



## Occhio...

Non sembra un nostro problema,  
ma è il nostro più grande problema.



1

## Legge di propagazione degli errori

Senza entrare nella trattazione matematica, qualitativamente per propagazione degli errori si intende l'effetto dell'errore di una singola variabile sul risultato di una funzione.

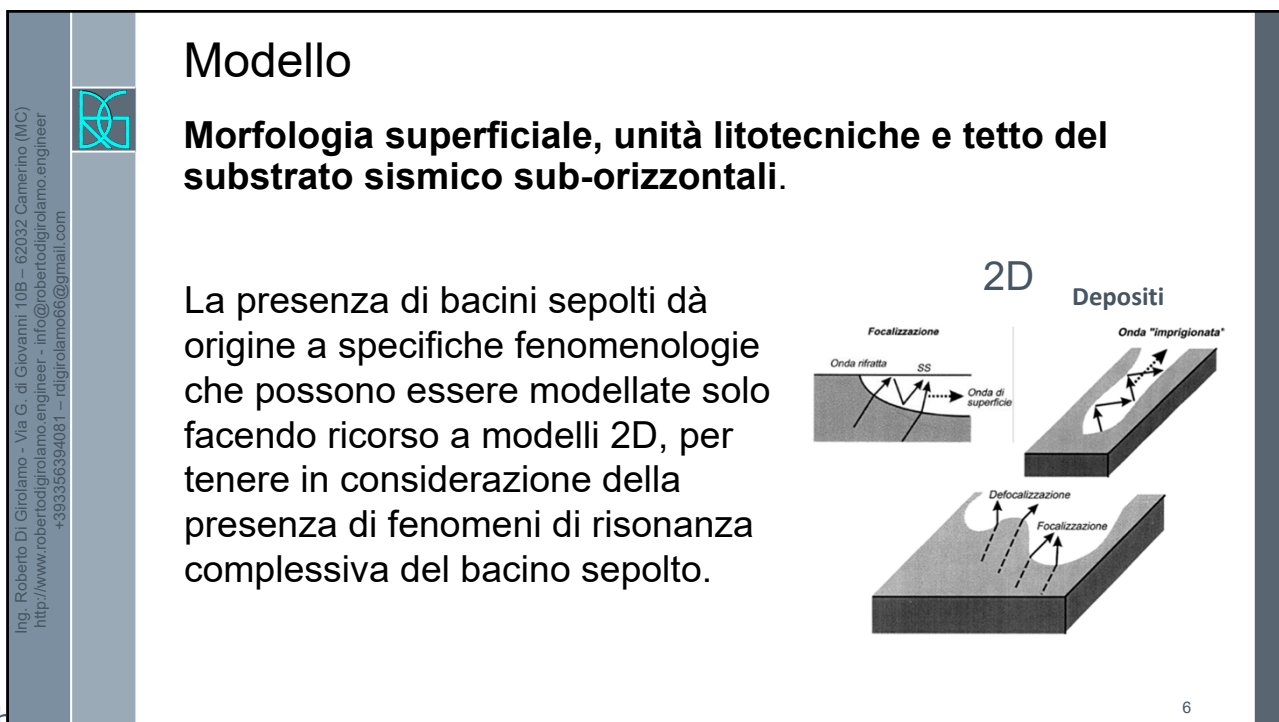
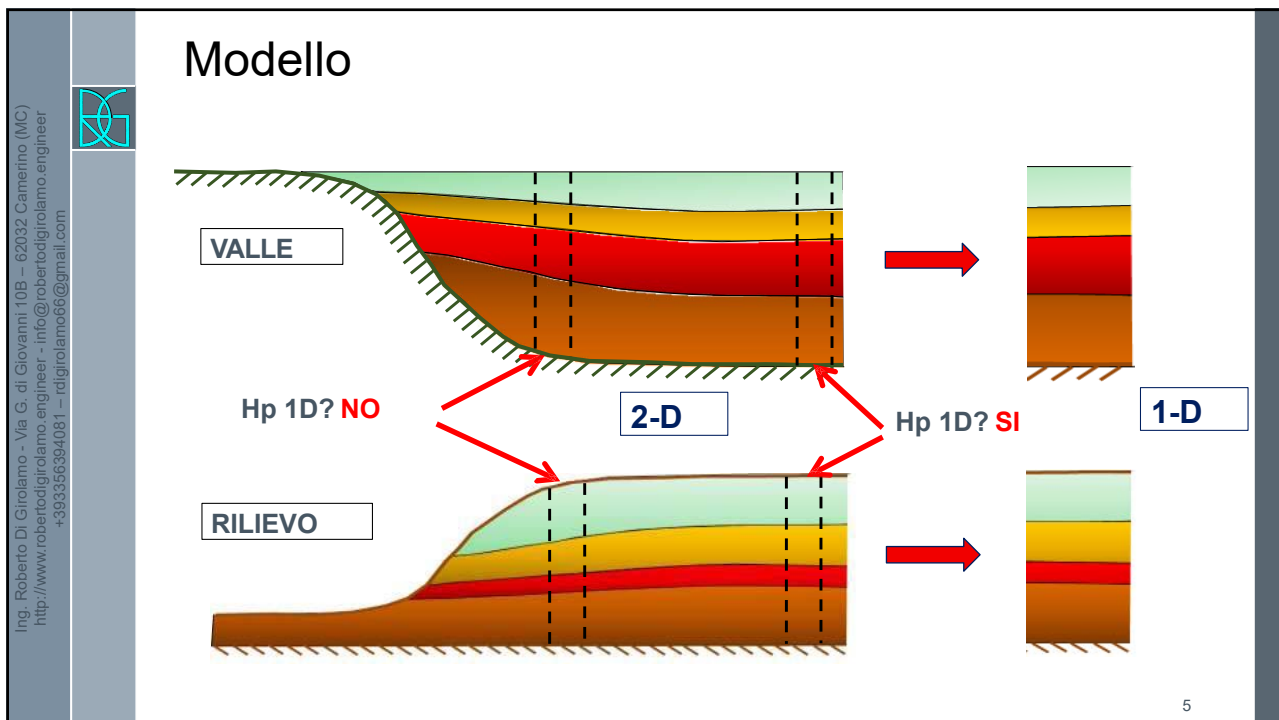
Nel caso in cui la nostra elaborazione sia il risultato e la combinazione di un certo numero di variabili, per conoscere la variabilità del risultato finale devo considerare come cambiano i singoli fattori che producono il risultato.

Se non riesco a trovare una formulazione matematica chiusa di tale errore, posso, in maniera sistematica, controllare la sensibilità (variabilità) del risultato al variare di un singolo parametro.

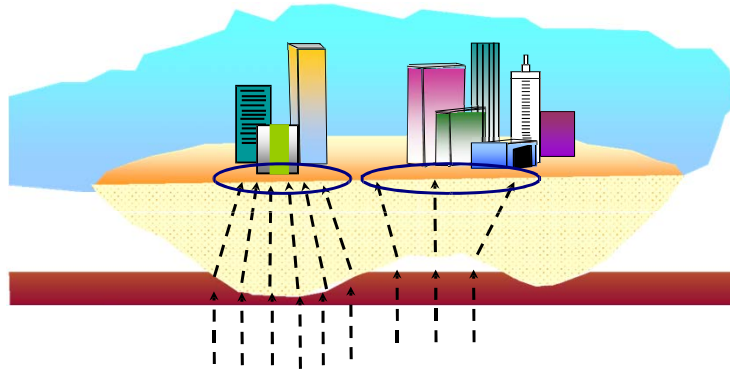
## ANALISI DI SENSITIVITÀ

2





## Modello



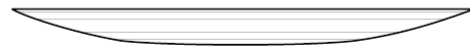
Focalizzazione (defocalizzazione) delle onde in superficie per effetto della morfologia del basamento roccioso

## Modello

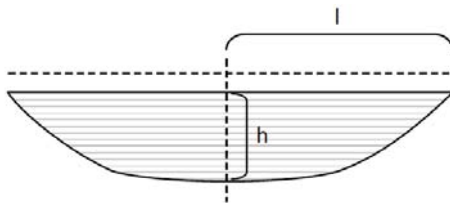
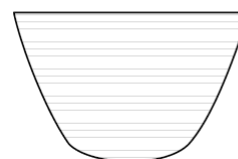
**Morfologia superficiale, unità litotecniche e tetto del substrato sismico sub-orizzontali.**

Il primo criterio, esclusivamente morfologico, utilizza il calcolo del rapporto tra la profondità della valle (massimo spessore del deposito)  $h$ , e la sua semiampiezza  $l$ , distinguendo:

Esempio: valle superficiale  $h/l \leq 0.25$



Esempio: valle profonda  $h/l > 0.25$





## Modello

### **Morfologia superficiale, unità litotecniche e tetto del substrato sismico sub-orizzontali.**

Il secondo criterio, non solo geometrico, prevede che gli abachi di 2° livello possano essere utilizzati solo se è verificata la seguente condizione:

$$\frac{h}{l} \leq 0.65 / \sqrt{C_v - 1}$$

dove  $C_v$  è il rapporto tra la velocità delle onde S ( $V_s$ ) nel substrato sismico e quella media nei terreni di riempimento della valle.

9



## Modello

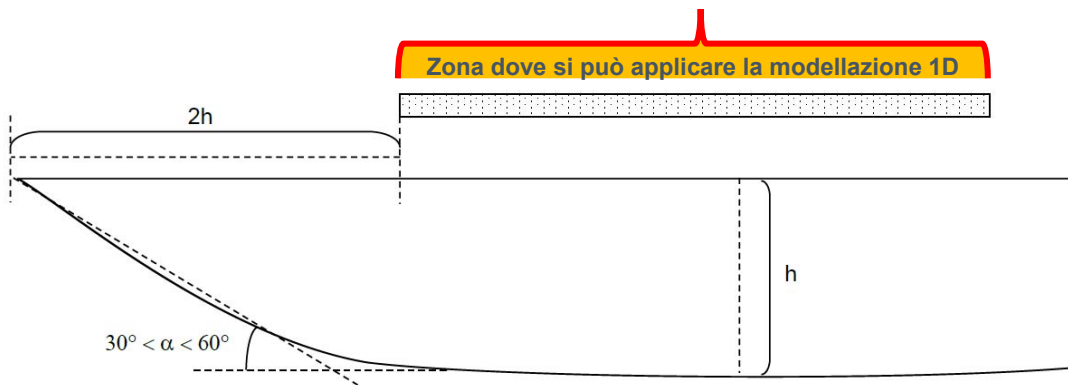
### **Sufficiente distanza dalla chiusura laterale nelle valli superficiali.**

In prossimità della chiusura laterale di una valle superficiale possono essere presenti effetti di geometria sepolta funzione dell'inclinazione e del contrasto d'impedenza dell'interfaccia copertura/substrato e del valore medio di  $V_s$  della copertura; in linea generale è possibile quantificare l'area di influenza dei suddetti fenomeni considerando una distanza in superficie dalla chiusura pari a due volte la profondità  $h$  della valle, nel caso in cui l'interfaccia copertura/substrato abbia inclinazioni medie  $\alpha$  comprese tra  $30^\circ$  e  $60^\circ$ .

