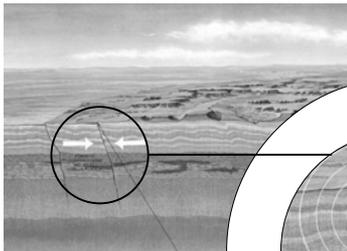
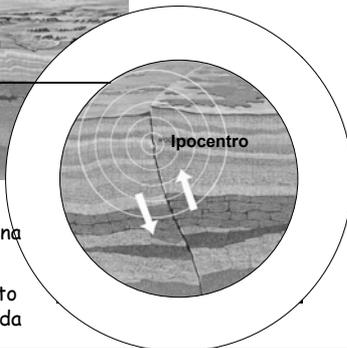


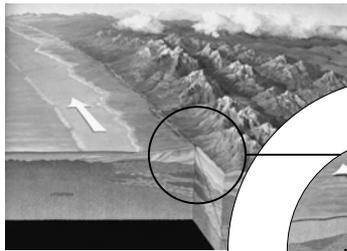
Zolle in collisione



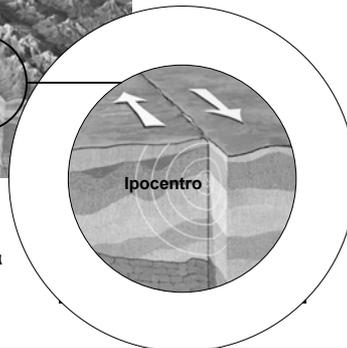
Zolle in movimento, l'una verso l'altra:
se sono entrambe molto spesse, nessuna affonda



Faglie trasformi

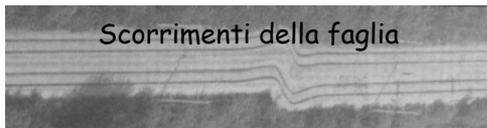


Zolle che scorrono orizzontalmente, l'una rispetto all'altra



Effetti permanenti dei terremoti

Scorrimenti della faglia



1999 - Turchia

Movimenti della faglia, smottamenti del terreno, frane



1999 - Turchia

Movimenti della faglia, smottamenti del terreno, frane



1948 - Giappone

1999 - Turchia



Movimenti della faglia,
smottamenti del terreno,
frane



12/4/1998 - Slovenia

1999 - Turchia



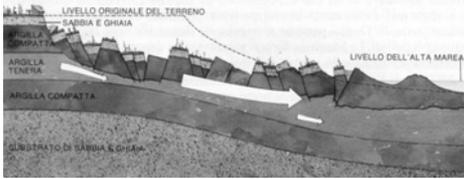
Cedimenti del terreno



1997 - Umbria



Liquefazione
di strati
sotterranei



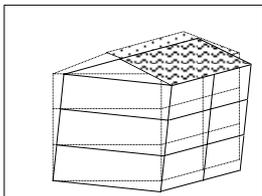
1964 - Alaska



Liquefazione del terreno

1999 - Turchia

Liquefazione del
terreno



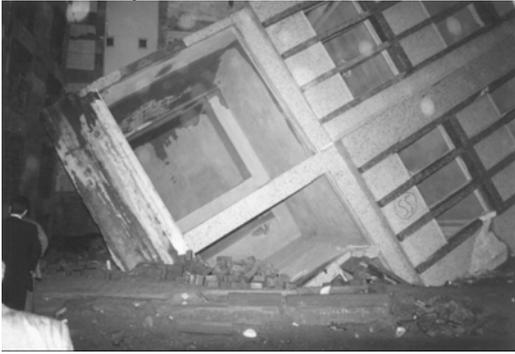
1999 - Turchia

Liquefazione del terreno



1999 - Turchia

Liquefazione del terreno



1999 – Turchia

Liquefazione del terreno

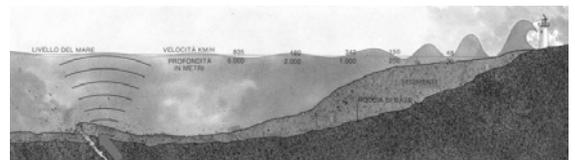


1999 – Turchia

Effetti transitori dei terremoti

- Maremoti, tsunami
- Moto del terreno

Maremoti, tsunami



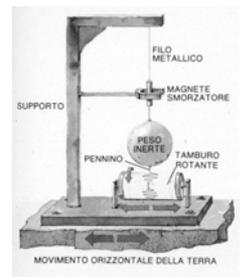
Dove l'acqua è profonda le onde viaggiano a velocità elevatissime (es. oltre 800 km/ora)

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

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

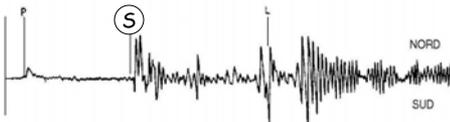
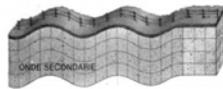


Onde di volume

Si hanno:

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

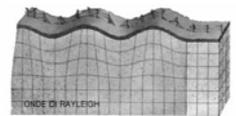
$$v_s = \frac{v_p}{\sqrt{3}} \quad \text{non si propagano nei liquidi}$$



Onde di superficie

Si hanno vari tipi, tra cui:

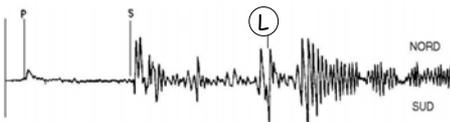
- Onde di Rayleigh (R) con moto secondo un'ellisse nel piano verticale



Onde di superficie

Si hanno vari tipi, tra cui:

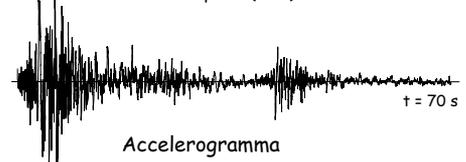
- Onde di Rayleigh (R) con moto secondo un'ellisse nel piano verticale
- Onde di Love (L) con moto tipo onde di taglio nel piano orizzontale



Accelerogramma

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

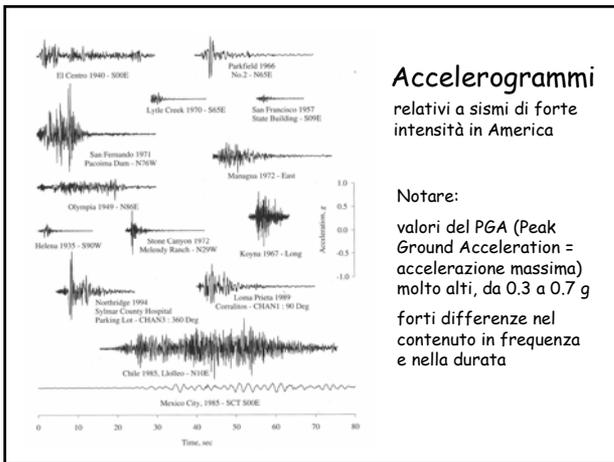
• accelerazione di picco (PGA)



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, 1956)

- I Percussione da persona in riposo, nei piani superiori delle case o in posizioni favorevoli.
- II Percussione nelle case. Oscillazione di oggetti appesi. Vibrazioni come al passaggio di autocarri leggeri. Sismi della durata. Tera non riconosciuto come terremoto.
- III Oscillazione di oggetti appesi. Vibrazioni come al passaggio di autocarri pesanti. Si scossa come di una pesante palla che colpisce le pareti. Oscillazione di apparecchi ferri. Movimento di porte e finestre. Termino di vasi. Vibrazione di vasetti. Nello stato superiore del IV, sintonico di pareti e di strutture in legname.
- IV Risento all'esterno, stima della direzione. Sveglia di persone dormienti. Movimento della superficie dei fucili, vestimento di lauri da ricambio. Spostamento o rovesciamento di piccoli oggetti instabili. Oscillazione di porte che si aprono o si chiudono. Movimento di mucose quadri. Arresto, messo in moto, cambiamento del passo di orologi e pendolo.
- V Sentito da tutti. Spavento e fuga all'esterno. Barcollare di persone in moto. Rottura di vetri, piatti, vasi, ecc. Caduta degli scaffali di negozi, foci ecc. e di quadri dalle pareti. Spostamento o rotazione di mobili. Scroscio di impacci, dotti e di murature tipo C (I). Sacco di campanelli (di chiese, di scuole). Stoviglie di aree e di corredi.
- VI Difficile stare in piedi. Risento dai gustatori di automobili. Tremolio di oggetti sospesi. Rottura di mobili. Danni agli edifici tipo D (I), scuse fenditure. Rotture di congegni deboli situati su come tutti. Caduta di stucchi, mattoni, pietre, tegole, cornicioni (anche di parapetti isolati e ornamenti scrosciatrici). Qualche lesione a murature tipo C (I). Formazione di onde sugli specchi d'acqua, intorbidamento di acque. Picchi simultaneamente e scavarranno in depositi di sabbie e ghiaie. Forte fumo di campane. Danni a canali di irrigazione rivestiti.

