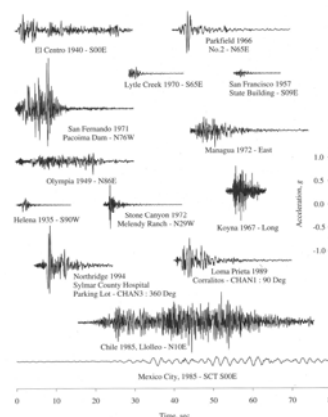
Accelerogrammi

relativi a sismi di forte intensità in America

Notare:

valori del PGA (Peak Ground Acceleration = accelerazione massima) molto alti, da 0.3 a 0.7 g

forti differenze nel contenuto in frequenza e nella durata



Classificazione dei terremoti

Scale di intensità empiriche, basate sugli effetti:

MM = Mercalli modificata

MCS = Mercalli-Cancani-Sieberg

MSK = Medvedev-Sponheur-Karnik

Scale basate su misurazioni di grandezze (energia, ecc.):

M = Magnitudo Richter

Scala Mercalli dell'intensità sismica (1902, modificata nel 1931 e 1956)

- | | | | | | |
|------|---|------|---|------|---|
| I | Non percepito dalle persone. | VII | Difficile stare in piedi. Rientro dei guidatori di automezzi. Tremolio di oggetti sospesi. Rottura di mobili. Danni alle murature tipo D(*), incise fenditure. | X | Distruzione di gran parte delle murature e delle strutture in legname, con le loro fondazioni. Distruzione di alcune robuste strutture in legname e di ponti. Gravi danni a dighe, briglie, argini. Grandi frane. Disallineamento delle acque di canali, fiumi, laghi ecc. Traslazione orizzontale di sabbie e argille sulle spiagge e su regioni piane. Rotole decolmente deviate. |
| II | Percepito da persone in riposo, nei piani superiori delle case o in posizione favorevole | III | Percepito nelle case. Oscillazione di oggetti appesi. Vibrazioni come al passaggio di autocarri leggeri. Stime della durata. Talora non riconosciuto come terremoto. | IV | Oscillazione di oggetti appesi. Vibrazioni come al passaggio di autocarri pesanti, o scossa come di una pesante palla che colpisce le pareti. Oscillazione di automezzi fermi. Movimento di porte e finestre. Tintinnio di vetri. Vibrazione di vasetti. Noto stadio superiore del IV, scricchiolio di pareti e di strutture in legname. |
| III | Percepito nelle case. Oscillazione di oggetti appesi. Vibrazioni come al passaggio di autocarri leggeri. Stime della durata. Talora non riconosciuto come terremoto. | V | Rientro nell'auto: stima della direzione. Sveglia di persone dormienti. Movimento della superficie dei liquidi, versamento di liquori dai recipienti. Spostamento o rovesciamento di piccoli oggetti instabili. Oscillazione di porte che si aprono o si chiudono. Movimento di imposte e quadri. Arresto, messa in moto, cambiamento del passo di orologi a pendolo. | VI | Sentito da tutti. Spavento e fuga all'esterno. Barcollare di persone in moto. Rottura di vetrine, piatti, vetri. Caduta dagli scaffali di rinnoli, libri ecc. e di quadri dalle pareti. Spostamento o rotazione di mobili. Scrosciature di intonaci deboli e di murature tipo D(*). Suono di campanelli (di chiese, di scuole). Stornire di alberi e di cespugli. |
| IV | Oscillazione di oggetti appesi. Vibrazioni come al passaggio di autocarri pesanti, o scossa come di una pesante palla che colpisce le pareti. Oscillazione di automezzi fermi. Movimento di porte e finestre. Tintinnio di vetri. Vibrazione di vasetti. Noto stadio superiore del IV, scricchiolio di pareti e di strutture in legname. | V | Rientro nell'auto: stima della direzione. Sveglia di persone dormienti. Movimento della superficie dei liquidi, versamento di liquori dai recipienti. Spostamento o rovesciamento di piccoli oggetti instabili. Oscillazione di porte che si aprono o si chiudono. Movimento di imposte e quadri. Arresto, messa in moto, cambiamento del passo di orologi a pendolo. | VI | Sentito da tutti. Spavento e fuga all'esterno. Barcollare di persone in moto. Rottura di vetrine, piatti, vetri. Caduta dagli scaffali di rinnoli, libri ecc. e di quadri dalle pareti. Spostamento o rotazione di mobili. Scrosciature di intonaci deboli e di murature tipo D(*). Suono di campanelli (di chiese, di scuole). Stornire di alberi e di cespugli. |
| V | Rientro nell'auto: stima della direzione. Sveglia di persone dormienti. Movimento della superficie dei liquidi, versamento di liquori dai recipienti. Spostamento o rovesciamento di piccoli oggetti instabili. Oscillazione di porte che si aprono o si chiudono. Movimento di imposte e quadri. Arresto, messa in moto, cambiamento del passo di orologi a pendolo. | VI | Sentito da tutti. Spavento e fuga all'esterno. Barcollare di persone in moto. Rottura di vetrine, piatti, vetri. Caduta dagli scaffali di rinnoli, libri ecc. e di quadri dalle pareti. Spostamento o rotazione di mobili. Scrosciature di intonaci deboli e di murature tipo D(*). Suono di campanelli (di chiese, di scuole). Stornire di alberi e di cespugli. | VII | Difficile stare in piedi. Rientro dei guidatori di automezzi. Tremolio di oggetti sospesi. Rottura di mobili. Danni alle murature tipo D(*), incise fenditure. |
| VI | Sentito da tutti. Spavento e fuga all'esterno. Barcollare di persone in moto. Rottura di vetrine, piatti, vetri. Caduta dagli scaffali di rinnoli, libri ecc. e di quadri dalle pareti. Spostamento o rotazione di mobili. Scrosciature di intonaci deboli e di murature tipo D(*). Suono di campanelli (di chiese, di scuole). Stornire di alberi e di cespugli. | VII | Difficile stare in piedi. Rientro dei guidatori di automezzi. Tremolio di oggetti sospesi. Rottura di mobili. Danni alle murature tipo D(*), incise fenditure. | VIII | Rientro nell'auto: stima della direzione. Sveglia di persone dormienti. Movimento della superficie dei liquidi, versamento di liquori dai recipienti. Spostamento o rovesciamento di piccoli oggetti instabili. Oscillazione di porte che si aprono o si chiudono. Movimento di imposte e quadri. Arresto, messa in moto, cambiamento del passo di orologi a pendolo. |
| VII | Difficile stare in piedi. Rientro dei guidatori di automezzi. Tremolio di oggetti sospesi. Rottura di mobili. Danni alle murature tipo D(*), incise fenditure. | VIII | Rientro nell'auto: stima della direzione. Sveglia di persone dormienti. Movimento della superficie dei liquidi, versamento di liquori dai recipienti. Spostamento o rovesciamento di piccoli oggetti instabili. Oscillazione di porte che si aprono o si chiudono. Movimento di imposte e quadri. Arresto, messa in moto, cambiamento del passo di orologi a pendolo. | IX | Panico generale. Distruzione di murature tipo D(*), gravi danni a murature tipo C(*), lacerazione con crollo completo; seri danni a murature tipo B(*). Danni generali alle fondazioni. Gravi danni ai serbatoi. Rottura di tubazioni sotterranee. Rilevanti crepacci nel terreno. Nelle aree alluvionali espulsione di sabbie e fango, formazione di crateri di sabbia. |
| VIII | Rientro nell'auto: stima della direzione. Sveglia di persone dormienti. Movimento della superficie dei liquidi, versamento di liquori dai recipienti. Spostamento o rovesciamento di piccoli oggetti instabili. Oscillazione di porte che si aprono o si chiudono. Movimento di imposte e quadri. Arresto, messa in moto, cambiamento del passo di orologi a pendolo. | IX | Panico generale. Distruzione di murature tipo D(*), gravi danni a murature tipo C(*), lacerazione con crollo completo; seri danni a murature tipo B(*). Danni generali alle fondazioni. Gravi danni ai serbatoi. Rottura di tubazioni sotterranee. Rilevanti crepacci nel terreno. Nelle aree alluvionali espulsione di sabbie e fango, formazione di crateri di sabbia. | XI | Rotture fortemente deviate. Tubazioni sotterranee completamente fuori servizio. |
| IX | Panico generale. Distruzione di murature tipo D(*), gravi danni a murature tipo C(*), lacerazione con crollo completo; seri danni a murature tipo B(*). Danni generali alle fondazioni. Gravi danni ai serbatoi. Rottura di tubazioni sotterranee. Rilevanti crepacci nel terreno. Nelle aree alluvionali espulsione di sabbie e fango, formazione di crateri di sabbia. | X | Distruzione di gran parte delle murature e delle strutture in legname, con le loro fondazioni. Distruzione di alcune robuste strutture in legname e di ponti. Gravi danni a dighe, briglie, argini. Grandi frane. Disallineamento delle acque di canali, fiumi, laghi ecc. Traslazione orizzontale di sabbie e argille sulle spiagge e su regioni piane. Rotole decolmente deviate. | XII | Distruzione pressoché totale. Spostamento di grandi masse rocciose. Linee di riferimento deformate. Oggetti lanciati in aria. |
| X | Distruzione di gran parte delle murature e delle strutture in legname, con le loro fondazioni. Distruzione di alcune robuste strutture in legname e di ponti. Gravi danni a dighe, briglie, argini. Grandi frane. Disallineamento delle acque di canali, fiumi, laghi ecc. Traslazione orizzontale di sabbie e argille sulle spiagge e su regioni piane. Rotole decolmente deviate. | XI | Rotture fortemente deviate. Tubazioni sotterranee completamente fuori servizio. | (*) | A = Buon manufatto, legato insieme con ferri, calcestruzzo ecc., progettato per resistere a forze laterali.
B = Buon manufatto con malta, rinforzato, ma non destinato in particolare a resistere a forze laterali.
C = Manufatto ordinario con malta, senza tranti agli angoli né rinforzi.
D = Materiali deboli, come mattoni cotti al sole, malte povere; manufatto di bassa qualità, debile orizzontalmente. |

