

Corso di aggiornamento

Progettazione strutturale sulla base delle
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

Progetto e verifica di edifici antisismici in c.a.

2 - Terremoti e norma sismica

Spoletto

10-12 dicembre 2009

Aurelio Ghersi

I terremoti

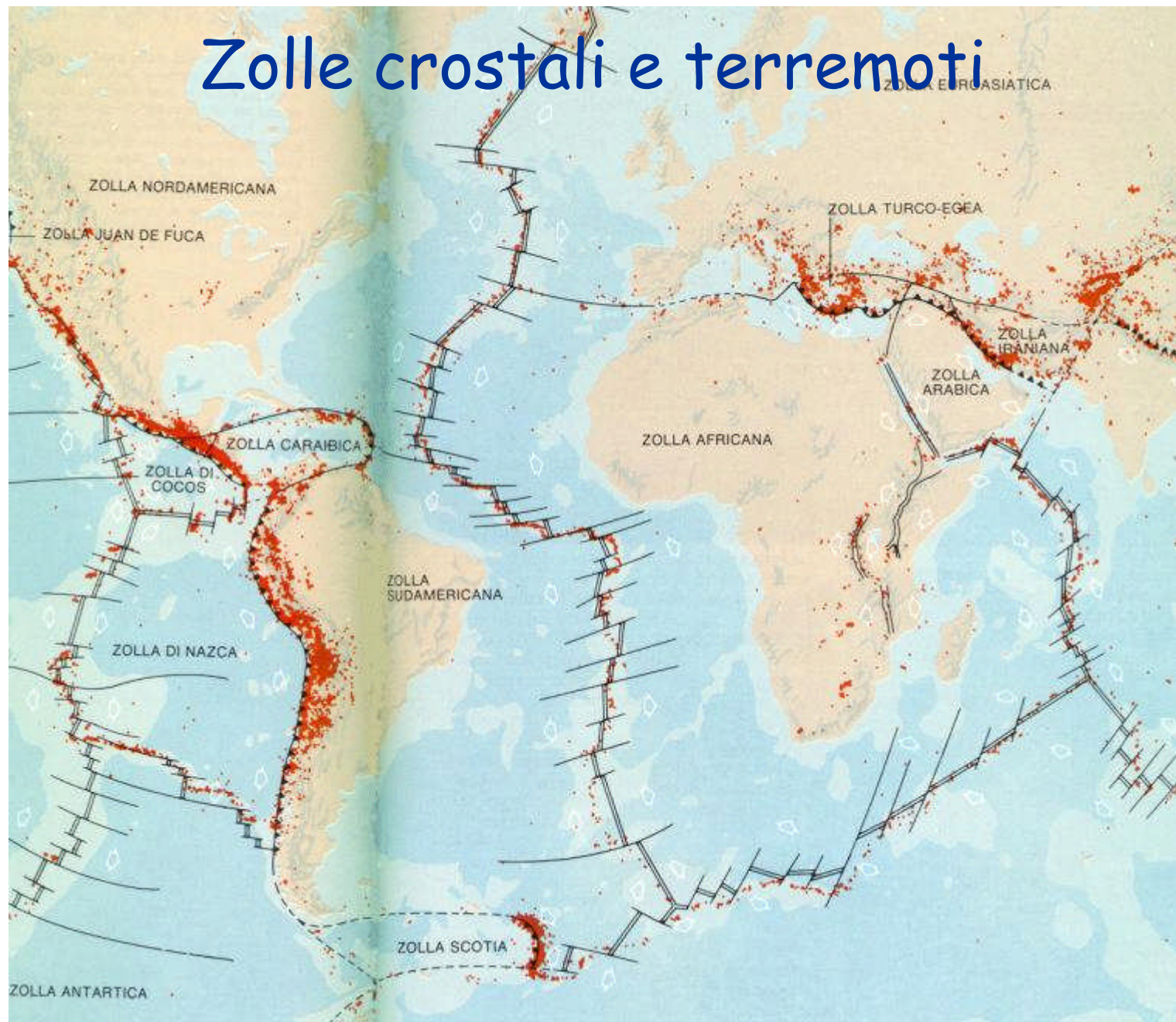
Cosa sono?

Quali effetti producono?

Qual è l'obiettivo della
progettazione antisismica?

I terremoti:
cosa sono?

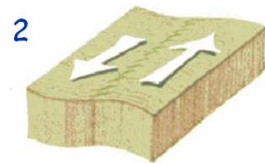
Zolle crostali e terremoti



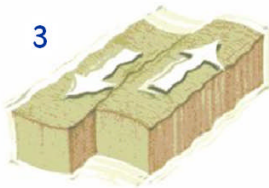
Il meccanismo che scatena un terremoto: scorrimento lungo una faglia



blocchi di crosta in riposo



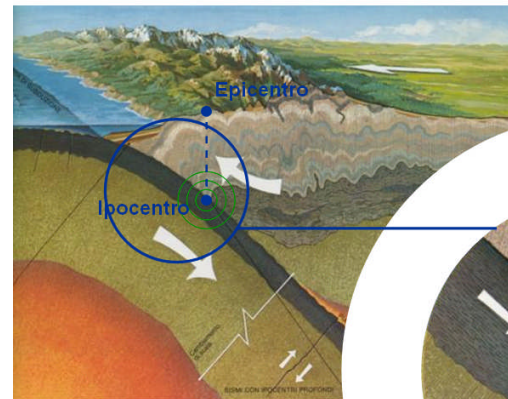
scorrimento impedito: deformazione
con accumulo di energia



il momento della rottura:
rilascio dell'energia



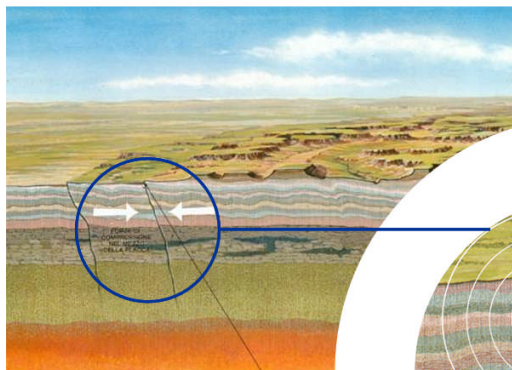
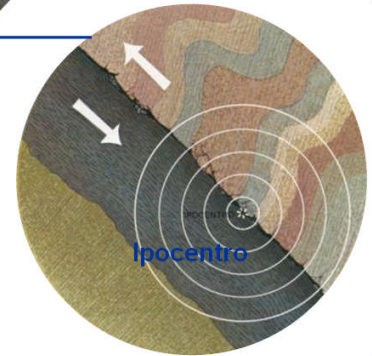
brusco scorrimento, verso un nuovo
equilibrio



Zone di
subduzione

Zolle in movimento,
l'una verso l'altra:

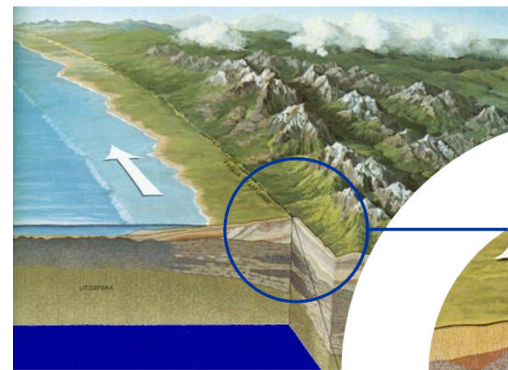
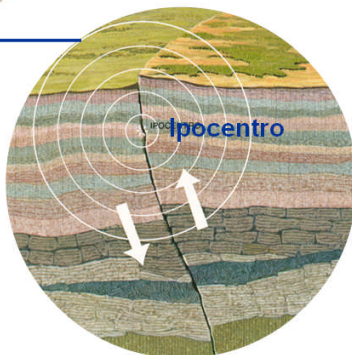
la più leggera affonda
scorrendo sotto l'altra