10

## Modello

**Sufficiente distanza dalla chiusura laterale nelle valli superficiali.**



11

## Modello

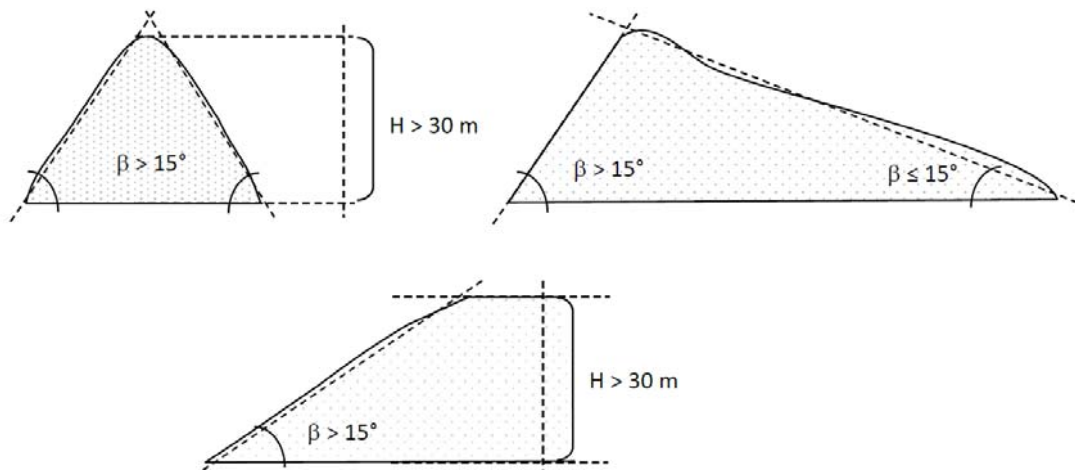
**Irregolarità morfologiche (creste, cocuzzoli, dorsali, scarpate).**

In linea di principio gli effetti geometrici sono condizionati dal rapporto tra lunghezza d'onda dominante del campo di moto e dimensione caratteristica dell'irregolarità morfologica. In particolare, se l'inclinazione media di almeno uno dei due versanti, nel caso di creste o dorsali, o del fronte nel caso di scarpate, è maggiore di  $15^\circ$  e il dislivello  $H$  è superiore a 30 m sono presenti fenomeni di amplificazione di tipo topografico.

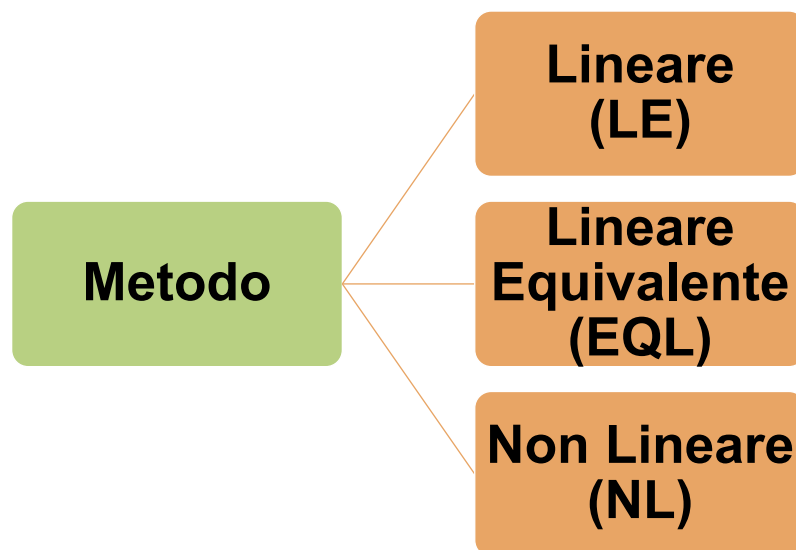
12

## Modello

**Irregolarità morfologiche (creste, cocuzzoli, dorsali, scarpate).**



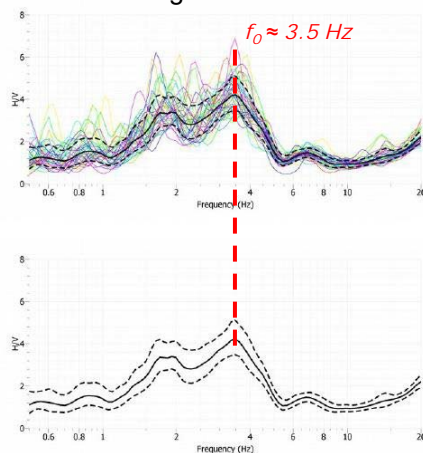
## Metodo



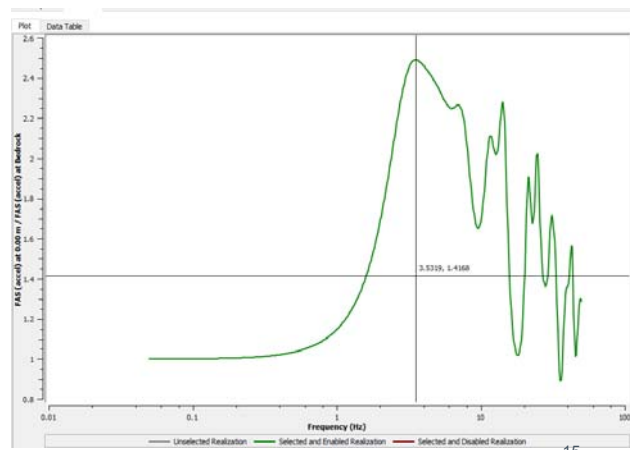
## Metodo

**Il metodo di calcolo Lineare** è necessario per la calibrazione del modello di sottosuolo.

Indagine H/V



Modellazione lineare con STRATA



15

## Metodo

**Metodo di calcolo Lineare Equivalente (EQL) e non Lineare (NL).**

- › La deviazione tra il metodo di calcolo equivalenti lineari (EQL) e non lineari (NL) crescente al diminuire della rigidità del deposito.
- › Pertanto è bene utilizzare approcci non lineari (NL) in caso di depositi deformabili soggetti a forti azioni sismiche, in cui altrimenti si otterrebbe una sovrastima della risposta.
- › il metodo di calcolo (EQL) dà luogo ad un sovrasmorzamento più marcato ai bassi periodi rispetto al metodo di calcolo non lineare (NL).

16





## Metodo

### Metodo di calcolo Lineare Equivalente (EQL) e non Lineare (NL).

Rathje and Kottke (2011) hanno studiato la differenza di risultati ottenuti da approcci EQL e NL, al variare della frequenza.

- › Ad alte frequenze (superiori a 25 Hz), lo schema NL dà luogo ad una minore amplificazione a causa dell'incoerenza di fase nello scuotimento introdotta in tale approccio.
- › A frequenze intermedie (tra 5 Hz e 25 Hz), la situazione si ribalta a causa del sovra-smorzamento da parte dell'approccio EQL.
- › In condizione di risonanza, si osserva una minore amplificazione da parte degli approcci NL, probabilmente a causa delle continue variazioni di rigidezza del terreno.

17



## Metodo

### Modello Lineare Equivalente (EQL) o Modello non Lineare (NL).

Kim et al. (2016), introducono un parametro sintetico di previsione della divergenza tra approccio EQL e NL, definito nel seguente modo:

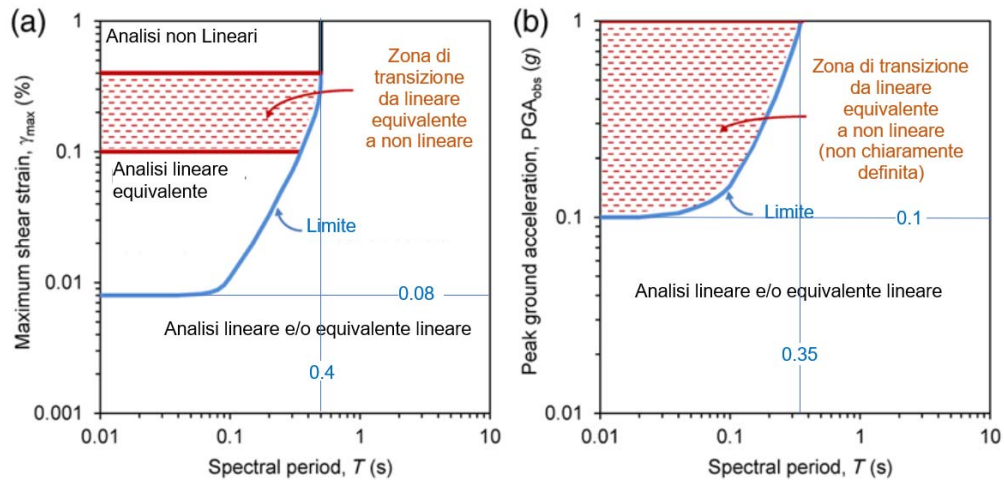
$$\gamma_{est} = \frac{PGV_{input}}{V_s}$$

Il confronto di tale parametro con un valore soglia consente una valutazione aprioristica del metodo di analisi più indicato.

18

## Metodo

### Modello Lineare Equivalente (EQL) o Modello non Lineare (NL).



Da Kaklamos et al. 2013

19

## Metodo

### Modello Lineare Equivalente (EQL) o Modello non Lineare (NL).

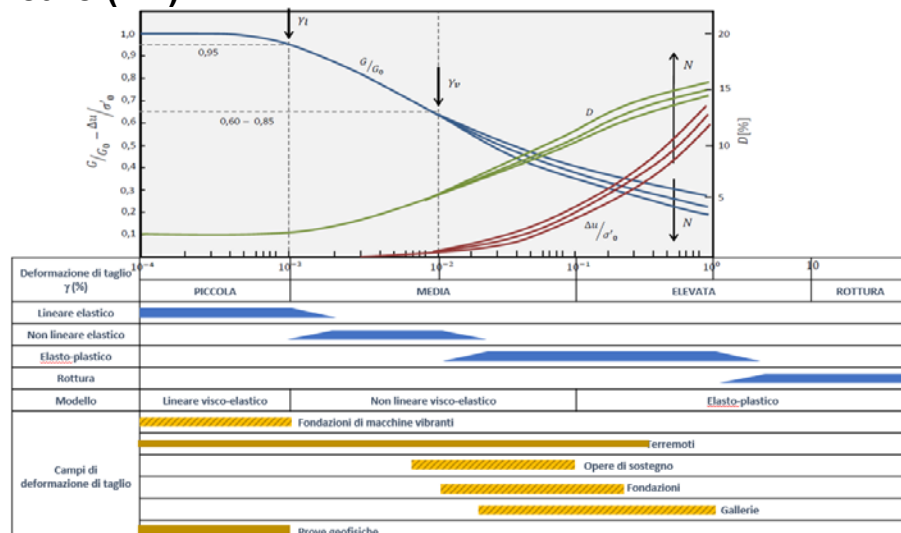
Tutto questo perché viene trattato?

Perché le nostre analisi sono sempre EQL, e pertanto è fondamentale sapere se e quanto siamo entrati nella zona in cui bisogna analizzare in maniera non lineare il problema.

