

**Ordine degli Architetti Paesaggisti e Conservatori della Provincia di Bergamo**  
**RISCHIO SISMICO E SICUREZZA DELLE COSTRUZIONI IN LOMBARDIA**  
**NOZIONI RIFLESSIONI E QUESTIONI APERTE**

# **PERICOLOSITA' SISMICA E GEOLOGIA: ASPETTI FISICI E NORMATIVI**

Massimo Compagnoni

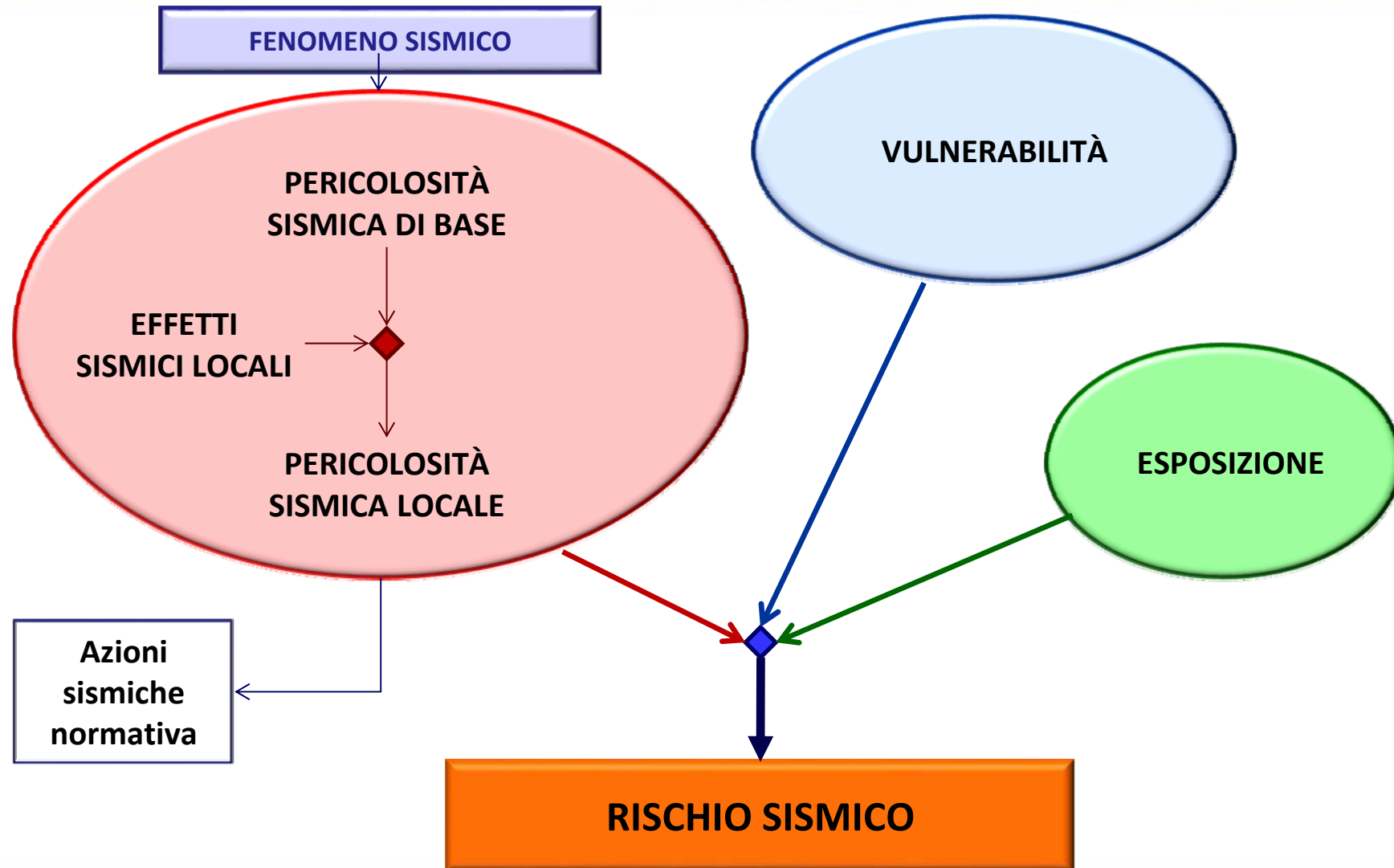
**Auditorio Modernissimo, Nembro (BG) – 24 febbraio 2017**



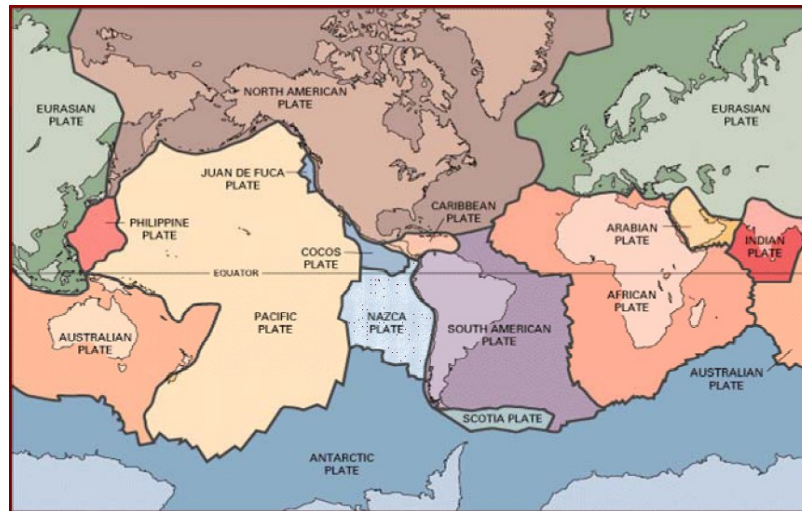
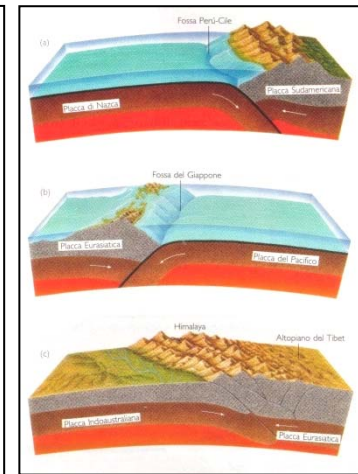
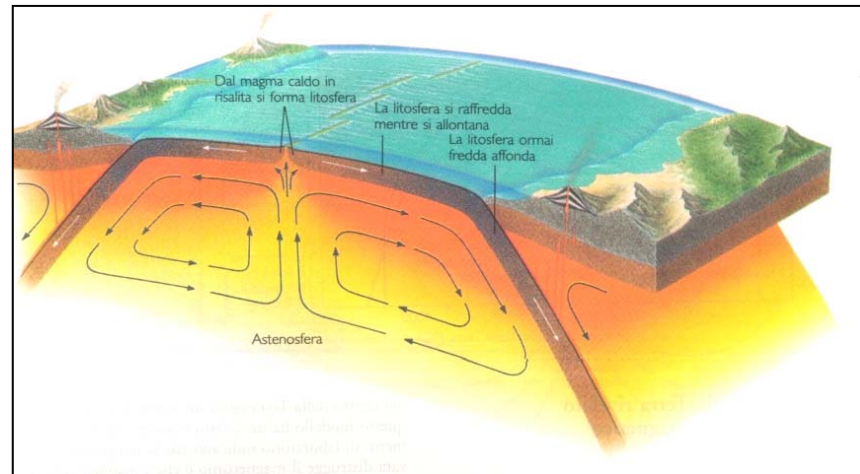
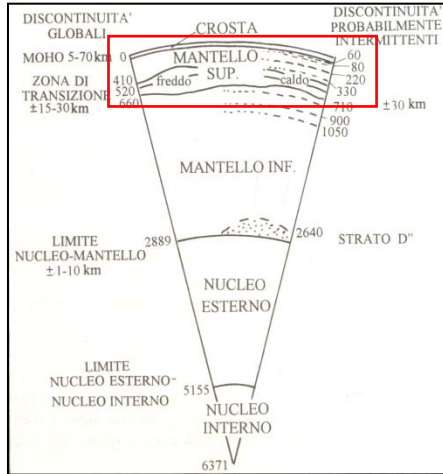
POLITECNICO MILANO 1863

# INTRODUZIONE AL CONCETTO DI RISCHIO SISMICO

1/36



# FENOMENO FISICO DEL TERREMOTO (1)



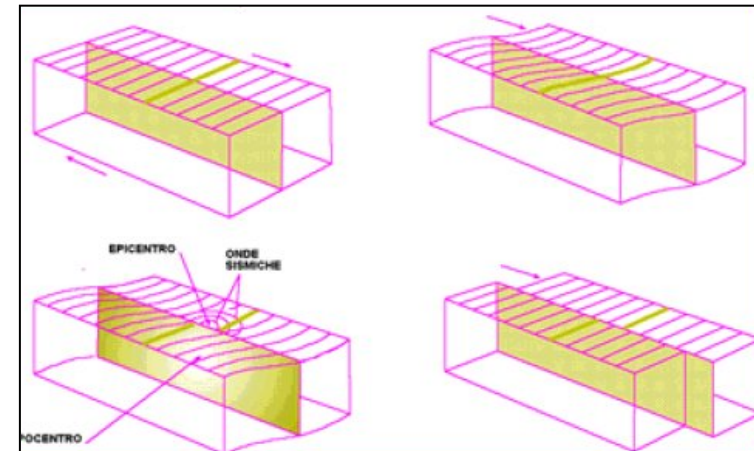
## Flusso geotermico

Liberazione del calore interno che causa la convezione nel mantello motore della tettonica a placche – controlla la velocità e l'ubicazione delle deformazioni crostali