Zolle
in collisione

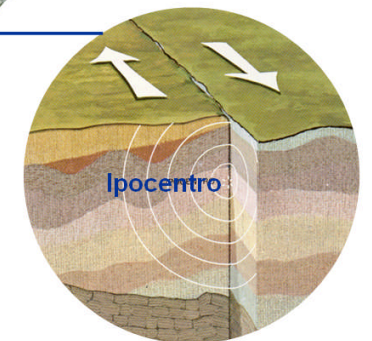
Zolle in movimento, l'una
verso l'altra:

se sono entrambe molto
spesse, nessuna affonda



Faglie
trasformi

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



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)

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 $\geq M$:

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

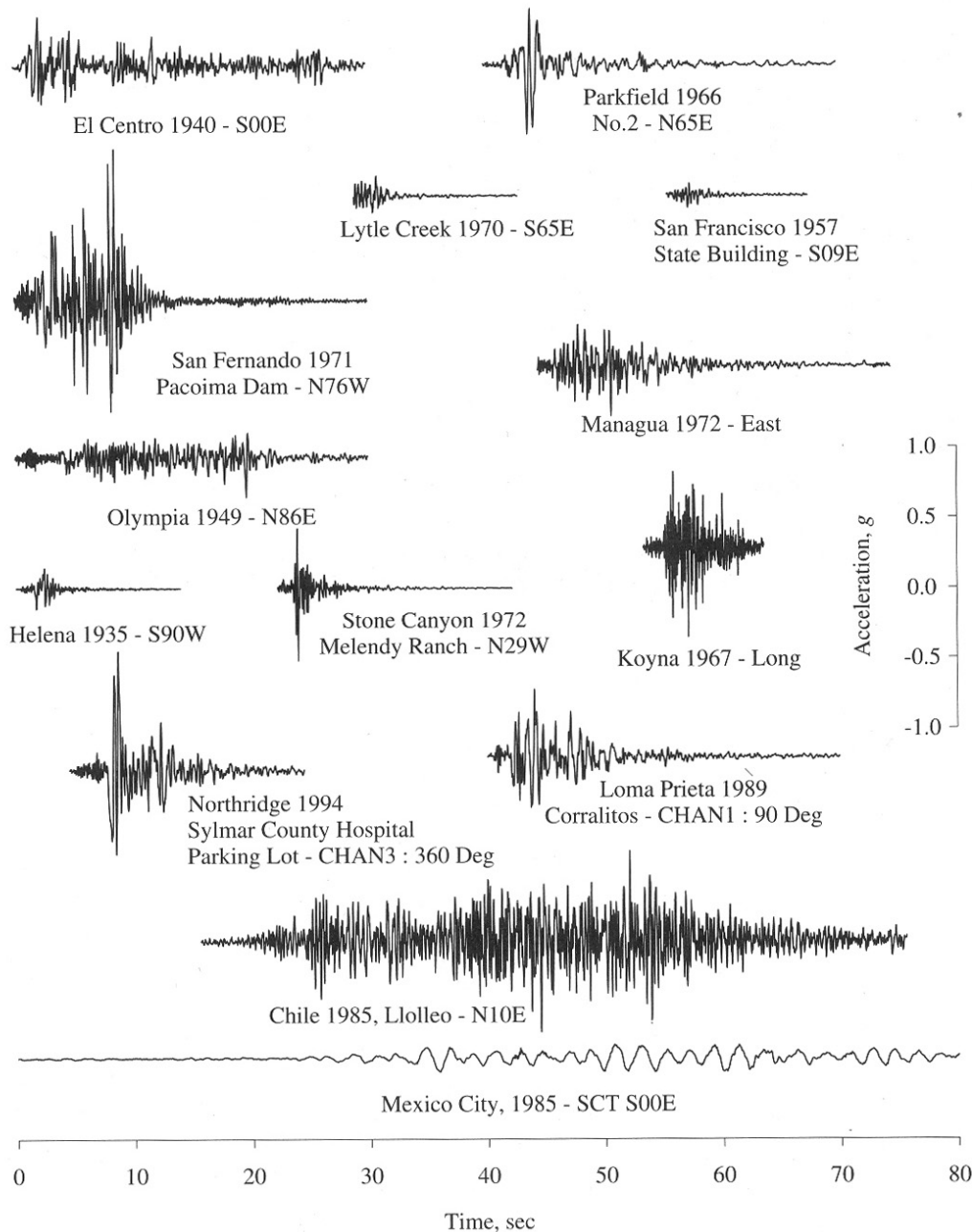
Accelerogramma

Diagramma l'accelerazione in funzione del tempo



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 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

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:

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

I terremoti:
quali effetti producono?

Particolare attenzione a ...