20

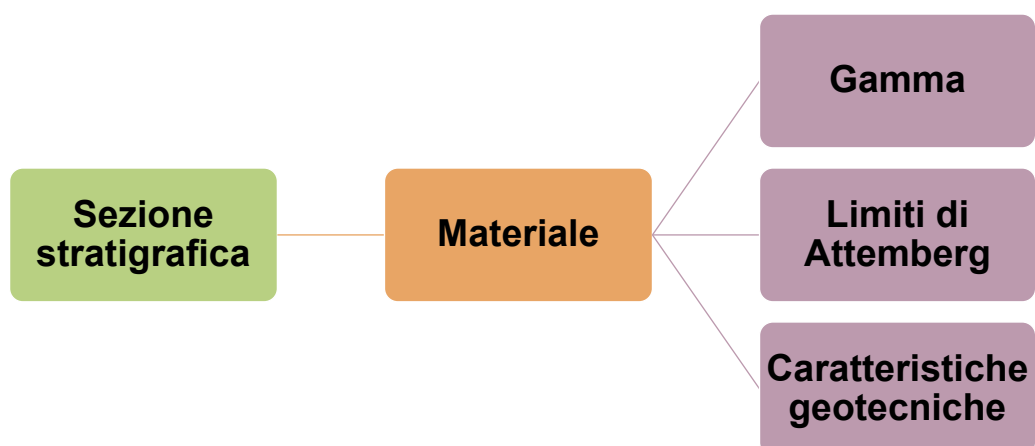
## Metodo

### Modello Lineare Equivalente (EQL) o Modello non Lineare (NL).



21

## Sezione Stratigrafica



22

## Sezione Stratigrafica

I parametri necessari per la realizzazione di un'analisi di RSL (tenendo conto di un approccio di tipo lineare-equivalente) sono:

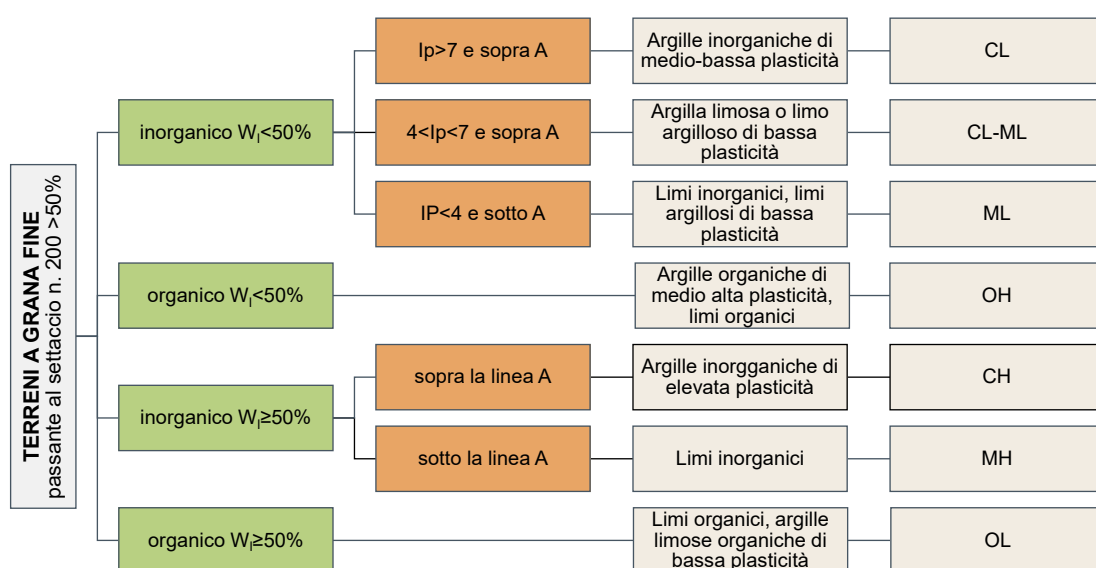
**Pesi di volume** dei litotipi in oggetto;

**Limiti di Atterberg e definizione USCS** che sono utili per la scelta delle curve di decadimento.

**Caratteristiche geotecniche.**

23

## Sezione Stratigrafica- Classificazione USCS

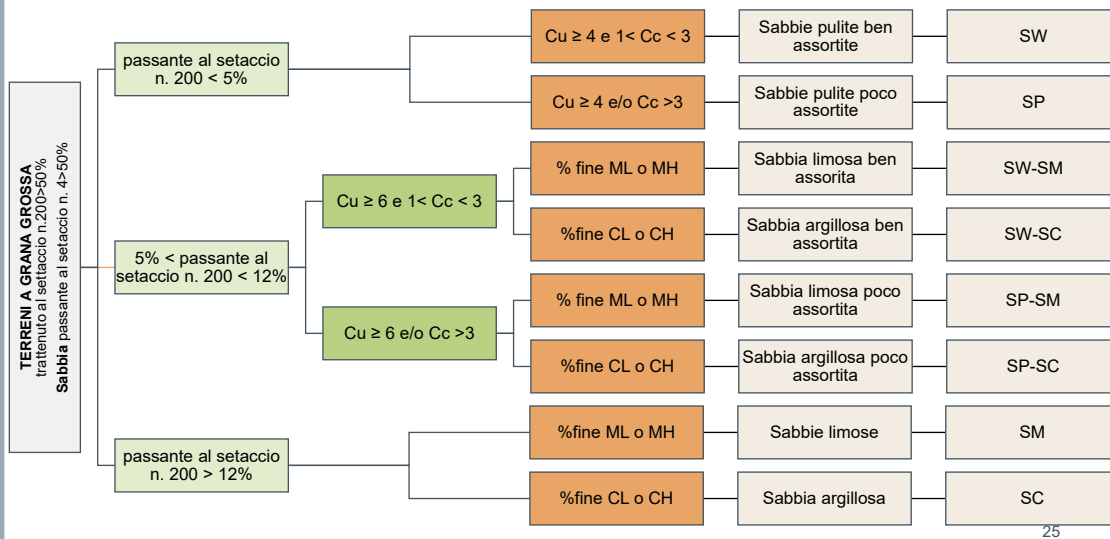


24

## Sezione Stratigrafica – Classificazione USCS



Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)  
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer  
+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

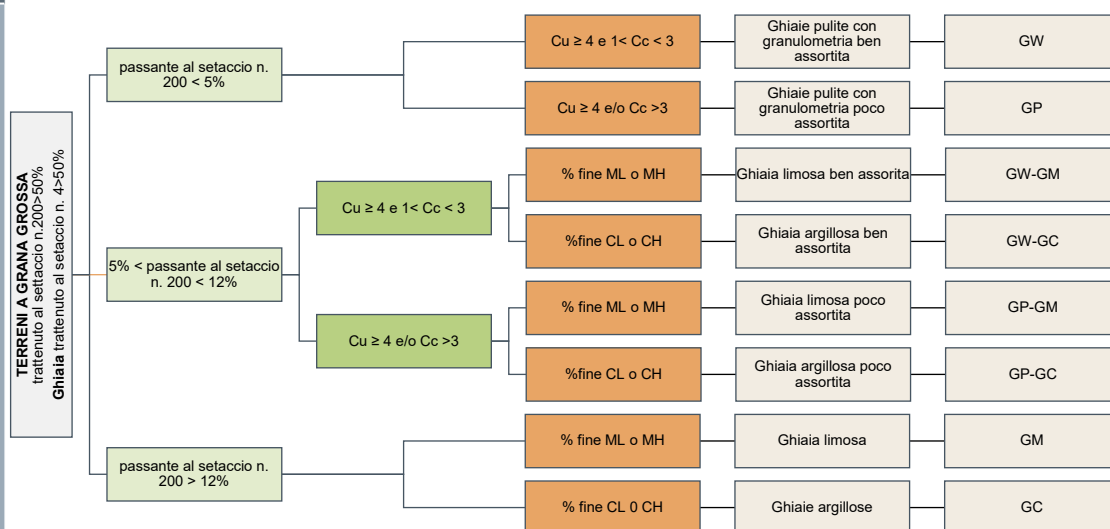


25

## Sezione Stratigrafica – Classificazione USCS



Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)  
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer  
+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com



26

## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$



Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B - 62032 Camerino (MC)  
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer  
+393356394081 - rdigirolamo66@gmail.com

**Curve di variazione  
 $G/G_0$  e  $D\%$   
Curve di  
decadimento**

27

## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$



Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B - 62032 Camerino (MC)  
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer  
+393356394081 - rdigirolamo66@gmail.com

**Le Curve di variazione di  $G/G_0$  e  $D\%$  o Curve di Decadimento sono uno dei parametri più influenti nella RSL.**

Le Curve di Decadimento influenzano i risultati della RSL soprattutto in presenza di depositi molto deformabili

Le Curve di Decadimento influenzano i risultati della RSL in maniera rilevante con azioni sismiche elevate (Papaspiliou et al. 2012),

Le Curve di Decadimento influenzano i risultati della RSL in maniera meno importante in aree a bassa sismicità (Pagliaroli et al. 2015).

Le Curve di Decadimento influenzano i risultati della RSL in maniera forte in presenza di siti deformabili soggetti a forti azioni sismiche Bahrapouri et al. (2018).

28



## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$

Che cosa sono le curve di decadimento e a cosa servono?

La RSL richiede la modellazione del comportamento meccanico del terreno.

La risposta meccanica dei terreni ai carichi ciclici risulta molto complessa in quanto caratterizzata da:

1. andamento non lineare,
2. accumulo di deformazioni permanenti,
3. dissipazione di energia,
4. decadimento progressivo dei parametri meccanici,
5. dipendenza dal numero di cicli di carico applicati,
6. accumulo di sovrappressioni interstiziali se in presenza di fluido interstiziale.

29

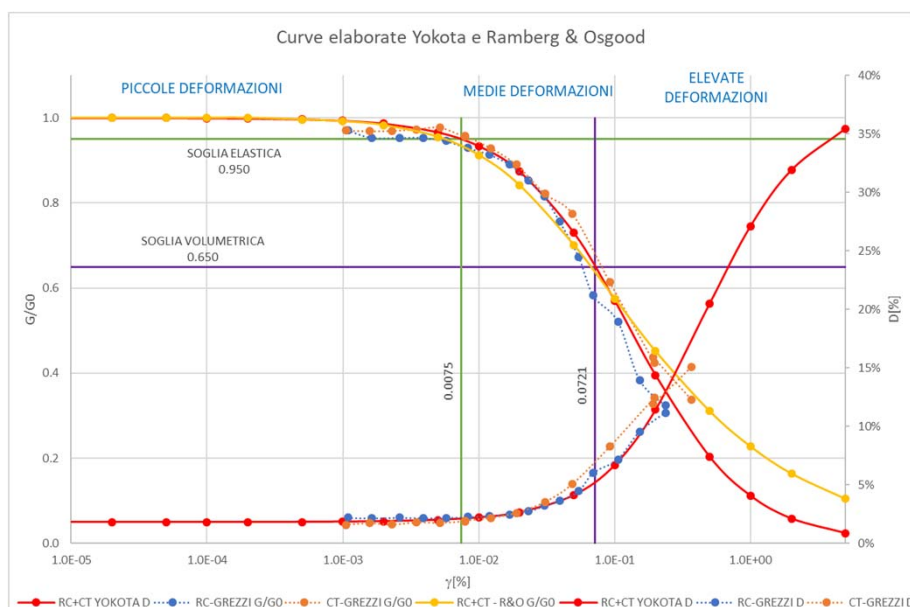


## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$

- › L'approccio visco – elastico lineare rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi e accuratezza dei risultati.
- › L'approccio visco – elastico lineare fa riferimento alle soluzioni relative alla propagazione delle onde sismiche, le quali possono essere implementate in un codice numerico, adeguando iterativamente i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico del terreno.