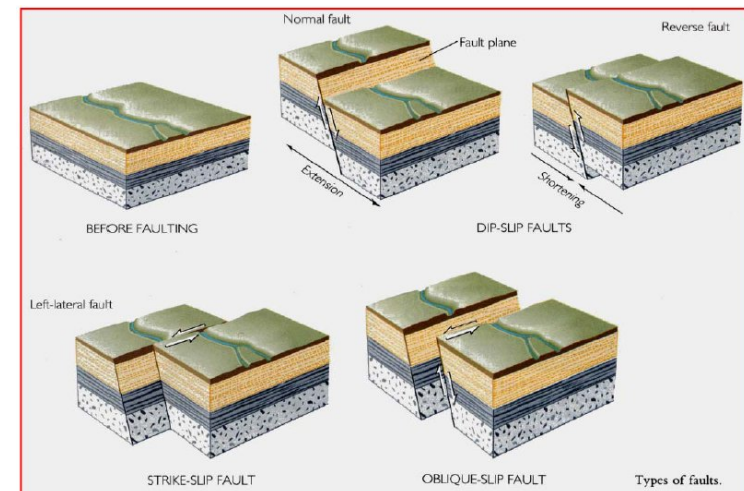


# FENOMENO FISICO DEL TERREMOTO (2)

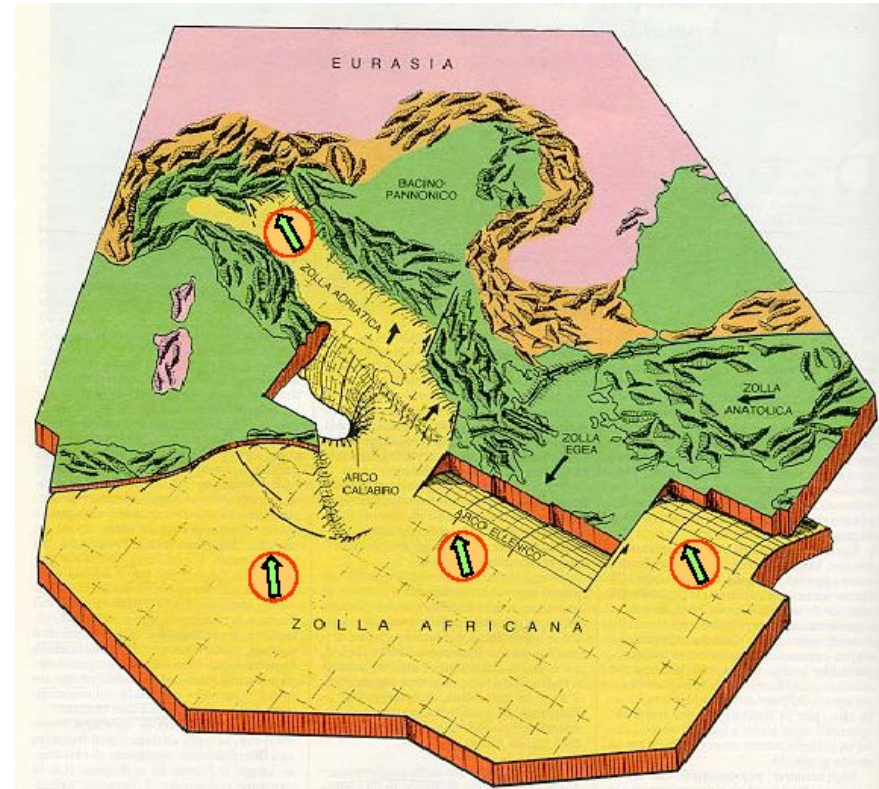
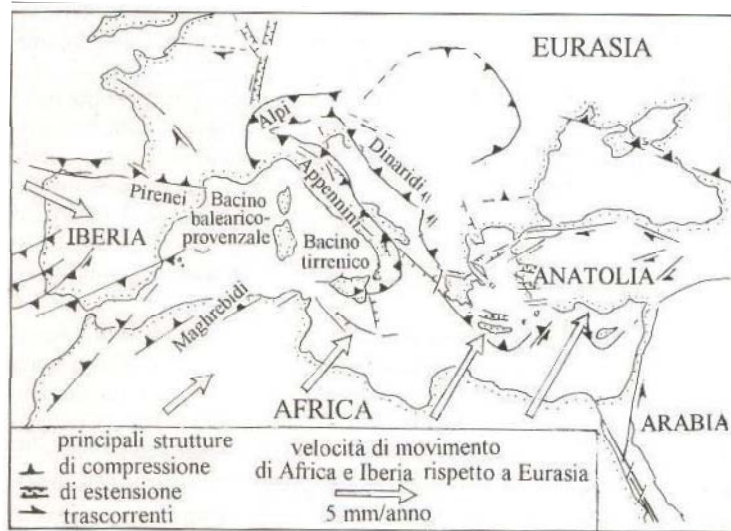
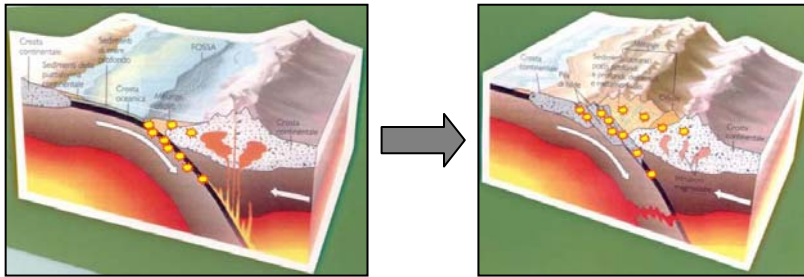
Le aree sismicamente attive sono sottoposte a campi di stress variabili che inducono un accumulo di deformazione: quando questa è tale da vincere la resistenza delle rocce si genera rottura nel punto più debole la quale si sviluppa fino al raggiungimento di una nuova posizione di equilibrio; la deformazione permanente “incassata” è massima in vicinanza della rottura e diminuisce allontanandosi – il riequilibrio delle strutture è detto RIMBALZO ELASTICO



I punti di maggior debolezza si collocano in corrispondenza di piani di rottura detti “faglie” ove si verifica movimento reciproco tra masse rocciose



# MODELLO GEODINAMICO PENISOLA ITALIANA

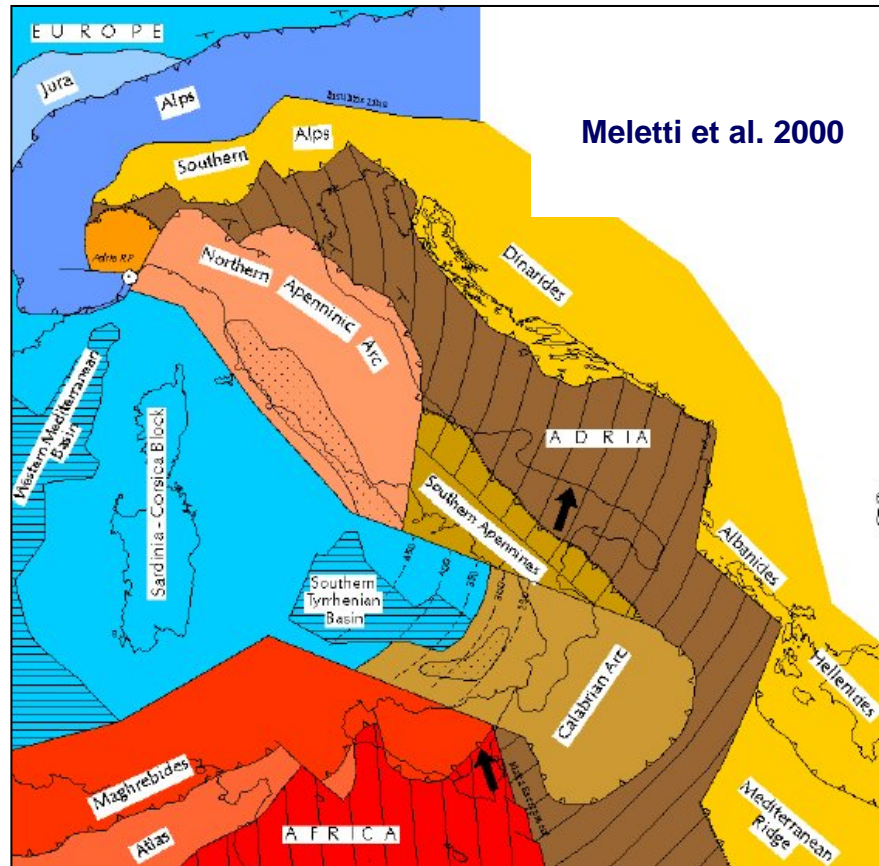


Da Mantovani, 1991 (modificata)

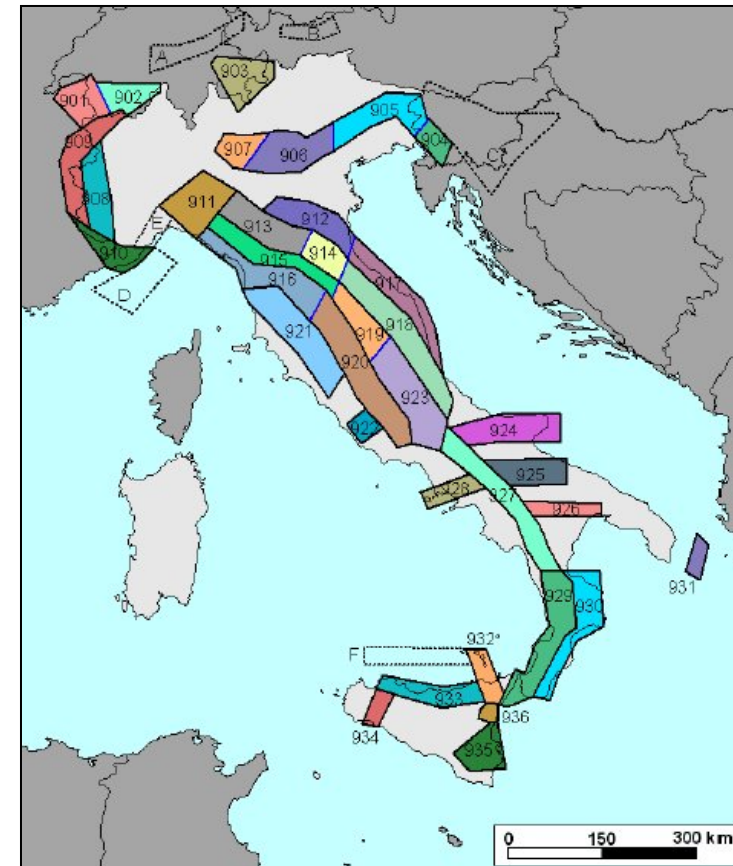


# MODELLO SISMOGENETICO PENISOLA ITALIANA

## MODELLO CINEMATICO



## ZONAZIONE SISMOGENETICA ZS9



### ZONA SISMOGENETICA:

proiezione in superficie delle faglie maestre e delle faglie minori ad esse associate che formano in una certa area un sistema attivo cinematicamente omogeneo capace di generare terremoti (Meletti *et al.* 2000).

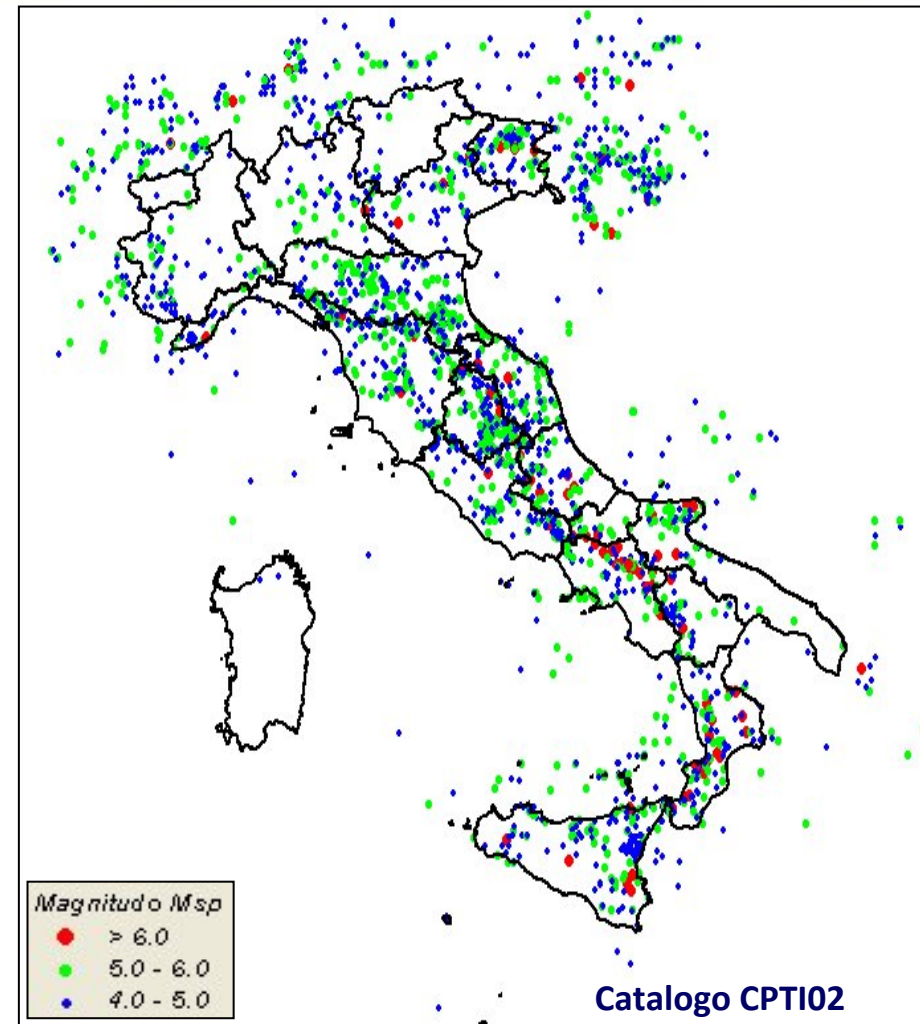


# SISMICITA' ITALIANA – CATALOGO SISMICO

## Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI02:

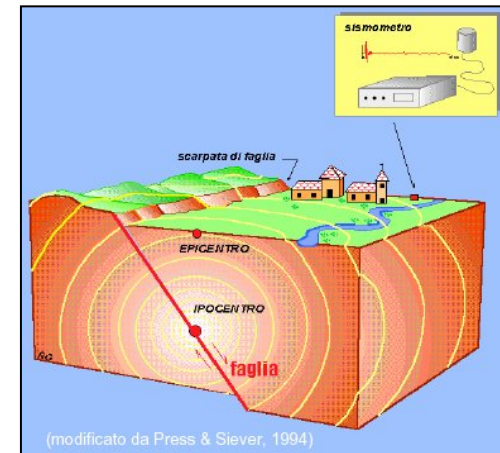
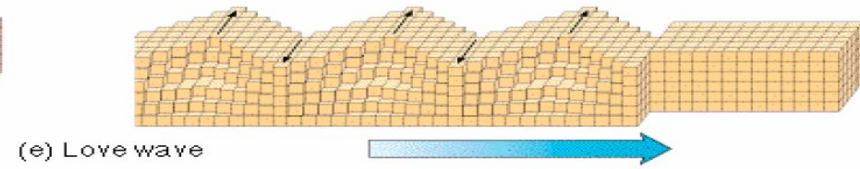
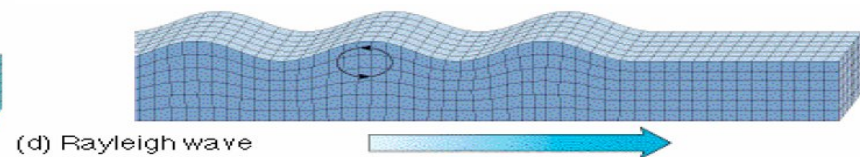
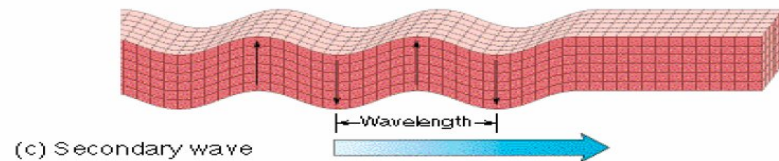
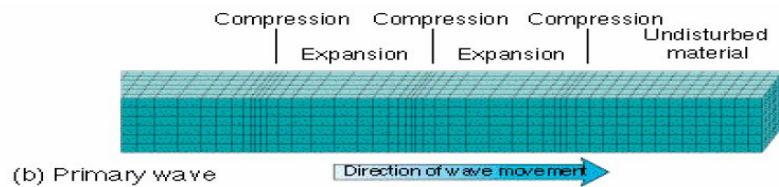
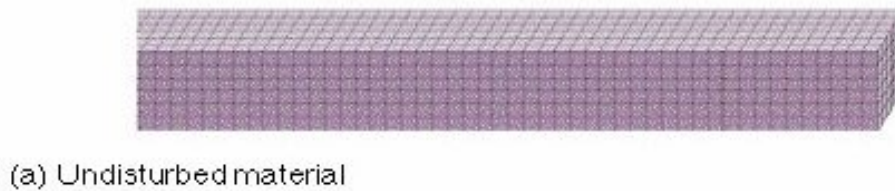
Il catalogo contiene solo eventi ritenuti “principali” secondo una finestra spazio-temporale di 90 giorni e 30 km, con Intensità Macrosismica  $I_0 \geq 5-6$  o  $M_s \geq 4.0$ , ad eccezione dell'area Etnea per la quale è stata usata una soglia più bassa (3.4).

In continuo aggiornamento contiene 2550 eventi fino al 2002.



# FENOMENO FISICO DEL TERREMOTO (3)

SISMA: Vibrazione del suolo prodotta dalla propagazione delle onde sismiche generatesi per liberazione dell'energia elastica in occasione della rottura di masse rocciose deformate sottoposte a campi di stress



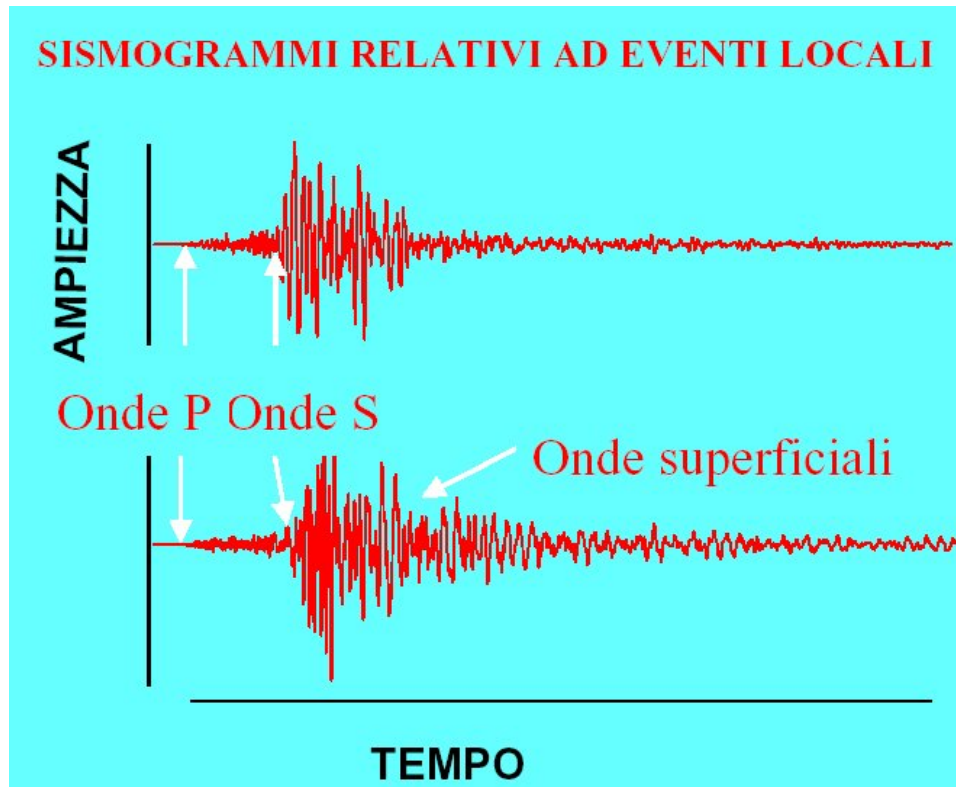
© 1995 West Publishing Company





# FENOMENO FISICO DEL TERREMOTO (4)

Il primo passo per la conoscenza del fenomeno è la registrazione attraverso strumenti sempre più efficienti



**LOCALIZZAZIONE**

**MISURAZIONE ENTITA'**

**MODELLAZIONE**

In assenza di registrazioni di un evento sismico l'unica azione possibile è quella di misurarne gli effetti sull'ambiente naturale ed antropico



# LA RETE NAZIONALE - Velocimetrica



Esempio di stazione sismica RSN

RSN collegate in tempo reale 24h con il centro operativo INGV a Roma:  
conta più di 350 stazioni comprese reti collegate