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

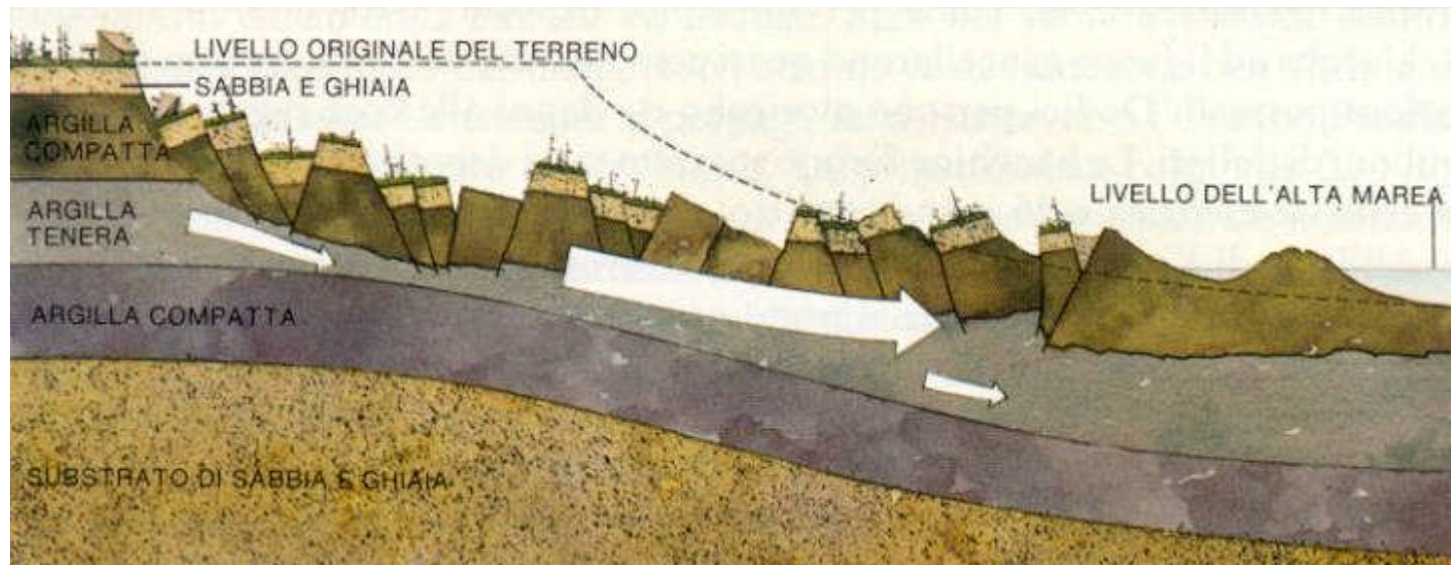
Cedimenti del terreno



1997 - Umbria



Liquefazione di strati sotterranei



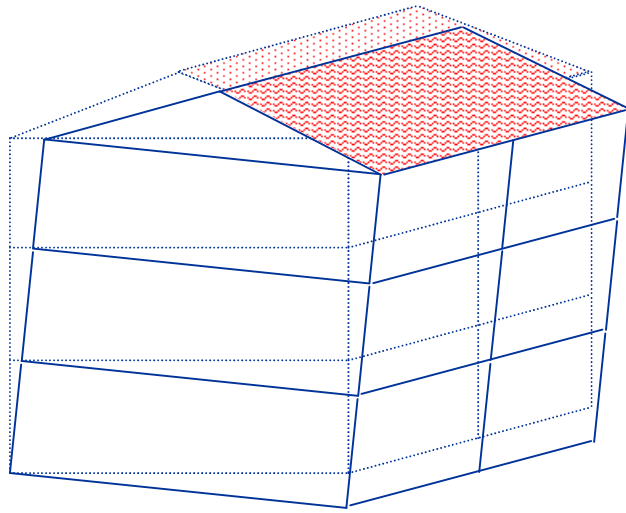
1964 - Alaska

Liquefazione del terreno



1999 – Turchia

Liquefazione del terreno



1999 – Turchia

Liquefazione del terreno



1999 – Turchia

Liquefazione del terreno



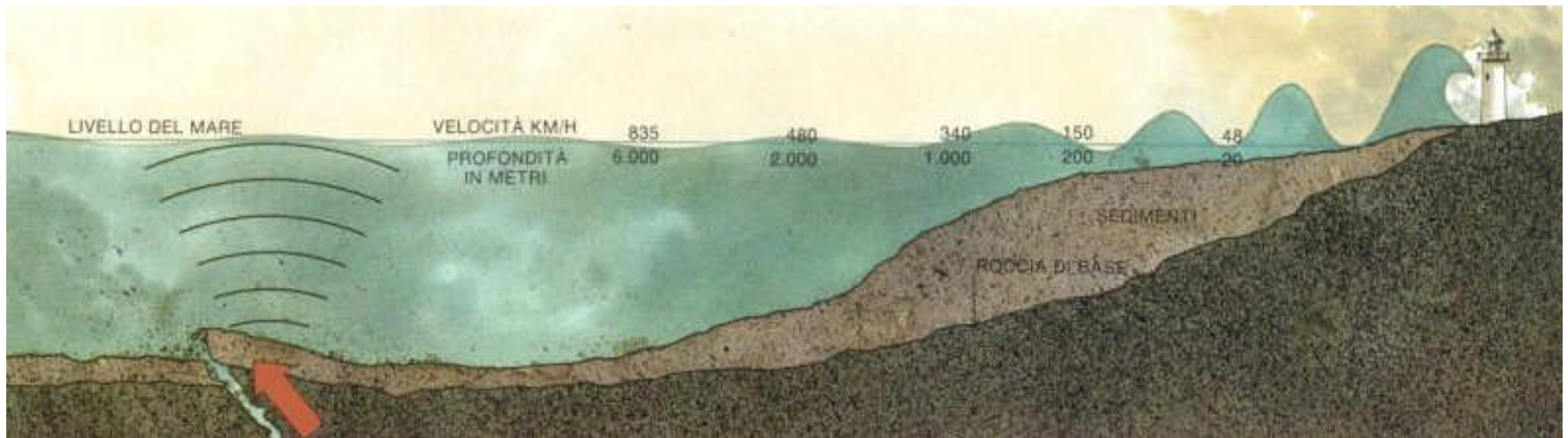
1999 – Turchia

Liquefazione del terreno



1999 – Turchia

Maremoti, tsunami



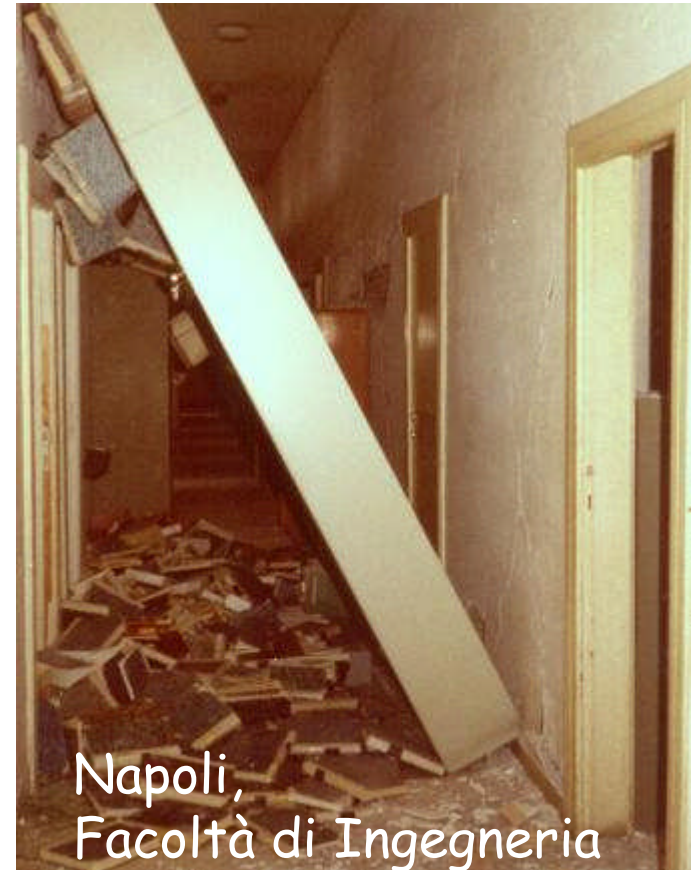
Dove l'acqua è profonda le onde viaggiano a velocità elevatissime (es. oltre 800 km/ora)

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

I terremoti: quali effetti producono?

Accelerazione sismica medio-bassa
Basso periodo di ritorno

Ribaltamento di mobili



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



Danni ai tramezzi



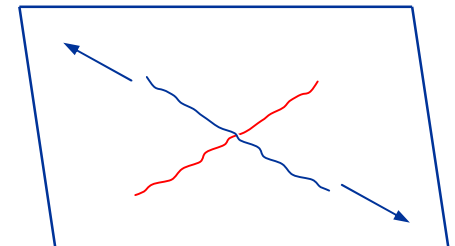
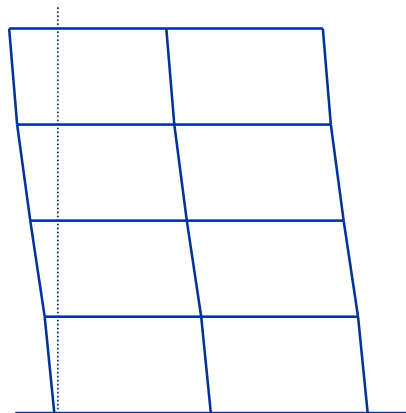
Napoli,
Facoltà di
Ingegneria

23/11/1980 - Irpinia e Basilicata

Danni ai tramezzi



Napoli,
Facoltà di
Ingegneria

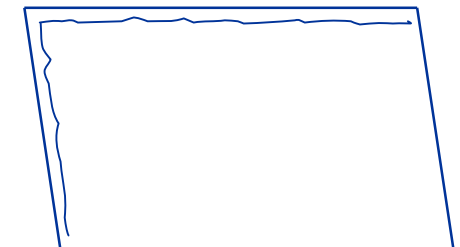
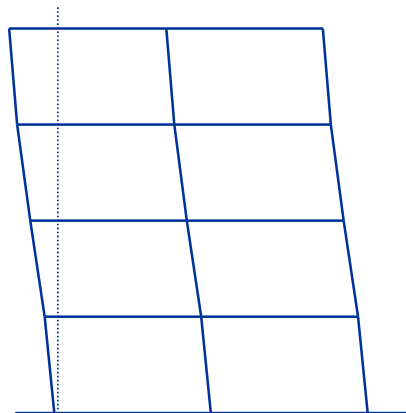