Magnitudo (Richter, 1935)

È il logaritmo dell'ampiezza massima di oscillazione (in micron), misurata a 100 km dall'epicentro

Energia rilasciata da un sisma:

è legata alla magnitudo dalla relazione

$$\log E = 4.4 + 1.5 M \quad (E \text{ in joule})$$

Frequenza annua N di terremoti con intensità $\geq M$:

$$\log N = a - b M \quad (a \approx 5.5, b \approx 1.1 \text{ nel Mediterraneo})$$

Classificazione sismica del territorio

Nel passato:

classificazione in base ai danni provocati dai terremoti avvenuti

Oggi:

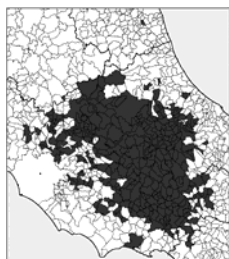
valutazione statistica della pericolosità sismica

Classificazione sismica, nel passato

Terremoto:
Messina, 1908
RD n. 193/1909

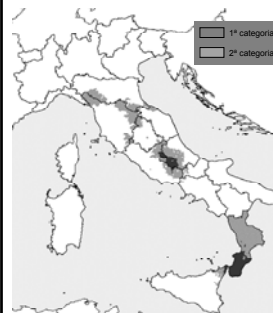


Terremoto:
Avezzano, 1915
RD n. 573/1915

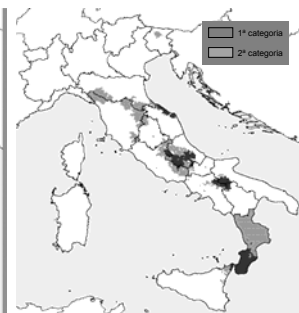


Classificazione sismica, nel passato

RD n. 431/1927

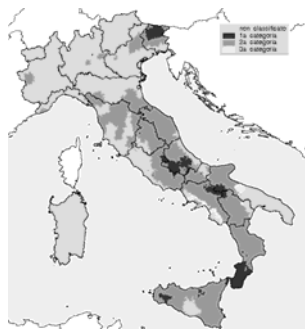


RD n. 640/1935



Classificazione sismica, anni '80

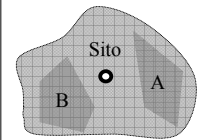
Dopo il terremoto del Friuli (1976) parte il Progetto Finalizzato Geodinamica (CNR)



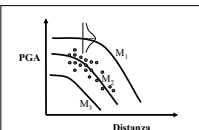
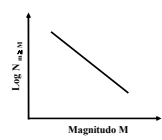
Zona
1ª categoria
2ª categoria
3ª categoria
non classificato

Classificazione sismica, oggi

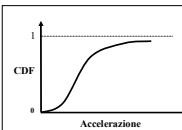
Fase 1 - Zone



Fase 2 - Ricorrenza



Fase 3 - Attenuazione



Fase 4 - Probabilità
(di non superamento nell'intervallo t)

Classificazione sismica, oggi

Valutazione probabilistica dell'intensità dei terremoti

Periodo di ritorno T_r = tempo medio che intercorre tra due eventi sismici di assegnata intensità

Esempio: periodo di ritorno di 475 anni

oppure

Probabilità di superamento P_{VR} = probabilità che si verifichi un evento sismico di intensità maggiore di quella assegnata in un periodo di riferimento

Esempio: probabilità di superamento del 10% in 50 anni

Classificazione sismica, oggi

Quali valori di riferimento per la progettazione sismica?

