

Università di Catania
Corso di laurea in ingegneria civile strutturale e geotecnica

Costruzioni in zona sismica

Terremoti e norma sismica

16 ottobre 2012

Aurelio Ghersi

I terremoti

Cosa sono?

Quali effetti producono?

Qual è l'obiettivo della
progettazione antisismica?

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

Classificazione dei terremoti
e indicazioni della normativa

Classificazione dei terremoti

Nel passato:

Scale di intensità empiriche, basate sugli effetti:

- MM = Mercalli modificata
- MCS = Mercalli-Cancani-Sieberg
- MSK = Medvedev-Sponheur-Karnik

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(*), incluse fenditure. Rotture di comignoli deboli situati sul colmo dei tetti. Caduta di intonaci, mattoni, pietre, tegole, cornicioni (anche di parapetti isolati e ornamenti architettonici). Qualche lesione a murature tipo C(*). Formazione di onde sugli specchi d'acqua; intorbidamento di acque. Piccoli smottamenti e scavarnamenti in depositi di sabbia e ghiaia. Forte suono di campane. Danni a canali d'irrigazione rivestiti.	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. Disalveamento delle acque di canali, fiumi, laghi ecc. Traslazione orizzontale di sabbie e argille sulle spiagge e su regioni piane. Rotaie debolmente deviate.
II	Percepito da persone in riposo, nei piani superiori delle case o in posizione favorevole			XI	Rotaie 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.			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 colpisca le pareti. Oscillazione di automezzi fermi. Movimento di porte e finestre. Tintinnio di vetri. Vibrazione di vasellami. Nello stadio superiore del IV, scricchiolio di pareti e di strutture in legname.	VIII	Risentito nella guida di automezzi. Danni a murature tipo C(*), crolli parziali. Alcuni danni a murature tipo B(*), non tipo A(*). Caduta di stucchi e di alcune pareti in muratura. Rotazione e caduta di camini, monumenti, torri, serbatoi elevati. Costruzioni con strutture in legname smosse 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.	(*)	A = Buon manufatto, legato insieme con ferri, calcestruzzo ecc., progettato per resistere a forze laterali. B = Buon manufatto con malta; rinforzato, ma non destinato in particolare a resistere a forze laterali. C = Manufatto ordinarlo con malta, senza tiranti agli angoli né rinforzi. 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 taluni 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 passe di orologi a pendolo.	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 serbatoi. Rottura di tubazioni sotterranee. Rilevanti crepacci nel terreno. Nelle aree alluvionali espulsione di sabbie e fango, formazione di crateri di sabbia.		
VI	Sentito da tutti. Spavento e fuga all'esterno. Barcollare di persone in moto. Rottura di vetrine, piatti, vetrerie. Caduta dagli scaffali di ninnoli, libri ecc. e di quadri dalle pareti. Spostamento o rotazione di mobili. Screpolature di intonaci deboli e di murature tipo D(*). Suono di campanelli (di chiese, di scuole). Stormire di alberi e di cespugli.				

Classificazione dei terremoti

Nel passato:

Scale di intensità empiriche, basate sugli effetti:

- MM = Mercalli modificata
- MCS = Mercalli-Cancani-Sieberg
- MSK = Medvedev-Sponheur-Karnik

Oggi:

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

- M = Magnitudo Richter

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 $\geq M$:

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

Eventi sismici, classificazione sismica e indicazioni della normativa

- La normativa sismica si è evoluta nel tempo, quasi sempre con nuove norme emesse subito dopo un forte evento sismico

Evento sismico



Nuova classificazione delle zone sismiche



Nuova norme sismiche

Prime norme sismiche in Italia

Fine '700 ed '800:

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

Classificazione sismica

1909

Terremoto: Messina (1908) – 80000 morti e 600 miliardi di lire (di allora) di danno



**Regio Decreto n. 193/1909,
Regio Decreto n. 542/1909**



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):

C1

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"