23/11/1980 - Irpinia e Basilicata

Danni ai tramezzi



Napoli,
Facoltà di
Ingegneria



oppure distacco
dei tramezzi dagli
elementi strutturali

23/11/1980 - Irpinia e Basilicata

Danni alle pareti di tamponamento per azioni nel loro piano



2002 - Santa Venerina

foto G. Gaeta

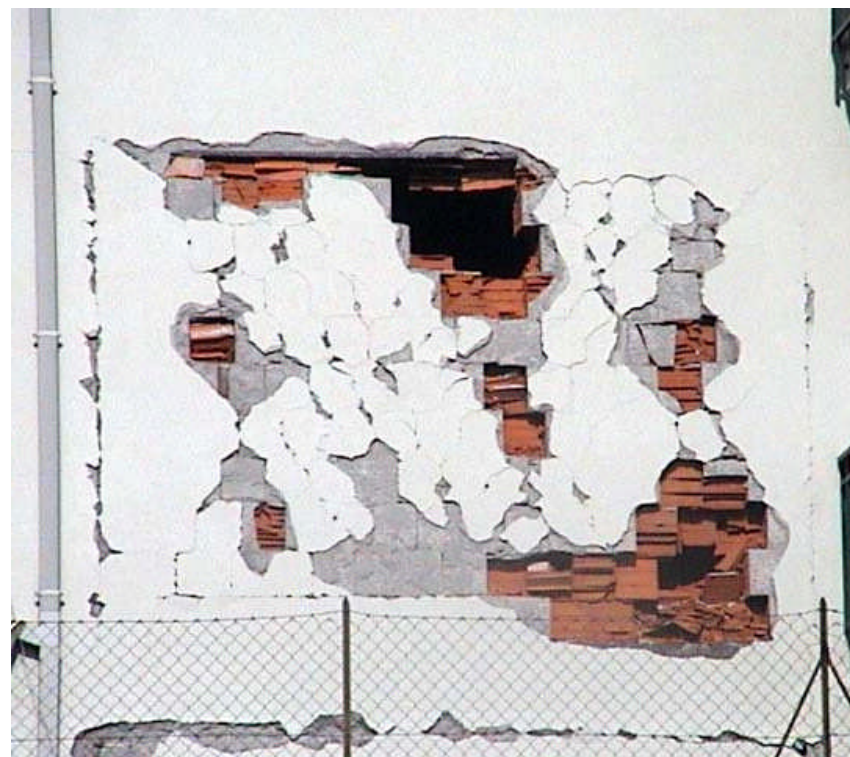
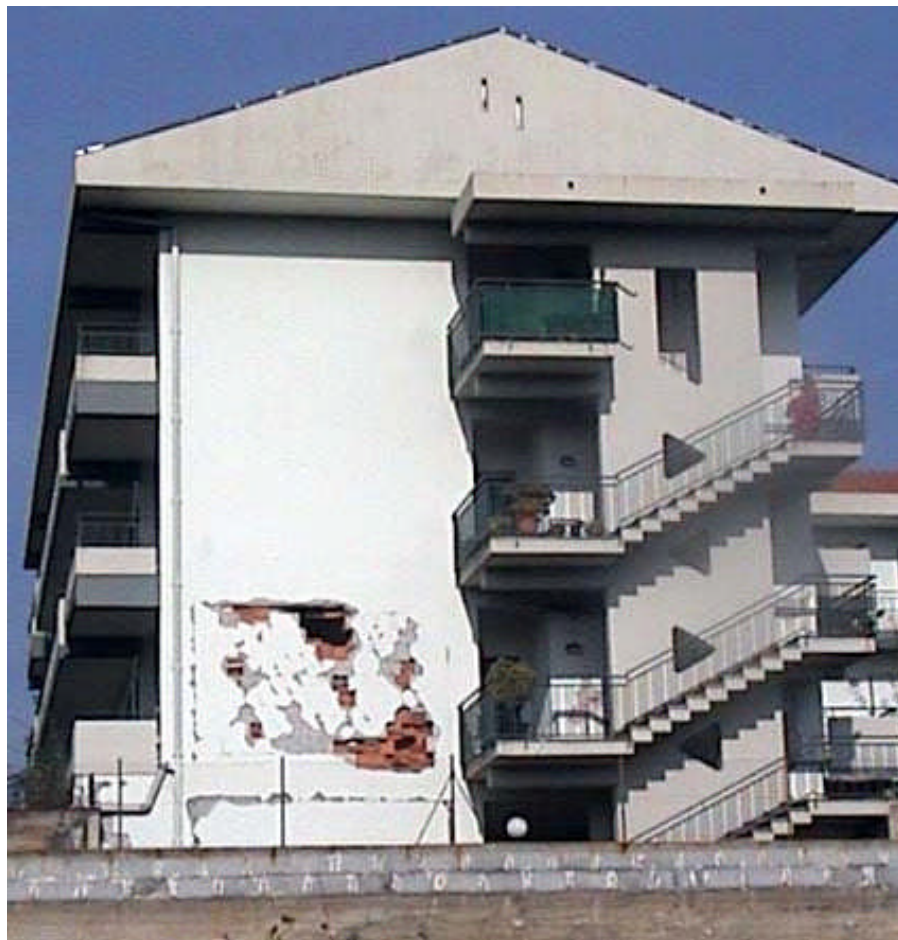
Danni alle pareti di tamponamento per azioni nel loro piano



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

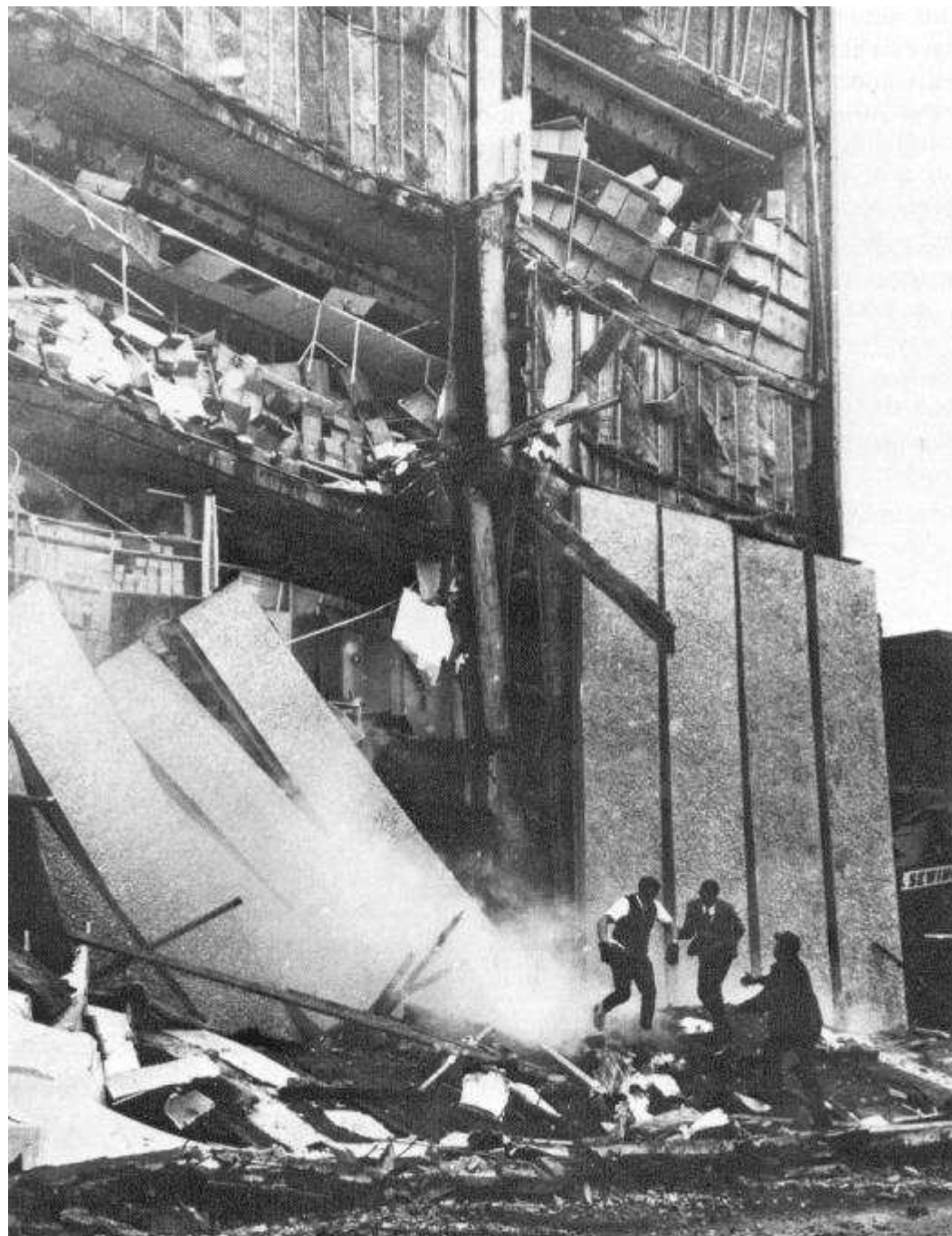
Espulsione delle pareti di tamponamento



1994 - Northridge

Espulsione delle
pareti di
tamponamento

Rischio di
perdita di vite



1964 - Alaska

I terremoti: quali effetti producono?