Stato Limite di salvaguardia della Vita - SLV

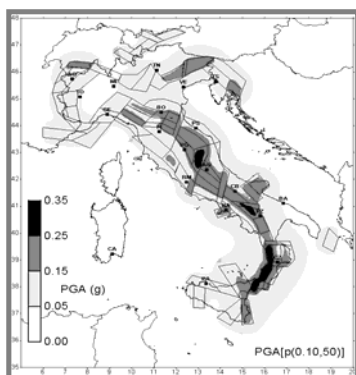
Significativi danni agli elementi strutturali e non strutturali. Esiste ancora un consistente margine nei confronti del collasso. La funzionalità dell'edificio è compromessa

Deve essere garantito per un terremoto con probabilità di superamento P_{VR} del 10% nel periodo di riferimento V_R

NTC08, punto 3.2.1

Analisi di pericolosità

Classificazione del territorio in base alla probabilità di superamento di PGA del 10% in 50 anni ($T_r = 475$ anni)



Classificazione sismica (ordinanza 3274)

Nota: questi valori sembrano molto grandi rispetto a quelli usati nel passato per l'analisi sismica col metodo T.A.

Bisogna tener conto della differenza di impostazione delle nuove norme

Zona	a_g
1	0,35 g
2	0,25 g
3	0,15 g
4	0,05 g



Classificazione sismica, oggi

Più in generale:

Stati Limite di Esercizio

P_{VR}

81% Stato Limite di Operatività - SLO

Danni estremamente modesti agli elementi non strutturali, tali da non compromettere in alcun modo la funzionalità dell'edificio

63% Stato Limite di Danno - SLD

Danni modesti agli elementi non strutturali e quasi nulli a quelli strutturali. L'utilizzo dell'opera dopo il sisma dovrebbe essere consentito, anche se alcune funzionalità potrebbero risultare compromesse

NTC08, punto 3.2.1

Classificazione sismica, oggi

Più in generale:

Stati Limite Ultimi

P_{VR}

10% Stato Limite di salvaguardia della Vita - SLV

Significativi danni agli elementi strutturali e non strutturali. Esiste ancora un consistente margine nei confronti del collasso. La funzionalità dell'edificio è compromessa

5% Stato Limite di prevenzione del Collasso - SLC

La capacità dell'edificio di portare azioni orizzontali e verticali è compromessa. L'uso dell'edificio dopo l'evento sismico comporterebbe un sensibile livello di rischio

NTC08, punto 3.2.1

Relazione tra periodo di ritorno T_r e probabilità di superamento P_{VR}

È fornita dalla relazione:

$$T_r = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \cong \frac{V_R}{P_{VR}}$$

Esempio:

probabilità di superamento del 10% in 50 anni

Il periodo di ritorno è:

$$T_r = -\frac{50}{\ln(1 - 0.10)} = 474.6 \cong 475 \text{ anni}$$

Relazione tra periodo di ritorno T_r e probabilità di superamento P_{VR}

Periodo di ritorno T_r (in anni)
in funzione di V_R e P_{VR}

Stato limite	P_{VR}	$V_R=35$ anni	$V_R=50$ anni	$V_R=75$ anni	$V_R=100$ anni
SLO	81%	21	30	45	60
SLD	63%	35	50	75	100
SLV	10%	332	475	712	950
SLC	5%	682	975	1462	1950

Relazione tra accelerazione di picco e periodo di ritorno

- Non esiste una relazione rigorosa
- Approssimativamente si può ritenere che l'accelerazione di picco vari con la radice quadrata del periodo di ritorno

Esempio:

per un periodo di ritorno $T_r=475$ anni si ha $a_g=0.25$ g

per un periodo di ritorno $T_r=950$ anni si ha

$$a_g \cong 0.25 \times \sqrt{\frac{950}{475}} = 1.41 \times 0.25 = 0.35 \text{ g}$$

Considerazioni

- A cosa servono le "classi d'uso" degli edifici?
 - Forniscono il coefficiente d'uso C_U che, moltiplicato per la vita nominale V_N , dà la vita di riferimento V_R
 - Per classe d'uso II si ha $C_U = 1$ quindi per verifica di resistenza di costruzioni usuali $V_R = 50$ anni, periodo di ritorno $T_r = 475$ anni si ha, ad esempio, $a_g = 0.25$ g
 - Per classe d'uso III (edifici con affollamento) $C_U = 1.5$ quindi per verifica di resistenza di costruzioni usuali $V_R = 50 \times 1.5$ anni, periodo di ritorno $T_r = 475 \times 1.5$ anni si ha $a_g \cong 0.25 \times \sqrt{1.5} = 1.22 \times 0.25$ g
 - Per classe d'uso IV (edifici strategici) $C_U = 2$ quindi $a_g \cong 0.25 \times \sqrt{2} = 1.41 \times 0.25$ g

Considerazioni

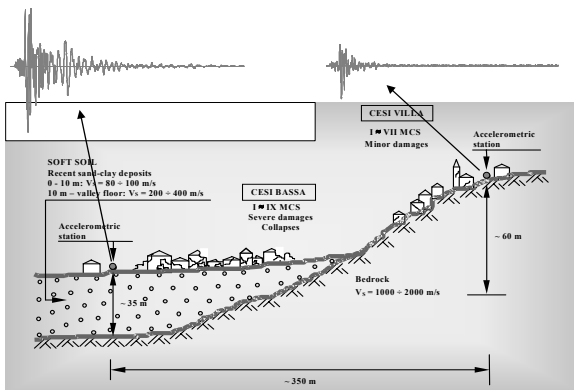
- Nel passato: coefficiente di importanza I
 - Moltiplicatore delle forze di progetto
 - Per costruzioni usuali $I = 1$
 - Per edifici con affollamento $I = 1.2$
 - Per edifici strategici $I = 1.4$

Considerazioni

"cambiare tutto per non cambiare niente"