30

## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$



## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$

### Fattori che influenzano le Curve di Decadimento

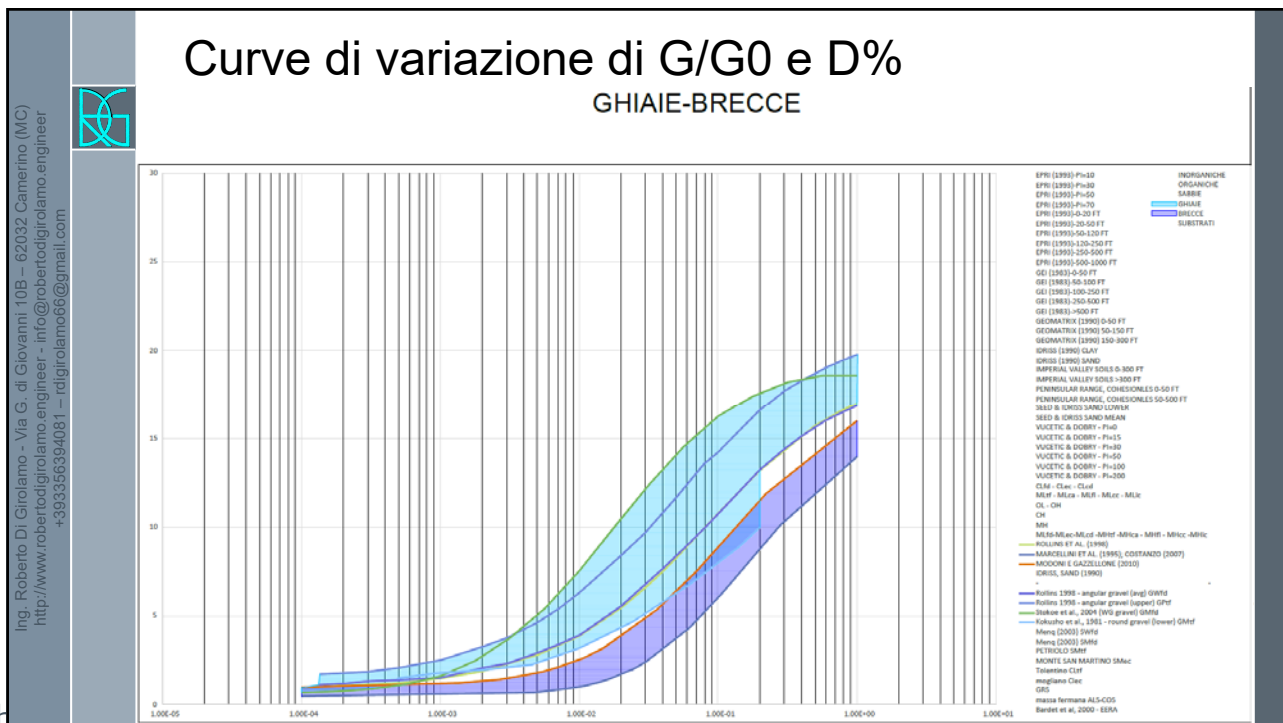
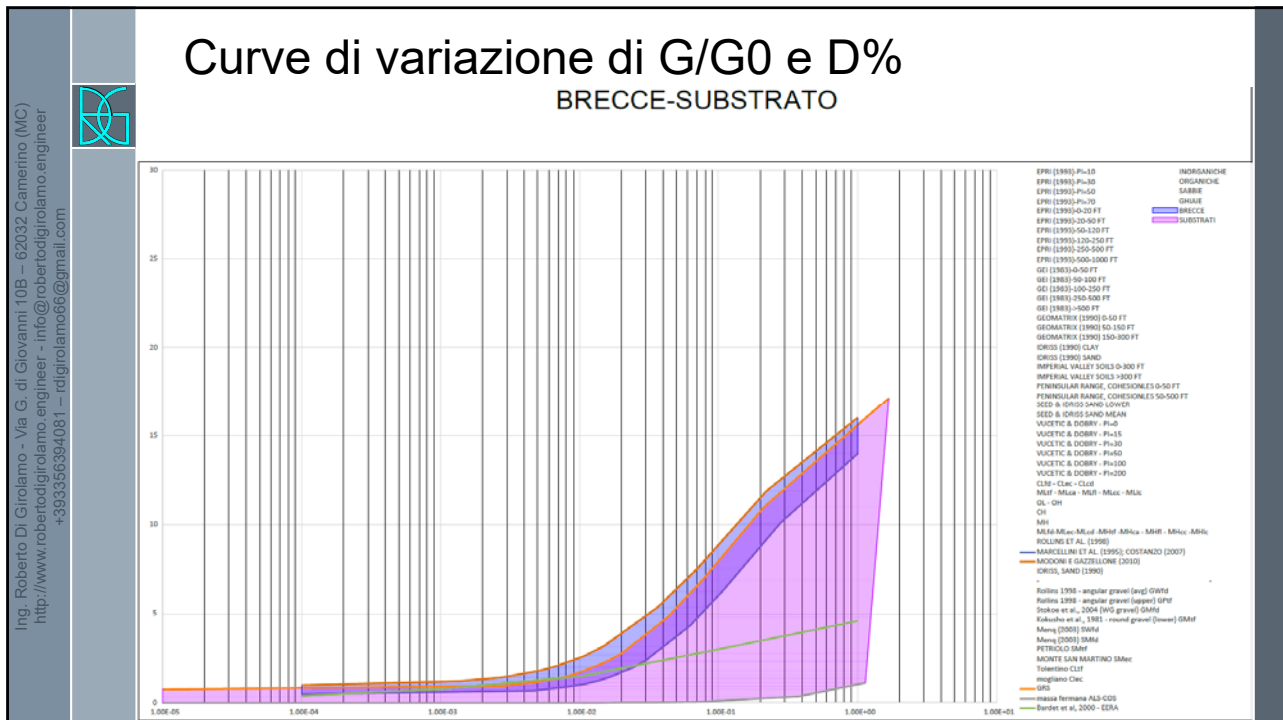
Fattori	$G/G_0$	$D$
Pressione di confinamento $\sigma'_0$	Aumenta $\uparrow$	Decresce $\downarrow$
Indice dei vuoti $e$	Decresce $\downarrow$	Aumenta $\uparrow$
Età geologica	Aumenta $\uparrow$	Decresce $\downarrow$
Cementazione	Può aumentare	Può decrescere
Grado di sovraconsolidazione OCR	Aumenta $\uparrow$	Poco influenzato
Indice di plasticità $I_p$	Aumenta $\uparrow$	Decresce $\downarrow$
Deformazione ciclica	Decresce $\downarrow$	Aumenta $\uparrow$
Velocità di deformazione	Poco influenzato	Può crescere
Numero di cicli di carico $N$	Decresce $\downarrow$ (per $\gamma > \gamma_V$ )	Può crescere (per $\gamma > \gamma_V$ )

Rielaborazione slide prof. Ing. Claudia Madiati

**N.B.: Il comportamento di  $G/G_0$  è approssimativamente opposto a quello di  $D$**

32



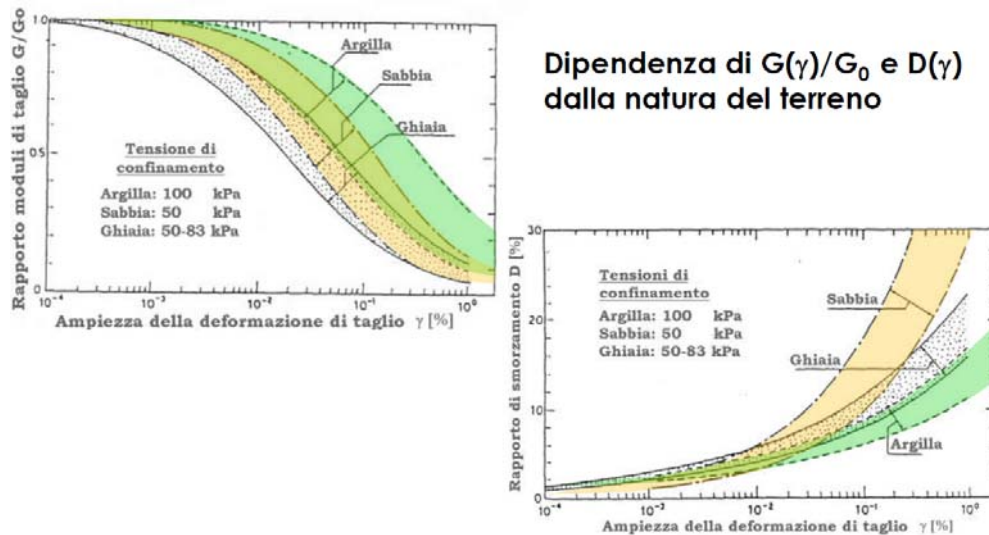








## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$



Corso di formazione UOT Marche 1 - C. Madiati e J. Facciorusso: Modello geotecnico e analisi numeriche di RSL - Camerino, 14 Luglio 2017

41

## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$

Tutto questo per far vedere la variabilità delle curve, ma soprattutto della fondamentale importanza di considerare nella RSL la "sensibilità" del modello alla variabilità delle curve stesse.

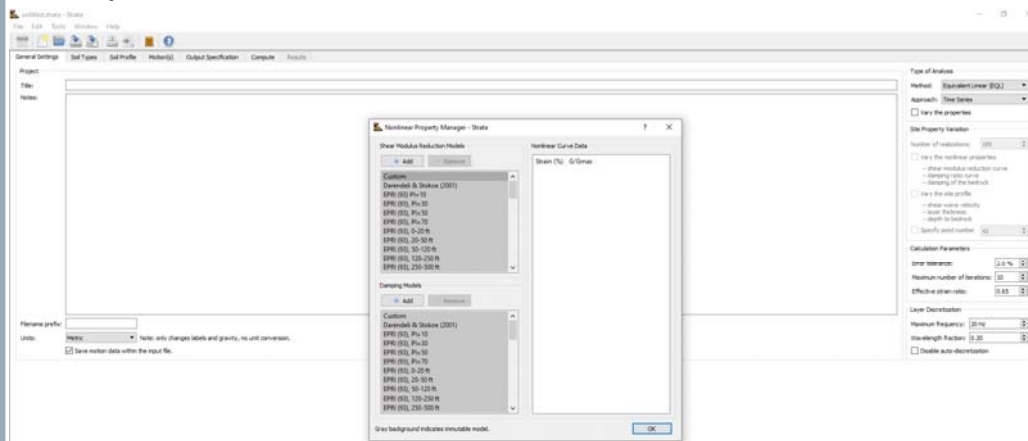
Dove si possono trovare le curve di decadimento:

1. Nei programmi di modellazione (tipo STRATA) sono già presenti una serie di curve tratte dalla letteratura;
2. Con Ordinanza del Commissario n. 24, sono state redatte le Microzonazioni di 3° livello dei 138 comuni del cratere sismico, nell'archivio presente in rete ci sono tali curve;
3. Sito della Regione Toscana.