Accelerazione sismica elevata
Alto periodo di ritorno

Danno agli elementi strutturali



2002 – Santa Venerina

foto G. Gaeta

Danni e difetti costruttivi



Mancanza di
staffe in testa
al pilastro e
nel nodo

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

Ma tra i difetti ...

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



... la trascuratezza
degli operai

Danni e difetti costruttivi ...



S. Angelo dei Lombardi,
edificio in costruzione



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

... possono portare a meccanismi di piano



1999 – Turchia

Meccanismi di piano - senza crollo



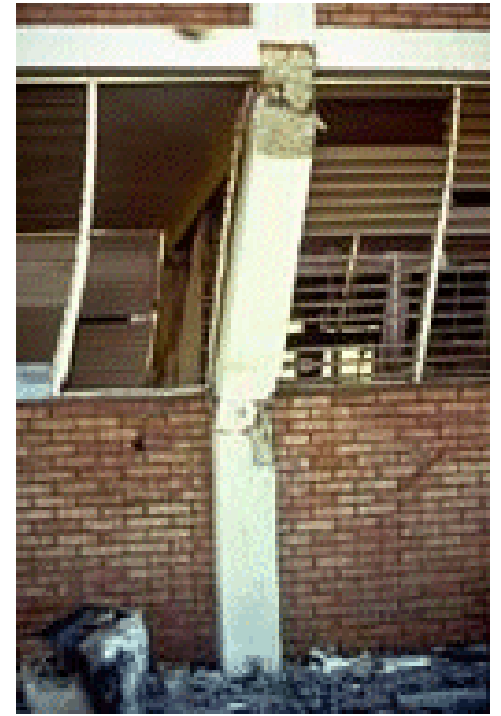
1999 – Turchia

Meccanismi di piano - senza crollo

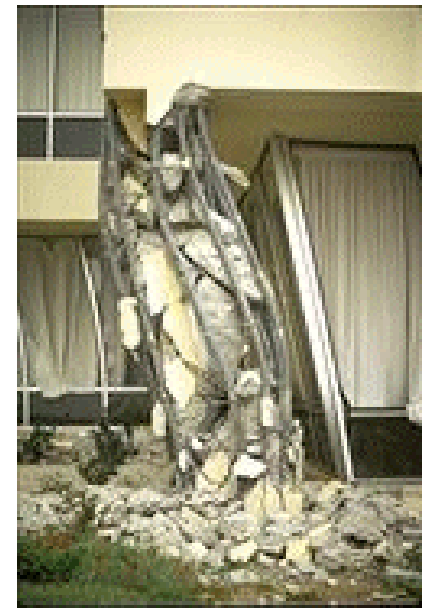
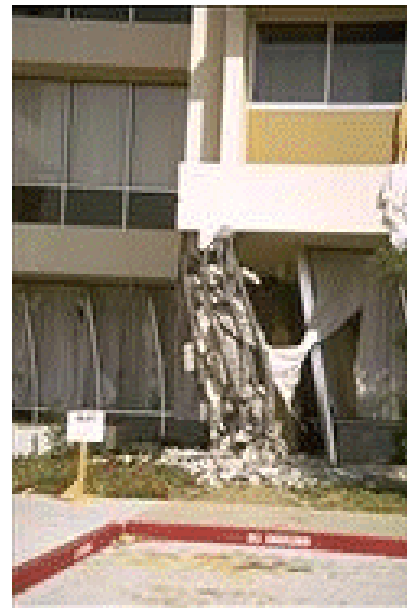
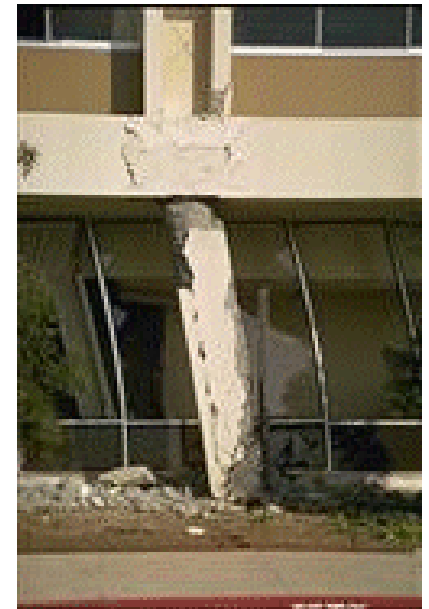
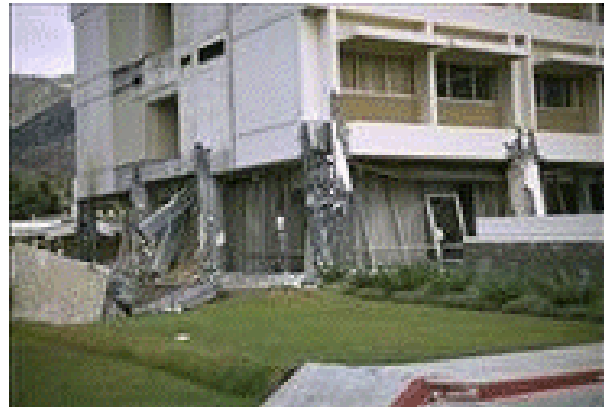


1999 – Turchia

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



... con risultati fatali



1999 – Turchia

foto A. Gherzi

Perdita del piano inferiore

Lioni,
edificio del Banco di Napoli



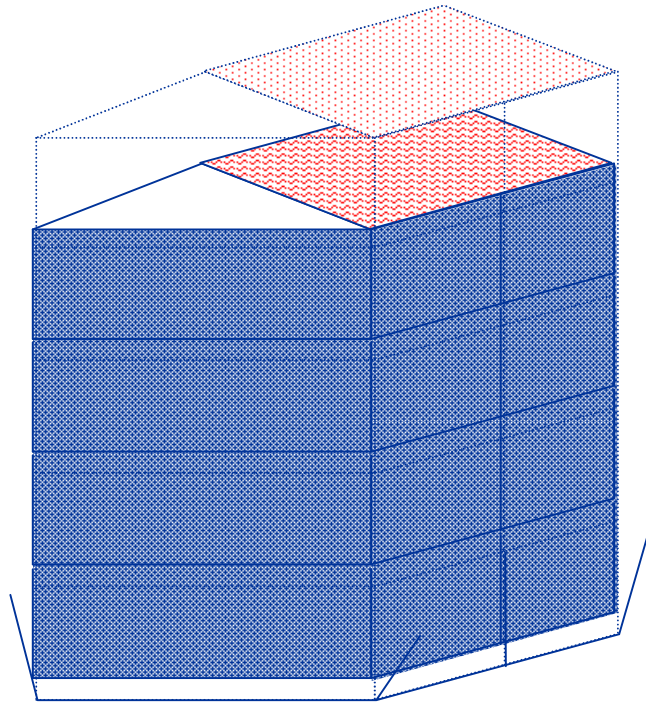
23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