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 $\geq M$:

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

Classificazione sismica del territorio

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

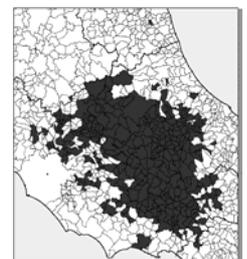
Oggi:
valutazione statistica della pericolosità sismica

Classificazione sismica, nel passato

Terremoto:
Messina, 1908
RD n. 193/1909



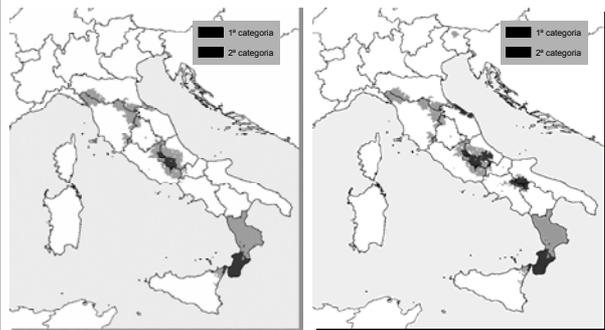
Terremoto:
Avvezano, 1915
RD n. 573/1915



Classificazione sismica, nel passato

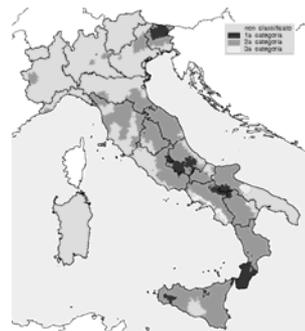
RD n. 431/1927

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

Valutazione probabilistica dell'intensità dei terremoti

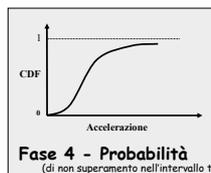
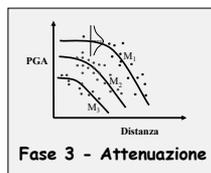
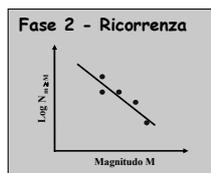
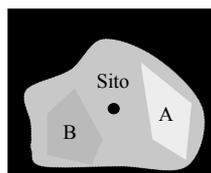
Periodo di ritorno T_r = tempo medio che intercorre tra due eventi sismici di assegnata intensità

Relazione tra probabilità p_1 di superamento nel tempo T_1 e periodo di ritorno T_r :

$$T_r = -\frac{T_1}{\ln(1-p_1)} \cong \frac{T_1}{p_1}$$

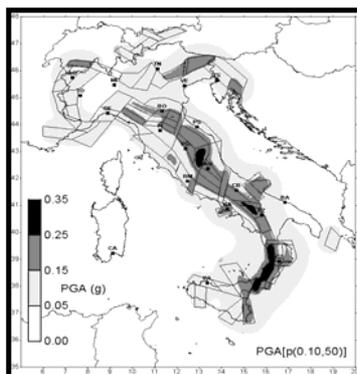
Terremoto di riferimento per il progetto: probabilità di superamento del 10% in 50 anni ovvero periodo di ritorno di 475 anni

Classificazione sismica, oggi



Analisi di pericolosità

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

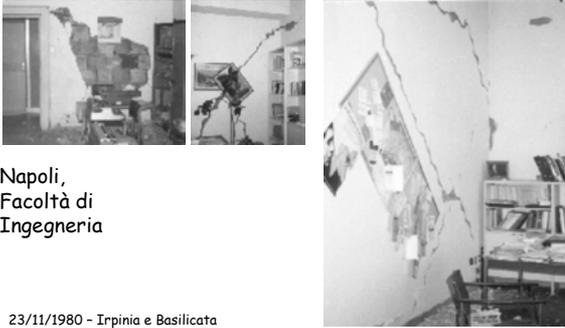


Classificazione sismica, oggi (ordinanza 3274)



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

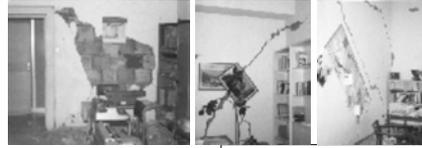
Danni ai tramezzi



Napoli,
Facoltà di
Ingegneria

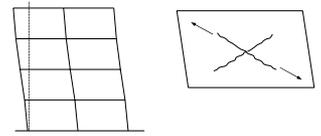
23/11/1980 - Irpinia e Basilicata

Danni ai tramezzi



Napoli,
Facoltà di
Ingegneria

23/11/1980 - Irpinia e Basilicata

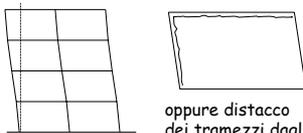


Danni ai tramezzi



Napoli,
Facoltà di
Ingegneria

23/11/1980 - Irpinia e Basilicata



oppure distacco
dei tramezzi dagli
elementi strutturali

Danni alle pareti di tamponamento per azioni nel loro piano



2002 - Santa Venerina

foto G. Gaeta

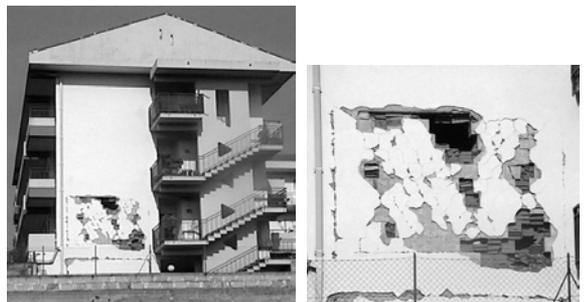
Danni alle pareti di tamponamento per azioni nel loro piano



2002 - Santa Venerina

foto G. Gaeta

Danni alle pareti di tamponamento per azioni nel loro piano



2002 - Santa Venerina

foto G. Gaeta

Espulsione delle pareti di tamponamento
per azioni ortogonali al loro piano



1999 - Turchia

Espulsione delle pareti di tamponamento



1999 - Turchia

Espulsione delle pareti di tamponamento



2002 - Santa Venerina

foto G. Gaeta

Espulsione delle pareti di tamponamento



1994 - Northridge

Espulsione delle
pareti di
tamponamento

Rischio di
perdita di vite



1964 - Alaska

Altre conseguenze dei terremoti



1906 - San Francisco

Incendi

Rottura delle
condotte idriche



Accelerazione sismica elevata

Danno agli elementi strutturali



2002 – Santa Venerina

foto G. Gaeta

Danni e difetti costruttivi

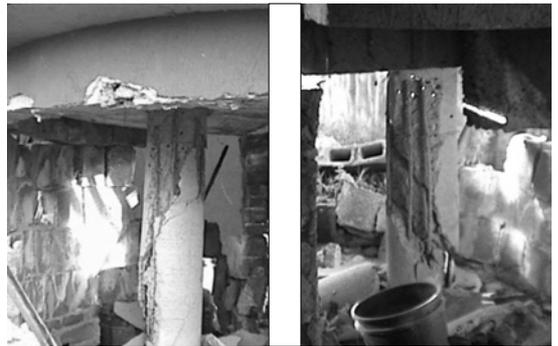


Mancanza di staffe in testa al pilastro e nel nodo

2002 – Santa Venerina

foto G. Gaeta

Danni e difetti costruttivi



2002 – Santa Venerina

foto G. Gaeta

Danni e difetti costruttivi



Mancanza di staffe in testa al pilastro



La barra compressa si instabilizza

2002 – Santa Venerina

foto G. Gaeta

Danni e difetti costruttivi ...



