

Corso di aggiornamento  
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

## Modulo 1 - Sicurezza strutturale ed azioni

### 1. Problematiche generali

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

## Evoluzione della normativa e dei criteri di verifica della sicurezza

## Riferimenti normativi

Nuove normative:

D.M. 14/1/08 già applicabile, obbligatorio dal 4/9/09

Eurocodice 3, versione 2004 già applicabile

Norme precedenti - metodo delle tensioni ammissibili:

D.M. 14/2/92 applicabile (non sempre) fino al 4/9/09

Norme precedenti - metodo degli stati limite:

D.M. 9/1/96

(la sezione III della parte seconda è il NAD per EC3)

Eurocodice 3, versione 1992

D.M. 14/9/05 applicabili (non sempre) fino al 4/9/09

## Quali sono gli obiettivi della progettazione strutturale?

Una struttura deve essere progettata e costruita in modo che essa, durante la sua vita presupposta, con adeguato grado di affidabilità e tenendo conto del costo:

- sia in grado di sopportare tutte le azioni o influenze cui possa essere sottoposta durante la sua realizzazione e il suo esercizio
- rimanga adatta all'uso per il quale è prevista

Eurocodice EN 1990, punto 2.1

## Valutazione della sicurezza

La norma parla di "adeguato grado di affidabilità".

Perché ?

Perché sia la resistenza del materiale che le azioni sulla struttura non sono definite con certezza, quindi dovrebbero essere analizzate in maniera probabilistica.

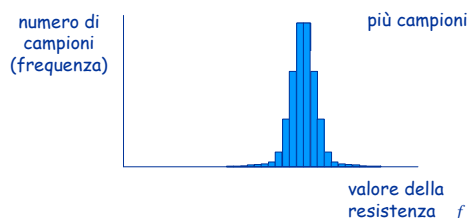
## Incertezza sulla resistenza

provino	$f_y$ [MPa]
1	387.9
2	407.8
3	419.4
4	435.1
5	448.7
6	450.8
7	462.4
...	...
49	511.2
...	...
99	570.6
100	578.5

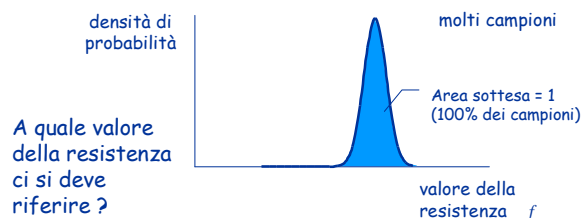
Portando a rottura  
100 provini si ottengono  
risultati fortemente diversi

A quale fare riferimento?

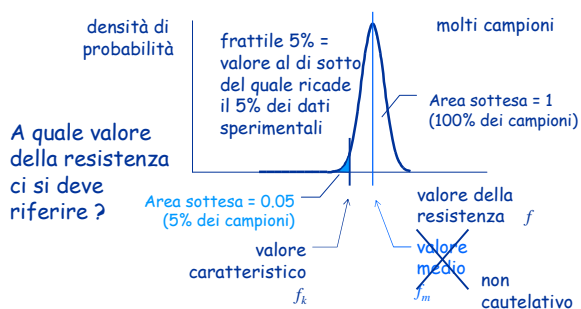
## Incertezza sulla resistenza



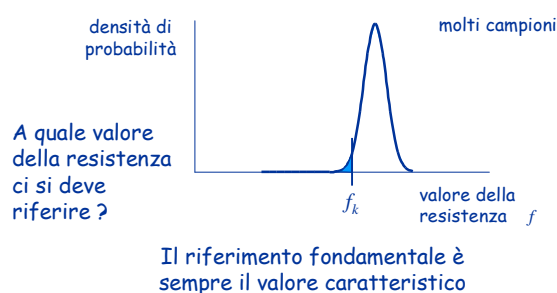
## Incertezza sulla resistenza



## Incertezza sulla resistenza



## Incertezza sulla resistenza



## Incertezza sulla resistenza

provino	$f_y$ [MPa]
1	387.9
2	407.8
3	419.4
4	435.1
5	448.7
6	450.8
7	462.4
...	...
49	511.2
...	...
99	570.6
100	578.5

Portando a rottura  
100 provini si ottengono  
risultati fortemente diversi  
A quale fare riferimento?

450 MPa  $f_{yk}$

Valore caratteristico  
frattile 5% = valore al di sotto  
del quale ricade il 5% dei dati  
sperimentali

## Incertezza sulle azioni

Valori nominali      peso di elementi di dimensioni  
e caratteristiche ben definite  
Esempio: peso proprio della  
soletta di un solaio

Siamo sicuri che verranno realizzati  
esattamente come previsto?

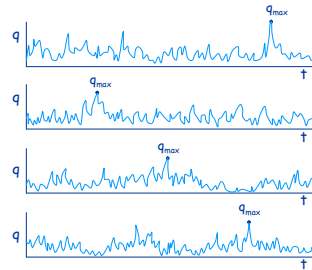
## Incertezza sulle azioni

Valori "massimi" Esempio: massimo carico variabile su un solaio (in base alla destinazione d'uso)

Siamo sicuri che non saranno mai superati?

## Incertezza sulle azioni

Variatione del carico  $q$  nel tempo



Possiamo far riferimento al valore massimo del carico durante tutta la vita

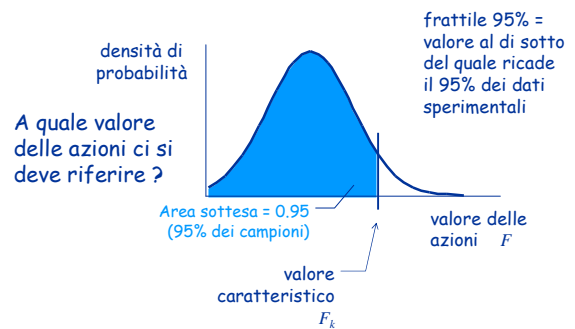
## Incertezza sulle azioni

solaio	$q$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	0.44
2	0.59
...	...
49	1.12
...	...
94	1.92
95	1.97
96	2.08
97	2.29
98	2.45
99	2.71
100	3.06

Esaminando il sovraccarico massimo (durante tutta la vita) in 100 solai per abitazione si trovano valori fortemente diversi

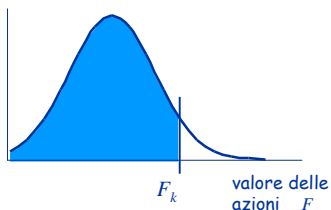
A quale fare riferimento?

## Incertezza sulle azioni



## Incertezza sulle azioni

A quale valore delle azioni ci si deve riferire?



Il riferimento fondamentale è sempre il valore caratteristico (anche quando non viene indicato esplicitamente)

## Incertezza sulle azioni

solaio	$q$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	0.44
2	0.59
...	...
49	1.12
...	...
94	1.92
95	1.97
96	2.08
97	2.29
98	2.45
99	2.71
100	3.06

Esaminando il sovraccarico massimo (durante tutta la vita) in 100 solai per abitazione si trovano valori fortemente diversi

A quale fare riferimento?

2.0 kN/m<sup>2</sup>  $q_k$

Valore caratteristico

frattile 95% = valore al di sotto del quale ricade il 95% dei dati sperimentali

E' possibile fare il calcolo utilizzando i valori caratteristici della resistenza e delle azioni ?

Dipende dagli obiettivi:

- La struttura deve rimanere adatta all'uso per il quale è prevista  
L'uso dei valori caratteristici può garantire una sufficiente sicurezza

E' possibile fare il calcolo utilizzando i valori caratteristici della resistenza e delle azioni ?

Dipende dagli obiettivi:

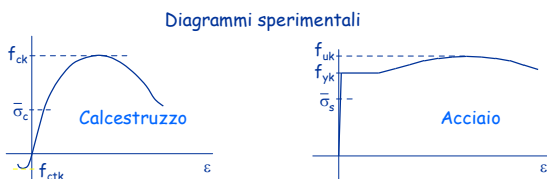
- La struttura deve rimanere adatta all'uso per il quale è prevista
- La struttura deve essere in grado di sopportare tutte le azioni o influenze cui possa essere sottoposta durante la sua realizzazione e il suo esercizio

La possibilità di avere resistenza inferiore o azioni superiori porta ad un rischio di crollo non sufficientemente basso

E' necessario applicare coefficienti di sicurezza

In che modo ?

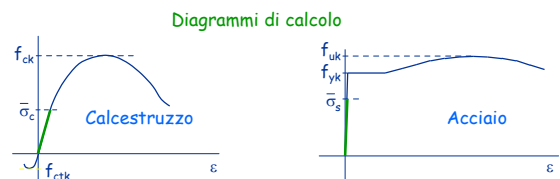
Prima possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza alla resistenza



Si considerano "ammissibili" valori delle tensioni molto ridotti rispetto a quelli di rottura

$$\sigma_c \leq \bar{\sigma}_c = \frac{f_{ck}}{\gamma} \quad \sigma_s \leq \bar{\sigma}_s = \frac{f_{yk}}{\gamma}$$

Prima possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza alla resistenza



Per valori delle tensioni inferiori a quelli ammissibili il legame tensioni-deformazioni è lineare

E' possibile quindi applicare tutte le formule della teoria di elasticità lineare, il principio di sovrapposizione degli effetti, ecc. ecc.

Prima possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza alla resistenza

Metodo delle tensioni ammissibili

La verifica consiste nel calcolare la tensione massima (prodotta dalle azioni, prese col valore caratteristico)

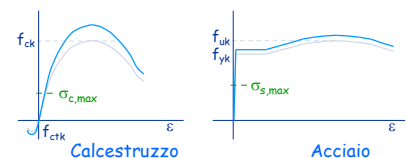


e controllare che sia inferiore a quella ammissibile

$$\sigma_{max} \leq \bar{\sigma}$$

Metodo delle tensioni ammissibili  
Considerazioni

Nel 95% dei casi la resistenza è maggiore del valore caratteristico ...