# LA RETE NAZIONALE - Accelerometrica



TOTALE 1210

215 RETI STRANIERE - 995 RETI NAZIONALI

**19 Rete Basilicata (UNIBAS)**

**15 Rete Enea**

**3 Rete Italia Occidentale (di cui 1 permanente)**

**637 Rete DPC (di cui 528 permanenti)**

**227 Rete INGV**

**23 Rete Irpinia**

**7 Rete Mediterraneo INGV**

**17 Rete OGS**

**20 Rete Friuli Venezia Giulia Università Trieste**

**8 Rete Provinciale Trentino**

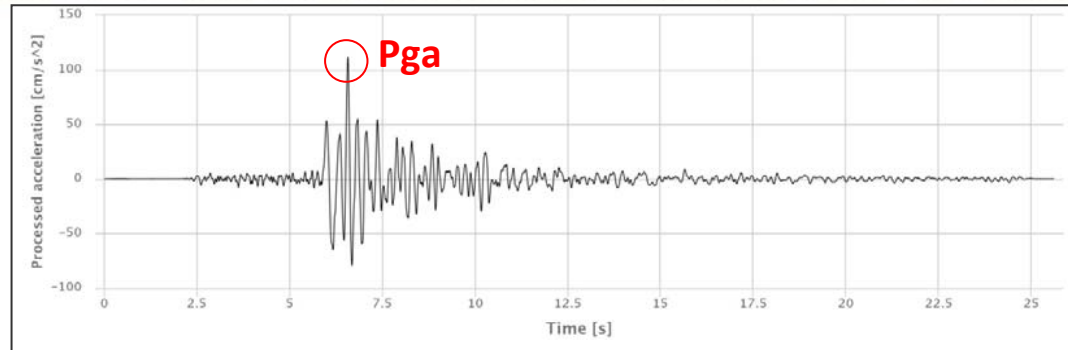
**16 Rete sperimentale Emilia INGV**

**3 Rete Valle d'Aosta (SISMOVALP)**

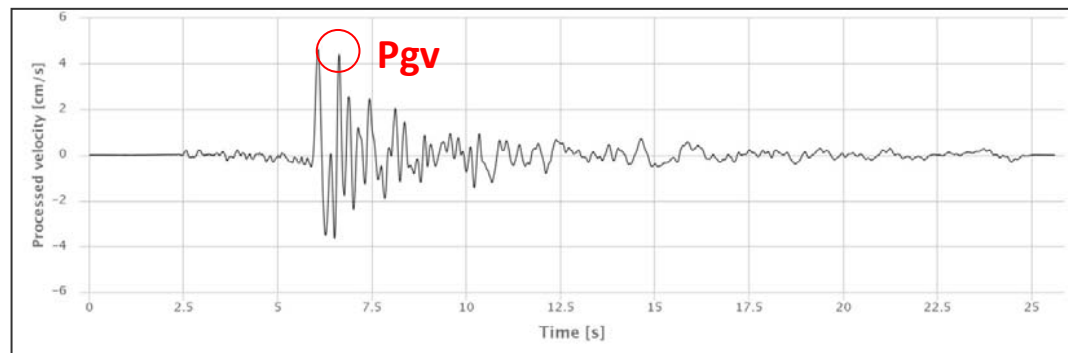


Stazione ASSISI Dist. Epicentrale 24.2 km  
Componente W-E

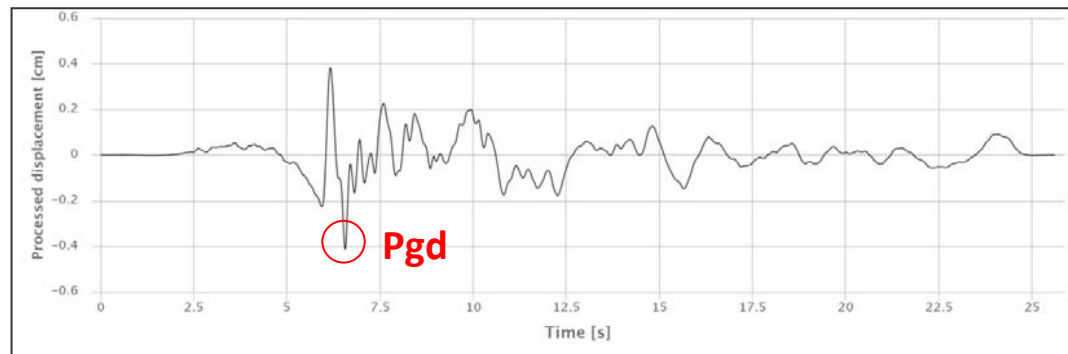
ACCELEROGRAMMA



VELOCIGRAMMA



SISMOGRAMMA



# LA MISURAZIONE

## MAGNITUDO

Misura indirettamente l'energia liberata da un terremoto attraverso il rapporto tra la grandezza in esame e una grandezza campione ad essa omogenea misurate su scala logaritmica

$$M = \log (A/T) + f(D, h) + C_s + C_r$$

A = ampiezza della fase sismica in esame

T = periodo della fase sismica esaminata

f = correzione per distanza dall'epicentro (D) e profondità dell'ipocentro (h)

C<sub>s</sub> = correzione tipo di suolo

C<sub>r</sub> = correzione tipo di sorgente

## PARAMETRI CARATTERISTICI STRONG MOTION

**Intensità spettrale (m)**  $SI_{0.1-0.5}(PSV) = \int_{0.1}^{0.5} PSV(T, \xi) dT$

**Intensità di Arias (m/s)**  $I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt$

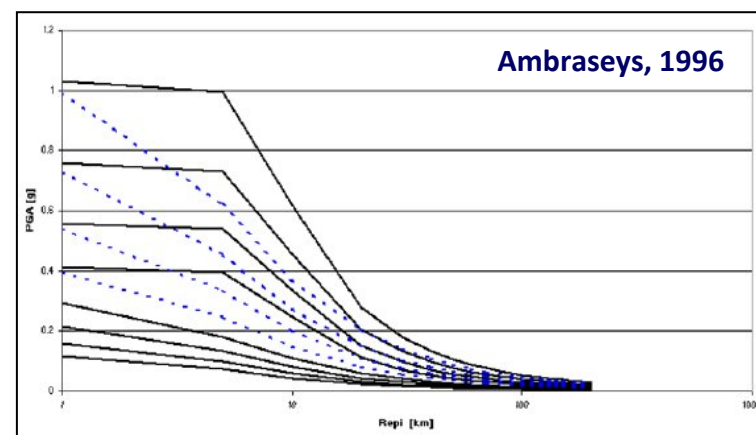
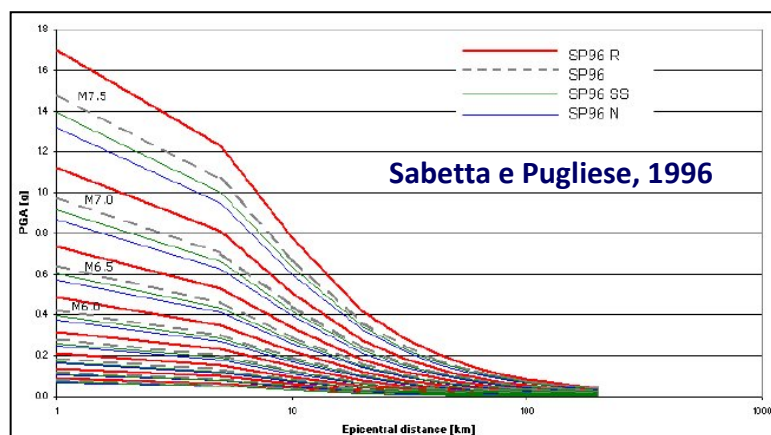
**Potenziale distruttivo (m)**  $p_d = \frac{2\pi}{2g} \frac{\int_0^{t_f} a^2(t) dt}{n.a.}$



# RELAZIONI DI ATTENUAZIONE DEL MOTO - GMPE

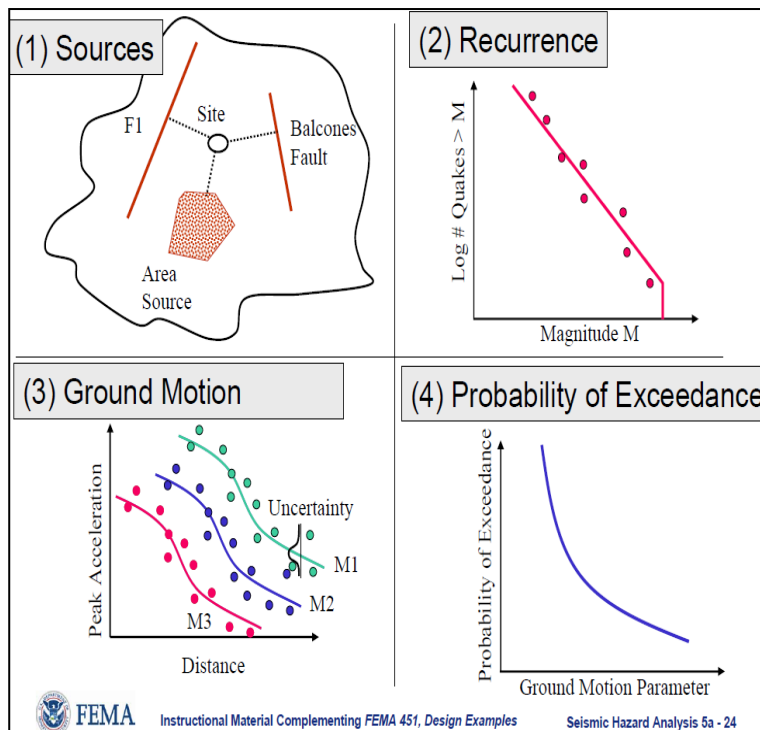
$$\log y = a + b M + c \log (R^2 + h^2)^{1/2} + e_1 S_1 + e_2 S_2 \mp \sigma$$

y	misura del moto sismico del suolo (il valore di picco dell'accelerazione (pga), della velocità (pgv), oppure dell'ordinata dello spettro di risposta per un prefissato valore del periodo proprio)
M	magnitudo del terremoto
R	misura della distanza sorgente-sito
h	termine di correlazione con la profondità dell'ipocentro
S1, S2	variabile "logica" che può valere 0 oppure 1, in funzione delle condizioni di sito (ad esempio 0 per siti rocciosi o rigidi, 1 per depositi alluvionali superficiali e/o profondi)
a, b, c, e1, e2	coefficienti numerici determinati mediante analisi di regressione
$\sigma$	scarto che serve per quantificare l'errore residuo e misurare la dispersione dei dati; considerando il risultato y dell'equazione si assume una distribuzione normale della variabile aleatoria a valore medio nullo per cui lo scarto $\sigma$ rappresenta l'errore associato al valor medio stimato tramite la correlazione



# ANALISI DI PERICOLOSITA' SISMICA NAZIONALE – MP04

**Livello di scuotimento** (entità del moto del suolo) che è **lecito attendersi** in una determinata area (senza considerare gli effetti locali).



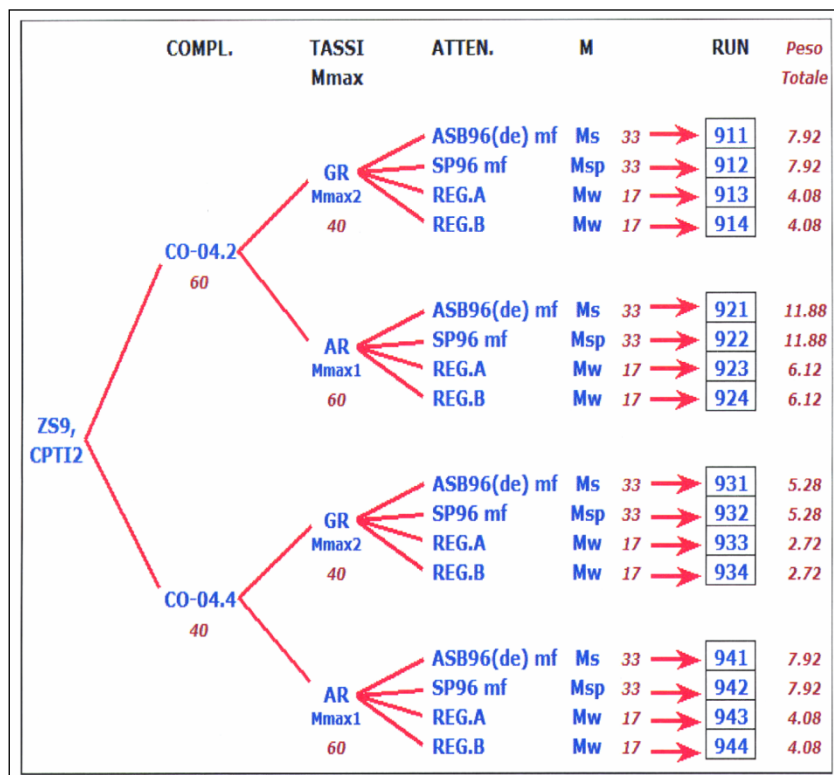
**Il metodo probabilistico standard** utilizzato per la valutazione della pericolosità sismica è quello originariamente proposto da Cornell (1968), definito delle zone sorgenti.

Gli eventi sono indipendenti tra loro e stazionari nel tempo e sono uniformemente distribuiti all'interno della zona sismogenetica, cioè i terremoti hanno la stessa probabilità di comparsa su tutta la zona e seguono la stessa legge di ricorrenza che è costante nel tempo e di tipo esponenziale, vale cioè la relazione di Gutenberg-Richter (1954):  $\log N(M) = a - b M$  tra numero annuo dei terremoti e magnitudo

Le diverse fasi di calcolo permettono di calcolare la probabilità di eccedenza  $p(i)$  che si verifichi un evento con intensità  $I > i$  in un assegnato intervallo di tempo  $\Delta t$ .



# ANALISI DI PERICOLOSITA' SISMICA NAZIONALE – MP04



L'albero logico utilizzato nell'analisi di pericolosità permette di esplorare le principali alternative di carattere epistemico esistenti per la definizione degli intervalli di completezza, definizione di  $M_{wmax}$ , tassi di sismicità e relazioni di attenuazione.