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi,
edificio in costruzione



... possono portare a meccanismi di piano



1999 - Turchia

Meccanismi di piano - senza crollo



1999 - Turchia

Meccanismi di piano - senza crollo



1999 - Turchia

Meccanismi di piano - senza crollo

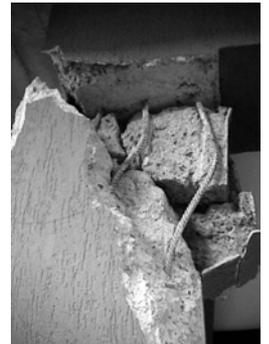


Meccanismi di piano - senza crollo



1971 - San Fernando

Ma il danno progredisce ...



Espulsione di blocchi di calcestruzzo
Scorrimento lungo la lesione

2002 - Santa Venerina

foto G. Gaeta



... con risultati fatali



1999 – Turchia

foto A. Ghersi

Perdita del piano inferiore



1999 – Turchia (?)



Perdita del piano inferiore

Lioni,
edificio del Banco di Napoli



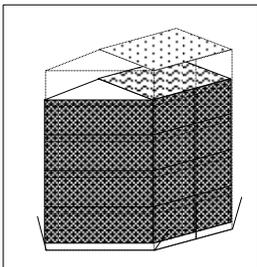
23/11/1980 – Irpinia e Basilicata



Lioni, edificio del Banco di Napoli

23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Lioni,
edificio del Banco di Napoli



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Lioni, edificio del Banco di Napoli



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Lioni, edificio del Banco di Napoli



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Perdita del piano inferiore - altri esempi



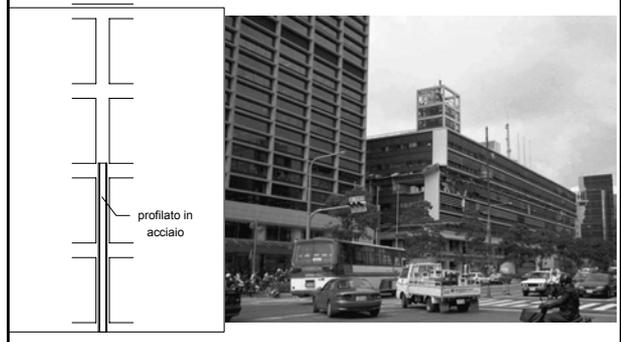
1999 – Turchia (?)

Perdita del piano inferiore



1995 – Kobe

Perdita di un piano intermedio



1995 – Kobe

Perdita di un piano intermedio



1995 – Kobe

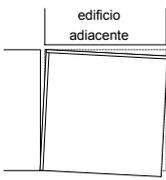
Perdita di un piano intermedio



1995 – Kobe

Perdita di un piano intermedio

possibili effetti torsionali
in pianta



1995 – Kobe

Ma tra i difetti ...

oltre alla differenza tra il
calcestruzzo sopra e
sotto la ripresa di getto...



2002 – Santa Venerina



... la trascuratezza
degli operai

foto G.Gaeta

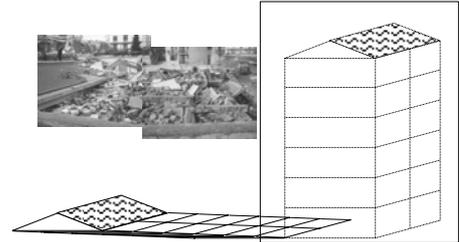
Risultato: crollo totale, con traslazione degli impalcati

S. Angelo dei Lombardi,
edificio 1



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Crollo totale, con traslazione degli impalcati



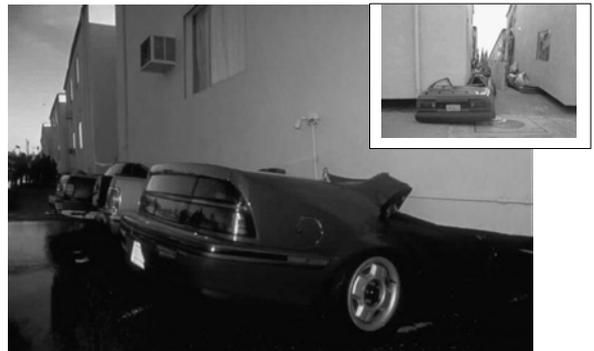
23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Così, possono essere gli edifici a investire le automobili ...



1994 – Northridge

Automobili schiacciate dagli edifici



1994 – Northridge

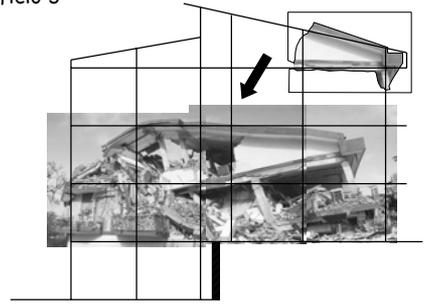


S. Angelo dei Lombardi Edificio 3



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi edificio 3



S. Angelo dei Lombardi edificio 3



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi - edificio 3



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Crollo totale - tipico (pilastri scadenti)



1999 – Turchia

Crollo totale



1999 – Turchia

Crollo totale - pilastri di ottima fattura



1994 - Northridge

Crollo totale



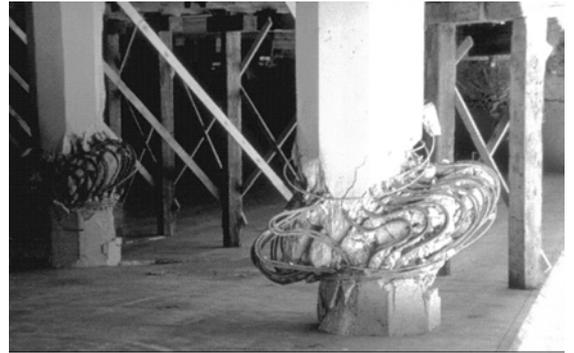
1994 - Northridge

Particolari dei pilastri



1994 - Northridge

Particolari dei pilastri



1994 - Northridge

Particolari dei pilastri



1994 - Northridge

Problematiche
della progettazione antisismica

Per terremoti con alto periodo di ritorno

Non è economico progettare la struttura in modo da evitare danni- l'importante è che non crolli



Bisogna tener conto del differente comportamento delle strutture oltre il limite elastico (con "coefficienti di struttura")



Bisogna garantire maggior sicurezza a strutture "importanti" (per la protezione civile, ecc.)