... e nel 95% dei casi il carico è più piccolo del valore caratteristico

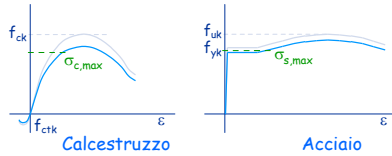
In questi casi il margine rispetto al collasso è maggiore di quanto previsto

## Metodo delle tensioni ammissibili

### Considerazioni

Ma c'è un 5% di casi in cui la resistenza è minore del valore caratteristico ...

... o il carico è più grande del valore caratteristico

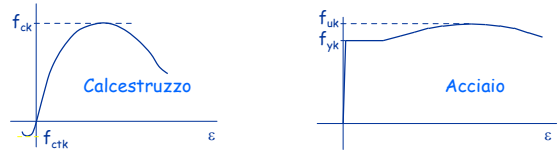


In questi casi lo stato tensionale e deformativo è molto maggiore e il margine rispetto al collasso è minore di quanto previsto

Qual è il reale rischio di crollo?

## Seconda possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza ai carichi

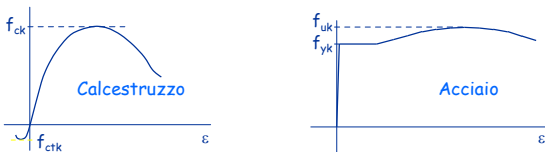
### Diagrammi sperimentali



Usando i legami costitutivi sperimentali, si valuta il carico che porta a collasso la struttura

## Seconda possibilità: applicare un coefficiente di sicurezza ai carichi

### Calcolo a rottura



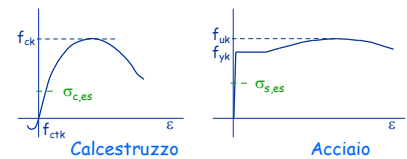
Si considera accettabile un carico ridotto rispetto a quello di collasso

$$F_k \leq \frac{F_u}{\gamma} \quad \text{ovvero} \quad \gamma F_k \leq F_u$$

## Calcolo a rottura

### Considerazioni

Il carico di esercizio è molto minore del carico di collasso



Qual è lo stato tensionale e deformativo sotto i carichi di esercizio?

## Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

Si parte da considerazioni probabilistiche

Si dimostra che per avere una bassa probabilità di collasso occorre fare riferimento a valori di carichi e resistenza corrispondenti a differenti probabilità di occorrenza

## Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

Si parte da considerazioni probabilistiche

Come si può valutare la probabilità di avere un crollo ?

Esempio

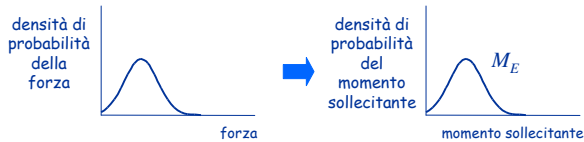


Per esprimere un giudizio dobbiamo confrontare il momento  $M_E$  che sollecita la sezione col momento  $M_R$  che essa può sopportare

### Probabilità di crollo



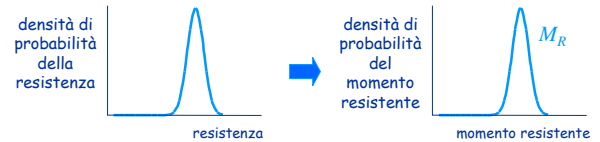
Il momento massimo  $M_E$  che sollecita la sezione dipende dal valore della forza



### Probabilità di crollo



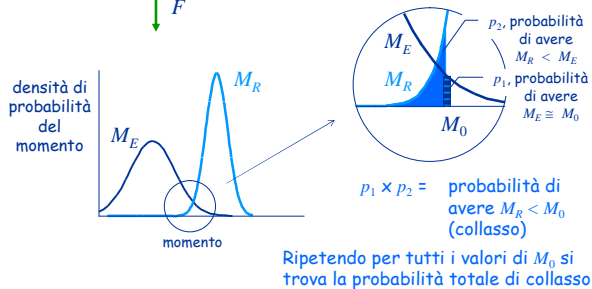
Il momento massimo  $M_R$  che la sezione può sopportare dipende dalla resistenza del materiale



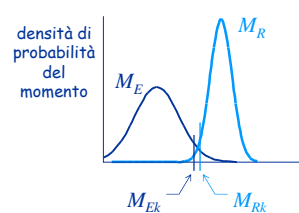
### Probabilità di crollo



Confronto tra  $M_E$  e  $M_R$

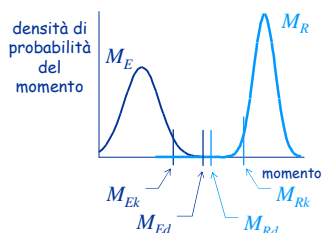


Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi



Effettuare i calcoli usando i valori caratteristici, cioè controllare che  $M_{Ek} \leq M_{Rk}$  non garantisce una probabilità di crollo sufficientemente bassa

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

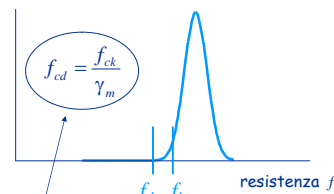


Per avere una bassa probabilità di crollo le due distribuzioni di probabilità devono essere ben distinte

Ciò può essere ottenuto facendo riferimento a valori di carichi e resistenza corrispondenti a differenti probabilità di occorrenza

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

Resistenza



Al posto del valore caratteristico  $f_k$  (frattile 5%)

si usa come valore di calcolo  $f_d$  un frattile più basso (0.5%)

Convenzionalmente, si passa dal valore caratteristico al valore di calcolo applicando un opportuno coefficiente di sicurezza

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

provino	$f_y$ [MPa]
1	387.9
2	407.8
3	419.4
4	435.1
5	448.7
6	450.8
7	462.4
...	...
49	511.2
...	...
99	570.6
100	578.5

$f_{yd}$  Si usa come valore di calcolo un frattile più basso (0.5%)

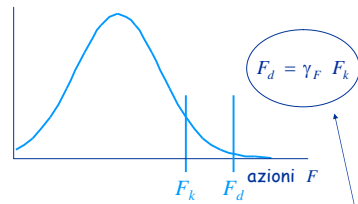
450 MPa  $f_{yk}$   
frattile 5%

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

Si passa dal valore caratteristico al valore di calcolo applicando un opportuno coefficiente di sicurezza

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

Azioni



Al posto del valore caratteristico  $F_k$  (frattile 95%) si usa come valore di calcolo  $F_d$  un frattile più alto (99.5%)

Convenzionalmente, si passa dal valore caratteristico al valore di calcolo applicando un opportuno coefficiente di sicurezza

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

solaio	q [kN/m <sup>2</sup> ]
1	0.44
2	0.59
...	...
49	1.12
...	...
94	1.92
95	1.97
96	2.08
97	2.29
98	2.45
99	2.71
100	3.06

Si passa dal valore caratteristico al valore di calcolo applicando un opportuno coefficiente di sicurezza

2.0 kN/m<sup>2</sup>  $q_k$   
frattile 95%

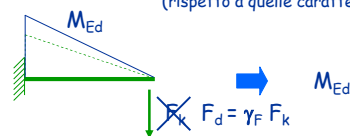
$$q_d = \gamma_q q_k$$

Si usa come valore di calcolo un frattile più alto (99.5%)

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

Verifica allo stato limite ultimo

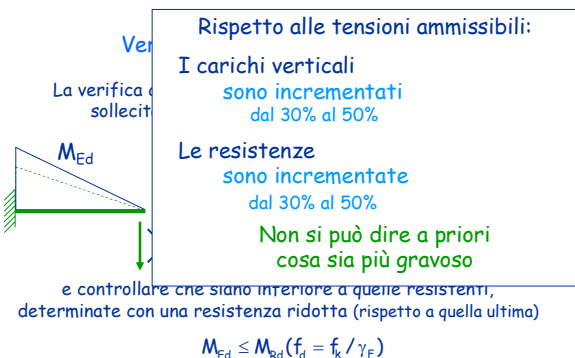
La verifica consiste nel calcolare le caratteristiche di sollecitazione, prodotta da azioni maggiorate (rispetto a quelle caratteristiche)



e controllare che siano inferiori a quelle resistenti, determinate con una resistenza ridotta (rispetto a quella ultima)

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} (f_d = f_k / \gamma_F)$$

Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi



Terza possibilità: applicare coefficienti di sicurezza sia alla resistenza che ai carichi

Verifica allo stato limite ultimo

Le caratteristiche di sollecitazione che la sezione può sopportare devono essere valutate tenendo conto della non linearità del legame costitutivo



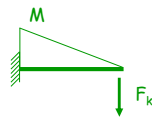
Le caratteristiche di sollecitazione prodotte dai carichi possono essere valutate con analisi non lineare, ma più comunemente si usa un'analisi lineare

## Riepilogo e confronto: tensioni ammissibili

- 1 - Analisi dei carichi  
si utilizzano i valori caratteristici

- 2 - Risoluzione (analisi strutturale)  
si utilizza sempre un'analisi lineare;  
si ottengono le caratteristiche di sollecitazione (es.  $M$ )

- 3 - Verifica della sezione  
si determinano le tensioni massime  
e le si confronta con quelle ammissibili  
in alternativa, si determina la massima caratteristica di sollecitazione sopportabile (es.  $M_{max}$ ) - che corrisponde al raggiungimento della tensione ammissibile - e la si confronta con quella sollecitante



$$\sigma_{max} \leq \bar{\sigma}$$

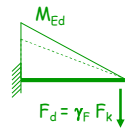
## Riepilogo e confronto: stato limite ultimo

- 1 - Analisi dei carichi  
si utilizzano i valori di calcolo  
 $1.3 \div 1.5 \times$  quelli caratteristici

- 2 - Risoluzione (analisi strutturale)  
si utilizza normalmente un'analisi lineare; a volte, analisi non lineare  
si ottengono le caratteristiche di sollecitazione (es.  $M_{Ed}$ )

- 3 - Verifica della sezione  
si determina la massima caratteristica di sollecitazione sopportabile (es.  $M_{Rd}$ ) - che corrisponde al raggiungimento della deformazione limite - e la si confronta con quella sollecitante

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} (f_d = f_k / \gamma_F)$$



## Riepilogo e confronto: tensioni ammissibili - stato limite ultimo

T.A.