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

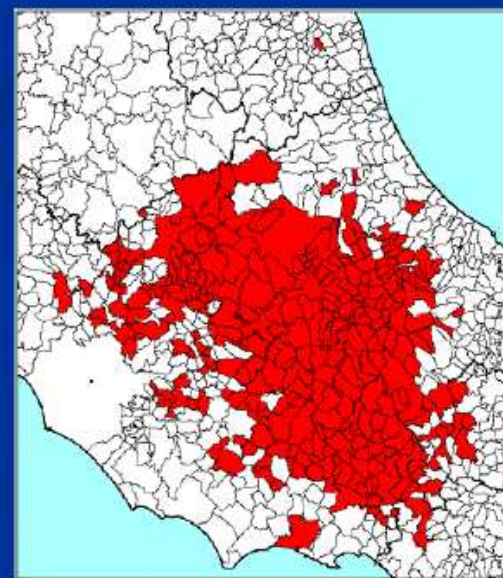
Classificazione sismica

1909-1915

Terremoto: area etnea (1911), Avezzano (1915) – oltre 30000 morti



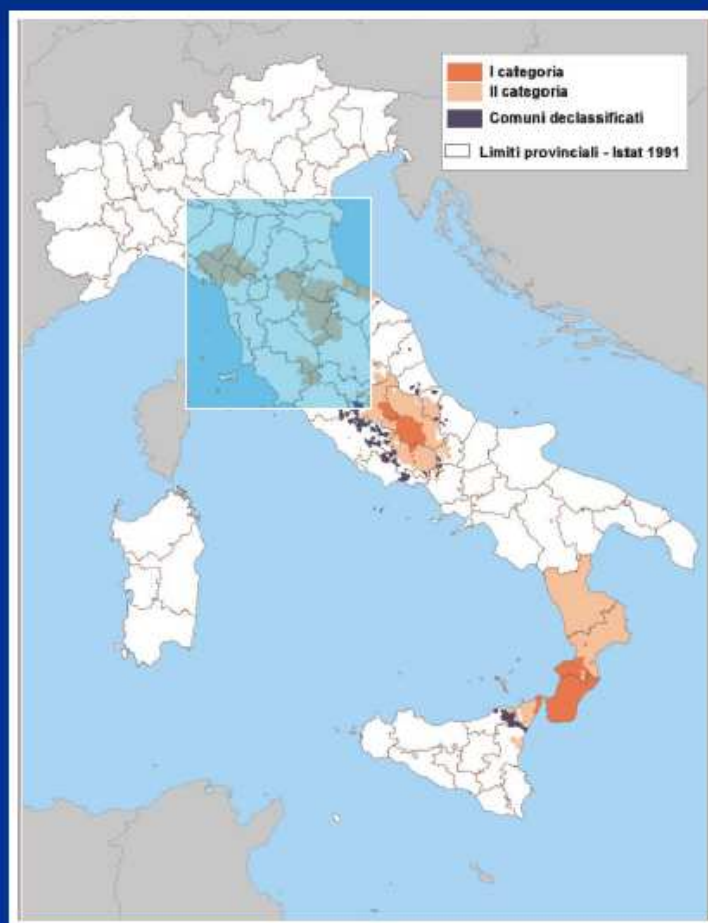
Regio Decreto n. 573/1915



Classificazione sismica

1916-1920

Terremoto: Alto Adriatico, Riminese (1916), Val Tiberina (1917),
Appennino Romagnolo (1918), Mugello, Toscana Merid. (1919), Garfagnana (1920)