Per terremoti con basso periodo di ritorno

Poiché questi avvengono con frequenza, è importante evitare danni eccessivi



Più in generale

Bisogna imporre alla struttura prestazioni diverse in funzione del periodo di ritorno del terremoto e dell'importanza dell'edificio



Sviluppo delle norme sismiche

Prime norme sismiche in Italia

Fine '700 ed '800:

Norme che fornivano prescrizioni costruttive e limitazioni all'altezza degli edifici



Subito dopo il terremoto di Messina (1908):

R.D. 18 aprile 1909, n.193

impone di tener conto, nei calcoli di resistenza delle costruzioni, di "azioni dinamiche dovute al moto sismico ondulatorio, rappresentandole con accelerazioni applicate alle masse del fabbricato"

Principali norme del '900

R.D. 25 marzo 1935, n. 640

Impone azioni di entità analoga a quelle utilizzate fino a fine secolo (ma con accelerazione uguale a tutti i piani)

Impone l'uso di cordoli in c.a. per edifici in muratura

Legge 25 novembre 1962, n. 1684

D.M. 3 marzo 1975

Le forze corrispondono ad una accelerazione crescente col piano

Introduce un "coefficiente di struttura" →



Consente l'analisi dinamica (modale)

Principali norme del '900

D.M. 2 luglio 1981, n. 593

Fornisce indicazioni per riparazione e rafforzamento di edifici danneggiati dal sisma del 1980

Introduce il calcolo anche per gli edifici in muratura

D.M. 24 gennaio 1986

Introduce un "coefficiente di importanza" →



D.M. 16 gennaio 1996

Consente la verifica col metodo degli stati limite

Introduce limiti agli spostamenti di interpiano →



Oggi, in Italia

Ordinanza 3274 del 20 marzo 2003
 Ordinanza 3431 del 3 maggio 2005
 Impone la verifica col metodo degli stati limite
 Consente altre modalità di analisi (statica non lineare, dinamica non lineare)
 Chiarisce meglio tutte le problematiche di base (SLU-SLD, fattore di struttura, ecc.)
 Introduce il concetto di "regolarità strutturale"

D.M. 14 settembre 2005
 Recepisce, con minime modifiche, l'impostazione dell'Ordinanza 3274-3431

Oggi, all'estero

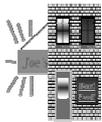
Eurocodice 8
 È la base da cui è stata tratta l'Ordinanza 3274-3431

Norme americane FEMA
 Introducono il concetto di "Performance based design" → 

cioè
 prestazione richiesta per un assegnato terremoto

Prestazione richiesta

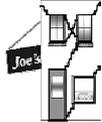
piena operatività
Operational



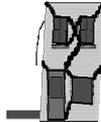
occupazione immediata
Immediate Occupancy



salvaguardia vite umane
Life Safety



prevenzione del collasso
Collapse Prevention



Prestazione richiesta

	Collapse Prevention	Life Safety	Immediate Occupancy	Operational
Overall Damage	Severe	Moderate	Light	Very Light
General	Little residual stiffness and strength, but load-bearing columns and walls function. Large permanent drifts. Some exits blocked. Infills and unbraced parapets failed or at incipient failure. Building is near collapse.	Some residual strength and stiffness left in all stories. Gravity-load-bearing elements function. No out-of-plane failure of walls or tipping of parapets. Some permanent drift. Damage to partitions. Building may be beyond economical repair.	No permanent drift. Structure substantially retains original strength and stiffness. Minor cracking of facades, partitions, and ceilings as well as structural elements. Elevators can be restarted. Fire protection operable.	No permanent drift. Structure substantially retains original strength and stiffness. Minor cracking of facades, partitions, and ceilings as well as structural elements. All systems important to normal operation are functional.
Nonstructural components	Extensive damage.	Falling hazards mitigated but many architectural, mechanical, and electrical systems are damaged.	Falling hazards mitigated but many architectural, mechanical, and electrical systems are damaged.	Falling hazards mitigated but many architectural, mechanical, and electrical systems are damaged.

Terremoto assegnato (probabilità di superamento in 50 anni)

Fornisce valori diversi del PGA, ma anche diverso contenuto in frequenza

50% $T_r \cong 75$ anni



20% $T_r \cong 225$ anni



10% $T_r \cong 475$ anni



2% $T_r \cong 2475$ anni



Oggi, all'estero

Eurocodice 8
 È la base da cui è stata tratta l'Ordinanza 3274-3431

Norme americane FEMA
 Introducono il concetto di "Performance based design"

		prestazione richiesta			
		piena operatività	occupazione immediata	salvaguardia vite umane	prevenzione del collasso
Terremoto: probabilità di superamento in 50 anni	50%	a	b	c	d
	20%	e	f	g	h
	10%	i	j	k	l
	2%	m	n	o	p

Equivale, per la norma italiana

Sopportare un'azione sismica avente periodo di ritorno molto elevato senza subire fenomeni di collasso sia a livello locale che globale, pur subendo danni di grave entità agli elementi strutturali e non strutturali.

Conservare dopo il sisma una residua resistenza e rigidità nei confronti delle azioni orizzontali e l'intera capacità portante nei confronti dei carichi verticali.

Terremoto: probabilità di superamento in 50 anni	prestazione richiesta			
	piena operatività	occupazione immediata	salvaguardia vite umane	prevenzione del collasso
50%	a	b	c	d
20%	e	f	↓	h
10%	i	j	→ (k) SLU	l
2%	m	n	o	p

Equivale, per la norma italiana

Sopportare un'azione sismica avente basso periodo di ritorno senza subire danni gravi agli elementi strutturali e non strutturali, nonché alle apparecchiature rilevanti alla funzione dell'edificio. Il danno può essere tollerato fintantoché non costituisca una limitazione nell'utilizzo del manufatto e comporti bassi costi di riparazione.

Terremoto: probabilità di superamento in 50 anni	prestazione richiesta			
	piena operatività	occupazione immediata	salvaguardia vite umane	prevenzione del collasso
50%	(a)	(b) SLD	c	d
20%	e	f	g	h
10%	i	j	k	l
2%	m	n	o	p

Dinamica e ingegneria sismica Comportamento a collasso

Comportamento elastico e comportamento oltre il limite elastico

Breve richiamo: comportamento elastico

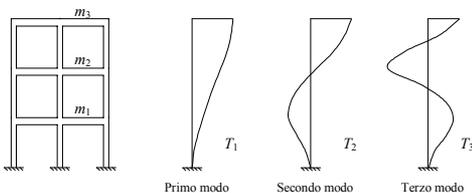
Presentazioni Catania:
Azioni3, Azioni4
Presentazioni Laboratorio progettuale
strutture 05-06:
05-Dinamica1, 06-Dinamica2,
07-Dinamica3

RICHIAMI

Modi di oscillazione libera

Telaio piano (con traversi inestensibili):

numero di modi di oscillazione libera = numero di piani



RICHIAMI

Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):

numero di modi di oscillazione libera = 3 x numero di piani

Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:
- n modi di traslazione in una direzione



RICHIAMI

Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):
numero di modi di oscillazione libera = 3 x numero di piani

- Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:
- n modi di traslazione in una direzione
 - n modi di traslazione nell'altra direzione



RICHIAMI

Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):
numero di modi di oscillazione libera = 3 x numero di piani

- Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:
- n modi di traslazione in una direzione
 - n modi di traslazione nell'altra direzione
 - n modi di rotazione



RICHIAMI

Modi di oscillazione libera

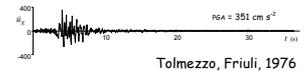
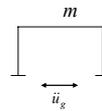
Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):
numero di modi di oscillazione libera = 3 x numero di piani

- Se la pianta non ha assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono accoppiati

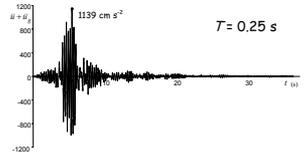


RICHIAMI

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



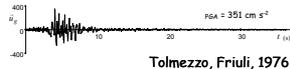
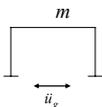
Tolmezzo, Friuli, 1976



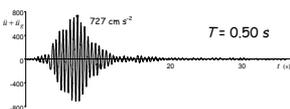
Risposta del sistema ad un accelerogramma

RICHIAMI

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



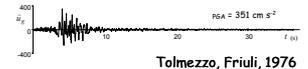
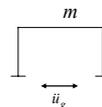
Tolmezzo, Friuli, 1976



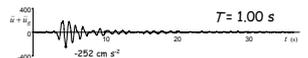
Cambiando il periodo dell'oscillatore, cambia la risposta

RICHIAMI

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)