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



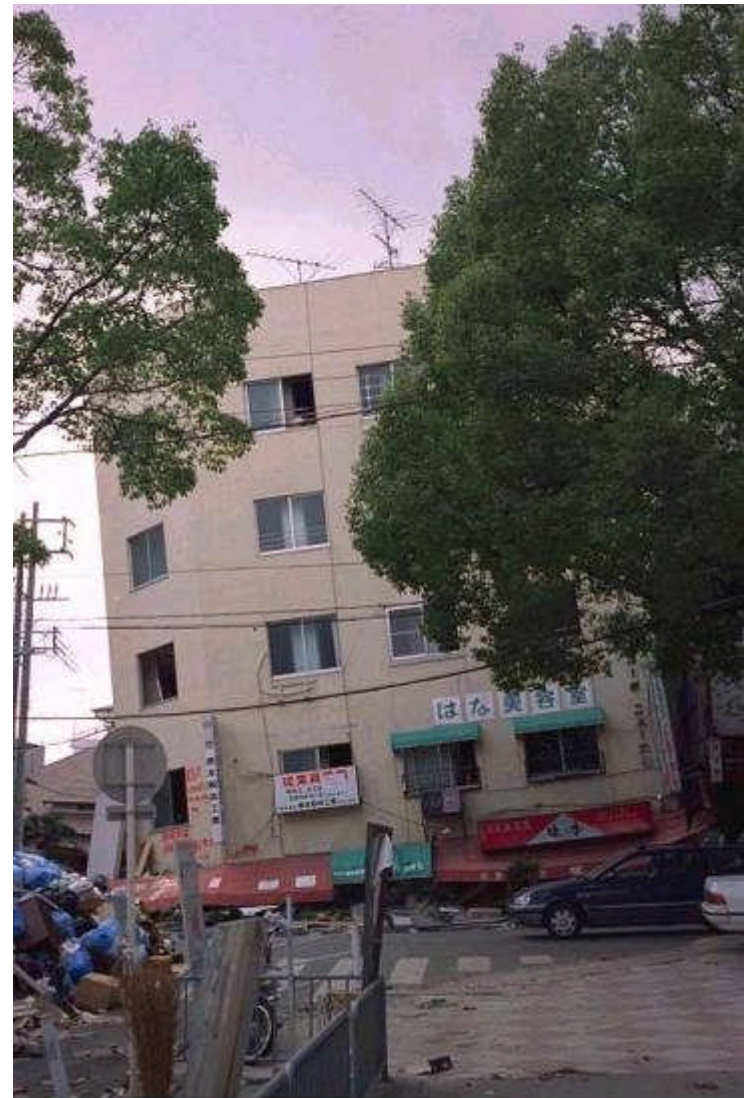
23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Perdita del piano inferiore - altri esempi



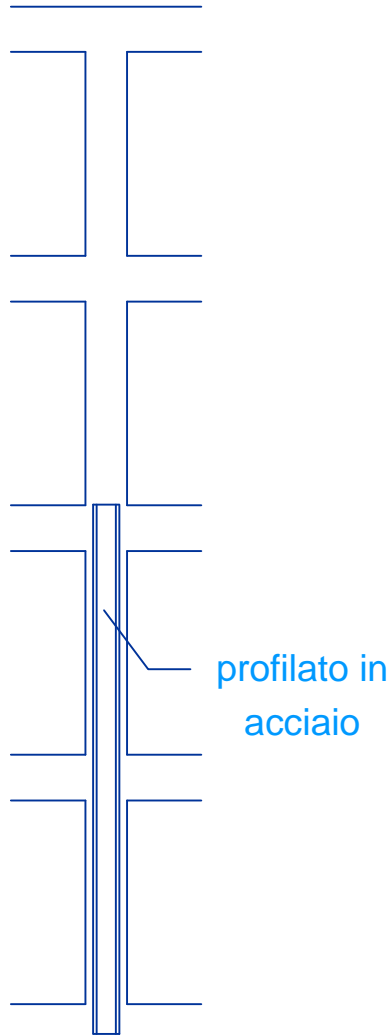
1999 – Turchia (?)