Decreto Legge n. 1526/1916

Regio Decreto n. 2089/1924

Regio Decreto n. 431/1927



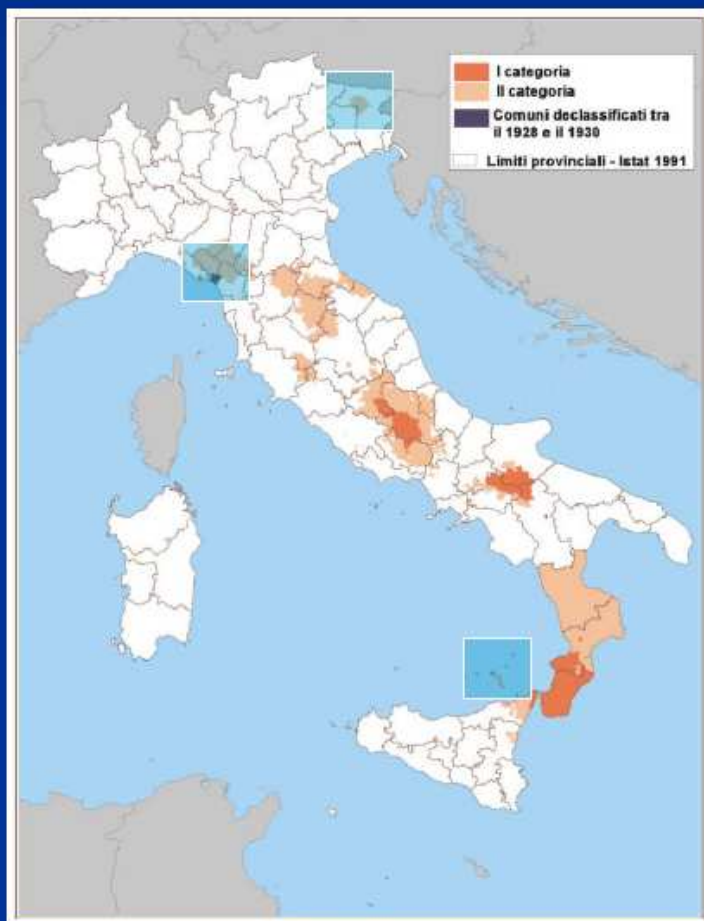
**1^a classificazione
sismica**

viene introdotta la
seconda zona sismica

Classificazione sismica

1927-1930

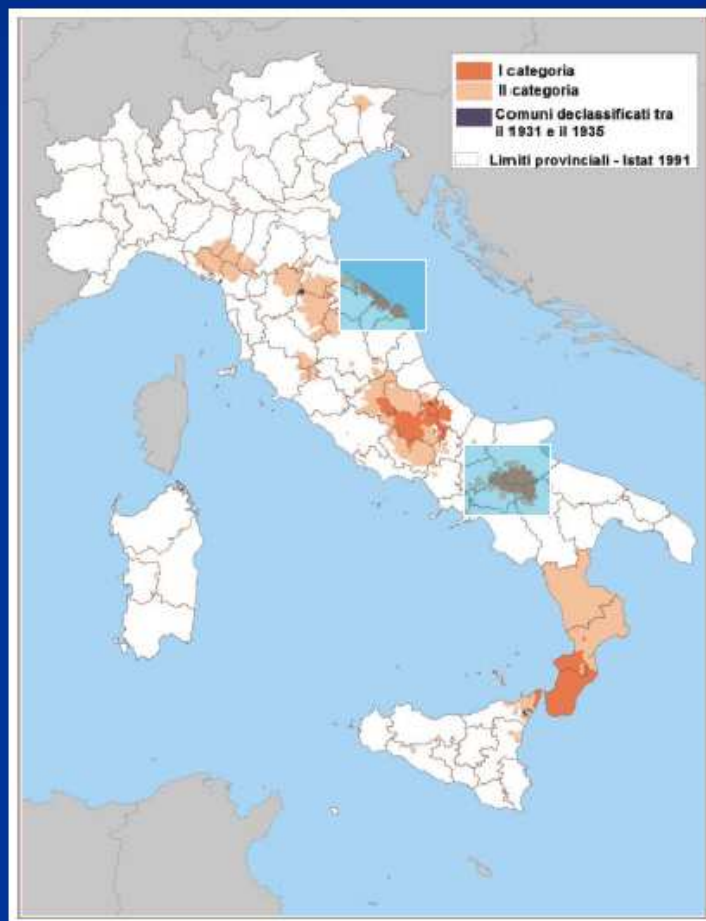
Terremoto: Colli alban (1927), Friuli (1928), Bolognese(1929)



Classificazione sismica

1930-1935

Terremoto: Irpinia, Marche Settentrionali (1930), Monte Baldo (1932), Maiella (1933)



Regio Decreto n. 640/1935

Principali norme del '900

R.D. 25 marzo 1935, n. 640

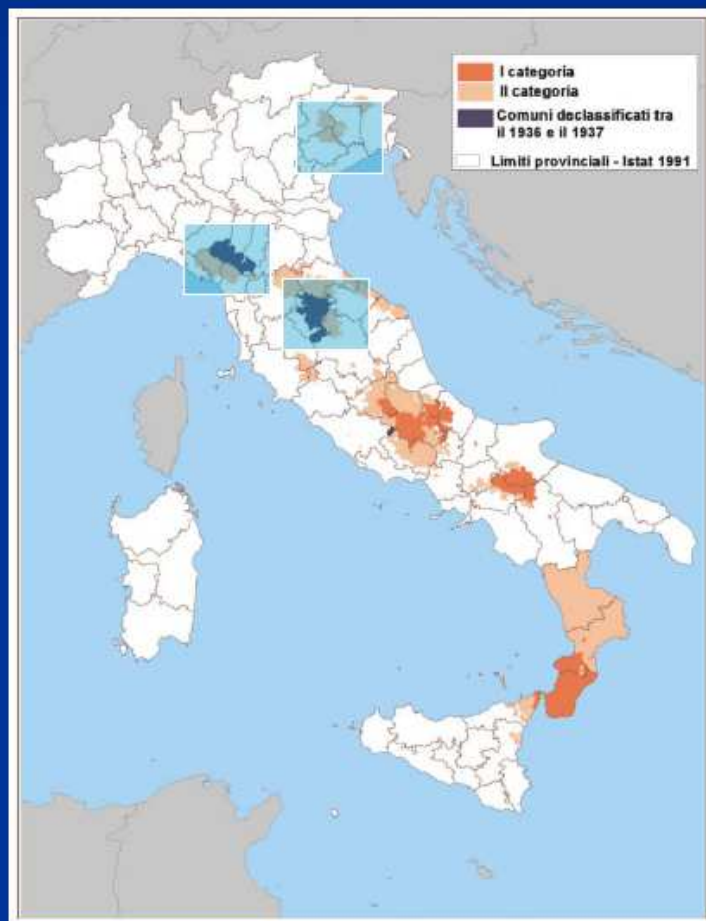
Impone azioni di entità analoga a quelle utilizzate fino a fine XX secolo (ma con accelerazione uguale a tutti i piani)