S.L.U.

Carichi	valori caratteristici	valori di calcolo (1.3÷1.5 maggiori)
Risoluzione	solo analisi lineare	di solito analisi lineare (car.soll. 1.3÷1.5 maggiori)
Verifica	controllo delle tensioni valutazione di car.soll. massime	--- valutazione di car.soll. resistenti (maggiori - di quanto?)

## ... Tornando agli obiettivi

### Metodo degli stati limite

- Sopportare tutte le azioni ...

cioè evitare il collasso ...

Verifica allo stato limite ultimo (SLU)

- Rimanere adatta all'uso ...

ovvero limitare:

- deformazioni
- fessurazione (per c.a.) ecc.

Verifica allo stato limite di esercizio (SLE)

## Stato Limite Ultimo

### 2.2.1 STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

I principali Stati Limite Ultimi, di cui al § 2.1, sono elencati nel seguito:

- perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte; **EQU**
- spostamenti o deformazioni eccessive;
- raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti di strutture, collegamenti, fondazioni;
- raggiungimento della massima capacità di resistenza della struttura nel suo insieme; **STR**
- raggiungimento di meccanismi di collasso nei terreni; **GEO**
- rottura di membrature e collegamenti per fatica;
- rottura di membrature e collegamenti per altri effetti dipendenti dal tempo;
- instabilità di parti della struttura o del suo insieme;

Altri stati limite ultimi sono considerati in relazione alle specificità delle singole opere; in presenza di azioni sismiche, gli Stati Limite Ultimi sono quelli precisati nel § 3.2.1.

## Stato Limite di Esercizio

### 2.2.2 STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

I principali Stati Limite di Esercizio, di cui al § 2.1, sono elencati nel seguito:

- danneggiamenti locali (ad es. eccessiva fessurazione del calcestruzzo) che possano ridurre la durabilità della struttura, la sua efficienza o il suo aspetto;
- spostamenti e deformazioni che possano limitare l'uso della costruzione, la sua efficienza e il suo aspetto;
- spostamenti e deformazioni che possano compromettere l'efficienza e l'aspetto di elementi non strutturali, impianti, macchinari;
- vibrazioni che possano compromettere l'uso della costruzione;
- danni per fatica che possano compromettere la durabilità;
- corrosione e/o eccessivo degrado dei materiali in funzione dell'ambiente di esposizione;

Altri stati limite sono considerati in relazione alle specificità delle singole opere; in presenza di azioni sismiche, gli Stati Limite di Esercizio sono quelli precisati nel § 3.2.1.



### La "formula" della progettazione $R_3D_2$ : tre R e due D

- R **Resistenza**: capacità di sopportare i carichi previsti
- D **Duttilità**: capacità di andare in campo plastico senza collasso immediato
- R **Rigidezza**: bassa deformazione sotto i carichi
- D **Durabilità**: capacità di mantenere le caratteristiche nel tempo
- R

### Durabilità

- La struttura deve essere progettata così che il **degrado** nel corso della sua vita nominale, purché si adotti la normale manutenzione ordinaria, non pregiudichi le sue prestazioni in termini di resistenza, stabilità e funzionalità, portandole al di sotto del livello richiesto dalle presenti norme
- Le misure di protezione contro l'eccessivo degrado devono essere stabilite con riferimento alle previste condizioni ambientali
- La protezione contro l'eccessivo degrado deve essere ottenuta attraverso un'opportuna scelta dei dettagli, dei materiali e delle dimensioni strutturali, con l'eventuale applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi, nonché con l'adozione di altre misure di protezione attiva o passiva

NTC08, punto 2.5.4

### La "formula" della progettazione $R_3D_2$ : tre R e due D

- R **Resistenza**: capacità di sopportare i carichi previsti
- D **Duttilità**: capacità di andare in campo plastico senza collasso immediato
- R **Rigidezza**: bassa deformazione sotto i carichi
- D **Durabilità**: capacità di mantenere le caratteristiche nel tempo
- R **Robustezza**: bassa sensibilità a modeste variazioni di carico o schema

### La "formula" della progettazione una quarta R?

- R **Resistenza**: capacità di sopportare i carichi previsti
- D **Duttilità**: capacità di andare in campo plastico senza collasso immediato
- R **Rigidezza**: bassa deformazione sotto i carichi
- D **Durabilità**: capacità di mantenere le caratteristiche nel tempo
- R **Robustezza**: bassa sensibilità a modeste variazioni di carico o schema
- R **Risparmio**: limitazione dei costi, nel rispetto degli obiettivi

### Le costruzioni Classificazione generale

### Vita nominale $V_N$

- Vita nominale**: numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata

	TIPI DI COSTRUZIONE	Vita nominale $V_N$
1	Opere provvisorie - Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva	$\leq 10$ anni
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	$\geq 50$ anni
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	$\geq 100$ anni

NTC08, punto 2.4.1

## Classe d'uso

- **Classe d'uso:**  
è legata alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso in presenza di azioni sismiche

TIPI DI COSTRUZIONE	Classe d'uso
Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli	I
Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali	II
Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi	III
Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità	IV

NTC08, punto 2.4.2

## Vita nominale e classe d'uso

A cosa servono?

Esclusivamente per individuare il periodo di riferimento  $V_R$  per l'azione sismica

$$V_R = V_N \times C_U \geq 35 \text{ anni}$$

Il coefficiente d'uso  $C_U$  dipende dalla classe d'uso

Classe d'uso	I	II	III	IV
$C_U$	0.7	1.0	1.5	2.0

## Periodo di riferimento $V_R$ per l'azione sismica

Classe d'uso Vita nominale	I	II	III	IV
10	35	35	35	35
50	35	50	75	100
100	70	100	150	200

Esempio: edificio per abitazione

Opera ordinaria

Normale affollamento

## Le azioni sulle costruzioni Indicazioni generali

## Classificazione delle azioni

- In base al modo di esplicarsi
- Secondo la risposta strutturale
- Secondo la variazione della loro intensità nel tempo

NTC08, punto 2.5.1

## Classificazione delle azioni

- In base al modo di esplicarsi
  - **Dirette:**  
forze concentrate, carichi distribuiti, fissi o mobili
  - **Indirette:**  
spostamenti impressi, variazioni di temperatura e di umidità, ritiro, precompressione, cedimenti di vincolo
  - **Degrado:**  
endogeno - alterazione naturale  
esogeno - alterazione dovuta ad agenti esterni
- Secondo la risposta strutturale
- Secondo la variazione della loro intensità nel tempo

NTC08, punto 2.5.1.1

## Classificazione delle azioni

- In base al modo di esplicarsi
- Secondo la risposta strutturale
  - Statiche: azioni che non provocano accelerazioni significative della struttura o di alcune sue parti
  - Pseudo-statiche: azioni dinamiche rappresentabili mediante un'azione statica equivalente
  - Dinamiche: azioni che causano significative accelerazioni della struttura o dei suoi componenti
- Secondo la variazione della loro intensità nel tempo

NTC08, punto 2.5.1.2

## Classificazione delle azioni

- In base al modo di esplicarsi
- Secondo la risposta strutturale
- Secondo la variazione della loro intensità nel tempo
  - Permanenti:  $G$   
variazione nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare con sufficiente approssimazione costanti
  - Variabili:  $Q$   
azioni con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel tempo
  - Eccezionali:  $A$   
azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura
  - Sismiche:  $E$   
azioni derivanti dai terremoti

NTC08, punto 2.5.1.3

## Classificazione delle azioni

- In base al modo di esplicarsi
- Secondo la risposta strutturale
- Secondo la variazione della loro intensità nel tempo
  - Permanenti:  $G$   
 $G_1$  - Peso proprio degli elementi strutturali  
 $G_2$  - Peso proprio degli elementi non strutturali  
 importante distinzione tra "compiutamente definiti" e non  
 $P$  - Precompressione  
 e inoltre spostamenti impressi, ritiro, viscosità, ecc.
  - Variabili:  $Q$
  - Eccezionali:  $A$
  - Sismiche:  $E$

NTC08, punto 2.5.1.3

## Classificazione delle azioni

- In base al modo di esplicarsi
- Secondo la risposta strutturale
- Secondo la variazione della loro intensità nel tempo
  - Permanenti:  $G$
  - Variabili:  $Q$   
 di lunga durata - agiscono con un'intensità significativa, anche non continuativamente, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura  
 di breve durata - agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita nominale della struttura
  - Eccezionali:  $A$
  - Sismiche:  $E$

NTC08, punto 2.5.1.3

## Classificazione delle azioni

- In base al modo di esplicarsi
- Secondo la risposta strutturale
- Secondo la variazione della loro intensità nel tempo
  - Permanenti:  $G$
  - Variabili:  $Q$
  - Eccezionali:  $A$   
 incendi  
 esplosioni  
 urti di veicoli  
 di solito queste azioni non vengono prese espressamente in conto nella progettazione
  - Sismiche:  $E$