- A cosa servono le "classi d'uso" degli edifici?
 - Forniscono il coefficiente d'uso C_U che, moltiplicato per la vita nominale V_N , dà la vita di riferimento V_R
 - Per classe d'uso II si ha $C_U = 1$ quindi per verifica di resistenza di costruzioni usuali $V_R = 50$ anni, periodo di ritorno $T_r = 475$ anni si ha, ad esempio, $a_g = 0.25$ g
 - Per classe d'uso III (edifici con affollamento) $C_U = 1.5$ quindi per verifica di resistenza di costruzioni usuali $V_R = 50 \times 1.5$ anni, periodo di ritorno $T_r = 475 \times 1.5$ anni si ha $a_g \approx 0.25 \times \sqrt{1.5} = 1.22 \cdot 0.25$ g nel passato 1.2
 - Per classe d'uso IV (edifici strategici) $C_U = 2$ quindi $a_g \approx 0.25 \times \sqrt{2} = 1.41 \cdot 0.25$ g nel passato 1.4

Influenza del terreno e microzonazione



Influenza del terreno e microzonazione

- Ci possono essere localmente forti variazioni dell'azione sismica
 - amplificazione dell'accelerazione sulle creste
 - variazione del contenuto in frequenza in zone di depositi alluvionali
 - possibili amplificazioni in zone di depositi per effetto di rifrazione delle onde sismiche
- La nuova normativa ne tiene conto in alcuni casi
 - tipo di suolo: A, B, C, D, E
 - categoria topografica: pendio, cresta
- In altri casi occorrono studi geologici e geotecnici locali

Classificazione sismica oggi (NTC 08)

Dati disponibili in 10751 punti
 - griglia di circa 10 km di lato
 - interpolare per punti interni alla griglia

Dati sismici forniti

- a_g , F_0 , T_C^* (consentono di definire lo spettro)
- forniti per 9 valori di T_R (da 30 a 2475 anni)
- interpolare per T_R non inclusi nell'elenco

Tabella pubblicata come allegato al D.M. 14/1/2008

Spettri di risposta NTC 08

parametri a_g F_0 T_C^*

ID	LON	LAT	$T_R=30$			$T_R=50$		
			a_g	F_0	T_C^*	a_g	F_0	T_C^*
13111	6.5448	45.134	0.263	2.50	0.18	0.340	2.51	0.21
13333	6.5506	45.085	0.264	2.49	0.18	0.341	2.51	0.21
13555	6.5564	45.035	0.264	2.50	0.18	0.340	2.51	0.20
13777	6.5621	44.985	0.263	2.50	0.18	0.338	2.52	0.20
12890	6.6096	45.188	0.284	2.46	0.19	0.364	2.51	0.21
13112	6.6153	45.139	0.286	2.46	0.19	0.366	2.51	0.21
13334	6.621	45.089	0.288	2.46	0.19	0.367	2.51	0.21
13556	6.6268	45.039	0.288	2.46	0.19	0.367	2.51	0.21
13778	6.6325	44.989	0.288	2.46	0.19	0.366	2.52	0.21
14000	6.6383	44.939	0.286	2.47	0.19	0.363	2.52	0.21
14222	6.6439	44.889	0.284	2.47	0.19	0.360	2.53	0.21
12891	6.6803	45.192	0.306	2.43	0.20	0.389	2.50	0.21

Determinazione dei dati sismici

Periodo di riferimento V_R

EdiLus-MS
Mappe Sismiche

indirizzo classe vita nominale

Via Guelfa Vicenza, 202, Catanzaro

Mappe Sismiche

Parametri di pericolosità Sismica

"Stato Limite"	T_f [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_c^* [s]
Operatività	30	0.063	2.553	0.242
Danno	50	0.077	2.548	0.263
Salvaguardia Vita	475	0.206	2.463	0.357
Prevenzione Collasso	975	0.281	2.435	0.440

ACCA software S.p.A.
Il software per Edilus-MS
Tel.: 0827369.304 - Fax: 0827369.12.35
P.33A.030574047 - E-mail: info@acca.it

Determinazione dei dati sismici

Periodo di riferimento V_R

EdiLus-MS
Mappe Sismiche

indirizzo classe vita nominale

Via Guelfa Vicenza, 202, Catanzaro

Mappe Sismiche

Dati corrispondenti

Stato limite e periodo di ritorno

Parametri di pericolosità Sismica

"Stato Limite"	T_f [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_c^* [s]
Operatività	30	0.063	2.553	0.242
Danno	50	0.077	2.548	0.263
Salvaguardia Vita	475	0.206	2.463	0.357
Prevenzione Collasso	975	0.281	2.435	0.440

Classificazione sismica oggi (NTC 08)

La normativa fornisce a_g , F_o , T_c^*

A che servono?

- consentono di definire lo spettro di risposta (di cui parleremo tra poco)

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

Serve veramente tutta questa precisione?

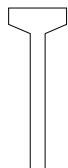
Comportamento dinamico elastico Schemi a un grado di libertà

Struttura a un grado di libertà

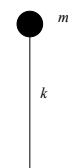
Serbatoio pensile



Foto



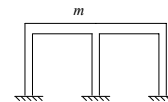
Disegno schematico



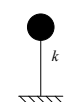
Modello di calcolo

Struttura a un grado di libertà

Telaio monopiano



Disegno schematico



Modello di calcolo

Oscillazioni libere

Esempio: altalena



Spostando il sedile dell'altalena e poi lasciandolo libero, esso oscilla con un periodo T ben preciso

Oscillazioni libere

Esempio: altalena



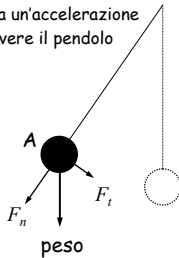
Spostando il sedile dell'altalena e poi lasciandolo libero, esso oscilla con un periodo T ben preciso

Oscillazioni libere pendolo (esempio: altalena)

A) Il peso è scomposto nelle forze

F_n assorbita dall'asta del pendolo

F_t che provoca un'accelerazione che fa muovere il pendolo

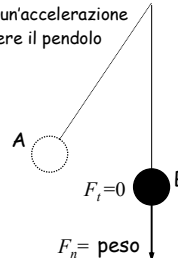


Oscillazioni libere pendolo (esempio: altalena)

A) Il peso è scomposto nelle forze

F_n assorbita dall'asta del pendolo

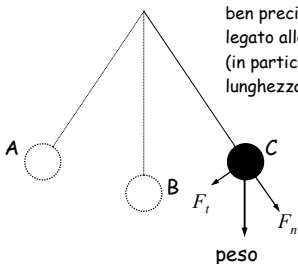
F_t che provoca un'accelerazione che fa muovere il pendolo



B) In questa posizione la velocità è massima (quando inizia a risalire rallenta) ma l'accelerazione è nulla perché $F_t = 0$

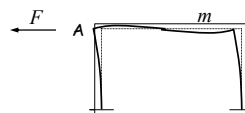
Oscillazioni libere pendolo (esempio: altalena)

Il pendolo oscilla con un periodo T ben preciso, legato alla geometria (in particolare, alla lunghezza dell'asta)



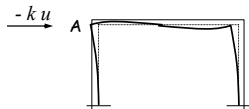
Oscillazioni libere telaio monopiano

A) Per deformare il telaio in questa posizione occorre applicare una forza F , uguale ed opposta alla forza elastica che tende a riportare il telaio alla posizione indeformata (forza di richiamo elastico).