Si è scelto di utilizzare il parametro  $a_{max}$  con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, prendendo la mediana tra le 16 elaborazioni indipendenti con associato peso diverso.

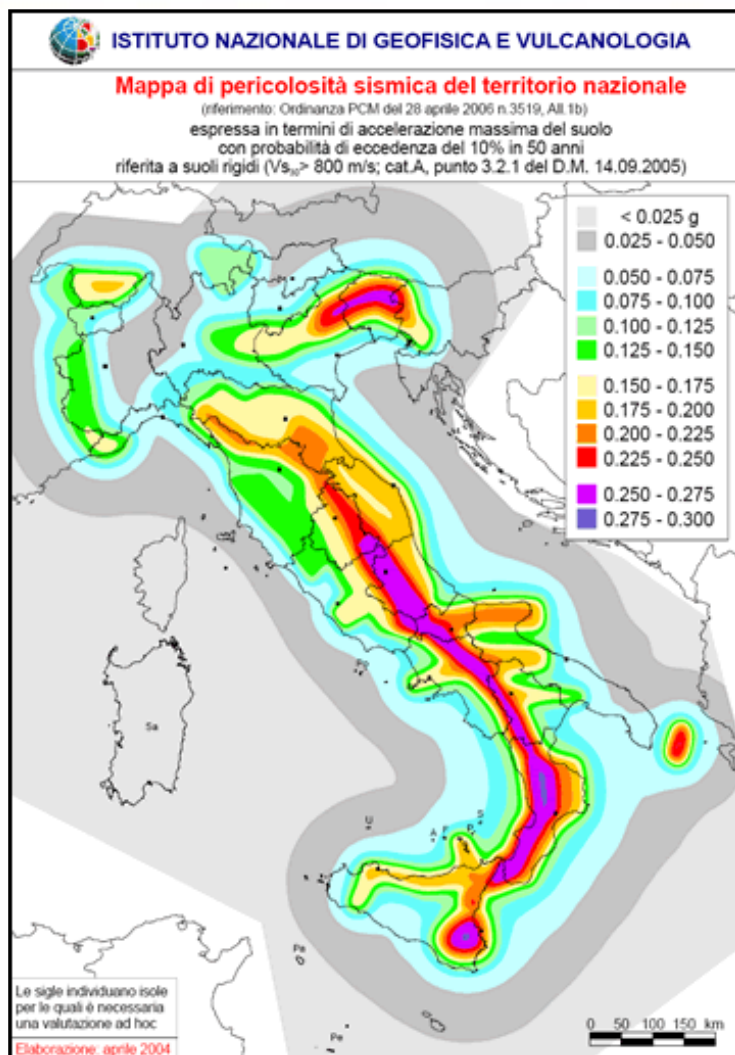
Id punto griglia	$a_{max}$ 16° percentile (g)	$a_{max}$ 50° percentile (g)	$a_{max}$ 84° percentile (g)
12053	0.1375	0.1483	0.1597

Il calcolo dell'indicatore di pericolosità è stato eseguito su una griglia di punti con passo 0.05°.

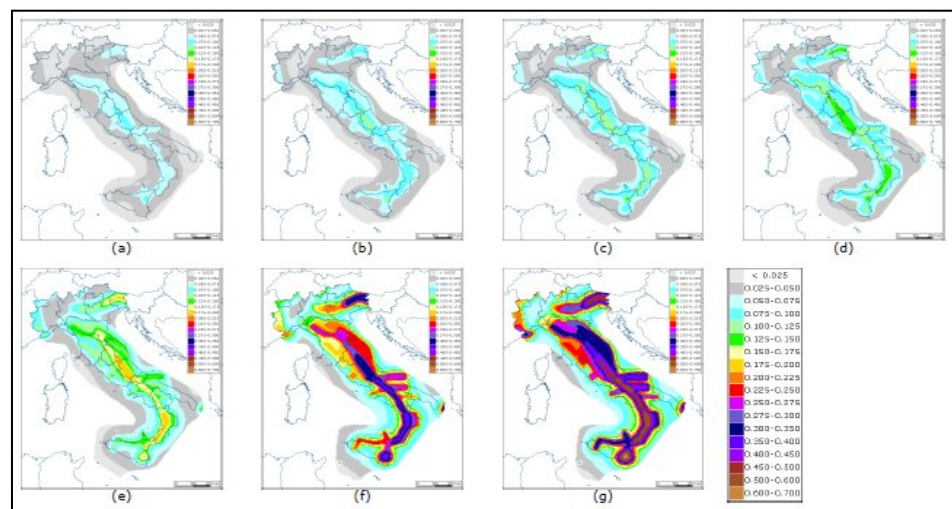




# PERICOLOSITA' PROBABILISTICA – elaborazioni 2006



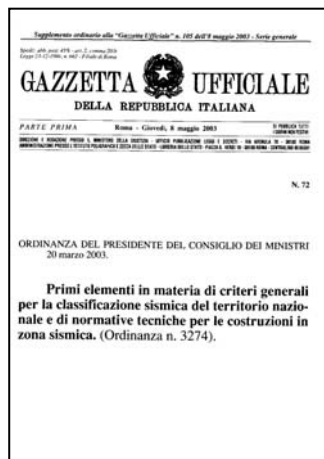
## Diversi tempi di ritorno



Calcolo della pericolosità sismica in termini di accelerazioni spettrali per i periodi 0.10 – 0.15 – 0.30 – 0.40 – 0.50 – 0.75 – 1.50 – 2.0 s attraverso l'utilizzo delle relazioni di attenuazione per le ordinate spettrali



# ANALISI DI PERICOLOSITA' SISMICA NAZIONALE – MP04



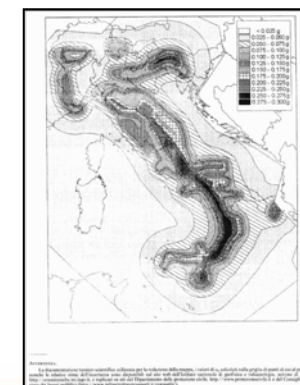
## O.P.C.M. 3274/2003

- entro 1 anno sarà predisposta una nuova mappa di riferimento a scala nazionale
- successivi aggiornamenti delle mappe di  $a_g$  dovranno avere luogo ogniqualvolta lo sviluppo delle conoscenze lo suggerisca, comunque ad intervalli temporali non superiori a 5 anni



## O.P.C.M. 3519/2006

- Ufficializzazione della nuova mappa di pericolosità sismica nazionale
- Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche

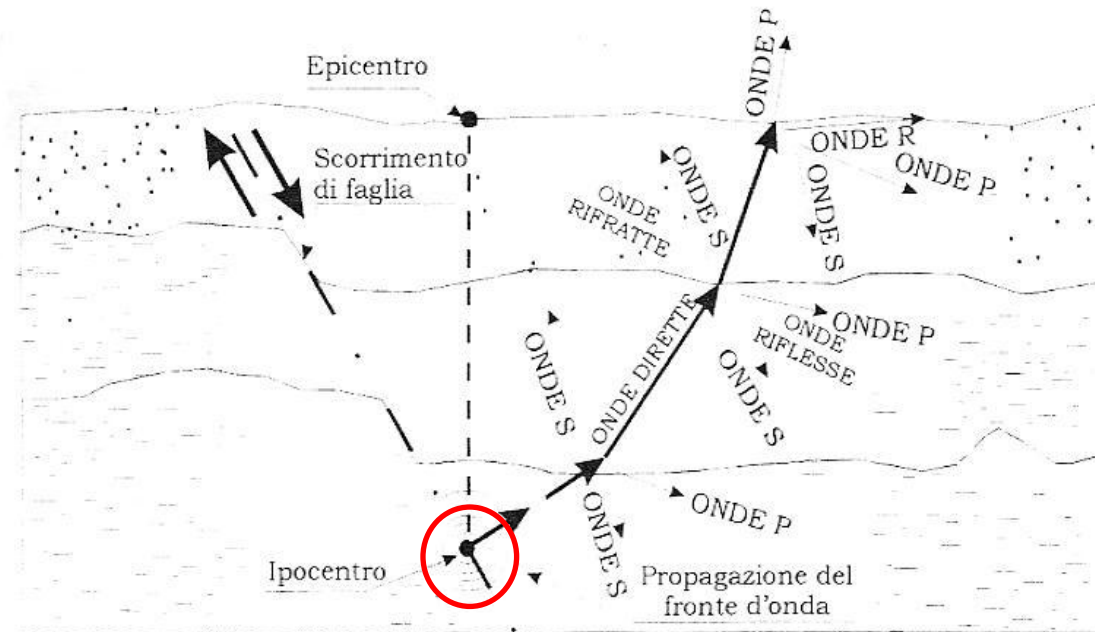


# EFFETTI SISMICI LOCALI

**SISMA**



liberazione di energia sotto forma di onde elastiche di volume



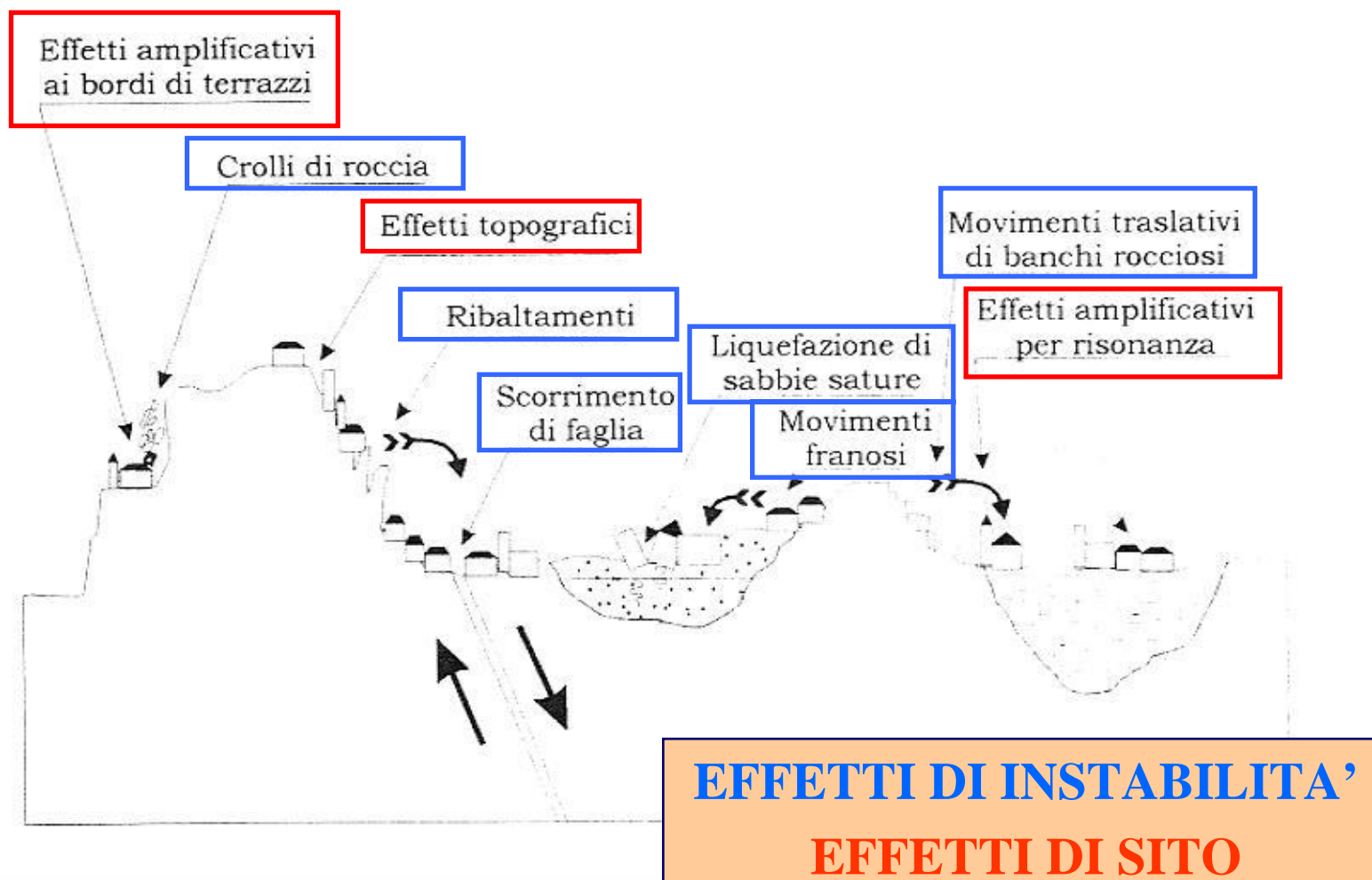
Fronti d'onda sferici:

- radiation damping (attenuazione geometrica)
- scattering damping (attenuazione legata ai fenomeni di riflessione e rifrazione)
- material damping (smorzamento interno dei materiali)



# EFFETTI SISMICI LOCALI

Tramite osservazione degli effetti prodotti da passati terremoti



# FAGLIAZIONE SUPERFICIALE



# FAGLIAZIONE SUPERFICIALE



## STUDI DI PALEOSISMOLOGIA



# FAGLIAZIONE SUPERFICIALE



è considerata **ATTIVA** una faglia che si è attivata almeno una volta negli ultimi 40000 anni (parte alta del Pleistocene Superiore-Olocene)

è considerata **CAPACE** una faglia attiva, il cui piano di rottura principale raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione del terreno

Zona di trasferimento: area ove manca la continuità fisica del piano di faglia ma può essere interessata da deformazioni secondarie cosismiche di tipo fragile (fratture, dislocazioni etc..) e/o plastico (piegamenti, rigonfiamenti etc..)



# FRATTURAZIONE SUPERFICIALE



TERREMOTO AQUILA 2009 – da report emergeo





# SPROFONDAMENTI - INSTABILITA' DI VERSANTE



TERREMOTO AQUILA 2009 - emerso



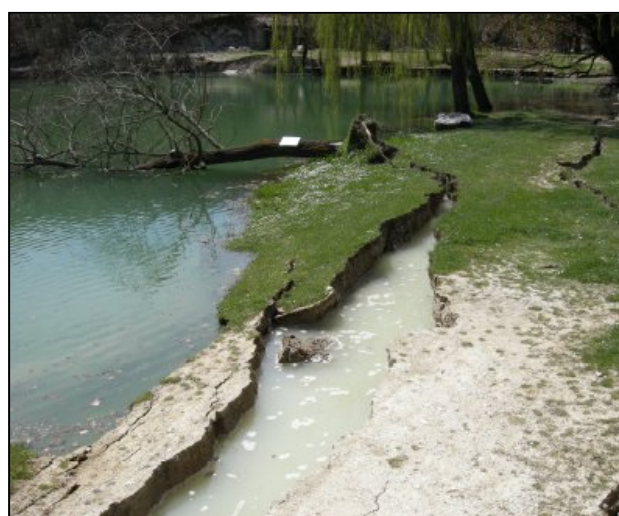
# INSTABILITA' DI VERSANTE – FRANE DI CROLLO



TERREMOTO AQUILA 2009



# ESPANDIMENTI LATERALI



TERREMOTO AQUILA 2009



# FENOMENI DI LIQUEFAZIONE



TERREMOTO EMILIA 2012



# NORMATIVA NAZIONALE – NTC2008

## A19 – CLASSIFICAZIONE DISPONIBILE PER IL SITO DA N.T.C.

dati esistenti     dati desunti dalla scheda

A19.a - VALUTAZIONE DELLA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO			S <sub>s</sub>
<input type="radio"/> A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di V <sub>s30</sub> superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m	V <sub>s30</sub> > 800 m/s	1.0
<input type="radio"/> B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V <sub>s30</sub> compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero N <sub>SPT30</sub> > 50 nei terreni a grana grossa e cu <sub>30</sub> > 250 kPa nei terreni a grana fina)	360 < V <sub>s30</sub> ≤ 800 m/s	1.0-1.2
<input type="radio"/> C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V <sub>s30</sub> compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero 15 < N <sub>SPT30</sub> < 50 nei terreni a grana grossa e 70 < cu <sub>30</sub> < 250 kPa nei terreni a grana fina)	180 < V <sub>s30</sub> ≤ 360 m/s	1.0-1.5
<input type="radio"/> D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V <sub>s30</sub> inferiori a 180 m/s (ovvero N <sub>SPT30</sub> < 15 nei terreni a grana grossa e cu <sub>30</sub> < 70 kPa nei terreni a grana fina)	V <sub>s30</sub> ≤ 180 m/s	0.9-1.8
<input type="radio"/> E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con Vs > 800 m/s)	180 < V <sub>s30</sub> ≤ 360 m/s V <sub>s30</sub> ≤ 180 m/s	1.0-1.6
<input type="radio"/> S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di V <sub>s30</sub> inferiori a 100 m/s (ovvero 10 < cu <sub>30</sub> < 20 kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche	V <sub>s30</sub> < 100 m/s	Specifiche analisi
<input type="radio"/> S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti	-	Specifiche analisi

### Provenienza dell'informazione

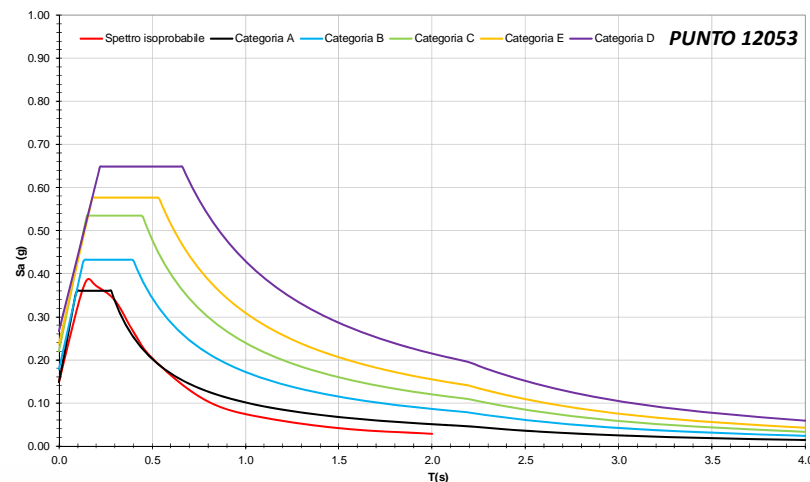
Rilevamento geologico   
  Prove geofisiche V<sub>s30</sub> = \_\_\_\_\_   
  SPT N<sub>SPT30</sub> = \_\_\_\_\_   
  C<sub>u</sub> cu<sub>30</sub> = \_\_\_\_\_

A19.b - VALUTAZIONE DELLA CATEGORIA TOPOGRAFICA		Inclinazione media (i)	S <sub>T</sub>
<input type="radio"/> T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°	i ≤ 15°	1,0
<input type="radio"/> T2	Pendii con inclinazione media i > 15°	i > 15°	1,2
<input type="radio"/> T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media 15° ≤ i ≤ 30°	15° ≤ i ≤ 30°	1,2
<input type="radio"/> T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media i > 30°	i > 30°	1,4

a <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>C</sub> *
0.1483	2.43	0.28

$$\begin{aligned}
 0 \leq T < T_B & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \\
 T_C \leq T < T_D & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)
 \end{aligned}$$

Categoria sottosuolo	S <sub>s</sub>	C <sub>c</sub>
A	1.00	1.00
B	1.00 ≤ 1.40 - 0.40 · F <sub>o</sub> · $\frac{a_g}{g}$ ≤ 1.20	1.10 · (T <sub>C</sub> <sup>*</sup> ) <sup>-0.20</sup>
C	1.00 ≤ 1.70 - 0.60 · F <sub>o</sub> · $\frac{a_g}{g}$ ≤ 1.50	1.05 · (T <sub>C</sub> <sup>*</sup> ) <sup>-0.33</sup>
D	0.90 ≤ 2.40 - 1.50 · F <sub>o</sub> · $\frac{a_g}{g}$ ≤ 1.80	1.25 · (T <sub>C</sub> <sup>*</sup> ) <sup>-0.50</sup>
E	1.00 ≤ 2.00 - 1.10 · F <sub>o</sub> · $\frac{a_g}{g}$ ≤ 1.60	1.15 · (T <sub>C</sub> <sup>*</sup> ) <sup>-0.40</sup>



# NORMATIVA REGIONALE – DGR 2616/2011

- **1° livello: fase pianificatoria**

obbligatoria per tutti i comuni della Lombardia ed estesa alle aree interferenti con l'urbanizzato e l'urbanizzabile (PSL)

- **2° livello: fase pianificatoria**

zone sismiche 2 e 3: obbligatoria nelle aree interferenti con l'urbanizzato e l'urbanizzabile

zona sismica 4: obbligatoria nelle aree con previsione di edifici strategici e rilevanti

- **3° livello: fase progettuale (rilascio titolo abilitativo)**

quando con il 2° livello il valore di  $F_a$  calcolato supera il valore di soglia comunale nelle aree PSL Z1-Z2-Z5



# NORMATIVA REGIONALE – 1° livello

<i>Sigla</i>	<i>SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE</i>	<i>EFFETTI</i>
Z1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi	Instabilità
Z1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti	
Z1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana	
Z2	Zone con terreni di fondazione particolarmente scadenti (riporti poco addensati, terreni granulari fini con falda superficiale)	Cedimenti e/o liquefazioni
Z3a	Zona di ciglio $H > 10$ m (scarpata con parete subverticale, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica)	Amplificazioni topografiche
Z3b	Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite - arrotondate	
Z4a	Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi	Amplificazioni litologiche e geometriche
Z4b	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	
Z4c	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)	
Z4d	Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale	
Z5	Zona di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse	Comportamenti differenziali