Tolmezzo, Friuli, 1976

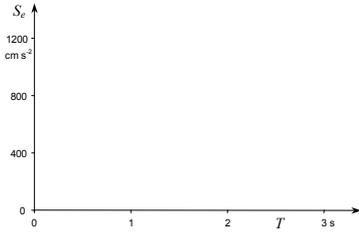


Cambiando il periodo dell'oscillatore, cambia la risposta

RICHIAMI

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

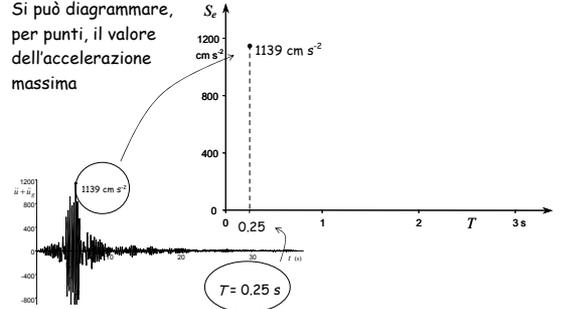
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



RICHIAMI

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

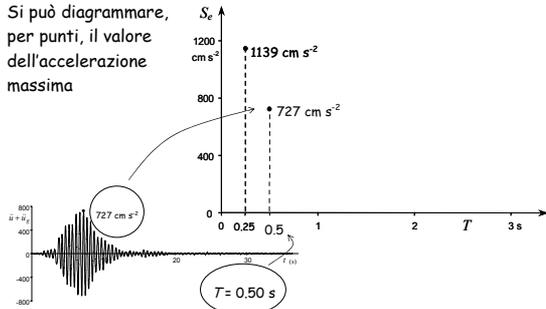
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



RICHIAMI

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

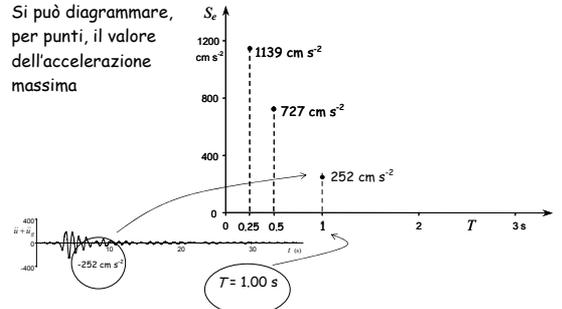
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



RICHIAMI

Oscillazioni forzate (moto del terreno - accelerogramma)

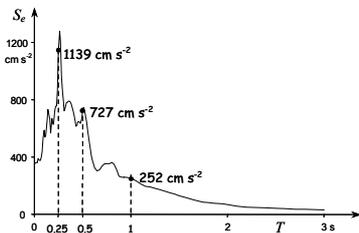
Si può diagrammare, per punti, il valore dell'accelerazione massima



RICHIAMI

Oscillazioni forzate Spettro di risposta

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

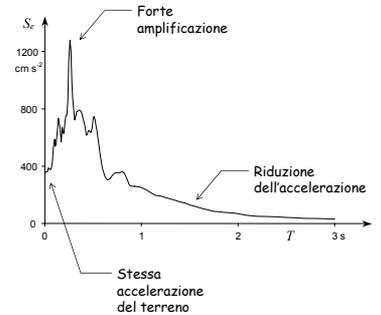


Il diagramma ottenuto unendo i vari punti viene detto "spettro di risposta" (in termini di accelerazione)

RICHIAMI

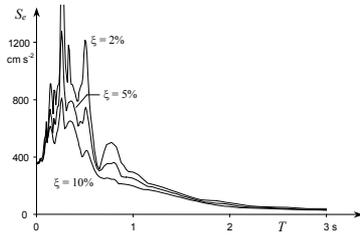
Oscillazioni forzate Spettro di risposta (accelerazione)

L'andamento dell'accelerazione massima dipende dal periodo proprio del sistema



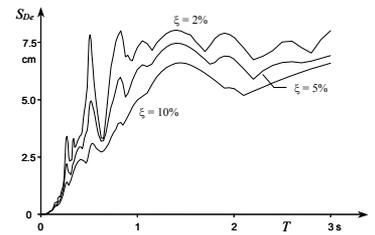
Oscillazioni forzate Spettro di risposta (accelerazione)

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

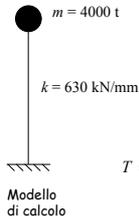


Il diagramma così ottenuto viene detto "spettro di risposta" (in termini di spostamento)

A cosa servono gli spettri?



Foto



Modello di calcolo

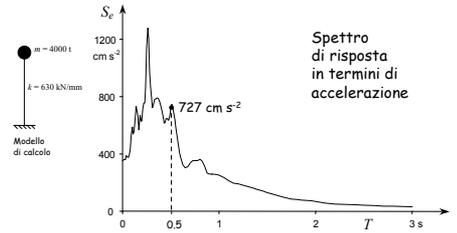
Conoscendo massa e rigidità possiamo determinare il periodo proprio

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

A cosa servono gli spettri?



Foto



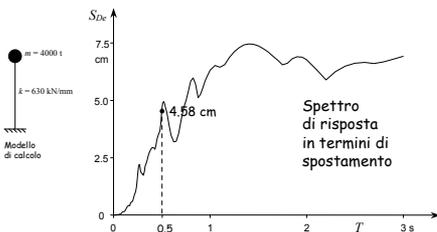
Spettro di risposta in termini di accelerazione

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

A cosa servono gli spettri?



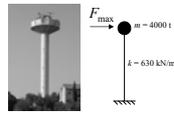
Foto



Spettro di risposta in termini di spostamento

Nota 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?



Foto

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

$$F_{\max} = m a_{\max} = 4000 \times 7.27 = 2900 \text{ kN}$$

e quindi le massime sollecitazioni nella struttura

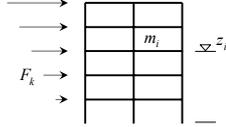
Nota il periodo proprio, possiamo leggere dallo spettro l'accelerazione assoluta massima $a_{\max} = 7.27 \text{ m/s}^2 = 0.74 \text{ g}$ o lo spostamento relativo massimo $u_{\max} = 4.58 \text{ cm}$

RICHIAMI

E per schemi a più gradi di libertà...

Dallo spettro di determina una accelerazione che serve per definire un insieme di forze (analisi statica) ...

$$F_k = m_k z_k \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n m_i z_i} S_e(T_1)$$



$$T_1 = C_1 H^{3/4}$$

Il periodo proprio può essere valutato con formule semplificate

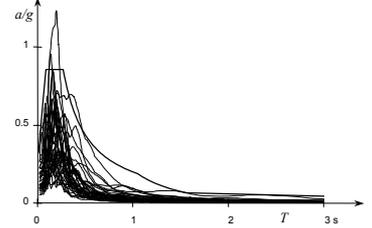
Le forze possono essere ridotte con $\lambda=0.85$ se l'edificio ha almeno 3 piani e periodo non troppo alto

... o più insiemi di forze (analisi modale)

RICHIAMI

Spettri di risposta

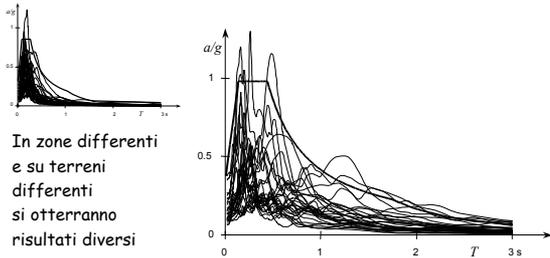
L'analisi di oscillatori semplici può essere ripetuta per diversi accelerogrammi (con un assegnato smorzamento)