Equilibrio statico
 $F = k u$

Oscillazioni libere telaio monopiano

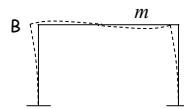


Quando si lascia libero il telaio, agisce solo la forza di richiamo elastico, che provoca un'accelerazione.

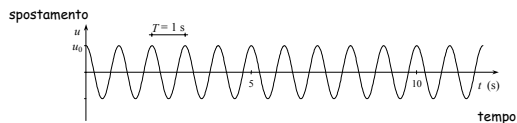
Equilibrio dinamico

$$-k u = m a \quad m \ddot{u} + k u = 0$$

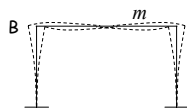
Oscillazioni libere telaio monopiano



B) Tornato nella posizione indeformata, la velocità è massima e l'accelerazione nulla (come la forza di richiamo elastico).

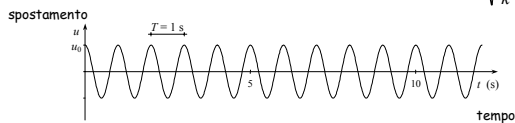


Oscillazioni libere telaio monopiano

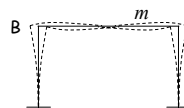


Il telaio oscilla con un periodo ben preciso, legato alla massa ed anche alla rigidità del telaio

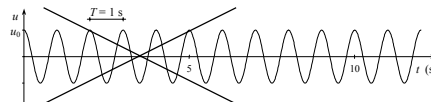
$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$



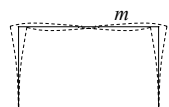
Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano



In realtà il moto non continua così, a causa della dissipazione di energia (smorzamento)



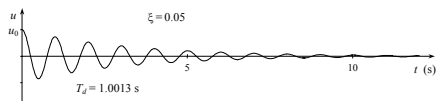
Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano



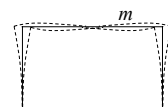
Equazione del moto:

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

Lo smorzamento è legato alla variazione di spostamento (velocità)



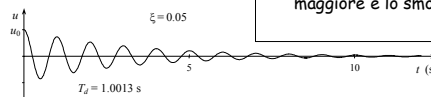
Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano



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

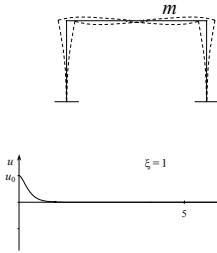


Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano

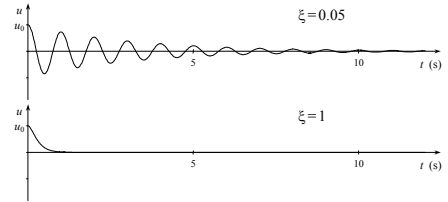
Equazione del moto:

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

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, topagni) 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 $\xi = 0.05$

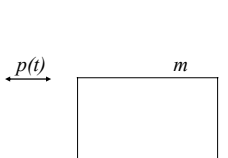
Oscillazioni forzate

Esempio: altalena



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

Oscillazioni forzate telaio monopiano

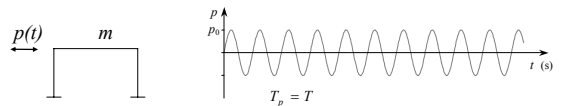


Equazione del moto:

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

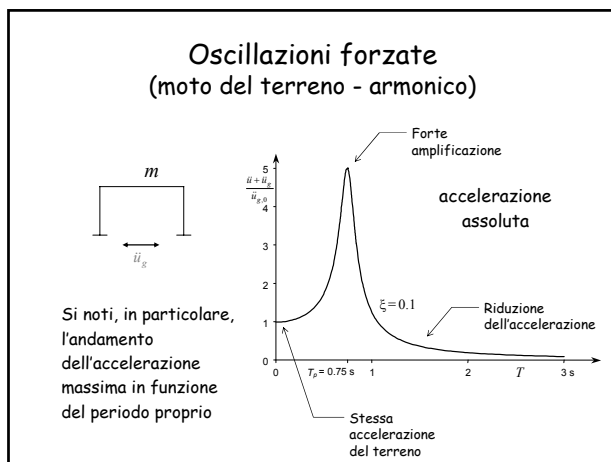
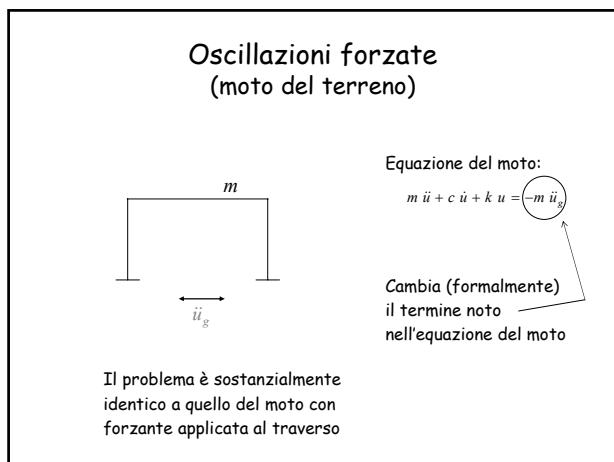
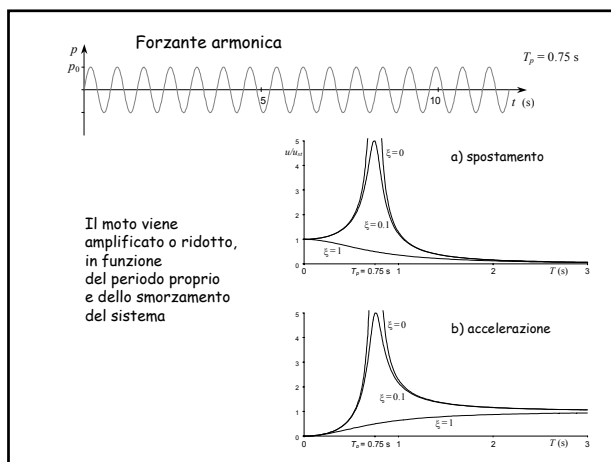
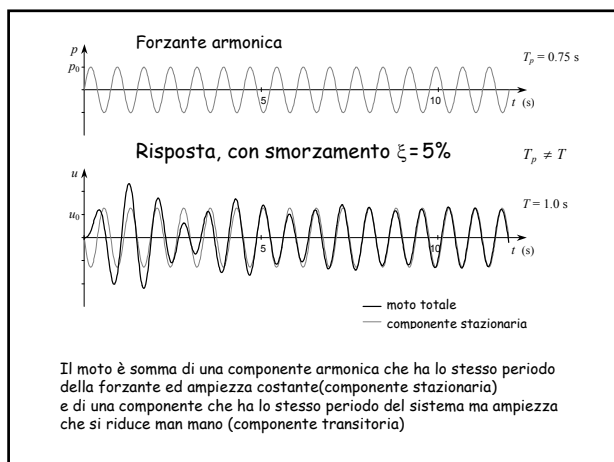
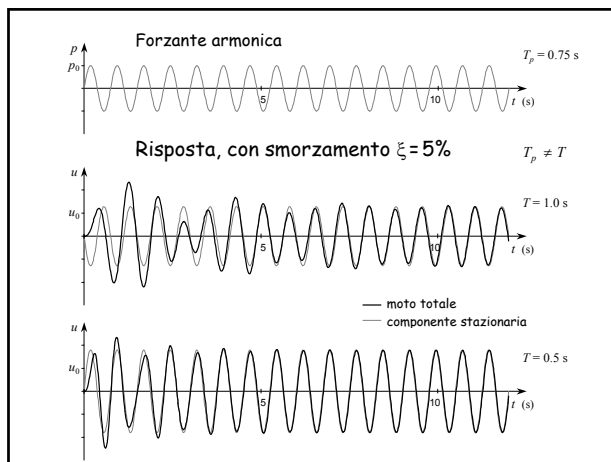
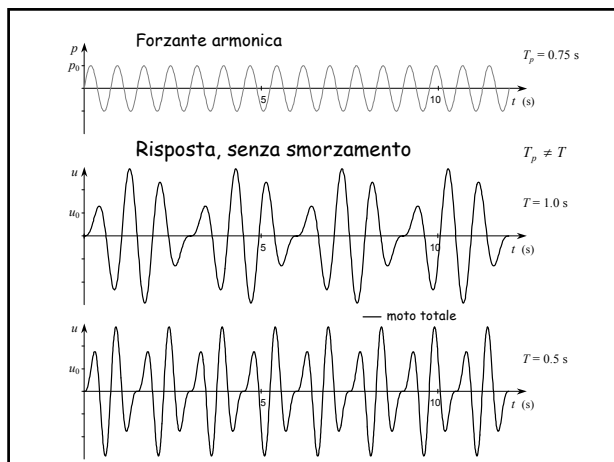
Nell'equazione del moto compare un nuovo termine (l'azione forzante)

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



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

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

Si ha allora:

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

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

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

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

Relazione tra i valori massimi di spostamento relativo e accelerazione assoluta

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

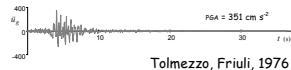
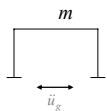
Essa coincide con l'accelerazione
assoluta quando lo smorzamento
è nullo

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

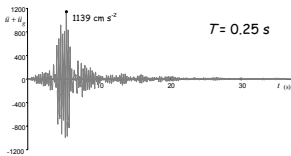
$$\text{La relazione } |\ddot{u} + \ddot{u}_g| = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 u$$

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

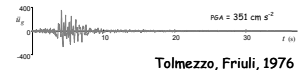
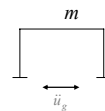
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



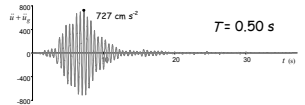
Concettualmente
analogo
(ma più complesso
numericamente)
è determinare
la risposta ad un
accelerogramma



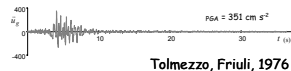
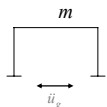
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



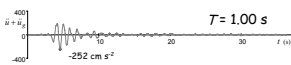
Cambiando il periodo
dell'oscillatore,
cambia la risposta



Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

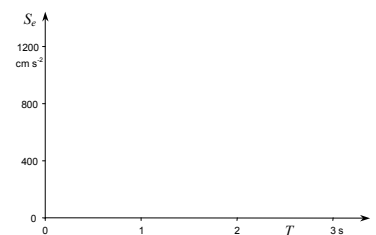


Cambiando il periodo
dell'oscillatore,
cambia la risposta



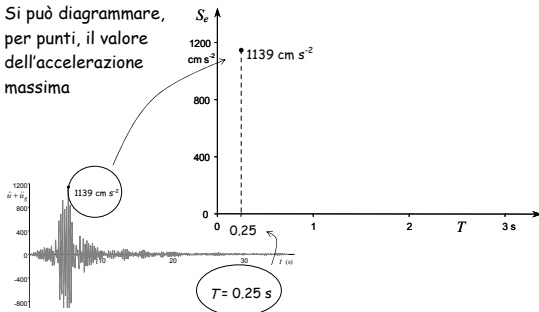
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

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



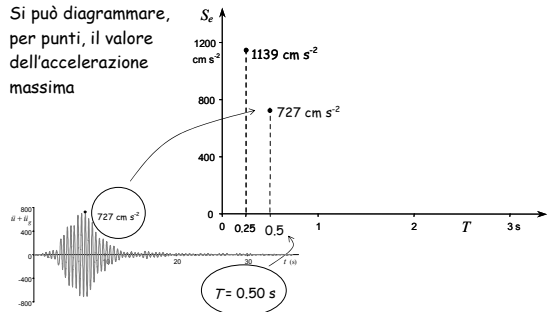
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