NTC08, punto 2.5.1.3

## Altri aspetti generali da trattare

- Caratterizzazione delle azioni elementari (punto 2.5.2)  
Valore di combinazione. Valore frequente, quasi permanente
- Combinazione delle azioni (punto 2.5.3)  
Combinazioni per SLU e per SLE
- Coefficienti parziali di sicurezza (punto 2.6)  
Valori dei coefficienti  $\gamma$

Saranno trattati più avanti,  
in questo modulo

## Tipi di azioni sulle costruzioni NTC08 cap. 3

- Par. 3.1 Carichi relativi ad opere civili e industriali  
Vedere anche Eurocodice 1, parte 1.1 ← Dopo
- Par. 3.2 Azione sismica  
Vedere anche Eurocodice 8, parte 1 ← Ora
- Par. 3.3 Azioni del vento  
Vedere anche Eurocodice 1, parte 1.4 ← Dopo
- Par. 3.4 Azioni della neve  
Vedere anche Eurocodice 1, parte 1.3
- Par. 3.5 Azioni della temperatura  
Vedere anche Eurocodice 1, parte 1.5
- Par. 3.6 Azioni eccezionali (incendio, esplosioni, urti)  
Incendio: EC1, parte 1.2 - Esplosioni, urti: EC1, parte 1.7

Corso di aggiornamento

Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

## Modulo 1 - Sicurezza strutturale ed azioni

### 2. Azione sismica

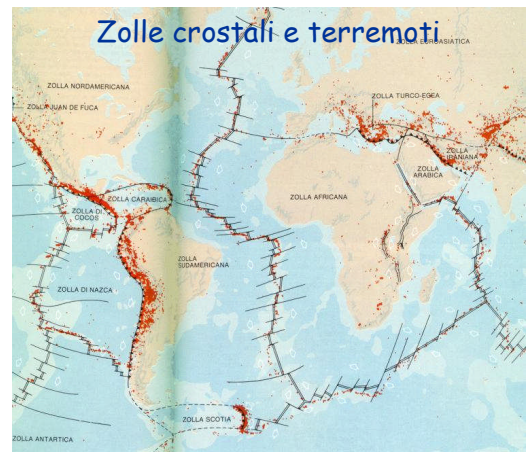
Ordine degli ingegneri, Catania

8, 10 ottobre 2008

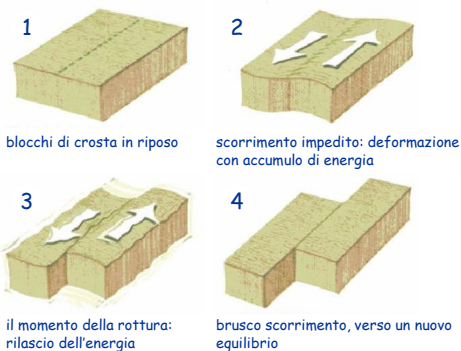
Aurelio Ghersi

## Brevi richiami di sismologia

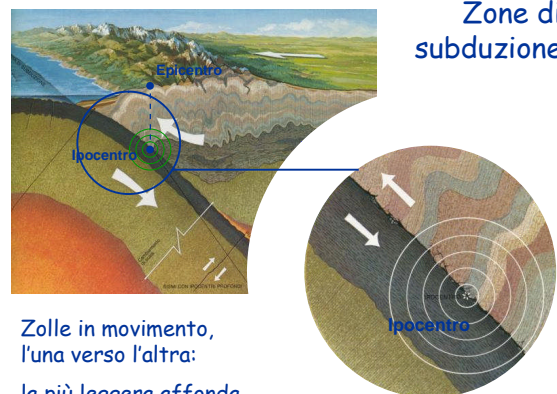
## Zolle crostali e terremoti



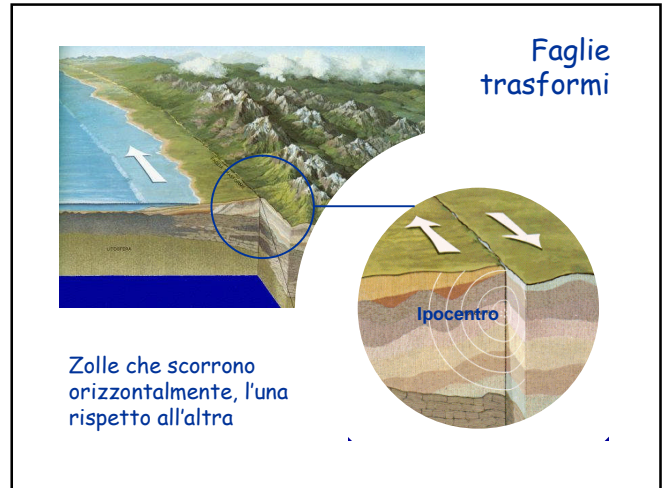
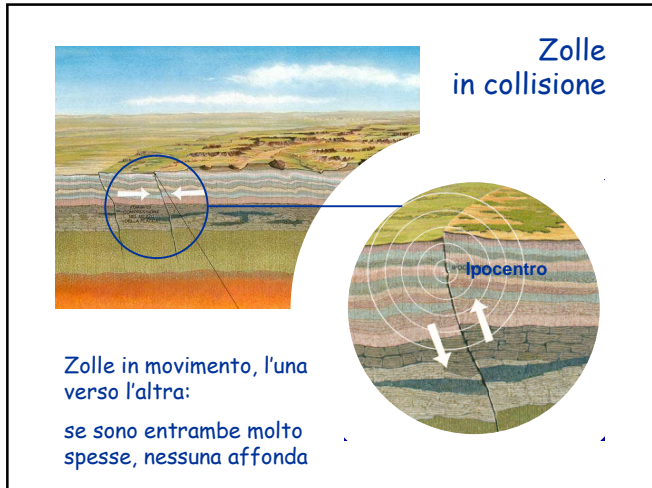
## Il meccanismo che scatena un terremoto: scorrimento lungo una faglia



## Zone di subduzione



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







12/4/1998 – Slovenia

Movimenti della faglia,  
smottamenti del terreno,  
frane



1999 – Turchia



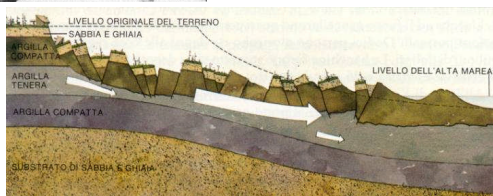
1997 – Umbria

Cedimenti del terreno



1964 – Alaska

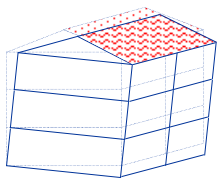
Liquefazione  
di strati  
sotterranei



1999 – Turchia

Liquefazione del terreno

Liquefazione del  
terreno



1999 – Turchia



Liquefazione del terreno



1999 – Turchia

### Liquefazione del terreno



1999 – Turchia

### Liquefazione del terreno

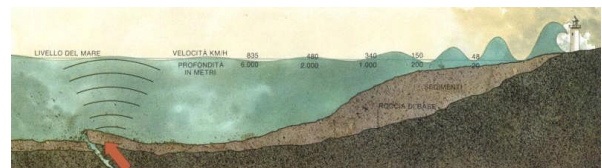


1999 – Turchia

### Effetti transitori dei terremoti

- Maremoti, tsunami
- Moto del terreno

### Maremoti, tsunami



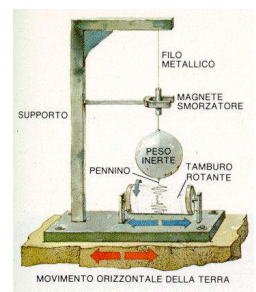
Dove l'acqua è profonda le onde viaggiano a velocità elevatissime (es. oltre 800 km/ora)

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

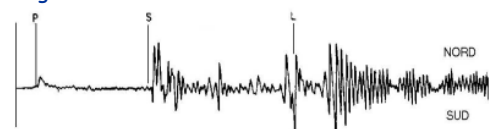
### Sismologia: studio del moto del terreno

### 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)

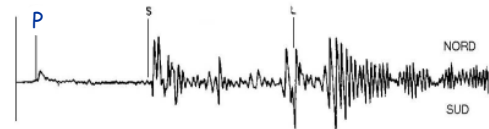
## Onde di volume

Si hanno:

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



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

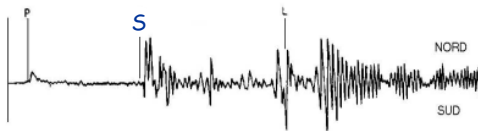
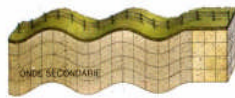


## Onde di volume

Si hanno:

- Onde primarie (P)
- Onde secondarie (S) onde trasversali, di taglio

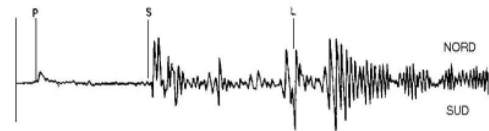
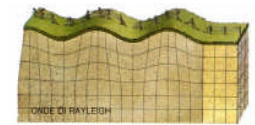
$$v_s = \frac{v_p}{\sqrt{3}} \quad \text{non si propagano nei liquidi}$$



## Onde di superficie

Si hanno vari tipi, tra cui:

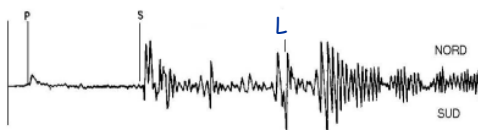
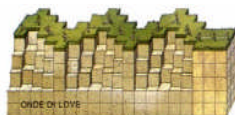
- Onde di Rayleigh (R) con moto secondo un'ellisse nel piano verticale



## Onde di superficie

Si hanno vari tipi, tra cui:

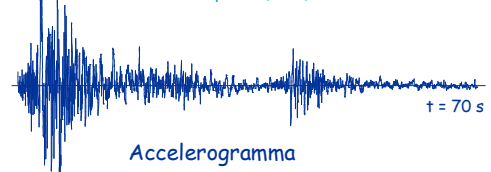
- Onde di Rayleigh (R) con moto secondo un'ellisse nel piano verticale
- Onde di Love (L) con moto tipo onde di taglio nel piano orizzontale



## Accelerogramma

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

• accelerazione di picco (PGA)

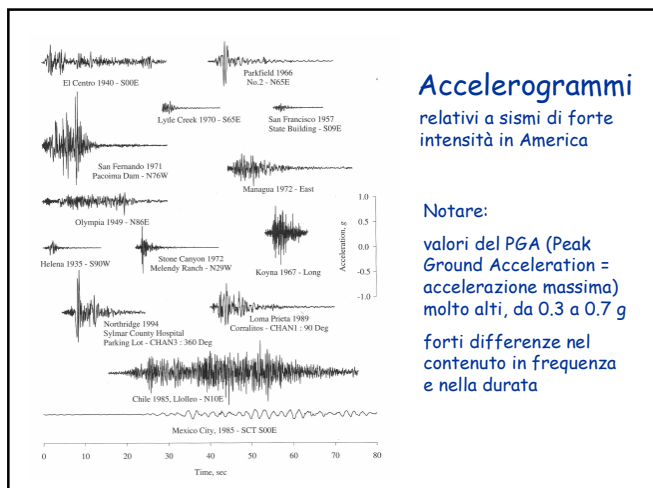


Accelerogramma

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. Risentito dai guidatori di automezzi. Tremolio di oggetti sospesi. Rottura di mobili. Danni alle murature tipo D(*). Inclusioni 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. Disassessamento delle acque di canali, fiumi, laghi ecc. Traslazione orizzontale di sabbie e argille sulle spiagge e su regioni piane. Rotele debolmente deviate.   |
| II Percepito da persone in riposo, nei piani superiori delle case o in posizione favorevole   | Rotture di cornicioni deboli situati sul colmo dei tetti. Caduta di intonaci, mattoni, pietre, tegole, cornicioni (anche di parapetti solari e ornamenti architettonici). Qualche lesione a murature tipo C(*). Formazione di onde sugli specchi d'acqua. Infradimento di acque. Piccoli smottamenti e scavenamenti in depositi di sabbia e ghiaia. Forte suono di campane. Danni a canali d'irrigazione rivestiti.  | XI Rotele fortemente deviate. Tubazioni sotterranee completamente fuori servizio.   |
| III Percepito nelle case. Oscillazione di oggetti appesi. Vibrazioni come al passaggio di autocarri leggeri. Stime della durata. Talora non riconosciuto come terremoto.  | VIII Risentito nella guida di automezzi. Danni a murature tipo C(*), crolli parziali. Alcuni danni a murature tipo B(*), non danni a murature tipo A(*). Caduta di stucchi e di alcune pareti in muratura. Rotazione e caduta di camini, monumenti, tori, sarbatoi elevati. Costruzioni con strutture in legname amosse dalle fondazioni se non imbullonate; pannelli delle pareti lanciati fuori. Rottura di palizzate deteriorate. Rottura di rami di alberi. Variazioni di portata o temperatura di sorgenti e pozzi. Crepacci nel terreno e sui pendii ripidi. | XII Distruzione pressoché totale. Spostamento di grandi masse rocciose. Linee di riferimento deformate. Oggetti lanciati in aria.   |
| 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 ponte e finestre. Tintinnio di vetri. Vibrazione di vascellari. Nello stadio superiore del IV, sordicchio di pareti e di strutture in legname.                               | IX Panico generale. Distruzione di murature tipo D(*), gravi danni a murature tipo C(*) talvolta con crollo completo; seri danni a murature tipo B(*) (danni generali alle fondazioni). Gravi danni ai sarbatoi. Rottura di tubazioni sotterranee. Rilevanti crolli nel terreno. Nelle aree alluvionali espulsione di sabbie e fango; formazione di crateri di sabbia.   | (*) A = Buon manufatto, legato insieme con ferri, calcestruzzo ecc. progettato per resistere a forze laterali.<br>B = Buon manufatto con malta; rinforzato, ma non destinato in particolare a resistere a forze laterali.<br>C = Manufatto ordinario con malta, senza tiranti agli angoli né rinforzi.<br>D = Materiali deboli, come mattoni cotti al sole; malte povere; manufatto di bassa qualità, debole orizzontalmente. |
| V Risentito all'esterno; stima della direzione. Sveglia di persone dormienti. Movimento della superficie dei liquidi, versamento di liquidi 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 paese di orologi a pendolo. |  |   |
| VI Sentito da tutti. Spavento e fuga all'esterno. Barcollare di persone in moto. Rottura di vetrine, piatti, vetri ecc. Caduta dagli scaffali di rinvoli, libri ecc. e di quadri dalle pareti. Spostamento o rotazione di mobili. Scrosciolature di intonaci deboli e di murature tipo D(*). Suono di campanelli (di chiese, di scuole). Stornire di alberi e di cespugli.  |  |   |

## 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  $\geq M$ :

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

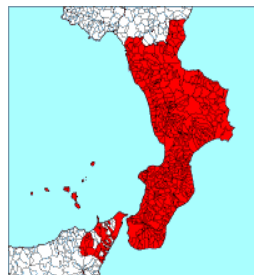
## Classificazione sismica del territorio

Nel passato:  
classificazione in base ai danni provocati dai terremoti avvenuti

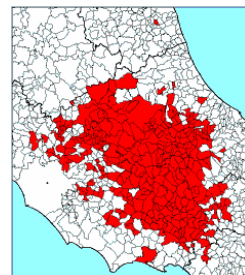
Oggi:  
valutazione statistica della pericolosità sismica

## Classificazione sismica, nel passato

Terremoto:  
Messina, 1908  
RD n. 193/1909



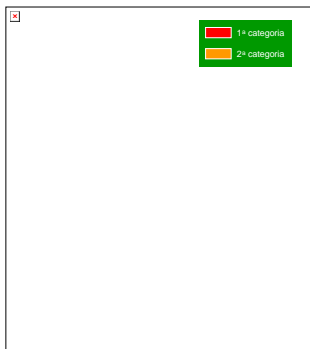
Terremoto:  
Avezzano, 1915  
RD n. 573/1915



## Classificazione sismica, nel passato

RD n. 431/1927

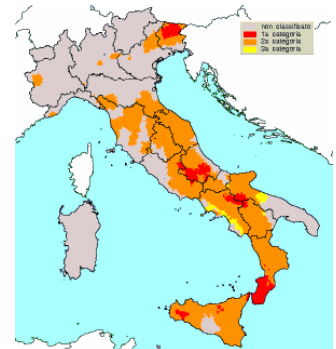
RD n. 640/1935



## Classificazione sismica, anni '80

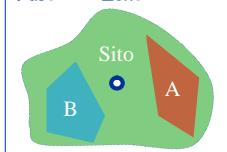
Dopo il terremoto del Friuli (1976) parte il Progetto Finalizzato Geodinamica (CNR)

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

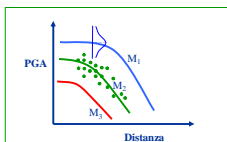
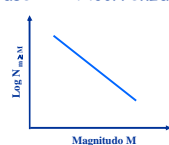


## Classificazione sismica, oggi

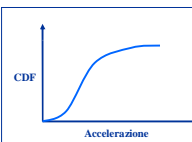
Fase 1 - Zone



Fase 2 - Ricorrenza



Fase 3 - Attenuazione



Fase 4 - Probabilità

## 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

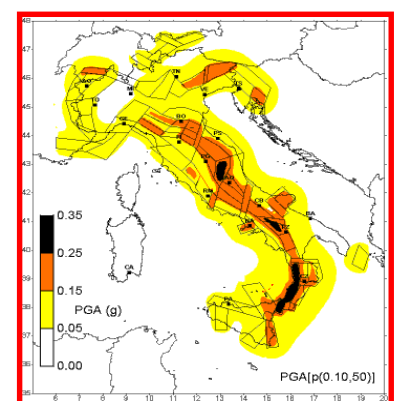
Significativi danni agli elementi strutturali e non strutturali. Esiste ancora un consistente margine nei confronti del collasso. La funzionalità dell'edificio è compromessa

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)

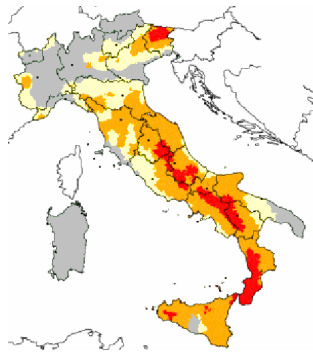


## Classificazione sismica (ordinanza 3274)

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

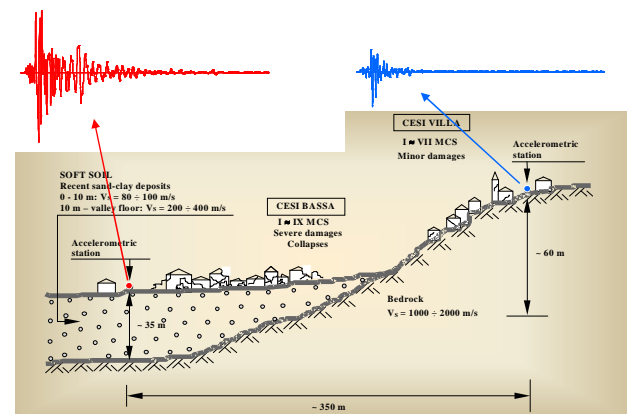
- Nel passato: coefficiente di importanza  $I$ 
  - Moltiplicatore delle forze di progetto
  - Per costruzioni usuali  $I = 1$
  - Per edifici con affollamento  $I = 1.2$
  - Per edifici strategici  $I = 1.4$

## 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  $a_g \cong 0.25 \times \sqrt{1.5} = 1.22 \times 0.25 g$  nel passato 1.2
  - Per classe d'uso IV (edifici strategici)  $C_U = 2$  quindi  $a_g \cong 0.25 \times \sqrt{2} = 1.41 \times 0.25 g$  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

- $a_g, F_o, T_C^*$  (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  $a_g$   $F_o$   $T_c^*$

ID	LON	LAT	$T_R=30$			$T_R=50$		
			$a_g$	$F_o$	$T_c^*$	$a_g$	$F_o$	$T_c^*$
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  $V_R$

indirizzo classe vita nominale

EdiLus-MS  
Mappe Sismiche

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

Indirizzo: Via Giulida Vincenzo, 202, Catania

Classe edificio: I.C. (azioni il cui uso prevede normali affollamenti)

Vita nominale: Struttura

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	0.063	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 l'edilizia  
Tel.: 0827765326 - Fax: 082776512335  
P. IVA 01883740647 - E-mail: info@acca.it

## Determinazione dei dati sismici

Periodo di riferimento  $V_R$

indirizzo classe vita nominale

EdiLus-MS  
Mappe Sismiche

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

Indirizzo: Via Giulida Vincenzo, 202, Catania

Classe edificio: I.C. (azioni il cui uso prevede normali affollamenti)

Vita nominale: Struttura

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	0.063	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?