Perdita del piano inferiore



1995 – Kobe

Perdita di un piano intermedio



1995 – Kobe

Perdita di un piano intermedio



1995 – Kobe

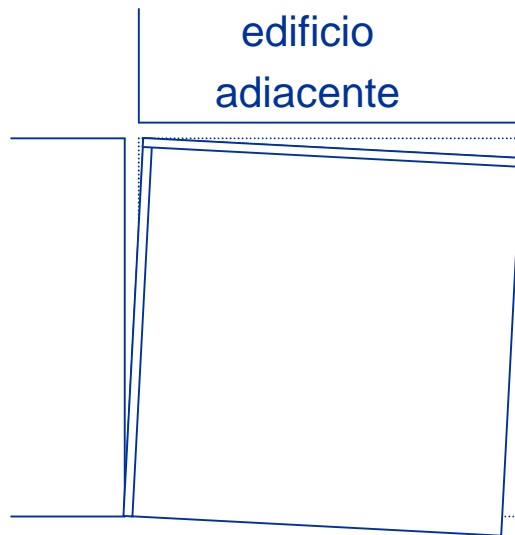
Perdita di un piano intermedio



1995 – Kobe

Perdita di un piano intermedio

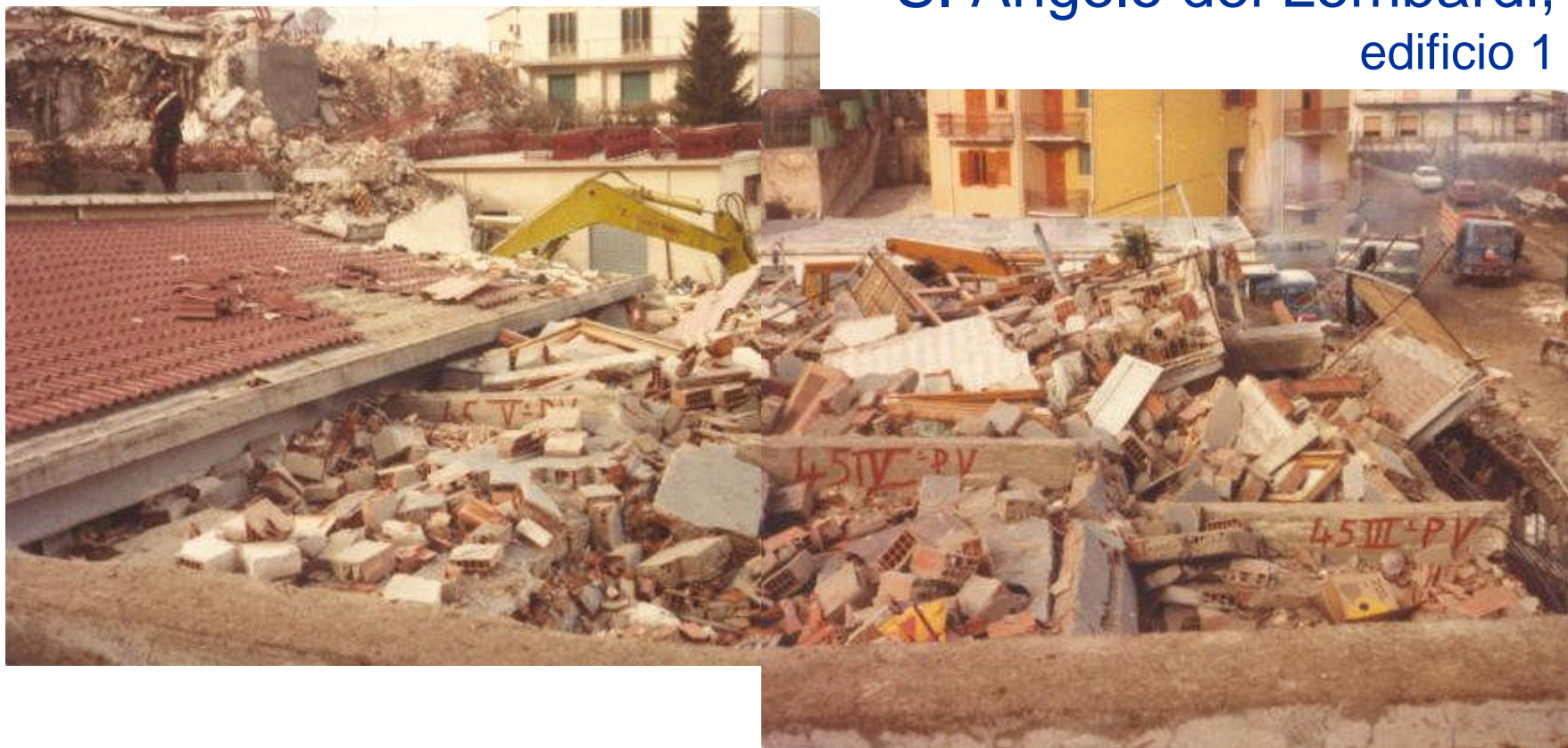
possibili effetti torsionali
in pianta



1995 – Kobe

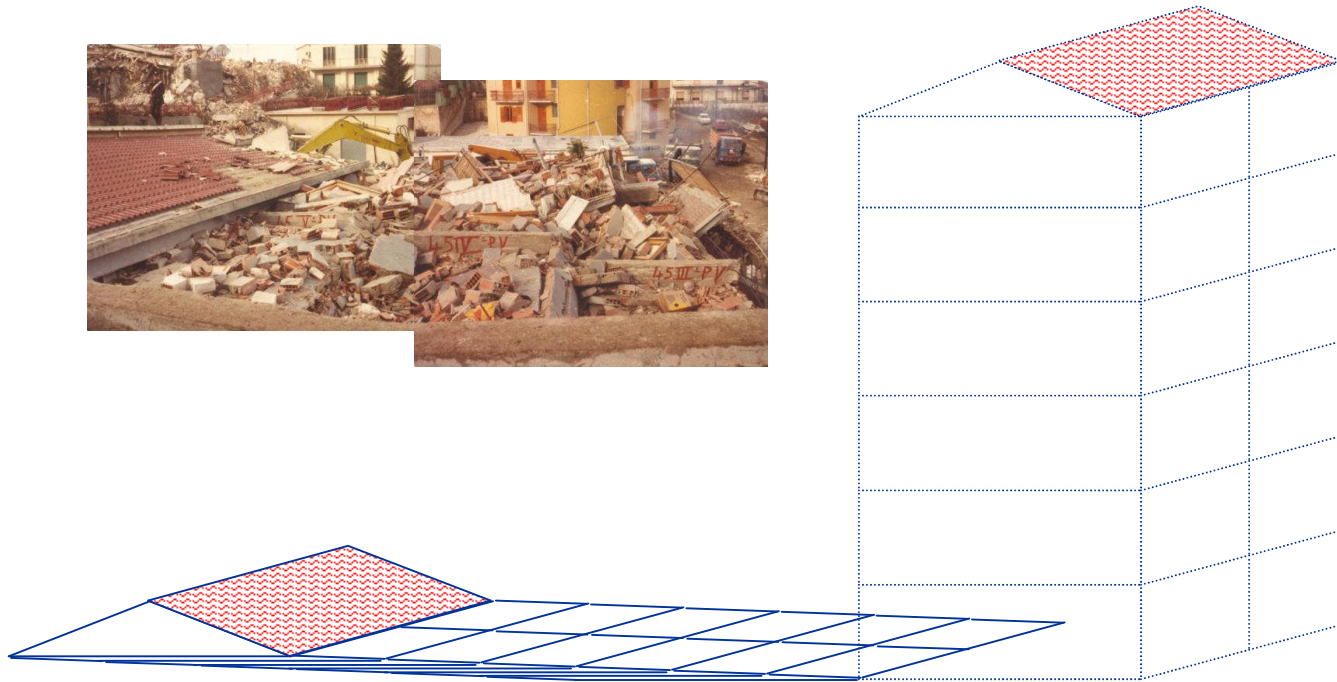
Crollo totale, con traslazione degli impalcati