42

## RSL - Curve di Decadimento

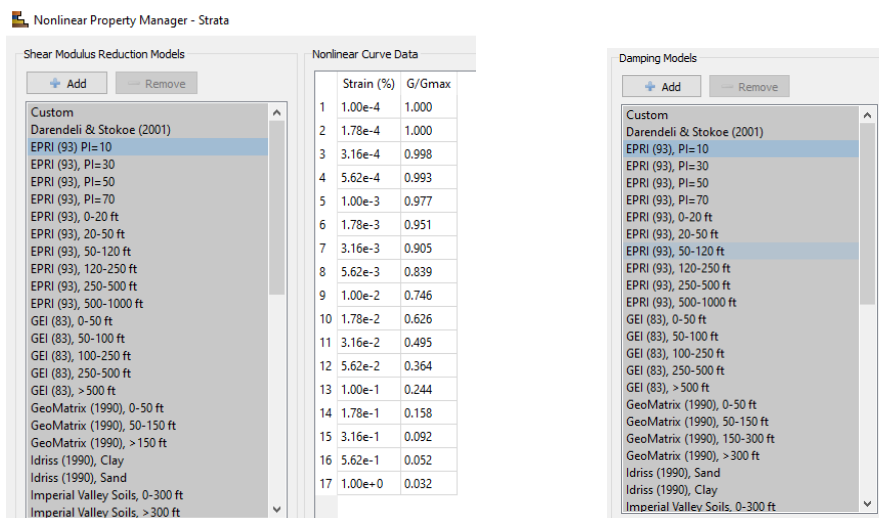
1. Nei programmi di modellazione (tipo STRATA) sono già presenti una serie di curve tratte dalla letteratura;



43

## Curve di variazione di $G/G_0$ e $D\%$

1. Nei programmi di modellazione (tipo STRATA) sono già presenti una serie di curve tratte dalla letteratura;



44

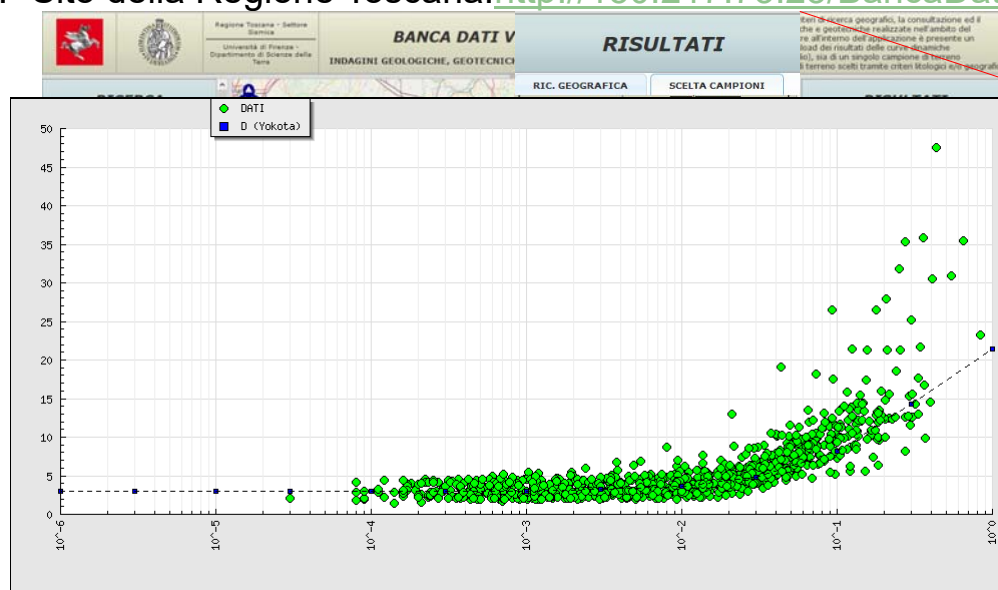


## Curve di variazione di G/G0 e D%

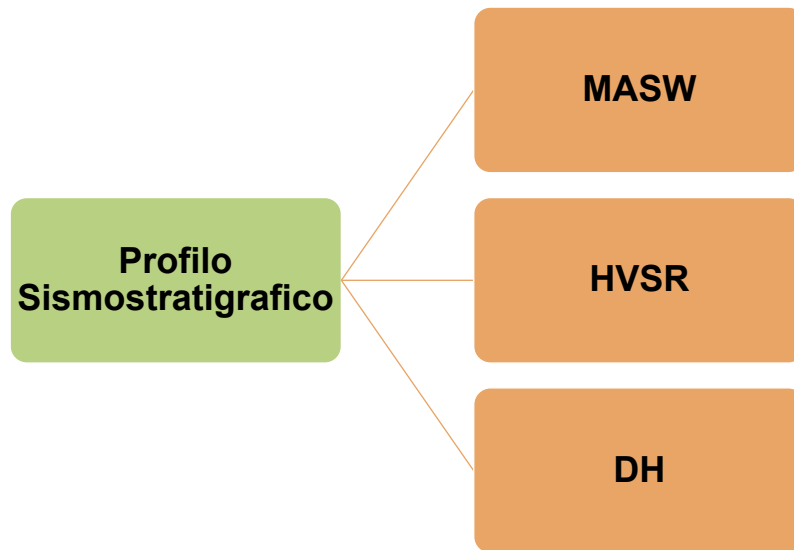
PESI DI VOLUME		CURVE DI DECADIMENTO E SMORZAMENTO									
curve n°	T <sub>500</sub> (kN/m³)	CL	curve n° (sito)	CH	curve n° (sito)	ML	curve n° (sito)	MH	curve n° (sito)		
1	20.0 + 23.0	CL1f	4 (Fabriano)	CH1f	4 (Camerino)	ML1f	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH1f	3 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
2	18.0 + 19.0	CL2f	1 (Aprolo)*; 6 (S. Severino M.)	CH2f	4 (Camerino)	ML2f	6 (Trella)	MH2f	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro)		
3	12.5 + 13.5	CL3c	1 (Aprolo)*; 6 (S. Severino M.)	CH3c	4 (Camerino)	ML3c	6 (Trella)	MH3c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro)		
4	19.0 + 20.0	CL4a	4 (Fabriano)	CH4a	4 (Camerino)	ML4a	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH4a	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
5	17.0 + 18.0	CL5c	4 (Fabriano)	CH5c	4 (Camerino)	ML5c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH5c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
6	19.5 + 20.5	CL6d	1 (Aprolo)*; 6 (S. Severino M.)	CH6d	4 (Camerino)	ML6d	6 (Trella)	MH6d	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro)		
Rollins et al. (1998) - RIPTO	17.0 + 19.0	CL7c	4 (Fabriano)	CH7c	4 (Camerino)	ML7c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH7c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Rollins et al. (1998) - GHIAIE	19.0 + 20.5	CL8c	4 (Fabriano)	CH8c	4 (Camerino)	ML8c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH8c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Marcellini et al. (1995); Costanzo (2007) - CONGLOM. E BRECCIE NON ALTERATE	21.0 + 23.0	CL9c	4 (Fabriano)	CH9c	4 (Camerino)	ML9c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH9c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Modoni & Castellone (2010) - CONGLOM. E BRECCIE ALTERATE	20.0 + 22.0	CL10c	4 (Fabriano)	CH10c	4 (Camerino)	ML10c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH10c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Idriss, sand (1990) - SABBIE	18.0 + 20.5	CL11c	4 (Fabriano)	CH11c	4 (Camerino)	ML11c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH11c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Schlier (SCH)	22.0 + 23.0	CL12c	4 (Fabriano)	CH12c	4 (Camerino)	ML12c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH12c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Calci diaspigni (CDU)	24.0 + 25.0	CL13c	4 (Fabriano)	CH13c	4 (Camerino)	ML13c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH13c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Marne del Monte Serrone	21.0 + 22.0	CL14c	4 (Fabriano)	CH14c	4 (Camerino)	ML14c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH14c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Arenarie di Camerino (litofacies pelitico-arenaceo)	22.5 + 23.5	CL15c	4 (Fabriano)	CH15c	4 (Camerino)	ML15c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH15c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Arenarie di Camerino (litofacies arenaceo-pelitico)	22.5 + 23.5	CL16c	4 (Fabriano)	CH16c	4 (Camerino)	ML16c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH16c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Corniola (COI)	22.0 + 25.0	CL17c	4 (Fabriano)	CH17c	4 (Camerino)	ML17c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH17c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Arenarie di Borelio (ARGILLE AZZURRE) - formazione marina	21.0 + 22.0	CL18c	4 (Fabriano)	CH18c	4 (Camerino)	ML18c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH18c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Gessoso-Solfifera (GES)	20.0 + 21.0	CL19c	4 (Fabriano)	CH19c	4 (Camerino)	ML19c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH19c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Scaglia Bianca (SBI)	19.0 + 23.0	CL20c	4 (Fabriano)	CH20c	4 (Camerino)	ML20c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH20c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Scaglia Cinerea (SCC)	19.0 + 23.0	CL21c	4 (Fabriano)	CH21c	4 (Camerino)	ML21c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH21c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Scaglia Rossa (SAA)	22.0 + 24.0	CL22c	4 (Fabriano)	CH22c	4 (Camerino)	ML22c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH22c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Matelica (MAT)	22.0 + 24.0	CL23c	4 (Fabriano)	CH23c	4 (Camerino)	ML23c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH23c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		
Formazione a Colombari (FCO) (litofacies pelitico-arenacea)	21.0 + 22.0	CL24c	4 (Fabriano)	CH24c	4 (Camerino)	ML24c	2 (Esanatoglia)*; 6 (Trella)	MH24c	5 (Fiuminata, Matelica, Sefro); 6 (Castelraimondo)		

## Curve di variazione di G/G0 e D%

### 3. Sito della Regione Toscana <http://150.217.73.23/BancaDatiVEL/>



## Profilo Sismostratigrafico



47

## Profilo Sismostratigrafico

I parametri necessari per la realizzazione di un'analisi di RSL (tenendo conto di un approccio di tipo lineare-equivalente) sono:

**Valori di  $V_s$**  (velocità di propagazione delle onde di taglio).  
Tale parametro servirà sia per descrivere il comportamento del terreno in campo dinamico (essendo legato alla definizione del modulo di taglio  $G$ ) sia per determinare la dimensione ottimale della mesh (con cui verrà discretizzata la sezione da modellare) o dello spessore dei sottostrati in un'analisi monodimensionale.

$$D_{max} = \frac{\lambda}{k} = \frac{T \cdot V_s}{k}$$

$$\begin{aligned} f_{max} &= 20 \text{ Hz} \\ T &= 0,05 \text{ s} \\ K &= 8 \end{aligned}$$

48





## Profilo Sismostratigrafico

I parametri necessari per la realizzazione di un'analisi di RSL (tenendo conto di un approccio di tipo lineare-equivalente) sono:

**Valori di  $V_p$**  (velocità di propagazione delle onde di compressione) necessari nel caso di un approccio bidimensionale agli elementi finiti, poiché per ogni elemento sarà necessario indicare il valore del coefficiente di Poisson dinamico (definito da  $V_p$  e  $V_s$ ) legato alle modalità di deformazione dell'elemento stesso.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{1 - \nu}{0,5 - \nu}}$$