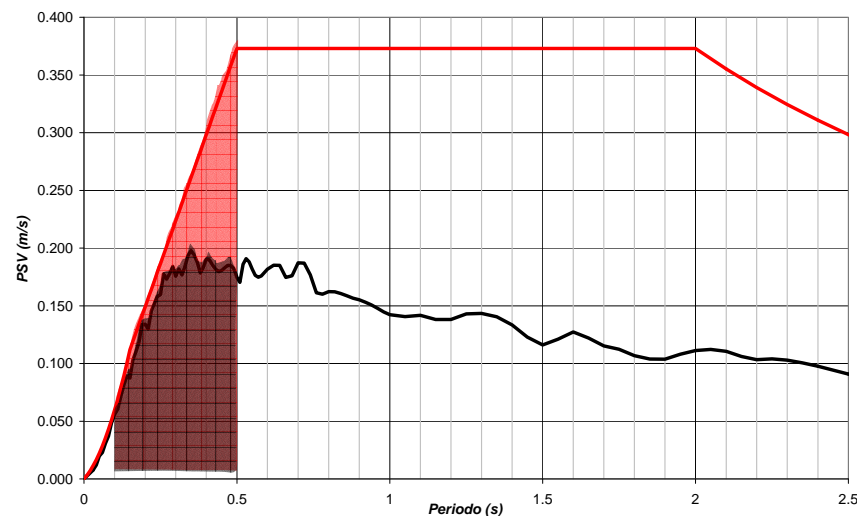
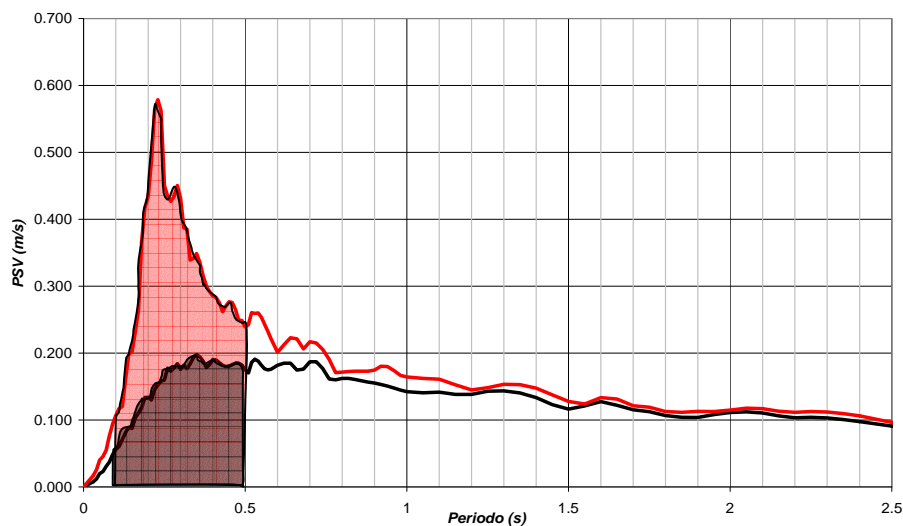


# NORMATIVA REGIONALE – 2° livello

Stima del fattore di amplificazione FAC tramite schede di valutazione (abachi regionalizzati) e confronto con il rispettivo valore di soglia (FAS)

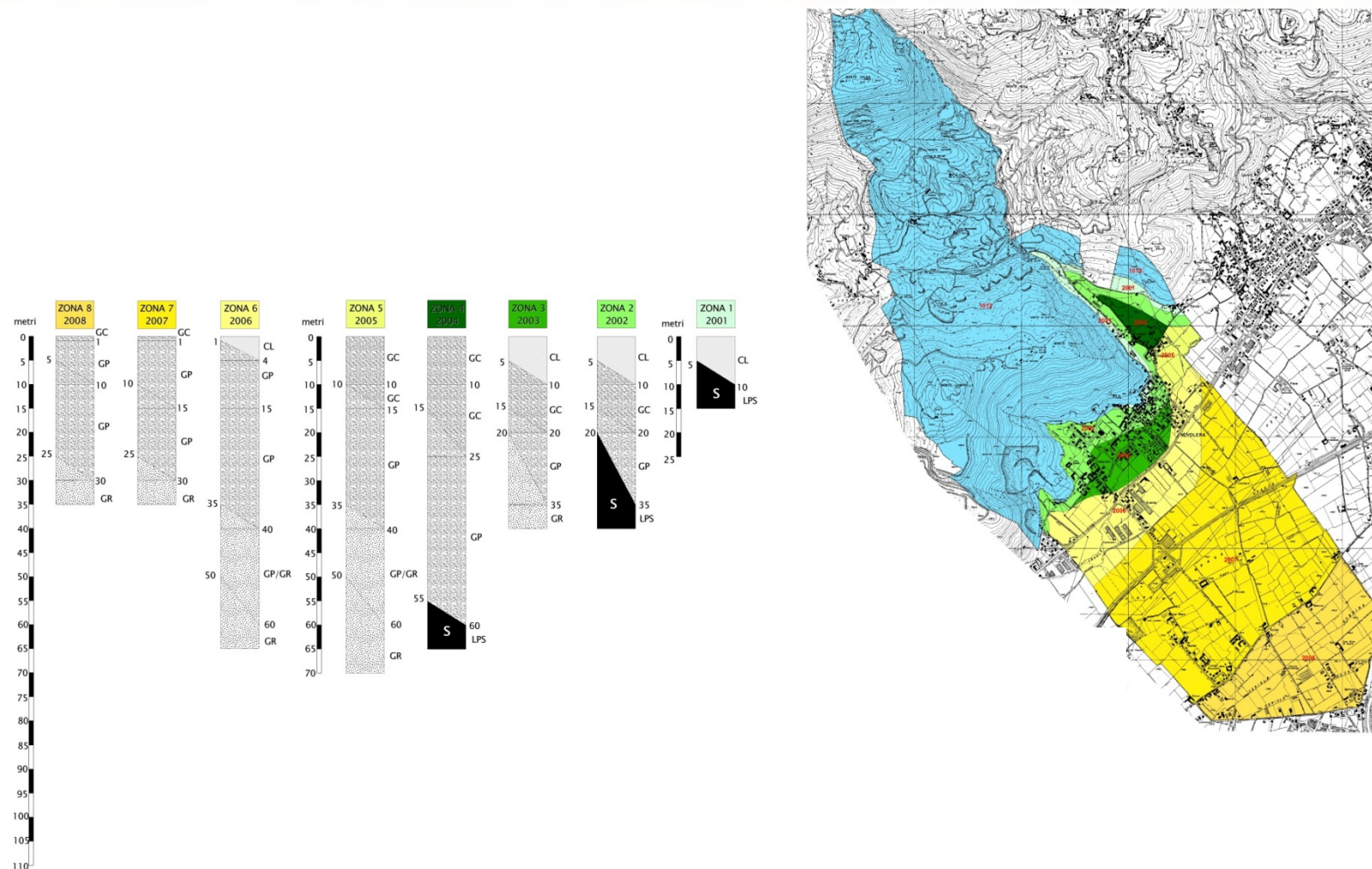
$$Fa_{0.1-0.5} = \frac{SI_{0.1-0.5}(PSV_{output}) = \int_{0.1}^{0.5} PSV_{output}(T, \xi) dT}{SI_{0.1-0.5}(PSV_{input}) = \int_{0.1}^{0.5} PSV_{input}(T, \xi) dT}$$

$$Soglia_{0.1-0.5} = \frac{SI_{0.1-0.5}(PSV_{norma}) = \int_{0.1}^{0.5} PSV_{norma}(T, \xi) dT}{SI_{0.1-0.5}(PSV_{input}) = \int_{0.1}^{0.5} PSV_{input}(T, \xi) dT}$$

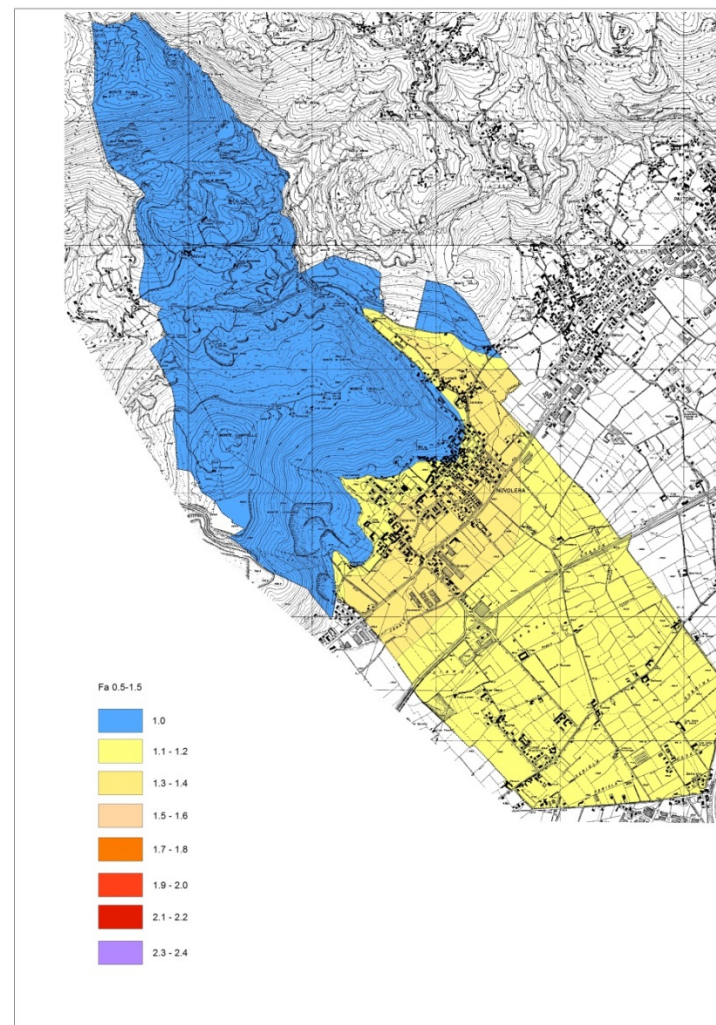
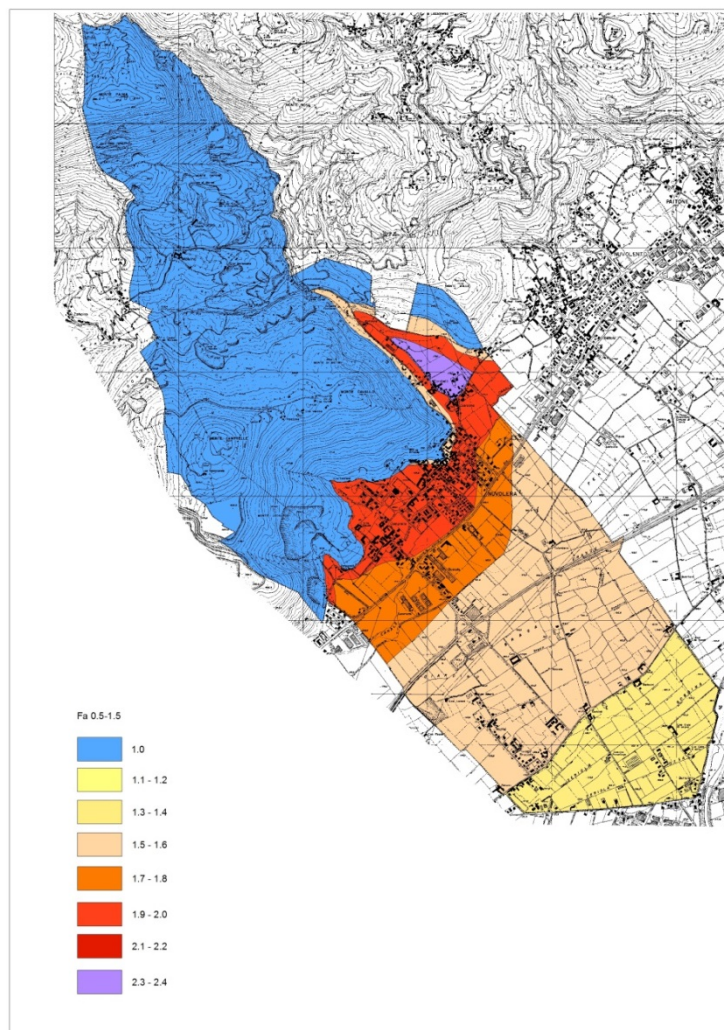