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



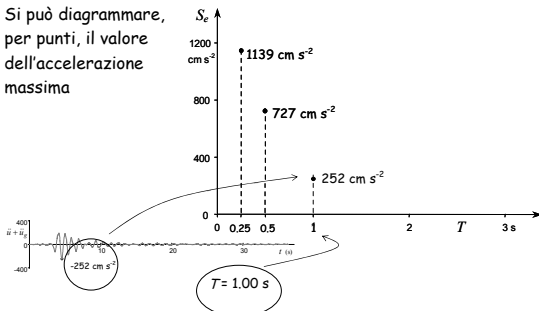
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

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



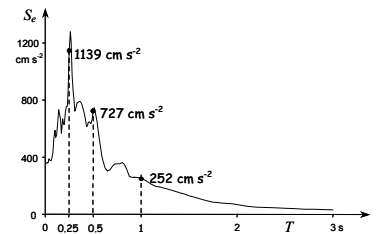
Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

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



Oscillazioni forzate Spettro di risposta

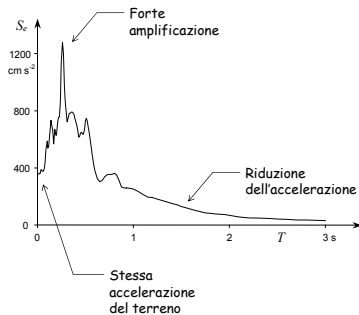
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



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

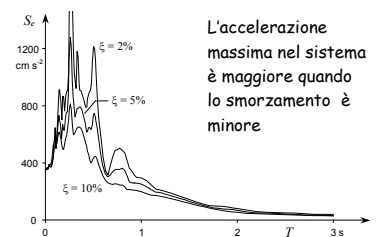
Oscillazioni forzate Spettro di risposta (accelerazione)

L'andamento dell'accelerazione massima in funzione del periodo proprio è analogo a quanto visto per moto del terreno armonico



Oscillazioni forzate Spettro di risposta (accelerazione)

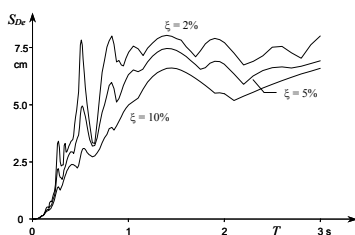
Al variare dello smorzamento si ottengono diverse curve



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

Oscillazioni forzate Spettro di risposta (spostamento)

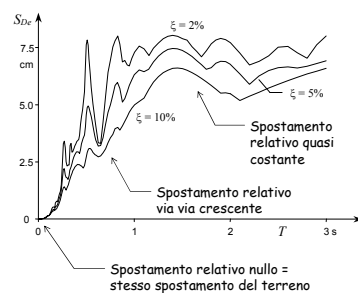
Allo stesso modo si può diagrammare lo spostamento relativo massimo in funzione del periodo



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

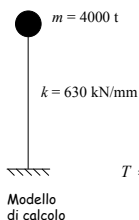
Oscillazioni forzate Spettro di risposta (spostamento)

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



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

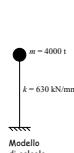
A cosa servono gli spettri?



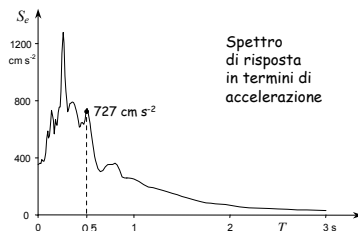
Conoscendo massa e rigidezza possiamo determinare il periodo proprio

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

A cosa servono gli spettri?



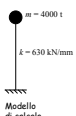
$$T = 0.5 \text{ s}$$



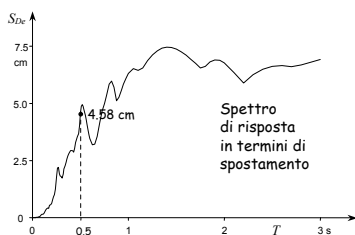
Spettro di risposta in termini di accelerazione

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?



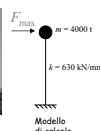
$$T = 0.5 \text{ s}$$



Spettro di risposta in termini di spostamento

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

A cosa servono gli spettri?



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

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

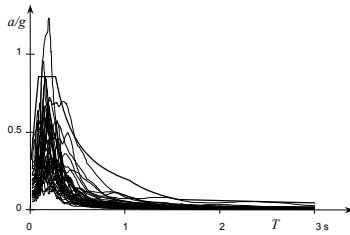
$$F_{\max} = m a_{\max} = 4000 \times 7.27 = 29000 \text{ kN}$$

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

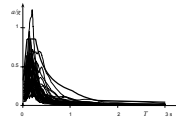
Spettri di risposta

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

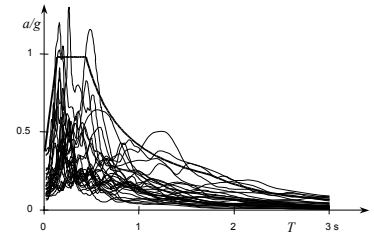


Si può quindi definire una curva che involupa tutti gli spettri di risposta, o che viene superata solo occasionalmente

Spettri di risposta

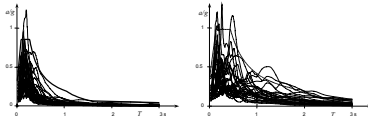


In zone differenti e su terreni differenti si otterranno risultati diversi



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

Spettri di risposta

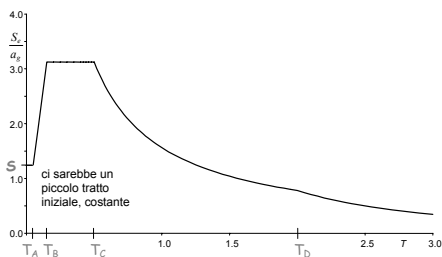


In zone differenti e su terreni differenti si otterranno risultati diversi

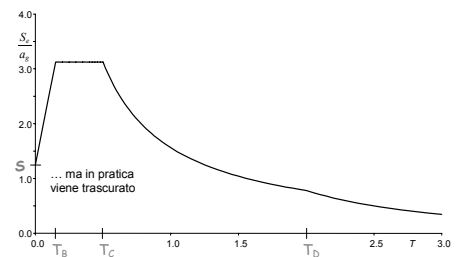
La normativa fornisce quindi spettri di risposta differenziati in funzione delle caratteristiche del suolo e della zona in cui è ubicata la struttura