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

RICHIAMI

Spettri di risposta

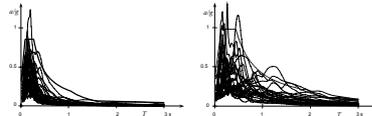


In zone differenti e su terreni differenti si otterranno risultati diversi

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

RICHIAMI

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 D.M. 14/9/2005

Accelerazione di riferimento a_g per terremoto con alto periodo di ritorno

Per strutture di classe 1:
probabilità di superamento del 10% in 50 anni

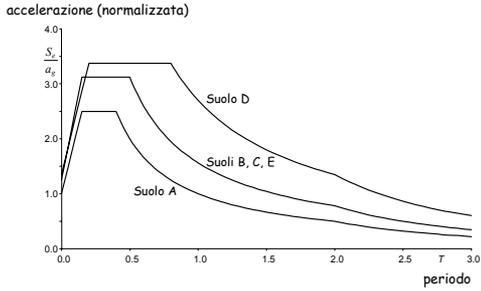
zona	1	2	3	4
a_g	0.35 g	0.25 g	0.15 g	0.05 g

Per strutture di classe 2:
probabilità di superamento del 5% in 50 anni

zona	1	2	3	4
a_g	0.49 g	0.35 g	0.21 g	0.07 g

cioè moltiplicati per 1.4

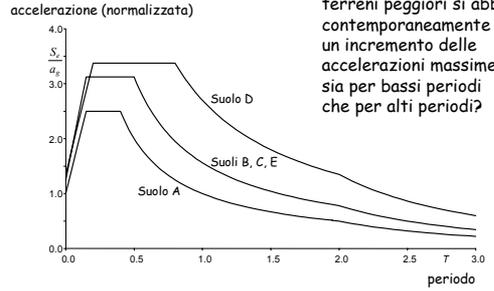
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno



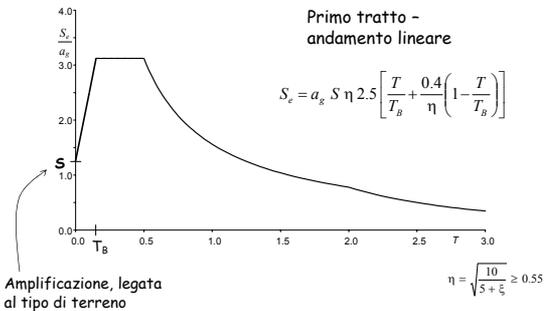
D.M. 14/9/05, punto 3.2.2.3.1

Un dubbio ...

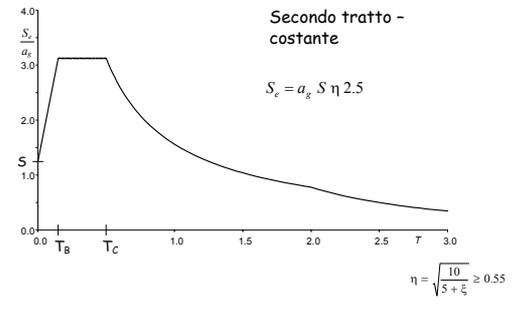
Ha senso che per i terreni peggiori si abbia contemporaneamente un incremento delle accelerazioni massime sia per bassi periodi che per alti periodi?



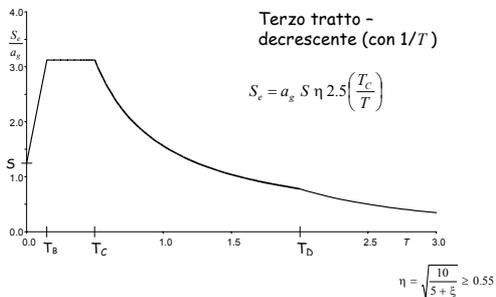
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno



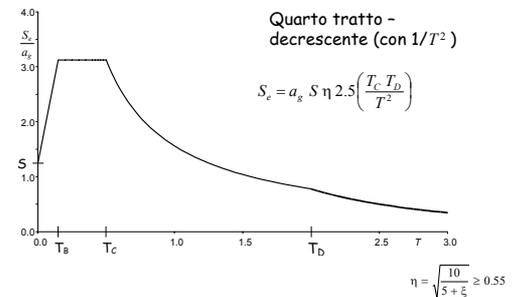
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno



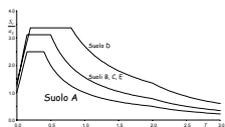
Spettri di risposta elastica di normativa accelerazioni orizzontali, alto periodo di ritorno



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



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



Suolo A

Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi

$V_{S30} > 800$ m/s

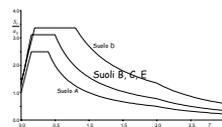
$S = 1$ $T_B = 0.15$ s $T_C = 0.4$ s $T_D = 2.0$ s
per terremoti con alto periodo di ritorno

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 m/s $< V_{S30} < 800$ m/s

Resistenza penetrometrica $N_{SPT} > 50$

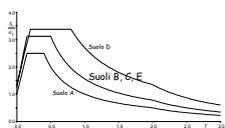
Coesione non drenata $c_u > 250$ kPa

$S = 1.25$ $T_B = 0.15$ s $T_C = 0.5$ s
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 m/s $< V_{S30} < 360$ m/s

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

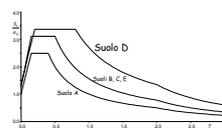
Coesione non drenata $70 < c_u < 250$ kPa

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

$V_{S30} < 180$ m/s

Resistenza penetrometrica $N_{SPT} < 15$

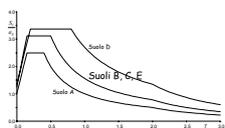
Coesione non drenata $c_u < 70$ kPa

$S = 1.35$ $T_B = 0.2$ s $T_C = 0.8$ s
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 $V_{S30} > 800$ 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

$V_{S30} < 100$ m/s

Coesione non drenata $10 < c_u < 20$ kPa

Suolo S2

Depositi di terreni soggetti a liquefazione

Per questi tipi di terreno occorrono studi speciali

Esempio

Dall'alto:

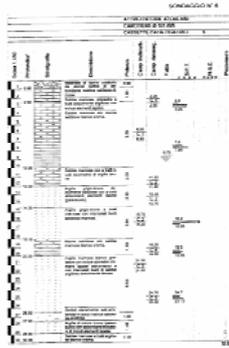
12 m - sabbie marnose
 $N_{SPT} = 26$

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
 $N_{SPT} = 18$

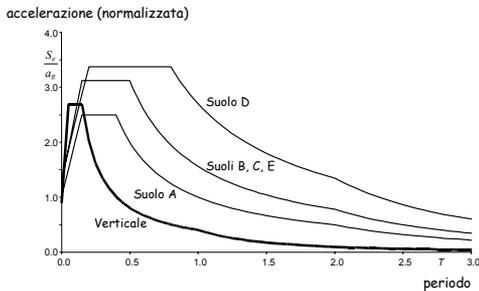
3.5 m - ciottoli, argille brune
 $N_{SPT} = 40$

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

$$N_{SPT} = 25.9$$

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

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



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

Accelerazione di riferimento a_{gd} per terremoto con basso periodo di ritorno

Per strutture di classe 1:
 probabilità di superamento del 50% in 50 anni

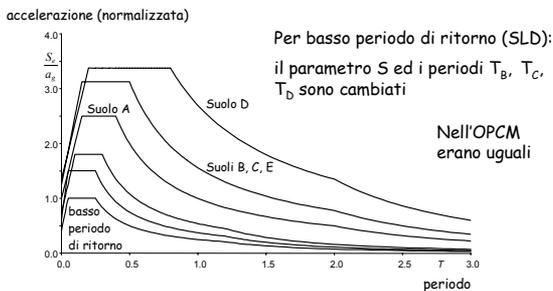
Per strutture di classe 2:
 probabilità di superamento del 30% in 50 anni

Salvo più accurate valutazioni, si può assumere

$$a_{gd} = a_g / 2.5$$

D.M. 14/9/05, punto 3.2.2.3

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



D.M. 14/9/05, punto 3.2.2.6

Al di là del limite elastico:
 sistemi a un grado di libertà

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

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

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

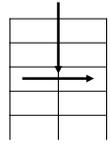
Le azioni inerziali (forze orizzontali indotte dal sisma) possono essere comparabili con le azioni verticali