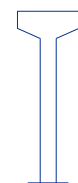
## Comportamento dinamico elastico Schemi a un grado di libertà

## Struttura a un grado di libertà

Serbatoio pensile



Foto



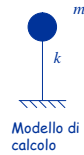
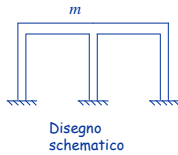
Disegno  
schematico



Modello di  
calcolo

## Struttura a un grado di libertà

### Telaio monopiano



## 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



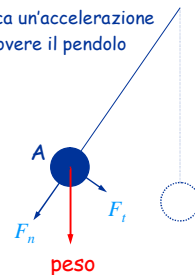
Spostando il sedile dell'altalena e poi lasciandolo libero, esso oscilla con un periodo  $T$  ben preciso

## 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

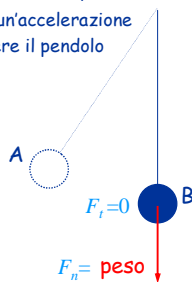


## Oscillazioni libere pendolo (esempio: altalena)

A) Il peso è scomposto nelle forze

$F_n$  assorbita dall'asta del pendolo

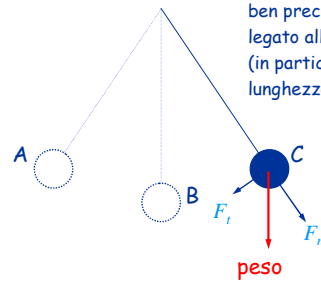
$F_t$  che provoca un'accelerazione che fa muovere il pendolo



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)





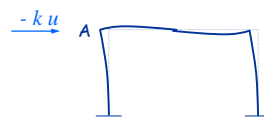
### Oscillazioni libere telaio monopiano



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  
 $F = k u$

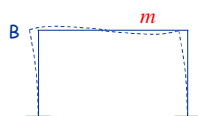
### Oscillazioni libere telaio monopiano



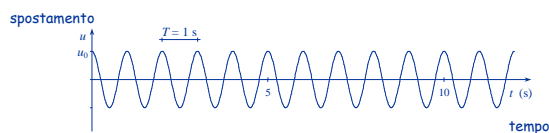
Quando si lascia libero il telaio, agisce solo la forza di richiamo elastico, che provoca un'accelerazione.

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

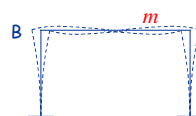
### Oscillazioni libere telaio monopiano



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

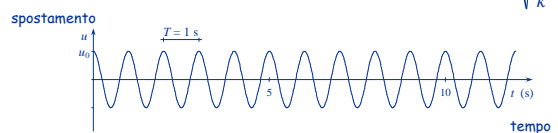


### Oscillazioni libere telaio monopiano

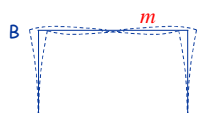


Il telaio oscilla con un periodo ben preciso, legato alla massa ed anche alla rigidezza del telaio

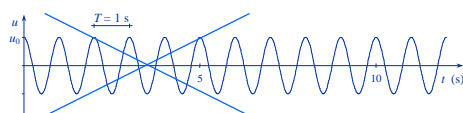
$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$



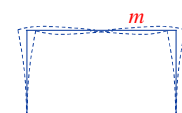
### Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano



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



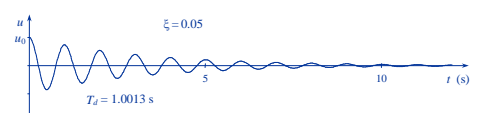
### Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano



Equazione del moto:

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

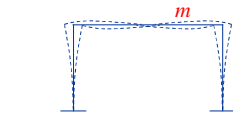
Lo smorzamento è legato alla variazione di spostamento (velocità)



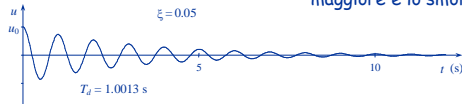
### Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano

Equazione del moto:

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



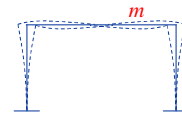
L'ampiezza del moto si riduce tanto più rapidamente quanto maggiore è lo smorzamento



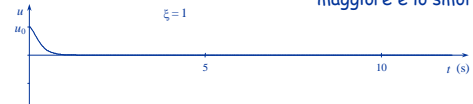
### Oscillazioni libere con smorzamento telaio monopiano

Equazione del moto:

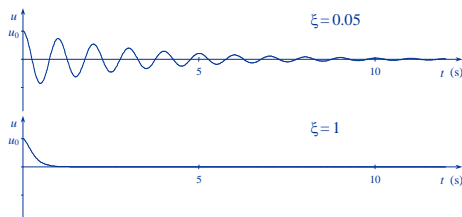
$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = 0$$



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  $\xi$  dello smorzamento critico

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

### Smorzamento - negli edifici

Dipende da:

- Elementi non strutturali (tramezzi, tondagni) 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

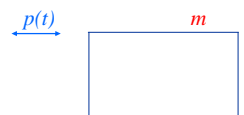


Dando (in maniera periodica) una piccola spinta al sedile dell'altalena, le oscillazioni si amplificano sempre di più

### Oscillazioni forzate telaio monopiano

Equazione del moto:

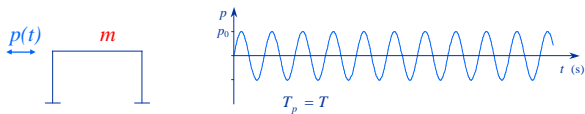
$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = p(t)$$



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

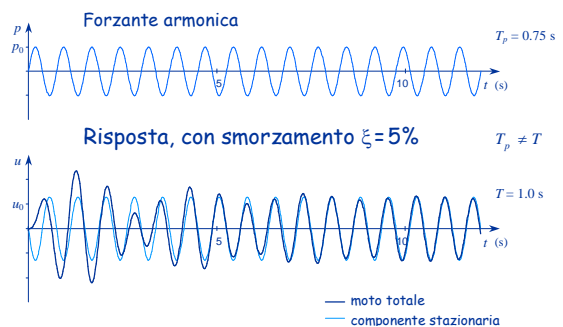
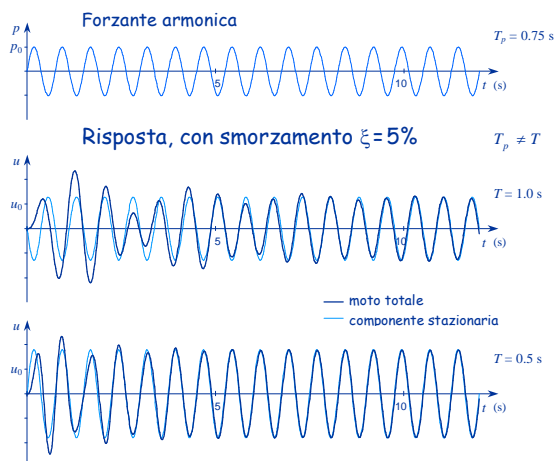
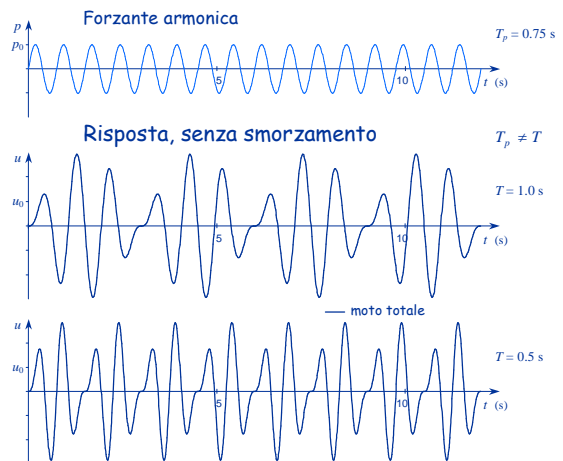