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

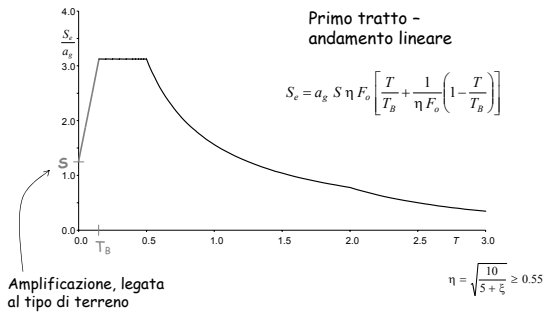
Forma generale degli spettri di risposta elastica



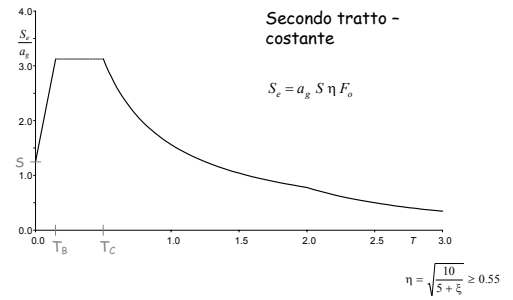
Forma generale degli spettri di risposta elastica



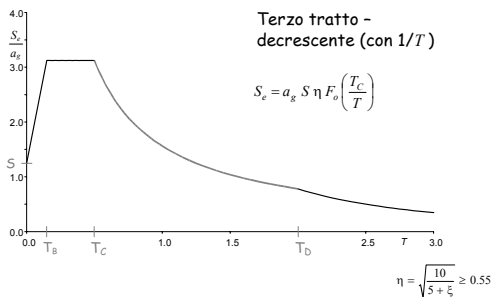
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



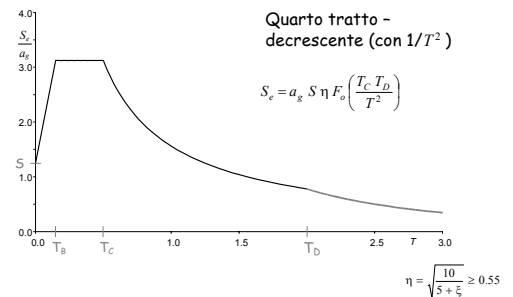
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali

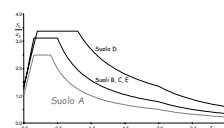
Per definire uno spettro di risposta elastico
occorre indicare i parametri

- 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 F_o T_C^*

che dipendono dal periodo di ritorno T_r e dalle
caratteristiche del terreno

Classificazione dei suoli e spettri di risposta



Suolo A

Formazioni litoidi o suoli
omogenei molto rigidi

$V_{530} > 800$ m/s

$S = 1$ $T_B = 0.15$ s $T_C = 0.4$ s $T_D = 2.0$ s

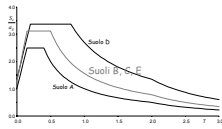
Valori orientativi per terremoti
con alto periodo di ritorno

V_{530}

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

$$V_{530} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

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



$S = 1.25$ $T_B = 0.15$ s $T_C = 0.5$ s
Valori orientativi per terremoti
con alto periodo di ritorno

V_{530}

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

Suolo B

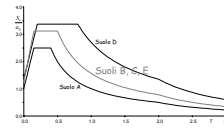
Depositi di sabbie e ghiaie
molto addensate o argille
molto consistenti

$360 \text{ m/s} < V_{530} < 800 \text{ m/s}$

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



Parametri come per B

V_{530}

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

Suolo C

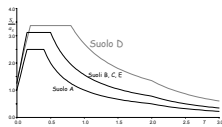
Depositi di sabbie e ghiaie
mediamente addensate o
argille di media consistenza

$180 \text{ m/s} < V_{530} < 360 \text{ m/s}$

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



$S = 1.35$ $T_B = 0.2$ s $T_C = 0.8$ s
Valori orientativi per terremoti
con alto periodo di ritorno

V_{530}

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

Suolo D

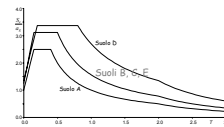
Depositi di terreni granulari da
sciolti a poco addensati oppure
coesivi da poco a
mediamente consistenti

$V_{530} < 180 \text{ m/s}$

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



Parametri come per B

V_{530}

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

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
 $V_{530} > 800 \text{ m/s}$

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

$V_{530} < 100 \text{ m/s}$

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

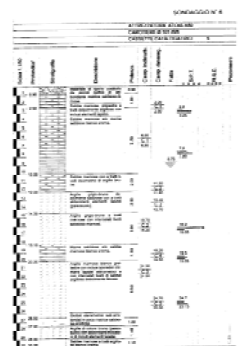
$N_{SPT} = 16$

6.5 m - argille marnose

$N_{SPT} = 18$

3.5 m - ciottoli, argille brune

$N_{SPT} = 40$



Esempio

Dall'alto:

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

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

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

$$N_{SPT} = 25.9$$

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

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

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

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

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^*

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

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: località Spoleto

Vedere foglio
 Excel "Spettri"
 per Catania

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 Catania

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

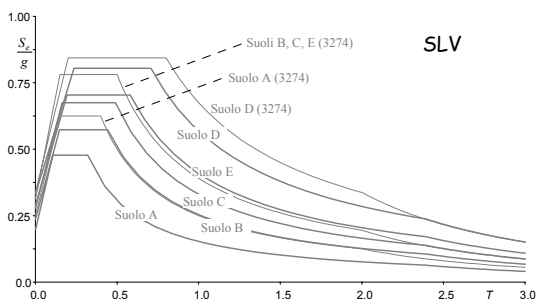
Tab. 8. Valori dei coefficienti che definiscono lo spettro di risposta elastico: accelerazioni orizzontali, terremoto con $T_R=50$ anni (SLD), Spoleto, D.M. 14/1/08

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

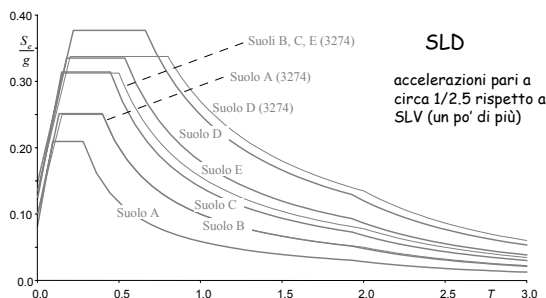
Vedere foglio
Excel "Spettri"
per Catania



Spettri di risposta NTC 08

Esempio: località Spoleto

Vedere foglio
Excel "Spettri"
per Catania



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

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

Spettri di risposta elastica di normativa

accelerazioni orizzontali e verticali, alto periodo di ritorno

accelerazione (normalizzata)