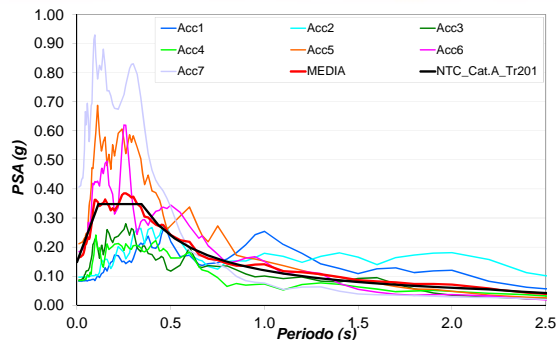
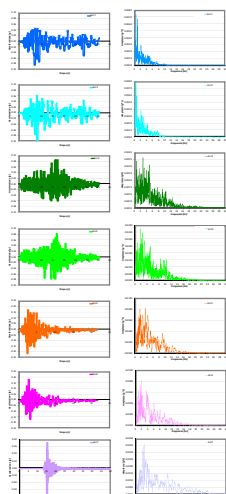
# NORMATIVA REGIONALE – DGR 2616/2011 - ICMS



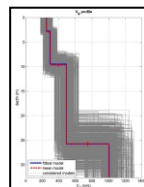
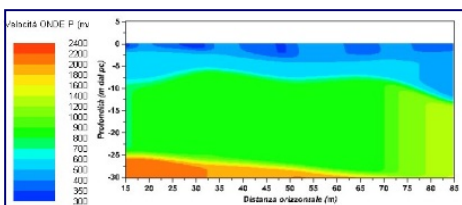
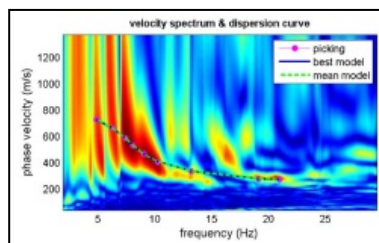
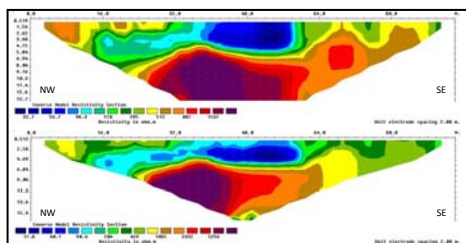
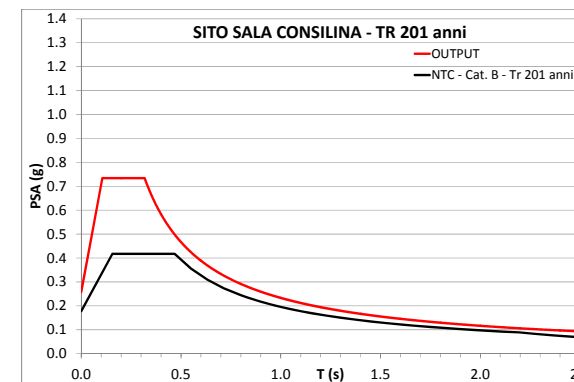
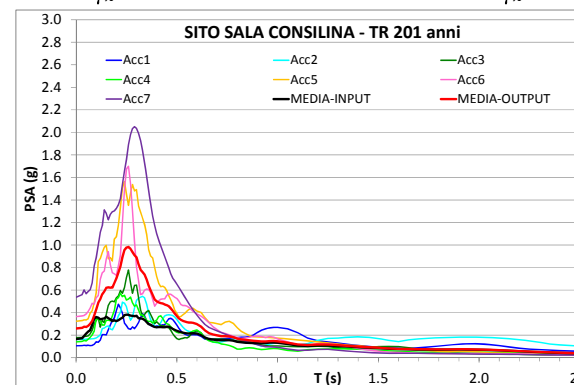
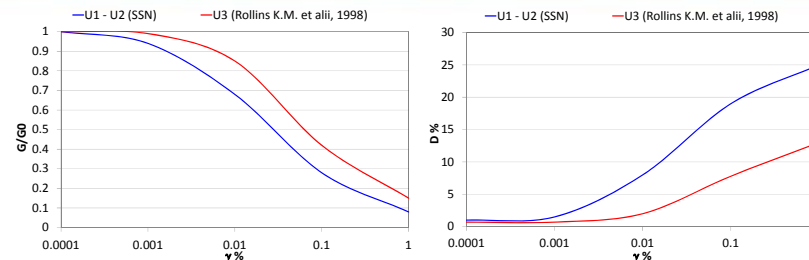
# NORMATIVA REGIONALE – DGR 2616/2011



# RISPOSTA SISMICA LOCALE



SINTE	Litologia	H (m)	$\gamma$ (%)	$V_s$ (m/s)	$V_{s0}$ (m/s)	$\mu$	$\beta$ (MPa)
U1	Argilla calcareo-argillosa	5	10	350	300	0.20	100
U2	Depositi detritici colluviali	5	10	300	300	0.20	100
U3	Depositi detritici	10	20	300	300	0.20	100
U4	Siltarenne argillose	—	10	300	300	0.20	100



# VERIFICHE DI SICUREZZA ALLA LIQUEFAZIONE

## ESEMPIO

Profondità falda 2 m dal pc

$M_w = 6.14$

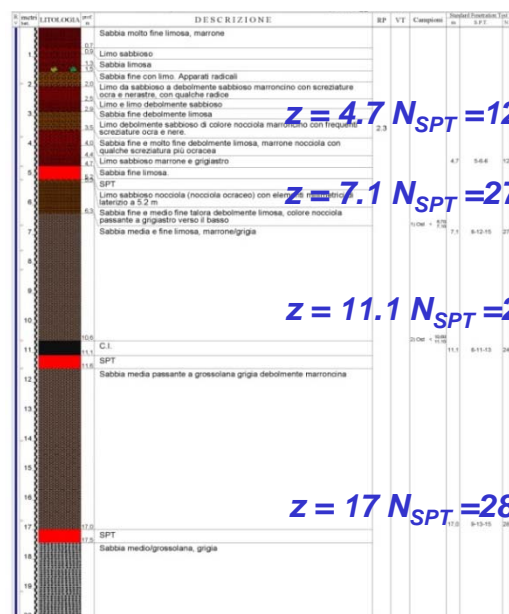
$a_{max} = 0.2 g$

FC stimato con I&B da CPTU

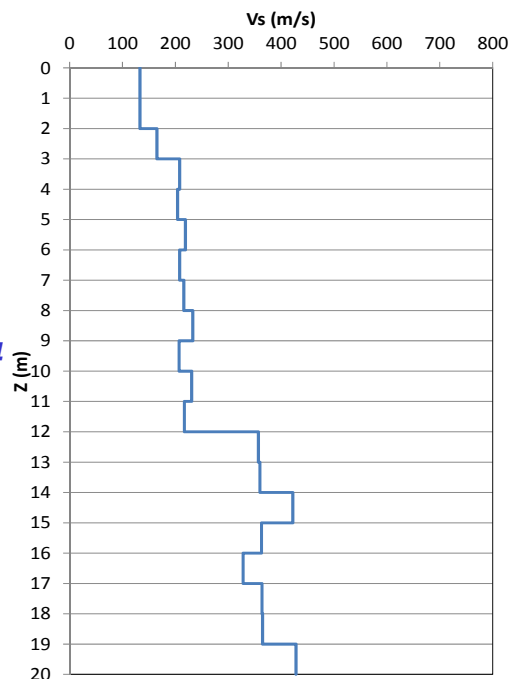
## ANALISI PUNTUALE

Profondità	FC %	$F_L$ da SPT	$F_L$ da $V_s$	$F_L$ da CPT-AGI	$F_L$ da CPT-I&B
4.7	26	1.17	0.22	0.73	0.78
7.1	8.6	2.47	0.17	1.20	1.29
11.1	7.8	1.30	0.10	1.18	1.24
17.0	5.0	1.43	1.24	3.13	3.94

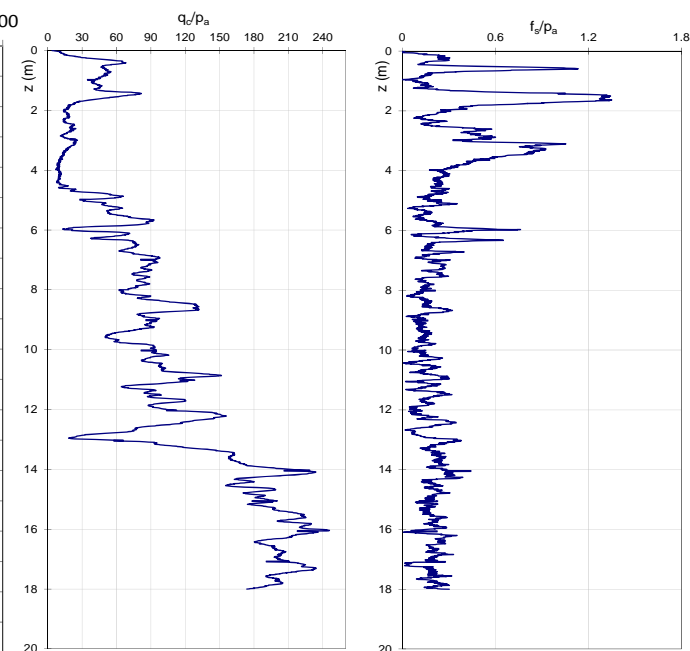
## SONDAGGIO + SPT



## DH



## CPTU



## IN SINTESI

1. La normativa nazionale vigente fa riferimento direttamente alla carta di Pericolosità Nazionale per definire le azioni sismiche progettuali, sganciandosi dal concetto di classificazione sismica adottata nelle precedenti normative – la classificazione rimane di utilità prevalentemente amministrativa
2. Alla Pericolosità Sismica di base devono essere aggiunti gli effetti sismici locali legati alle caratteristiche geologiche del sito
3. Tramite gli studi geologici di pianificazione comunale vengono fornite anche le prescrizioni generali legati alla componente sismica del territorio; qualora siano necessari approfondimenti specifici, questi saranno eseguiti nell'ambito della relazione geologica ai sensi della DGR 2616/2011 (Relazione Geologica R3 ai sensi della DGR 5001/2016), obbligatoria per il rilascio del titolo abilitativo relativo ad un intervento edilizio
4. La relazione geologica così predisposta fornirà il modello geologico di riferimento ai sensi della normativa nazionale NTC 2008 (§ 6.2.1) (Relazione Geologica R1 ai sensi della DGR 5001/2016), sulla base del quale saranno predisposte le indagini geotecniche per la predisposizione del modello geotecnico ai sensi delle NTC 2008 (§ 6.2.2) (Relazione Geotecnica R2 ai sensi della DGR 5001/2016).

***Grazie per l'attenzione***