## Oscillazioni forzate telaio monopiano

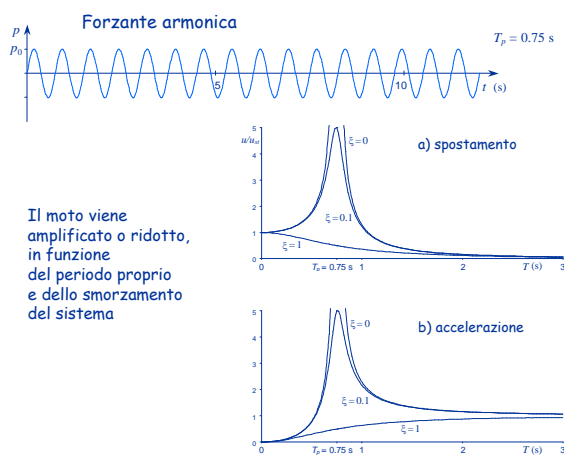


Se il periodo della  
forzante coincide con  
quello del sistema,  
in assenza di  
smorzamento  
il moto si amplifica  
sempre più

risonanza

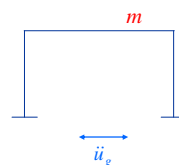


Il moto è somma di una componente armonica che ha lo stesso periodo della forzante ed ampiezza costante (componente stazionaria) e di una componente che ha lo stesso periodo del sistema ma ampiezza che si riduce man mano (componente transitoria)



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

## Oscillazioni forzate (moto del terreno)



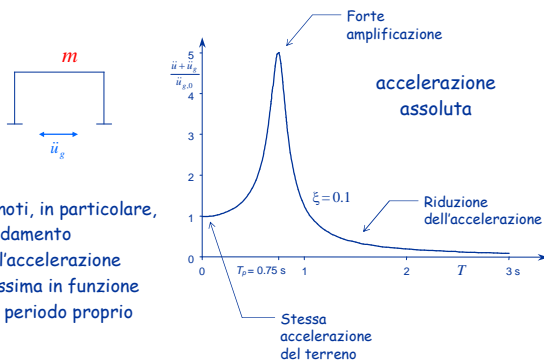
Equazione del moto:

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

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

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

Si ha allora:

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

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

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

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

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

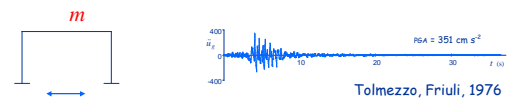
Essa coincide con l'accelerazione assoluta quando lo smorzamento è nullo

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

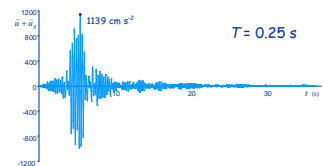
La relazione  $|\ddot{u} + \ddot{u}_g| = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 u$

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

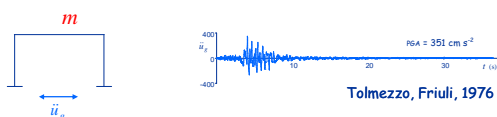
## Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



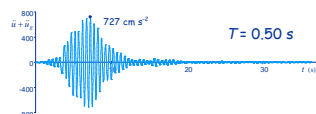
Concettualmente analogo (ma più complesso numericamente) è determinare la risposta ad un accelerogramma



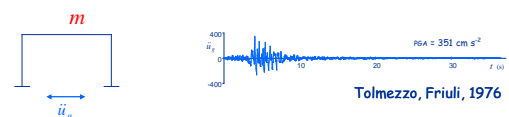
## Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



Cambiando il periodo dell'oscillatore, cambia la risposta



## Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

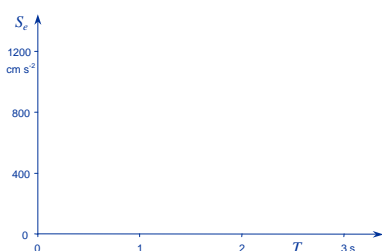


Cambiando il periodo dell'oscillatore, cambia la risposta



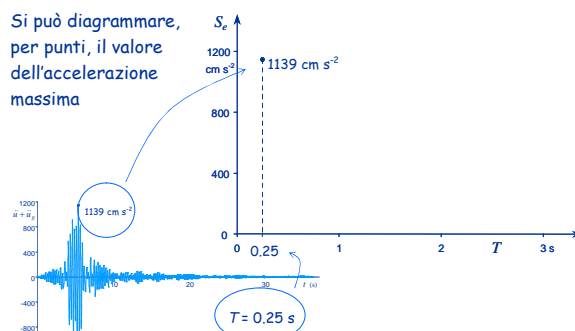
### Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

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



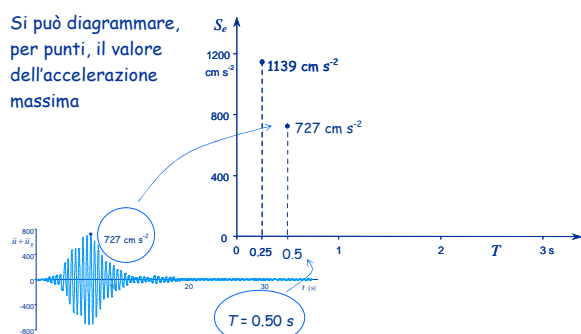
### Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

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



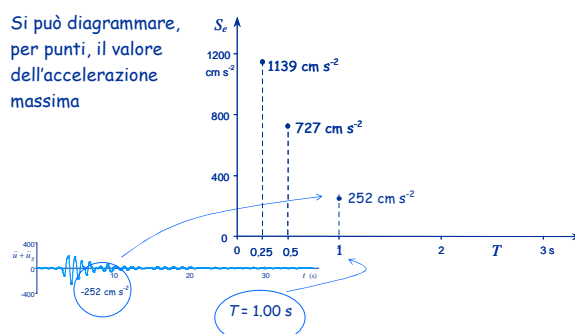
### Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

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



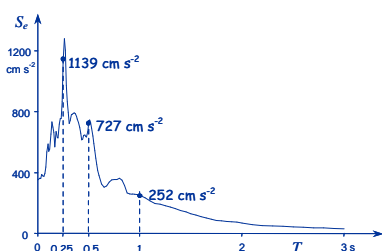
### Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

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



### Oscillazioni forzate Spettro di risposta

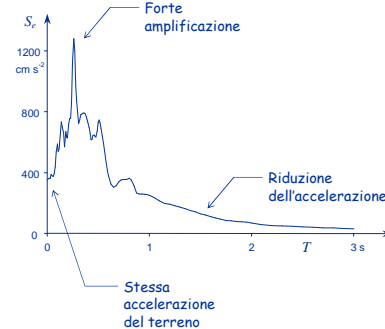
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



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

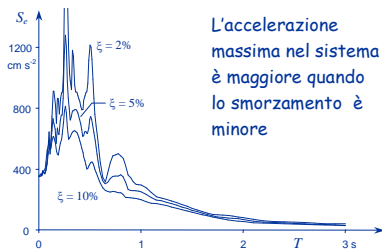
### Oscillazioni forzate Spettro di risposta (accelerazione)

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



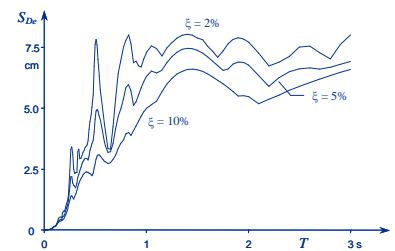
## Oscillazioni forzate Spettro di risposta (accelerazione)

Al variare dello smorzamento si ottengono diverse curve



## Oscillazioni forzate Spettro di risposta (spostamento)

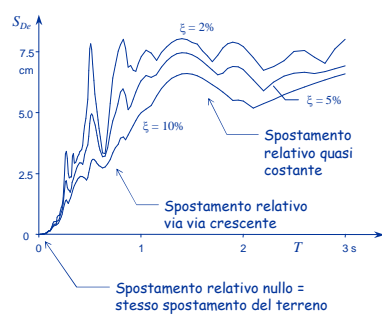
Allo stesso modo si può diagrammare lo spostamento relativo massimo in funzione del periodo



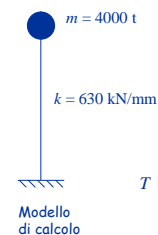
Il diagramma così ottenuto viene detto "spettro di risposta" (in termini di spostamento)

## Oscillazioni forzate Spettro di risposta (spostamento)

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



## A cosa servono gli spettri?



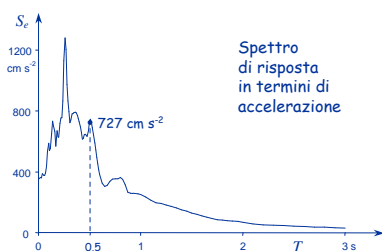
Conoscendo massa e rigidezza possiamo determinare il periodo proprio

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

## A cosa servono gli spettri?

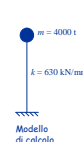


$$T = 0.5 \text{ s}$$

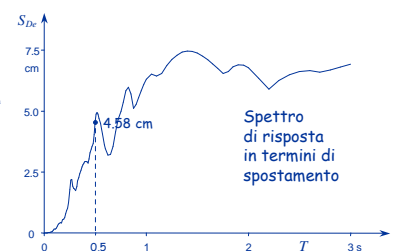


Noto il periodo proprio, possiamo leggere dallo spettro l'accelerazione assoluta massima  $a_{\max} = 7.27 \text{ m/s}^2 = 0.74 \text{ g}$