49

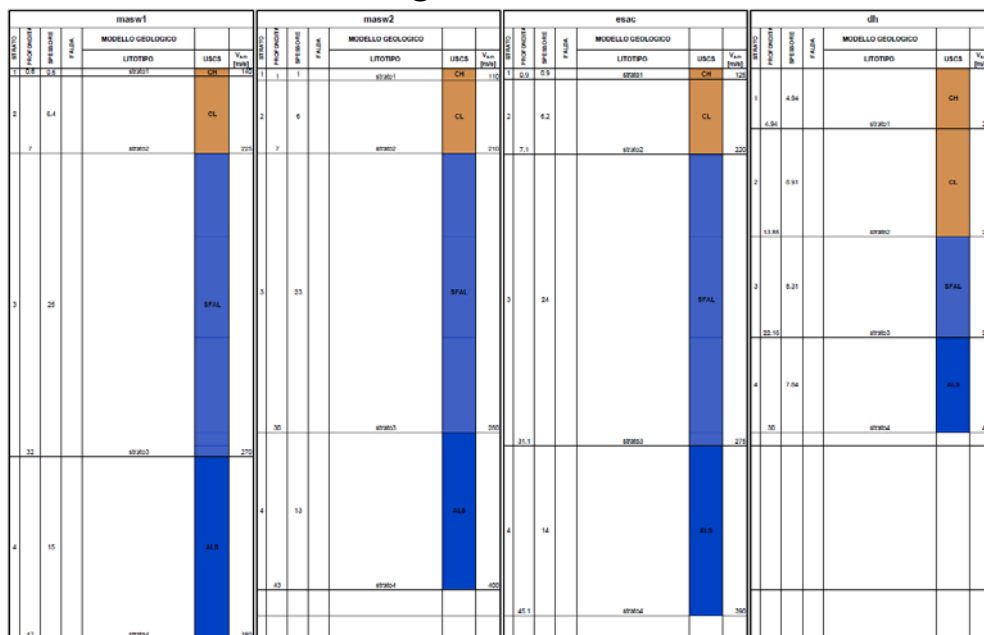


## Profilo Sismostratigrafico

		colonna geologica																	
SINTESI	PROFONDITÀ (m)	LITOTIPO	USCITA	FALDA	MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO														
					$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$\nu$	$\rho$ (kg/m³)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)	$\sigma_{vm}$ (MPa)
1	0.00	Areni argillosi decisamente sabbiosi	Lini marginali, fango di rosso, sabbie fini rosse e argillose, silt argillose di bassa plasticità	ML	155				22.00	22.00			0.10	0.10	0.14	0.13	5.00	7.70	
	5.00																		
2	12.00	Formazione della Laga. Lit. Pellico-Anticosa	Alternanza di litipi stratificati	ALB	490				23.00	23.00			0.30	0.30	0.87	0.73	25.00	22.00	
	17.00																		
3	13.00	Formazione della Laga. Lit. Pellico-Anticosa	Alternanza di litipi stratificati	ALB	610				23.00	23.00			0.30	0.30	0.87	0.73	25.00	22.00	
	20.00																		

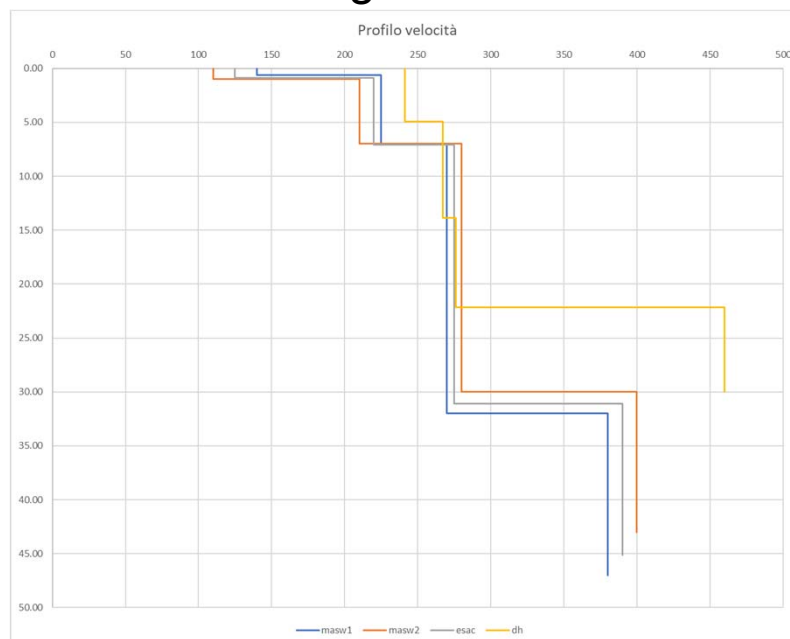
50

## Profilo Sismostratigrafico



51

## Profilo Sismostratigrafico



52

## Profilo Sismostratigrafico

Velocità di propagazione delle onde sismiche in un mezzo elastico:

Velocità delle onde P: 
$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2 \cdot G}{\rho}}$$

Velocità delle onde S: 
$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Velocità delle onde R; 
$$V_R = \frac{0.874 + 1.117 \cdot \nu}{1 + \nu}$$

53

## Profilo Sismostratigrafico

Velocità di propagazione delle onde sismiche in un mezzo elastico:

1. Il rapporto  $V_p/V_s$  varia tra  $\sqrt{2}=1.41$  e  $\infty$ , per  $\nu$  variabile fra 0 e 0,5. Dipende esclusivamente dal coefficiente di Poisson  $\nu$ .

2.  $V_p$  è sempre maggiore di  $V_s$ ;

3.  $V_R$  è sempre minore di  $V_s$ ;

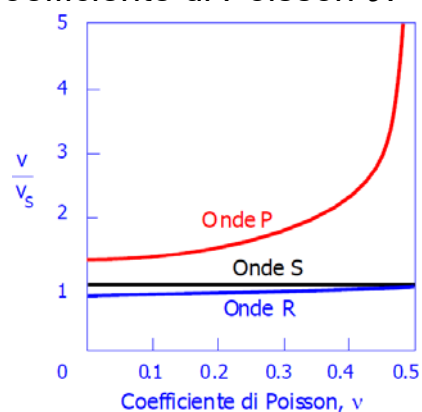
4.  $V_R$  è quasi uguale alla  $V_s$ :

$$\nu=0,25 \quad V_R = 0,919 V_s$$

$$\nu=0,33 \quad V_R = 0,933 V_s$$

$$\nu=0,40 \quad V_R = 0,943 V_s$$

$$\nu=0,45 \quad V_R = 0,955 V_s$$



54

## Profilo Sismostratigrafico

› Valori tipici  $V_P$  e  $V_S$ :

Tipo di terreno	$V_P$ [m/s]	$V_S$ [m/s]
Argilla satura	1500*	100 ÷ 250
Sabbia fine e media	300 ÷ 500	120 ÷ 200
Sabbia densa	400 ÷ 600	200 ÷ 400
Ghiaia	500 ÷ 750	300 ÷ 600
Arenaria	1500 ÷ 4500	700 ÷ 1500
Marna	1500 ÷ 4500	600 ÷ 1500

\* Velocità di propagazione nell'acqua

*nell'acqua  $V_P = 1500$  m/s; nell'aria  $V_P = 340$  m/s*

Per terreni non saturi e rocce da misure sismiche risulta:  $\frac{V_P}{V_S} \approx 1.5 \div 2.0$

55

## Profilo Sismostratigrafico

› Valori tipici  $\gamma$  e  $V_S$ :

Terreni	Valori indicativi	
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_S$ (m/s)
terreni organici, torbe	10 ÷ 13	< 100
argille molto molli	14 ÷ 17	
terreni piroclastici sciolti	10 ÷ 17	100 ÷ 200
argille tenere, sabbie sciolte	16 ÷ 19	
terreni piroclastici densi/cementati	12 ÷ 19	200 ÷ 400
argille consistenti, sabbie dense	18 ÷ 21	
argilliti, sabbie e ghiaie cementate	19 ÷ 22	400 ÷ 800
roccia tenera alterata o fratturata	18 ÷ 22	
roccia tenera intatta, roccia lapidea	22 ÷ 24	> 800

**Intervalli di valori adottati anche come criteri di classificazione dei siti da EC8 e Normativa nazionale**

56

## Profilo Sismostratigrafico

› Valori tipici di  $v$ :

materiale	$v$ [-]
argilla satura	0.40-0.50
argilla	0.30-0.45
sabbia	0.20-0.45
roccia	0.10-0.30 <sup>(*)</sup>
gomma	~ 0.50
acciaio	0.27-0.30
cemento	0.20
sughero	~ 0.00

<sup>(\*)</sup> aumenta all'aumentare del carico applicato e del contenuto in acqua (L. S. Burshtein, 1968)

57

## Profilo Sismostratigrafico

**Il profilo di  $V_s$  è uno dei parametri più influenti nella RSL.**

Le incertezze assumono un ruolo chiave in presenza di strati deformabili superficiali, nei quali un incontrollato abbattimento di rigidità potrebbe tradursi in una sovrastima del livello di dissipazione energetica, dando luogo a risultati non cautelativi.

**L'incertezza viene amplificata in presenza di forti contrasti di impedenza.**

L'aumento della **variabilità di  $V_s$** , **riduce l'amplificazione** mentre aumenta la relativa variabilità, comportando **stime più gravose** dell'azione sismica.

**La variabilità di  $V_s$**  è la principale responsabile delle elevate incertezze a **bassi periodi di vibrazione** negli spettri di risposta.

58



## Profilo Sismostratigrafico

Come valutare la variabilità del profilo di velocità?

Le indicazioni dovrebbero venire da chi effettua le prove, tenendo conto:

1. Della loro catena di misura;
2. Della bontà del dato acquisito;
3. Delle approssimazioni nella elaborazione del dato acquisito;
4. Delle correlazioni fra le indagini effettuate;
5. Dalla preparazione ed esperienza personale.

59



## Profilo Sismostratigrafico

Ricordiamo una differenza fondamentale:

**La prova geotecnica** consiste in una serie di procedure completamente standardizzate grazie alle quali i numeri che si ottengono sono tra loro confrontabili in modo semplice e univoco. Le prove geotecniche possono quindi essere eseguite da tecnici seguendo dei protocolli standardizzati - cioè uguali per tutti - grazie ai quali i valori ottenuti risultano alla fine confrontabili.

Una prova fornisce un dato oggettivo.

## Profilo Sismostratigrafico

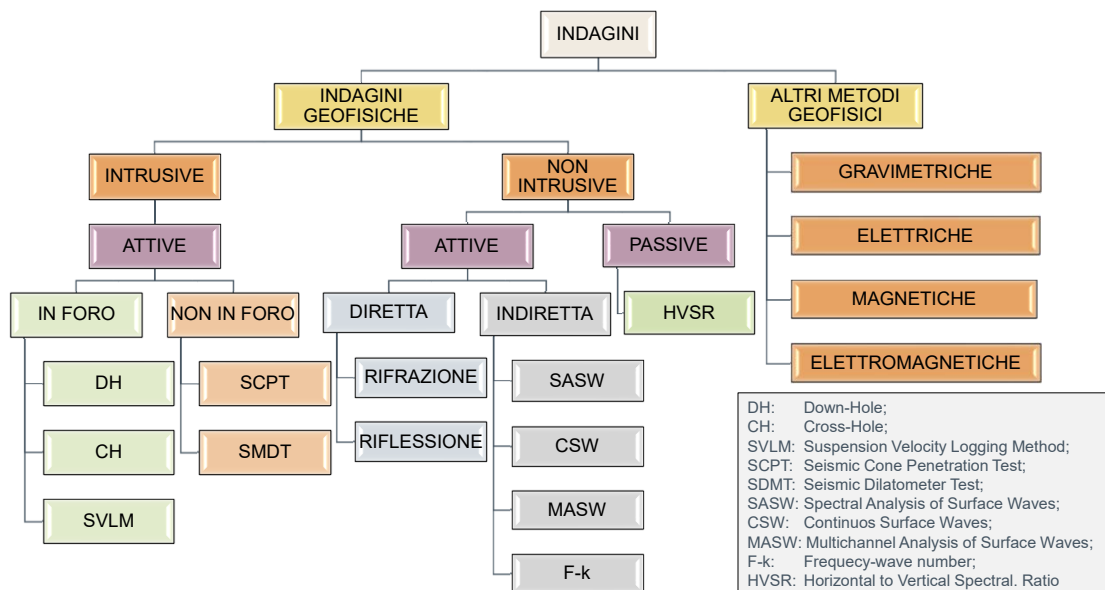
Questo in geofisica non è possibile, per questo si deve parlare di **indagine geofisica** e non di prova geofisica:

1. nulla in campagna è di fatto standardizzabile;
2. l'analisi di un qualsiasi dato sismico è un qualcosa in cui la persona, professionista o ricercatore, dovrebbe far confluire tutte le sue specifiche competenze.
3. Chiamare prova un'indagine sismica significa attribuire ai risultati un valore che prescinde dalle capacità di chi ha acquisito i dati e svolto le analisi.
4. I fenomeni fisici sono di per sé esatti (la natura non segue leggi diverse a seconda di un capriccio momentaneo), se il profilo  $V_s$  ricavato da, ad esempio, un'indagine MASW è impreciso o errato, lo è perché chi ha analizzato quei dati ha sbagliato il suo lavoro e non perché le onde di superficie "hanno sbagliato a propagarsi in quel modo".