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

Classificazione sismica

1935-1937

Terremoto: Alpago-Cansiglio (1936)



Regio Decreto Legge n. 2125/1937

Classificazione sismica

1937-1962

Terremoto: Golfo di Palermo (1940), Marche Merid. e Abruzzo (1943), Calabria Centrale (1947), Carnia (1959), Valle della Velina (1961), Irpinia (1962)



1937-1942 Tranne l'inclusione nelle liste dei Comuni delle province di Ascoli Piceno e Teramo si declassifica

Legge n. 1684/1962

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)

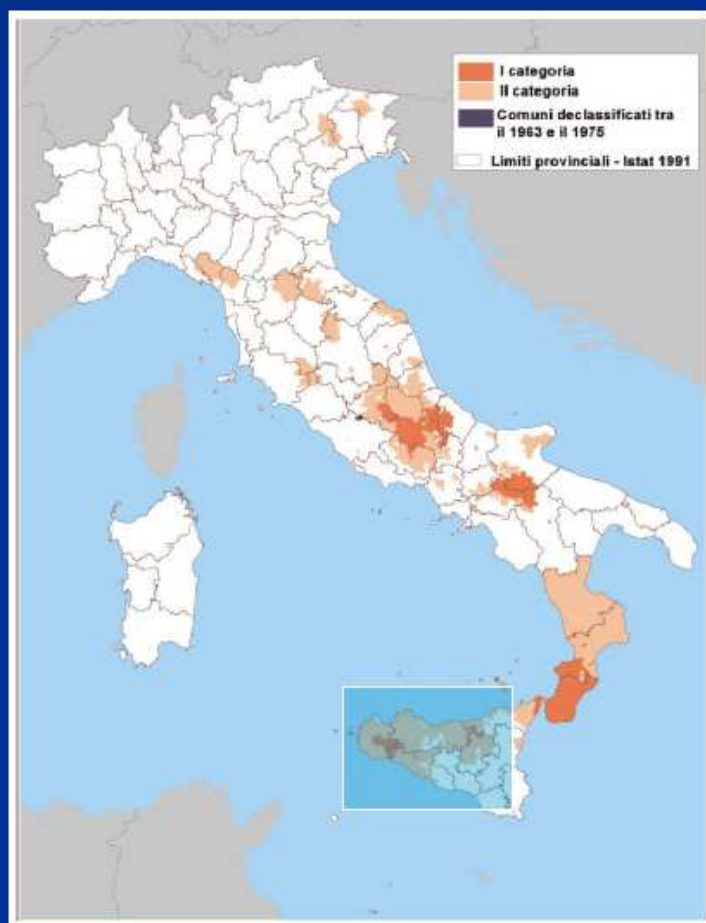
Impone l'uso di cordoli in c.a. per edifici in muratura

Legge 25 novembre 1962, n. 1684

Classificazione sismica

1962-1975

Terremoto: Monti Nebrodi (1967), Valle del Belice (1968), Tuscania (1971)



Legge n. 64/1974

Decreto Ministeriale n. 40/1975

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"



C2

Consente l'analisi dinamica (modale)

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

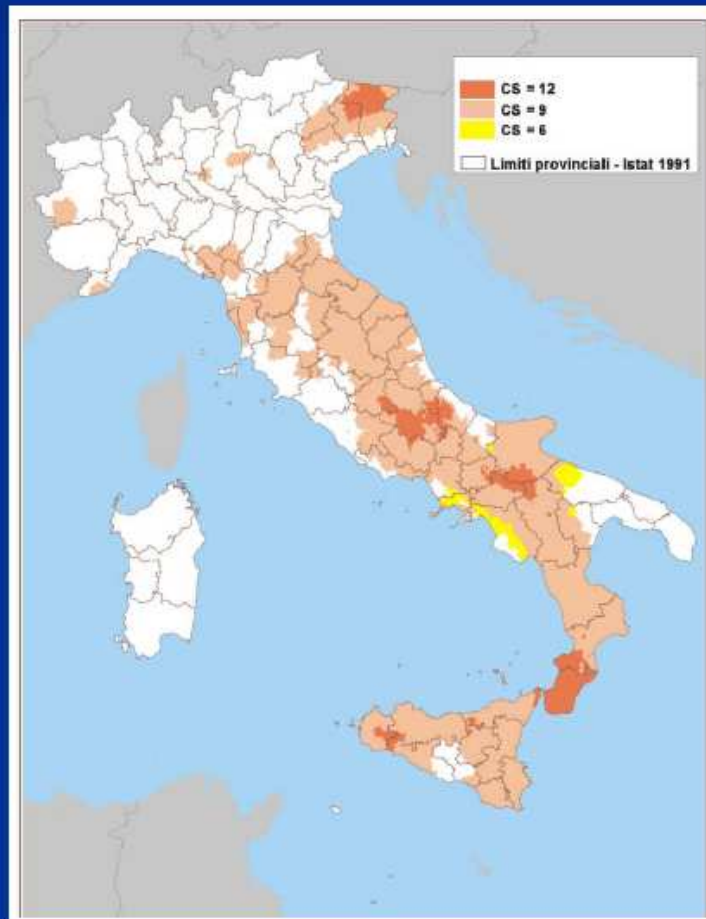
Bisogna tener conto del differente comportamento delle strutture oltre il limite elastico (con "coefficienti di struttura")