## A cosa servono gli spettri?

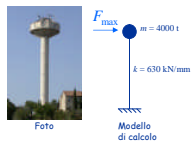


$$T = 0.5 \text{ s}$$



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

## A cosa servono gli spettri?



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

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

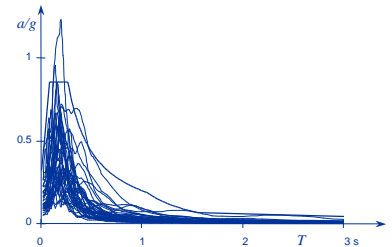
$$F_{\max} = m a_{\max} = 4000 \times 7.27 = 29000 \text{ kN}$$

e quindi le massime sollecitazioni nella struttura

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

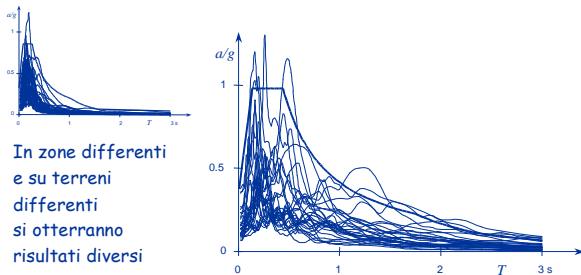
## Spettri di risposta

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



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

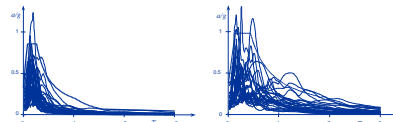
## Spettri di risposta



In zone differenti e su terreni differenti si otterranno risultati diversi

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

## Spettri di risposta

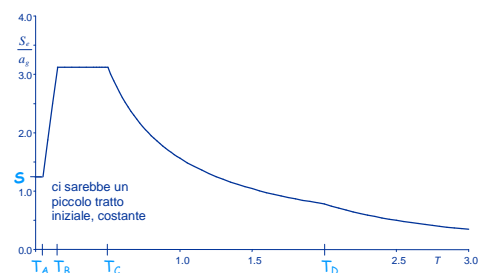


In zone differenti e su terreni differenti si otterranno risultati diversi

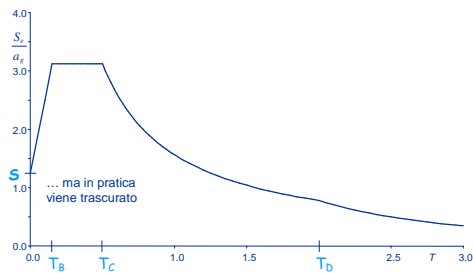
La normativa fornisce quindi spettri di risposta differenziati in funzione delle caratteristiche del suolo e della zona in cui è ubicata la struttura

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

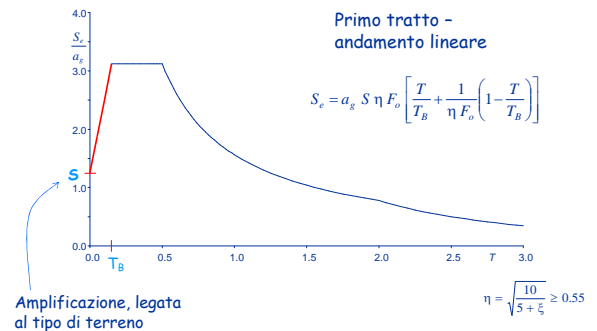
## Forma generale degli spettri di risposta elastica



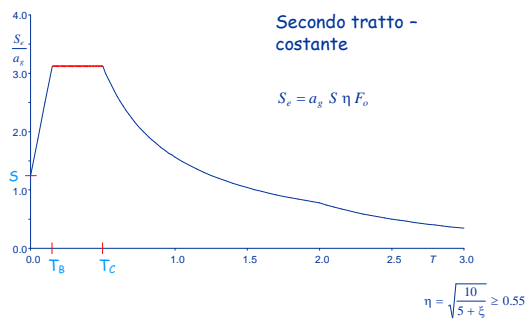
### Forma generale degli spettri di risposta elastica



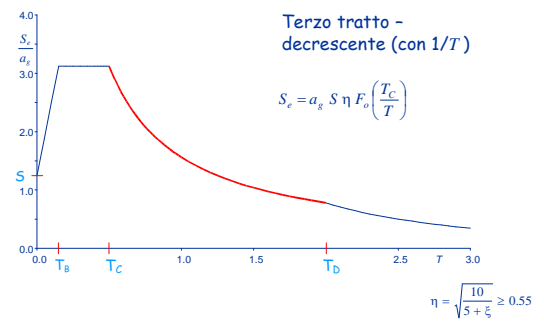
### Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



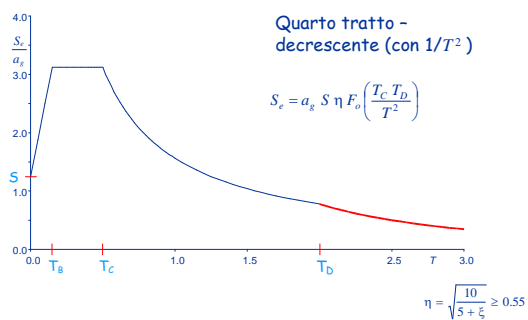
### Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



### Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



### Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali



### Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali

Per definire uno spettro di risposta elastico  
occorre indicare i parametri

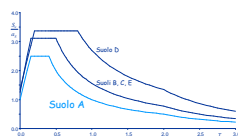
- $a_g$  accelerazione del terreno (su roccia)
- $S$  amplificazione dovuta al tipo di terreno
- $T_B$   $T_C$   $T_D$  periodi che separano i diversi tratti
- $\xi$  smorzamento della struttura

$S$   $T_B$   $T_C$   $T_D$  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

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

$$S = 1 \quad T_g = 0.15 \text{ s} \quad T_C = 0.4 \text{ s} \quad T_D = 2.0 \text{ s}$$

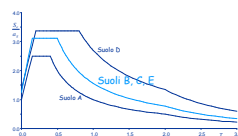
Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

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



### Suolo B

Depositi di sabbie e ghiaie molto addensate o argille molto consistenti

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

Resistenza penetrometrica  $N_{SPT} > 50$

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

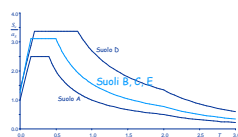
$$S = 1.25 \quad T_g = 0.15 \text{ s} \quad T_C = 0.5 \text{ s}$$

Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

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

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



### Suolo C

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

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

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

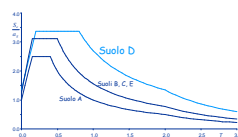
Coesione non drenata  $70 < c_u < 250 \text{ kPa}$

Parametri come per B

$$V_{S30}$$

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

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



### Suolo D

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

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

Resistenza penetrometrica  $N_{SPT} < 15$

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

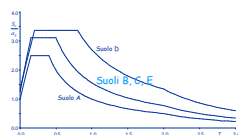
$$S = 1.35 \quad T_g = 0.2 \text{ s} \quad T_C = 0.8 \text{ s}$$

Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$$V_{S30}$$

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

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



### Suolo E

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

Parametri come per B

$$V_{S30}$$

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

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

### Suolo S1

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

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

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

### Suolo S2

Depositi di terreni soggetti a liquefazione

Per questi tipi di terreno occorrono studi speciali

## Esempio

Dall'alto:

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

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

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

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

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

## Esempio

Dall'alto:

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

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

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

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

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

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

$$N_{SPT} = 25.9$$

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

## 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  $T_C^*$

$$T_B \text{ dipende da } T_C \quad T_B = T_C / 3$$

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

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:  $a_g = 0.1938$  g  $F_o = 2.42$   $T_C^* = 0.32$  s  
per  $T_R = 50$  anni:  $a_g = 0.0803$  g  $F_o = 2.46$   $T_C^* = 0.28$  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 <sub>o</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>D</sub>
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:

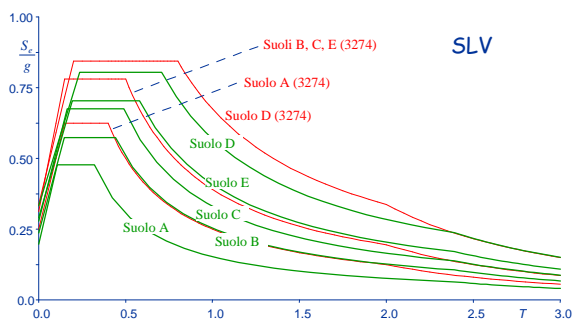
per  $T_R = 475$  anni:  $a_g = 0.1938$  g  $F_o = 2.42$   $T_C^* = 0.32$  s  
per  $T_R = 50$  anni:  $a_g = 0.0803$  g  $F_o = 2.46$   $T_C^* = 0.28$  s

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 <sub>o</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>D</sub>
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

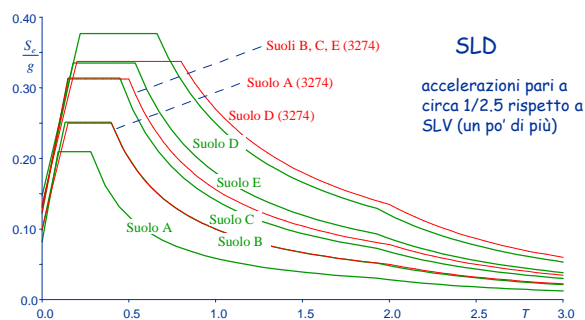
## Spettri di risposta NTC 08 Esempio: località Spoleto

Vedere foglio  
Excel "Spettri"  
per Catania



## Spettri di risposta NTC 08 Esempio: località Spoleto

Vedere foglio  
Excel "Spettri"  
per Catania



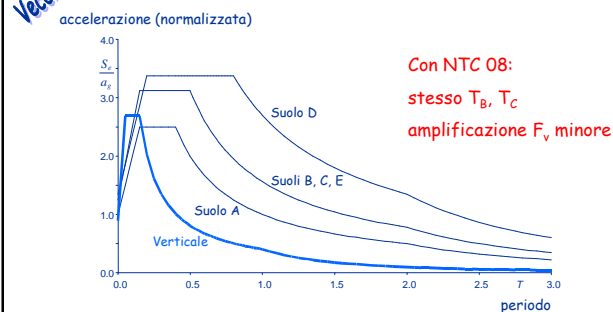
## Spettri di risposta NTC08 accelerazioni verticali

- Lo spettro ha la stessa forma, cambiano i parametri

Categoria di sottosuolo	S <sub>s</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>D</sub>
A, B, C, D, E	1.0	0.05	0.15	1.00

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

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



D.M. 14/9/05, punto 3.2.2.3.2