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

Azioni orizzontali comparabili con le azioni verticali

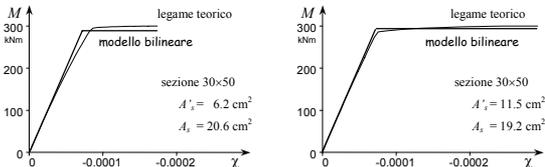
Le sollecitazioni provocate dalle azioni orizzontali sono molto forti

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



Comportamento oltre il limite elastico

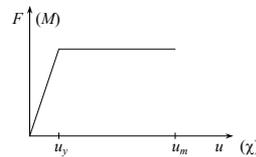
Occorre tener conto del comportamento non lineare delle singole sezioni



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

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico

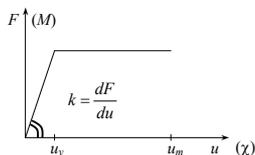


È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



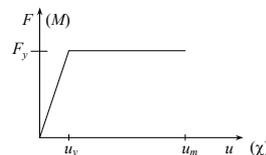
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Rigidezza = inclinazione del diagramma

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



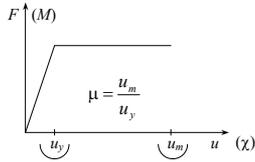
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Resistenza = soglia di plasticizzazione

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



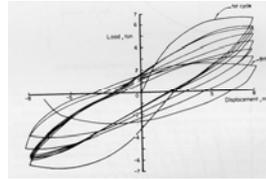
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente

Comportamento oltre il limite elastico

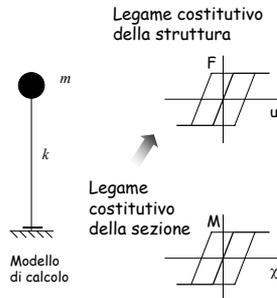
Per una valutazione della risposta sismica, occorre anche tener conto del comportamento ciclico, con i possibili degradi di rigidezza e resistenza



Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico



Foto



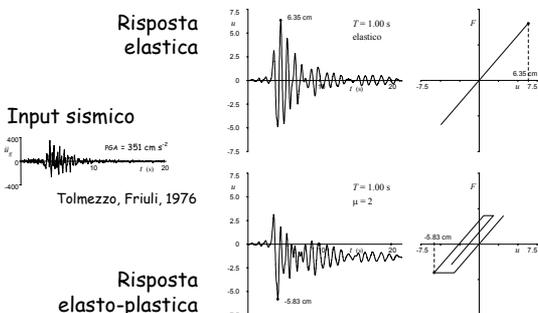
Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

L'equazione del moto è formalmente la stessa, ma la rigidezza non è più una costante

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

La risoluzione avviene per via numerica, in maniera analoga a quanto si fa per un oscillatore semplice elastico (ma con qualche complicazione in più)

Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

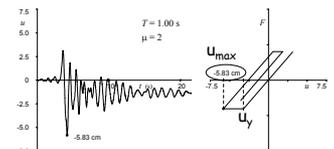


Richiesta di duttilità

Il rapporto tra lo spostamento massimo u_{max} ottenuto come risposta al sisma e lo spostamento u_y di plasticizzazione è la duttilità necessaria al sistema per non collassare (richiesta di duttilità)

In genere, abbassando la resistenza aumenta la richiesta di duttilità

Risposta elasto-plastica



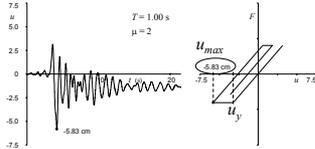
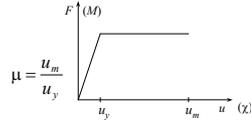
Progettazione di strutture elasto-plastiche

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

sia maggiore di quella richiesta

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

Risposta elasto-plastica



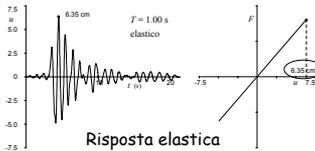
Progettazione di strutture elasto-plastiche

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

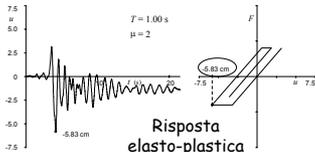


Ricordando che $F = m a$, si può diagrammare in funzione del periodo l'accelerazione da usare nel progetto, per assegnati valori della duttilità μ

Progettazione di strutture elasto-plastiche

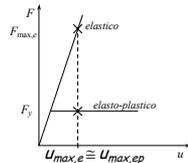


Risposta elastica



Risposta elasto-plastica

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



Progettazione di strutture elasto-plastiche

La forza di progetto può essere ottenuta dividendo

$$F_d$$

la forza necessaria per mantenere la struttura in campo elastico

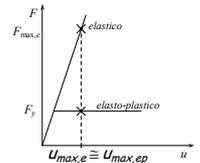
$$F_{max,e}$$

per la duttilità

$$\mu$$

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

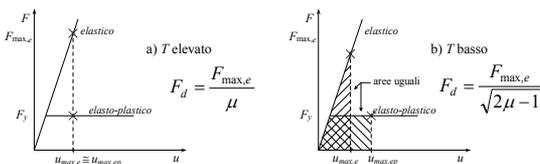
Le analisi numeriche mostrano che lo spostamento di schemi elastici ed elasto-plastici è più o meno lo stesso



Progettazione di strutture elasto-plastiche

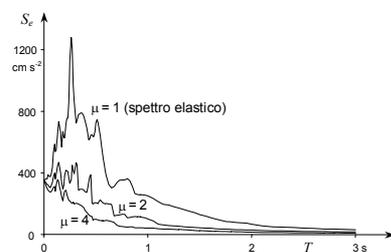
Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo per strutture con periodo medio-alto

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



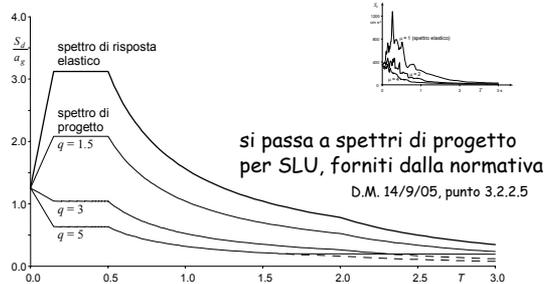
Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata

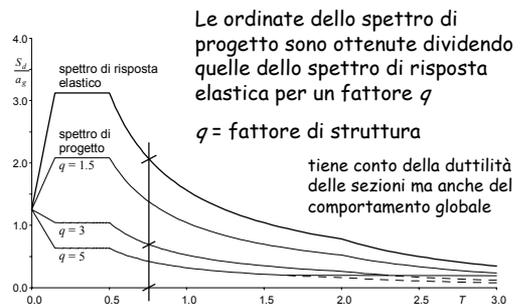


Progetto a duttilità assegnata

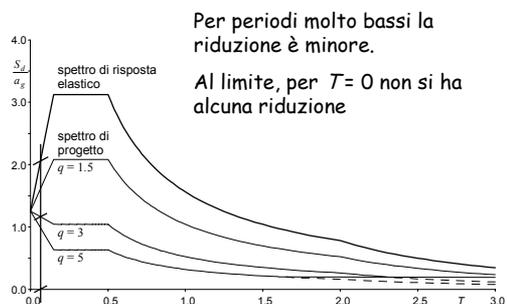
- Nota la duttilità, si può ricavare l'accelerazione (e quindi le forze) di progetto dagli spettri di risposta a duttilità assegnata.
- Risolvendo lo schema strutturale soggetto a queste forze (con analisi lineare) si verificano le sezioni.
- Se la struttura sopporta queste azioni ed ha la duttilità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