Giancarlo Dal Moro – Geologia Tecnica & Ambiente – n. 1 / 2018

61

## Profilo Sismostratigrafico



Rielaborazione slide prof. Ing. Claudia Madiai

62

## Profilo Sismostratigrafico

Normalmente non viene data una variabilità o una deviazione standard del dato.

Un aiuto ci può venire da:

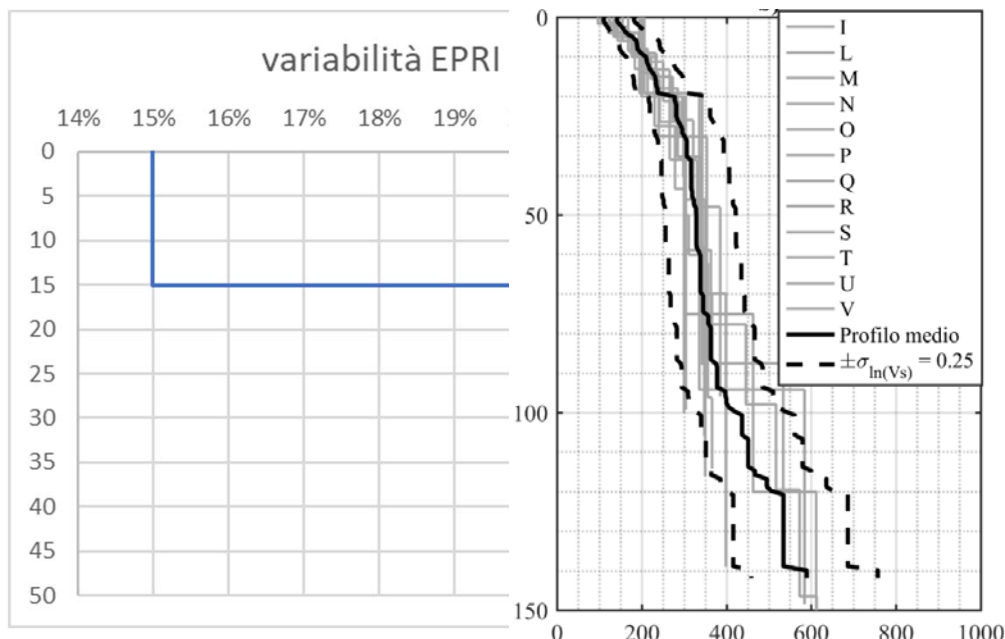
Linee Guida del novembre 2012 pubblicate da EPRI (Electric Power Research Institute) «Seismic Evaluation Guidance. Screening, Prioritization and Implementation Details (SPID) for the Resolution of Fukushima Near-Term Task Force Recommendation 2.1: Seismic»

Che danno una deviazione standard logaritmica ( $\sigma_{\ln(V_s)}$ ) pari a 0.25.

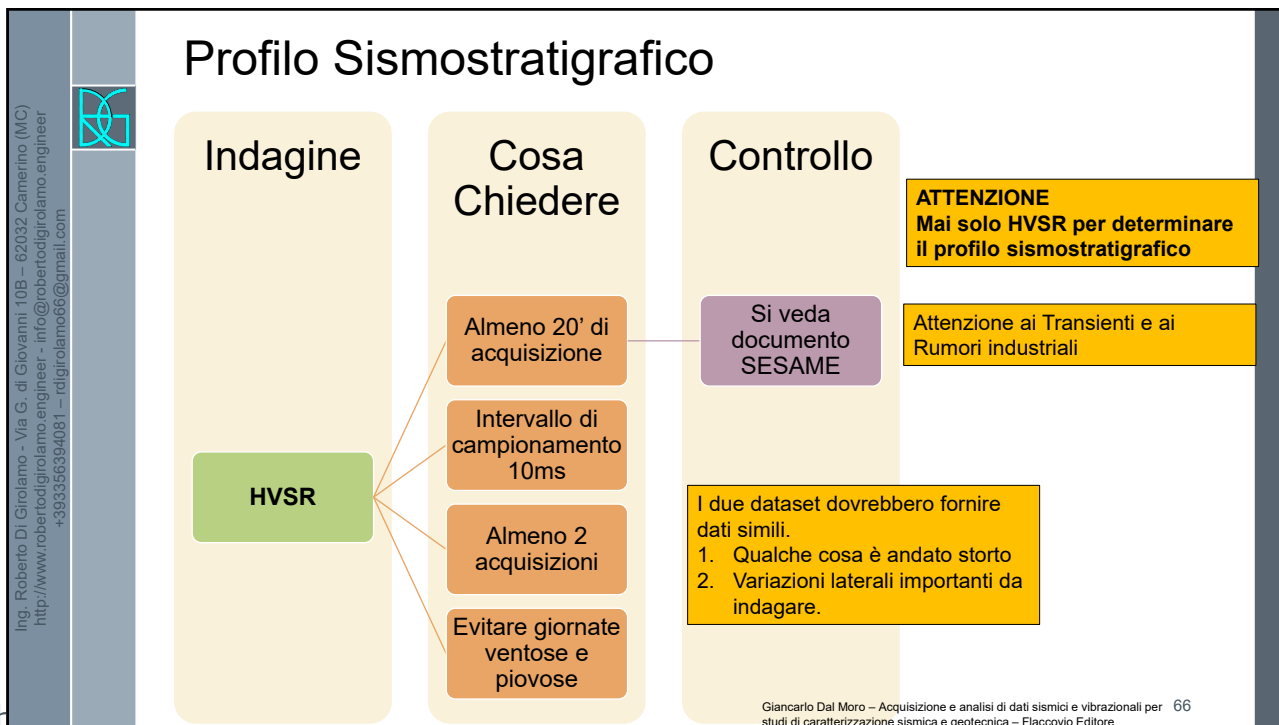
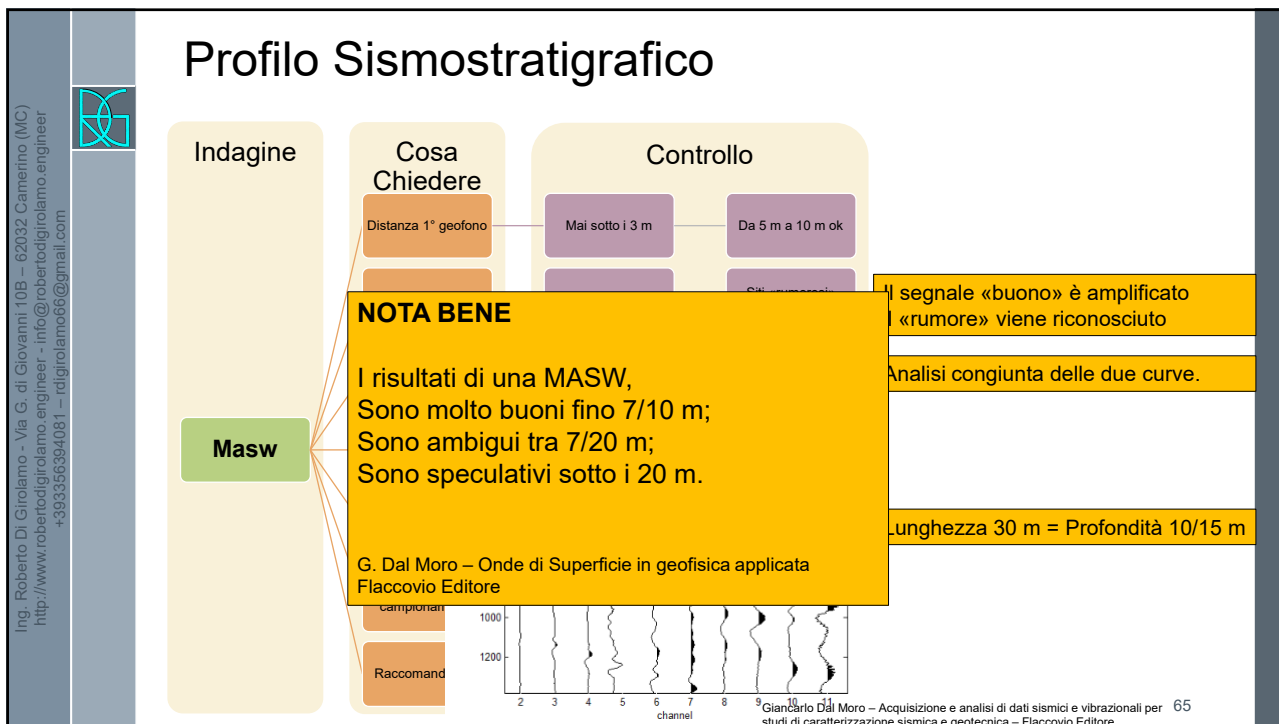
Nel testo si sottolinea che per profondità inferiori a 15 metri la deviazione standard logaritmica ( $\sigma_{\ln(V_s)}$ ) può scendere a 0.15

63

## Profilo Sismostratigrafico







## Profilo Sismostratigrafico

Note a margine HVSR.

Il parametro più importante per una buona acquisizione HVSR è **la durata** di registrazione.

Il concetto base per stabilire la durata di acquisizione è il seguente:

più si ha un ambiente rumoroso (ad es. traffico stradale pesante nelle vicinanze, le condizioni atmosferiche sono pessime, presenza di industrie ecc.) e più lunga è la durata della registrazione da effettuare.

Secondo le linee guida SESAME, la durata minima consigliata dovrebbe variare dai 10' a 20' minuti per i siti con un frequenza fondamentale compresa tra 10 Hz e 0,2 Hz rispettivamente.

**Sottolineo che questi sono il minimo raccomandato.**

67

## Profilo Sismostratigrafico

frequenze tipiche							periodi tipici						
		$V_s$							$V_s$				
		50	100	200	400	800			50	100	200	400	800
$\pm$	5	2.5	5	10	-	-	$\pm$	5	0.4	0.2	0.1	-	-
	10	1.25	2.5	5	10	-		10	0.8	0.4	0.2	0.1	-
	20	0.63	1.25	2.5	5	10		20	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1
	50	0.25	0.5	1	2	4		50	4	2	1	0.5	0.25
	100	-	0.25	0.5	1	2		100	-	4	2	1	0.5
	150	-	-	0.33	0.67	1.33		150	-	-	3	1.5	0.75
	200	-	-	0.25	0.5	1		200	-	-	4	2	1

**F = 0,25-10 Hz T = 0,1-4 sec.**

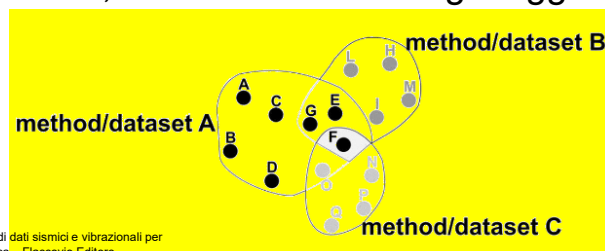
68

## Profilo Sismostratigrafico – Analisi Congiunta

Bisogna sfatare un mito:

Fare una MASW e un HVSR analizzandoli in modo indipendente per poi sintetizzare i risultati, **NON È ANALISI CONGIUNTA**, ma integrazione dei dati.