C2

Classificazione sismica

1976-1984

Terremoto: Friuli (1976), Calabria Merid., Golfo di Patti (1978), Valnerina (1979), Irpinia-Basilicata (1980)



Decreto Ministeriale n. 515/1981

Decreto Ministeriale n. 35/1984



viene introdotta la
terza zona sismica

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

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

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

Problematiche:

per terremoti con basso periodo di ritorno

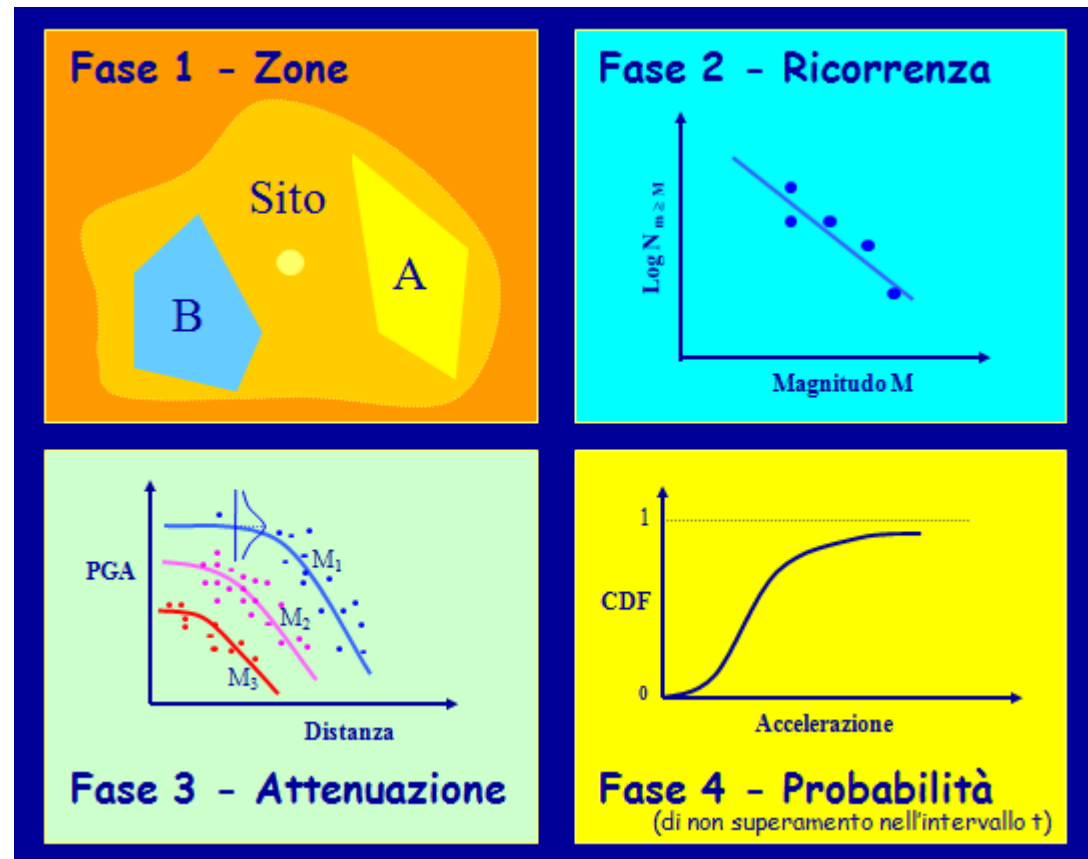
Poiché questi avvengono con frequenza,
è importante evitare danni eccessivi
ed interruzioni troppo lunghe dell'uso



Evoluzione della classificazione sismica anni '80 e '90

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

Partendo dallo studio
geologico, dall'individuazione
delle faglie, dalla ricorrenza
degli eventi sismici e dalla
attenuazione delle onde
sismiche con la distanza si
valuta la probabilità di avere
assegnate accelerazioni in
ciascun sito



Classificazione sismica, oggi

Valutazione probabilistica dell'intensità dei terremoti

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

oppure

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

Esempio: periodo di ritorno di 475 anni

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

È fornita dalla relazione:

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

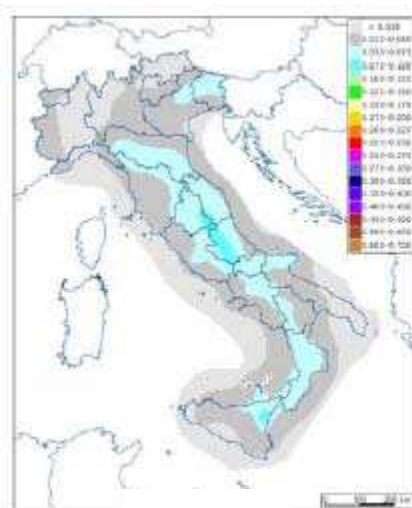
Esempio:

probabilità di superamento del 10% in 50 anni

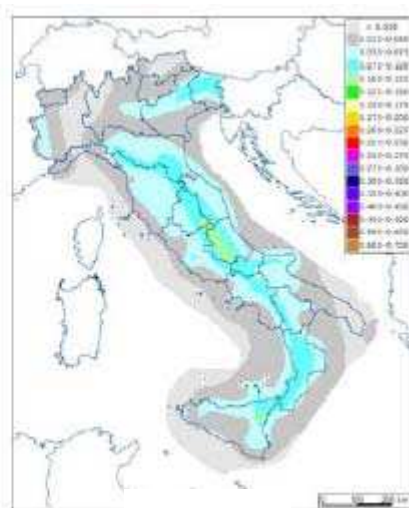
Il periodo di ritorno è:

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

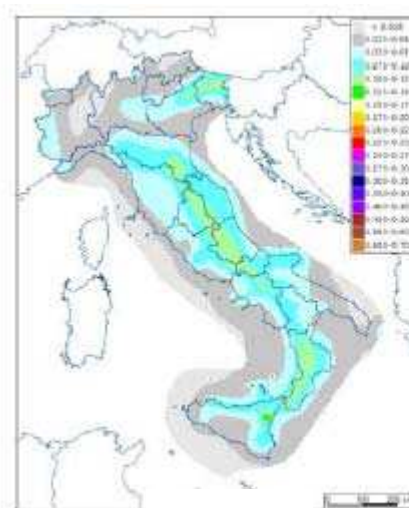
Carte di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni



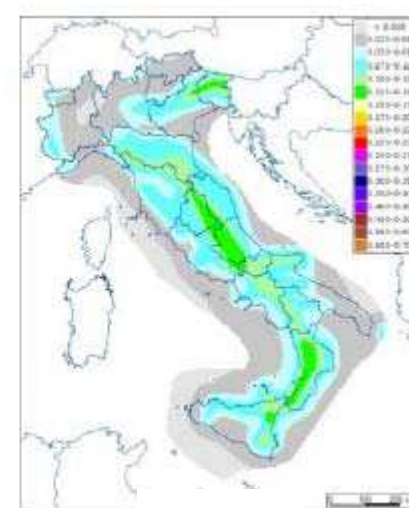
81%



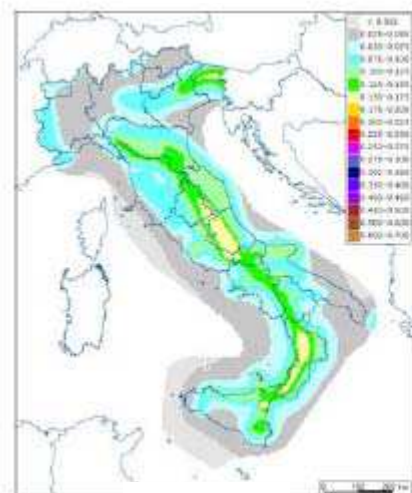
63%



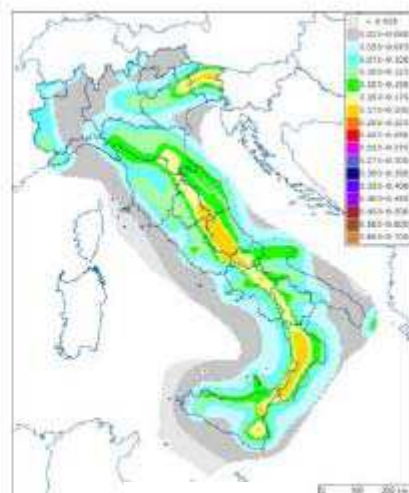
50%



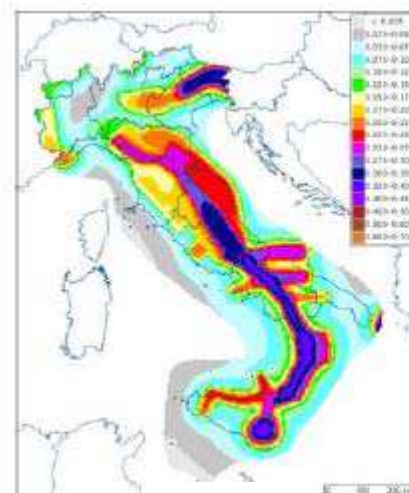
39%



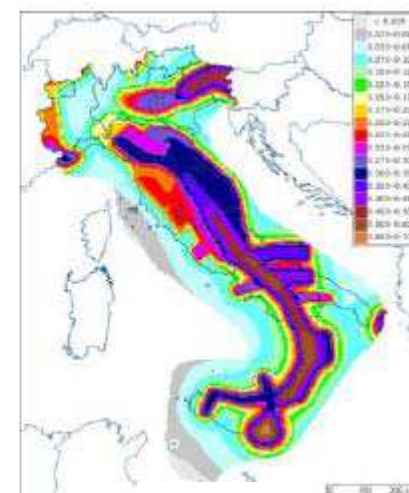
30%



22%



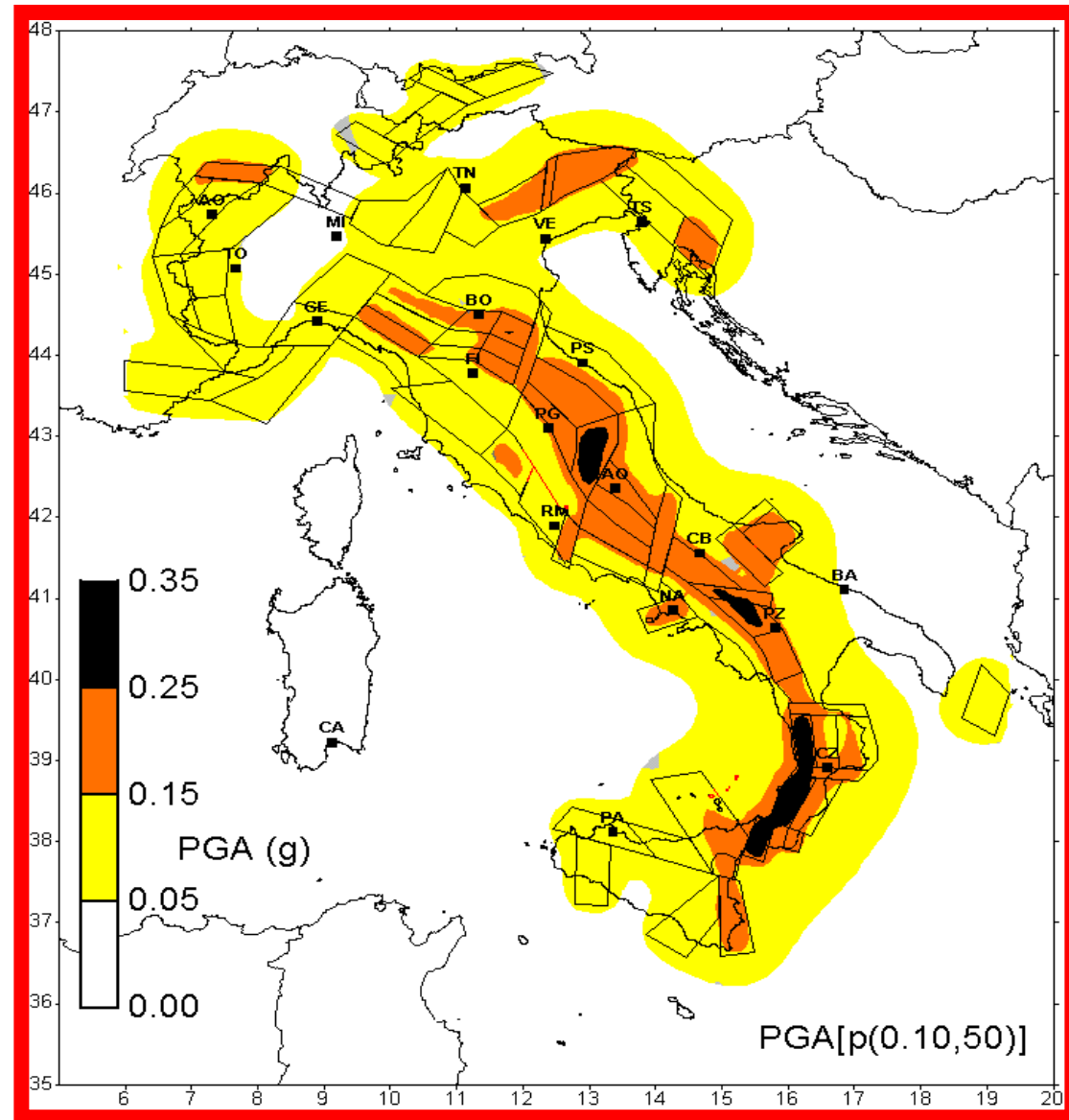
5%



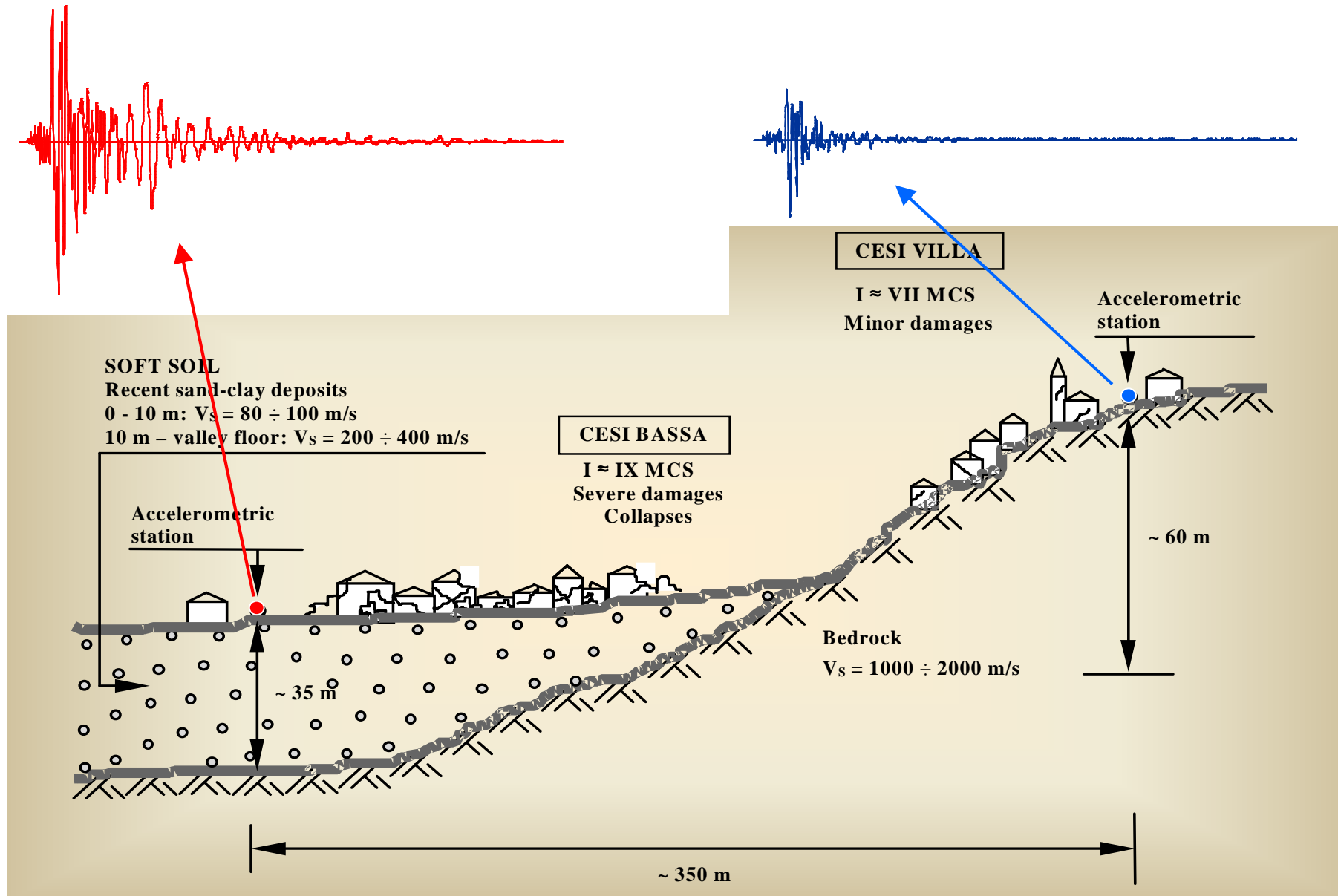
2%

Analisi di pericolosità

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



Influenza del terreno e microzonazione



Classificazione sismica

1984-2003

Terremoto: Umbro-Marchigiano 1997, zona etnea (Santa Venerina) 2001, Molise (San Giuliano di Puglia) 2002

Dal 2003 partono una serie di norme,
che modificano radicalmente il
panorama normativo

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"



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



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
(per edifici ordinari)

Accelerazione di picco

L'intensità sismica è espressa come accelerazione di picco (PGA, peak ground acceleration)

L'accelerazione di picco dipende da:

- Sito (collocazione geografica, tipo di terreno, ecc.)
- Periodo di ritorno dell'evento che interessa

Vita di riferimento V_R

L'intensità sismica è definita in funzione del periodo di ritorno T_r del sisma, che è legato alla vita di riferimento.

La vita di riferimento 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

Vita nominale \ Classe d'uso	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

Normativa europea considerazioni

L'Eurocodice 8 prevede solo due requisiti:

- Requisito di non-collasso
 - Equivale a SLV
 - È riferito ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni, ovvero a un periodo di ritorno di 475 anni
- Requisito di limitazione del danno
 - Equivale a SLD
 - È riferito ad una probabilità di superamento del 10% in 10 anni, ovvero a un periodo di ritorno di 95 anni

La differenziazione in base all'uso viene fatta mediante un coefficiente di importanza γ_I