Spettri di progetto per SLU D.M. 14/9/2005

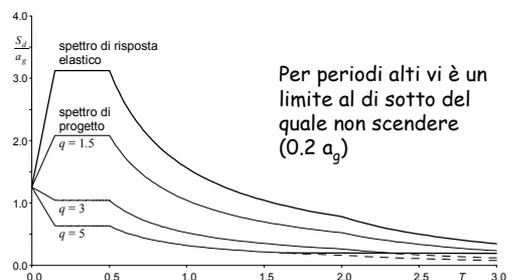
Spettri di progetto di normativa



Spettri di progetto di normativa

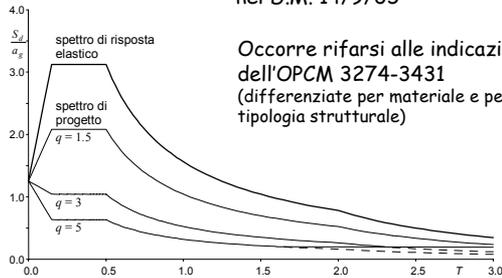


Spettri di progetto di normativa



Spettri di progetto di normativa accelerazioni orizzontali

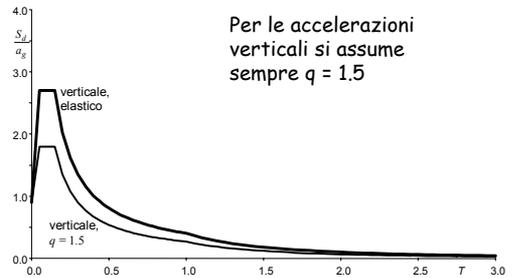
Il valore del fattore di struttura q non è definito nel D.M. 14/9/05



Occorre riferirsi alle indicazioni dell'OPCM 3274-3431 (differenziate per materiale e per tipologia strutturale)

Spettri di progetto di normativa accelerazioni verticali

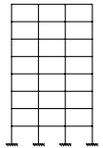
Per le accelerazioni verticali si assume sempre $q = 1.5$



Al di là del limite elastico: sistemi a più gradi di libertà

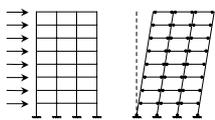
Dalla sezione alla struttura

Per schemi a più gradi di libertà



il passaggio tra comportamento della sezione e comportamento globale è molto più complesso

Meccanismi di collasso per schemi multipiano

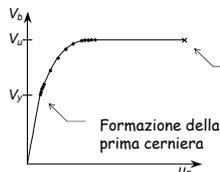


Notare:

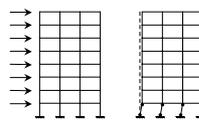
Buon incremento della forza da prima plasticizzazione a collasso

Forti spostamenti a collasso = elevata duttilità globale

Modalità di collasso: globale



Meccanismi di collasso per schemi multipiano



In altri casi, invece:

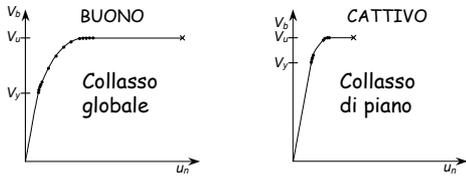
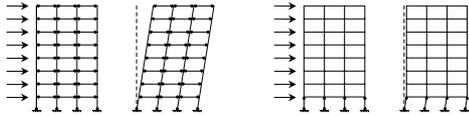
Basso incremento della forza da prima plasticizzazione a collasso

Modesti spostamenti a collasso = ridotta duttilità globale

Modalità di collasso: di piano



Meccanismi di collasso per schemi multipiano

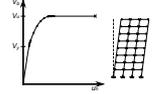


Per avere alta duttilità occorre un collasso globale

Meccanismi di collasso per schemi multipiano

Nella progettazione, per ottenere una struttura ad alta duttilità occorre:

- garantire una buona duttilità locale (con particolare attenzione ai dettagli costruttivi)
- garantire un collasso globale, fornendo maggiore resistenza ai pilastri (criterio di gerarchia delle resistenze)
- evitare che la mancanza di regolarità porti a concentrazione della plasticizzazione



Fattore di struttura

Le ordinate dello spettro di progetto sono ottenute dividendo quelle dello spettro di risposta elastica per il fattore di struttura q

Il fattore di struttura tiene conto della duttilità delle sezioni ma anche del comportamento globale della struttura

Fattore di struttura

$$q = q_0 K_\alpha K_D K_R$$

Dipende da:

- Duttilità generale della tipologia strutturale
- Rapporto tra resistenza ultima e di prima plasticizzazione
- Classe di duttilità dell'edificio
- Regolarità dell'edificio

D.M. 14/9/05, punto 5.7.7.1.1

In conclusione:

come possiamo valutare il comportamento sismico di una struttura?

Possibili approcci per valutare la risposta sismica elasto-plastica

Analisi elastica lineare (modale o statica), con forze ridotte mediante il fattore di struttura q

Analisi statica non lineare

Analisi dinamica non lineare, con valutazione della storia della risposta (istante per istante)

Ordinanza 3274, punto 4.5

D.M. 14/9/05, punto 5.7.4.3

Analisi elastica lineare (modale o statica)

È l'approccio tradizionale:

- Si calcolano le forze (modali o statiche) usando uno spettro ridotto mediante il fattore q
- Si controlla che le sollecitazioni conseguenti siano accettabili

Force based design
Progettazione basata sulle forze

Analisi elastica lineare (modale o statica)

È utilizzata comunemente, per la semplicità d'uso.
Ma:

- Quanto è affidabile il valore del fattore di struttura q utilizzato?

La vecchia norma italiana dava forze ridotte, ma senza alcuna indicazione

La nuova norma (OPCM) fornisce indicazione più dettagliate su come calcolare q e prescrizioni che dovrebbero garantire la duttilità necessaria

Sono sufficienti?

Analisi statica non lineare

È un approccio proposto abbastanza di recente:

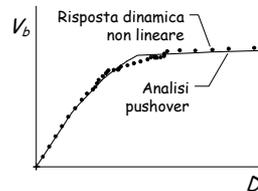
- Si calcolano gli spostamenti massimi della struttura soggetta a forze crescenti (analisi non lineare o analisi pushover)
- Si valutano gli spostamenti che la struttura subirà durante il sisma e si controlla se sono inferiori a quelli di collasso

Displacement based design
Progettazione basata sugli spostamenti

Analisi statica non lineare

L'idea è ottima, perché supera le incertezze legate alla valutazione di q . Ma:

- Gli spostamenti di collasso valutati con forze statiche coincidono con quelli dinamici?



Nell'esempio qui a fianco sì, ma non è sempre vero

Analisi statica non lineare

L'idea è ottima, perché supera le incertezze legate alla valutazione di q . Ma:

- Gli spostamenti di collasso valutati con forze statiche coincidono con quelli dinamici?
- Quanto è affidabile la previsione degli spostamenti che la struttura subirà durante un terremoto?

Inoltre, essa può essere usata solo per verifica (richiede una preliminare definizione delle resistenze)

Analisi dinamica non lineare

Consente di valutare bene la risposta strutturale, ma:

- Può essere usata solo per verifica (richiede una preliminare definizione delle resistenze)
- Va effettuata con specifici accelerogrammi (almeno 3 \Rightarrow ma sono sufficienti?)
- Richiede l'uso di programmi molto sofisticati ed una accurata modellazione del comportamento ciclico delle sezioni \Rightarrow possibili errori

FINE

Tratta dalla presentazione per CT
Azioni2, Azioni5
e dalla presentazione per Laboratorio
progettuale strutture 05-06
04-Obiettivi

Foto scattate da:

A. Gherzi, G. Gaeta

Altre foto fornite da:

M. Muratore, S. Pantano, P.P. Rossi

Per questa presentazione:

coordinamento

realizzazione

ultimo aggiornamento

A. Gherzi

A. Gherzi

30/10/2006

FINE

Foto scattate da:

A. Gherzi, G. Gaeta

Altre foto fornite da:

M. Muratore, S. Pantano, P.P.

Rossi Immagini tratte dal libro:

A. Gherzi, P. Lenza

Edifici antisismici in c.a. (in
preparazione)

Per questa presentazione:

coordinamento

realizzazione

ultimo aggiornamento

A. Gherzi

A. Gherzi

31/10/2006