S. Angelo dei Lombardi,
edificio 1



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

Crollo totale, con traslazione degli impalcati



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



1994 – Northridge

Automobili schiacciate dagli edifici



1994 – Northridge

S. Angelo dei Lombardi

Edificio 2



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi edificio 2



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi edificio 2



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi edificio 2



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi edificio 2



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi - edificio 2



23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

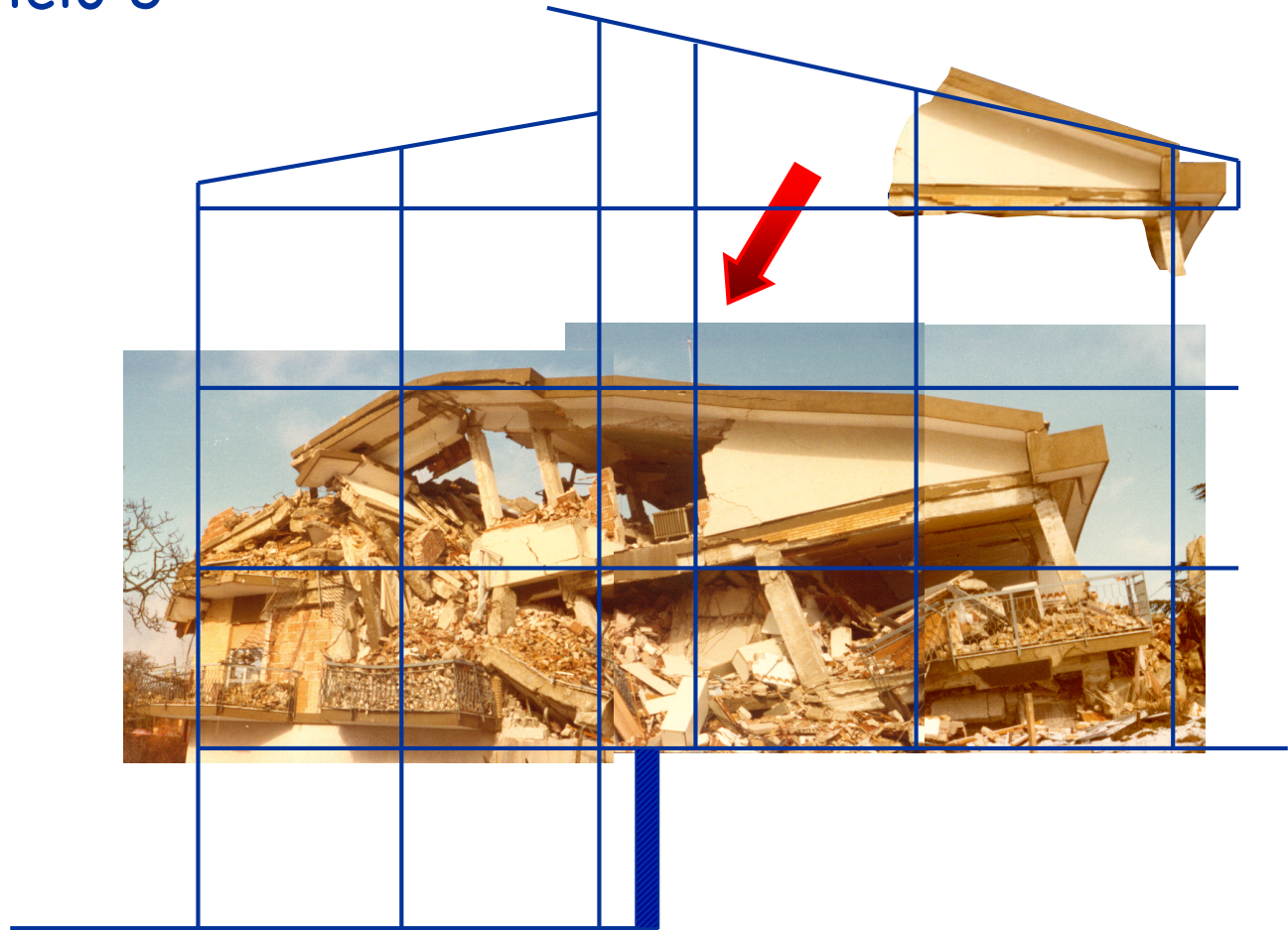
S. Angelo dei Lombardi

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



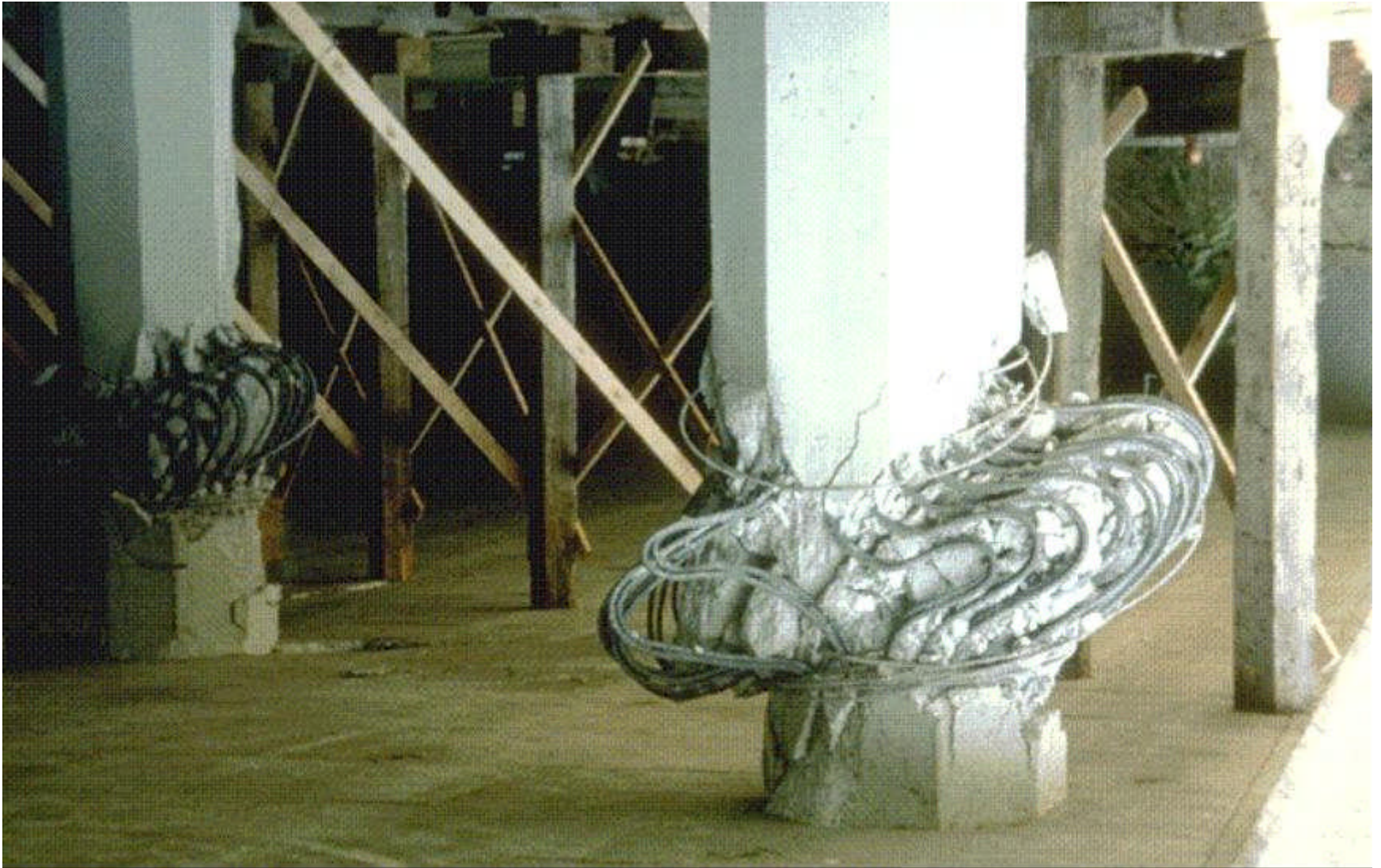
1994 – Northridge

Particolari dei pilastri



1994 – Northridge

Particolari dei pilastri



1994 – Northridge

Particolari dei pilastri



1994 – Northridge

I terremoti:
qual è l'obiettivo della
progettazione antisismica?

Indicazioni della
normativa

Problematiche:

per terremoti con basso periodo di ritorno

Poiché questi avvengono con frequenza,
è importante evitare danni eccessivi
ed interruzioni troppo lunghe dell'uso



Problematiche:

per terremoti con alto periodo di ritorno

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

C1

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

C2

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

C3

Problematiche:
per terremoti con basso periodo di ritorno



Problematiche:
per terremoti con alto periodo di ritorno



Più in generale

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



Prime norme sismiche in Italia

Fine '700 ed '800:

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

C1

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 XX 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)

→ **C2**

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" →

C3

D.M. 16 gennaio 1996

Consente la verifica col metodo degli stati limite

Introduce limiti agli spostamenti di interpiano →

D

XXI secolo, 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 (annullato dal D.M. 14/1/08)

Recepisce le Ordinanze

D.M. 14 gennaio 2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni

Sostanzialmente in linea con gli Eurocodici

Prime basi di "Performance based design"



Oggi, all'estero

Eurocodice 8

È la base da cui è stata tratta l'Ordinanza 3274-3431
Ad esso si allineano quasi perfettamente le NTC 08

Norme americane FEMA

Introducono il concetto di "Performance based design" →



cioè

prestazione richiesta per un assegnato terremoto

Evoluzione del concetto di protezione sismica

Prime normative:

Unico obiettivo

- Evitare perdite di vite umane nel caso di terremoto con periodo di ritorno molto alto

Evoluzione del concetto di protezione sismica

Normative attuali:

Doppio livello di protezione

- Evitare perdite di vite umane nel caso di terremoto con periodo di ritorno molto alto
- Limitare i danni nel caso di terremoto con periodo di ritorno più basso

Normativa italiana, a partire dal 1996

Normativa europea (Eurocodice 8)

Evoluzione del concetto di protezione sismica

Performance based design

Tendenza della normativa:

Più **livelli di prestazione**

- Evitare il crollo
- Evitare perdite di vite umane
- Consentire un rapido ripristino dell'operatività
- Mantenere l'operatività

associati a diversi **livelli di intensità sismica**

Normativa americana FEMA

Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

Livelli di prestazione

Ovvero Stati Limite da rispettare

Stati Limite di Esercizio

Stato Limite di Operatività - SLO

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

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

Livelli di prestazione

Ovvero Stati Limite da rispettare

Stati Limite Ultimi

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

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

Livelli di intensità sismica

Sono legati alla "vita di riferimento" V_R
della struttura

Livello	Probabilità di superamento	Periodo di ritorno *
Frequente	81% in V_R anni	30 anni
Occasionale	63% in V_R anni	50 anni
Raro	10% in V_R anni	475 anni
Estremamente raro	5% in V_R anni	975 anni

* Per $V_R = 50$ anni

Obiettivi prestazionali

	SLO	SLD	SLV	SLC
Frequente (30 anni)				
Occasionale (50 anni)				
Raro (475 anni)				
Molto raro (975 anni)				

Prestazioni non accettabili

Obiettivi di base

Strutture critiche per la sicurezza

NTC 08

Vita di riferimento V_R

Dipende da:

- Vita nominale V_N
- Classe d'uso

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	≤ 10 anni
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50 anni
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100 anni

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

Vita di riferimento V_R

Dipende da:

- Vita nominale V_N
- Classe d'uso

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

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

<div>Vita nominale</div> <div>Classe d'uso</div>	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

Periodo di ritorno T_r

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

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

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

- 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

Ma attenzione alle interpretazioni...

- Se gli edifici strategici vengono considerati come tipo 3 (vita di riferimento 100 anni, anziché 50) si ha un ulteriore incremento delle accelerazioni di circa il 40%

In questo caso vi sono forti differenze rispetto al passato