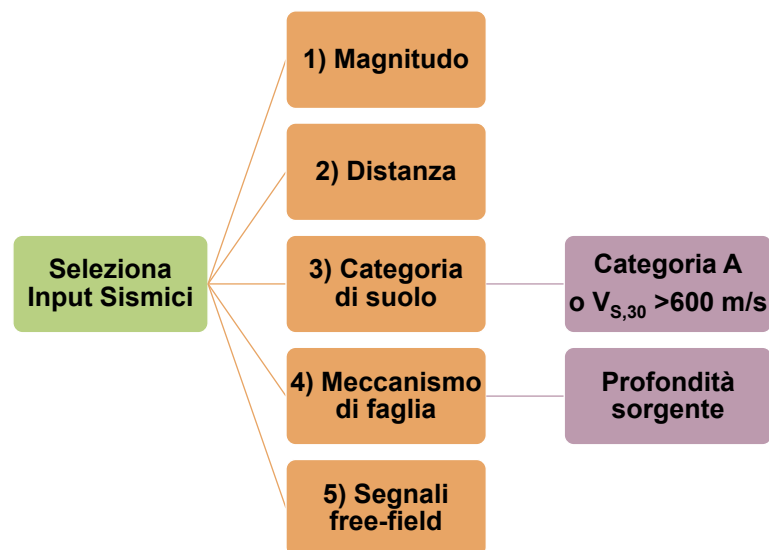
**L'ANALISI CONGIUNTA È** mettere all'interno dello stesso processo di inversione/modellazione una serie di "oggetti" (MASW e HVSR ad esempio) e trovare un modello che, quantitativamente, si accorda con tutti gli "oggetti" considerati.



Giancarlo Dal Moro – Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica – Flaccovio Editore

69

## Selezione Input Sismici



G. Acunzo, A. Pagliaroli, G. Scassera – IN-SPECTOR, un software di supporto alla selezione di accelerogrammi naturali spettrocompatibili per analisi geotecniche e strutturali – NGTTS 2014 – sessione 2.2

70

## Selezione Input Sismici

*NTC 2018 – punto 3.2.3.6.*

La norma prevede che le storie temporali del terreno possano essere:

1. **Artificiali**, generati mediante algoritmi stocastici;
2. **Sintetici**, generati mediante simulazione numerica del processo di rottura;
3. **Naturali o registrati**, registrazioni accelerometriche di eventi sismici reali;

**Per la RSL si possono usare solo quelli naturali o sintetici.**

71

## Selezione Input Sismici

*NTC 2018 – punto 3.2.3.6. – ultimi periodi*

L'uso di storie temporali del moto del terreno naturali o registrate è ammesso **a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.**

Le storie temporali del moto del terreno registrate devono essere selezionate e *possono* essere scalate in modo tale che i relativi **spettri di risposta approssimino gli spettri di risposta elastici nel campo dei periodi propri di vibrazione di interesse per il problema in esame.**

72



## Selezione Input Sismici

### *NTC 2018 – punto 3.2.3.6. – ultimi periodi*

Nello specifico la compatibilità con lo spettro di risposta elastico deve essere verificata in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi associati alle storie per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  del 5%.

**L'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% ed uno scarto in eccesso superiore al 30%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico in alcun punto dell'intervallo dei periodi propri di vibrazione di interesse per l'opera in esame per i diversi stati limite.**

73

# Tutto qui?

74

## Selezione Input Sismici

### *CIRCOLARE PUNTO C7.11.3.1.2.2 – ultimi 3 periodi*

Benché le NTC prescrivano che il requisito della spettro-compatibilità debba essere soddisfatto rispetto allo spettro di risposta medio di un insieme di accelerogrammi, **è opportuno evitare l'utilizzo di segnali individuali il cui spettro di risposta presenti uno scarto in eccesso rispetto allo spettro elastico di riferimento superiore al 30% questo per evitare l'adozione di accelerogrammi rappresentativi di una domanda sismica troppo severa.**

75

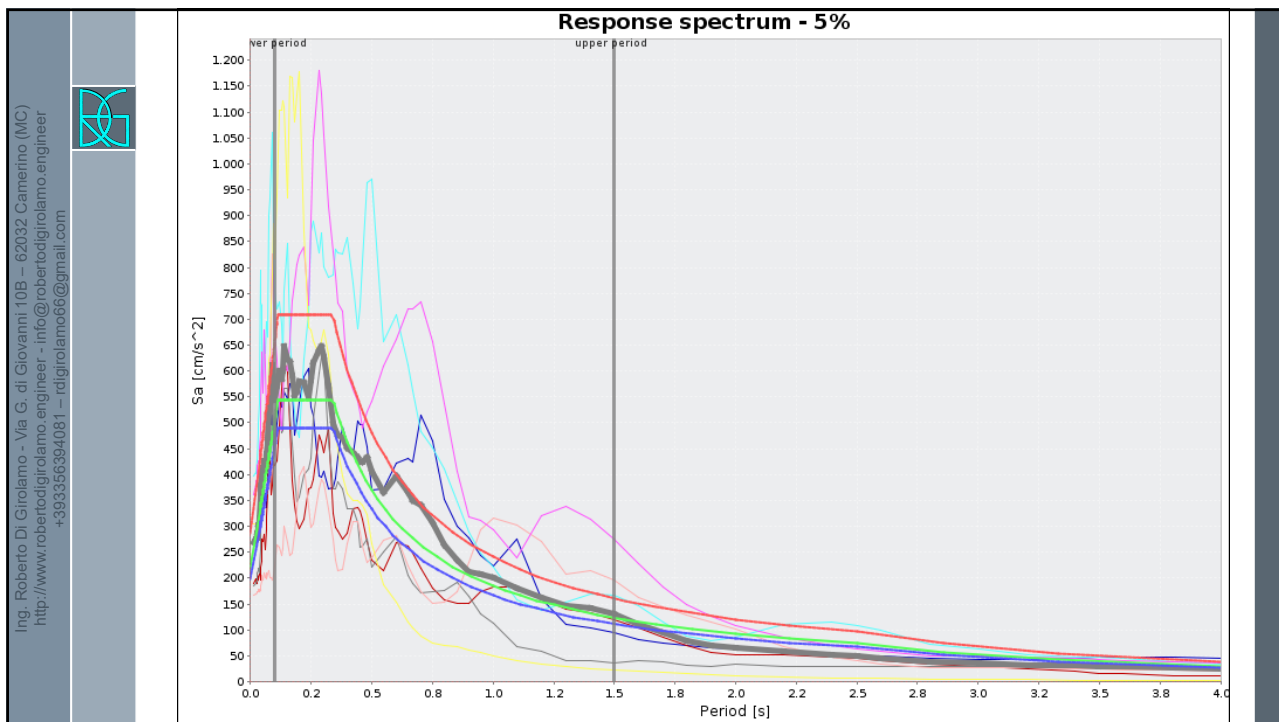
## Selezione Input Sismici

### *CIRCOLARE PUNTO C7.11.3.1.2.2 – ultimi 3 periodi*

Tali accelerogrammi potrebbero infatti determinare, sulla struttura o sul sistema geotecnico oggetto di analisi, **effetti di non linearità eccessivamente pronunciate incompatibili con l'effettiva pericolosità sismica del sito.**

Per motivi analoghi è opportuno selezionare storie temporali che soddisfino l'ulteriore vincolo di **compatibilità in media con l'accelerazione massima ( $a_g$ )** prescritta per il sito in esame dallo studio di pericolosità sismica di base.

76



## Selezione Input Sismici

### Caratteristiche del moto sismico al sito.

In prossimità dell'epicentro (near field) l'influenza dei meccanismi di sorgente prevale generalmente su quella degli altri fattori. I parametri che caratterizzano i meccanismi di sorgente sono:

#### a. Profondità della sorgente

A parità di altre condizioni un terremoto più superficiale:

- è più distruttivo
- interessa un'area meno estesa
- l'accelerogramma è di tipo più impulsivo, la durata è minore, il contenuto in frequenza è più ricco di alte frequenze

## Selezione Input Sismici



### b. lunghezza della frattura

È un parametro a cui risulta proporzionale l'energia rilasciata, quindi anche alcuni parametri caratteristici del terremoto e del moto sismico:

correlazione semi-empirica «indicativa»	
$M_w$	Lunghezza faglia (km)
5.5	~ 4 – ~10
<b>6.0</b>	<b>~ 10 – ~15</b>
<b>6.5</b>	<b>~ 15 – ~30</b>
7.0	~ 30 – ~60
7.5	~ 60 – ~95
8.0	~ 95 – ~195

79

## Selezione Input Sismici



### c. energia rilasciata

Maggiore è l'energia rilasciata, maggiore è l'estensione dell'area di risentimento e maggiori sono valori alcuni parametri caratteristici del terremoto e del moto sismico (magnitudo, intensità, durata, accelerazione massima, spostamento).

### d. meccanismo di rottura

Influenza la forma, l'ampiezza, la frequenza e la durata delle vibrazioni, oltre all'intervallo di tempo fra successivi rilasci di energia (eventi sismici).

80



## Selezione Input Sismici

La scelta sia rappresentativa della sismicità del sito:

- Paragonabile magnitudo;
- Paragonabile distanza dalla sorgente;
- Categoria di suolo A o  $V_{s,30} > 600$  m/s;
- Stesso meccanismo focale e paragonabile profondità;
- Segnali free-field.

La media delle estrazioni deve risultare all'interno della finestra +30%/-10% dello spettro target, per i limiti di estrazione considerati.

81

## Selezione Input Sismici

### Disaggregazione

**Selezione mappa**

☒ Visualizza punti della griglia riferiti a:

☐ Ridisegna mappa

Parametro dello scuotimento: **a(g)** **Se(T)**

Probabilità in 50 anni: 10% 81% 63% 50% 39% 30% 22% 10% 5% 2%

Percentile: 50 16 50 84

Periodo spettrale (sec):

Scala: 100000

Coordinate del centro della mappa: Latitudine: 43.141 Longitudine: 13.069

Campis scala/centro

Ricerca Comune: Il nome contiene: Ricerca

Comune evidenziato: Camerino

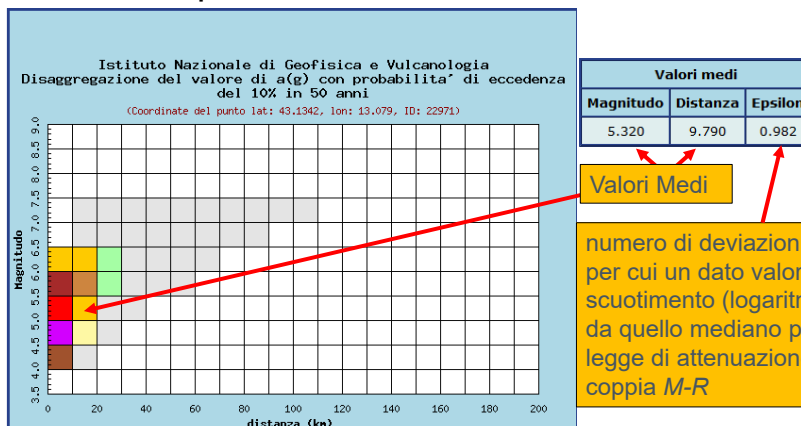
Elimina la Ricerca

82

## Selezione Input Sismici

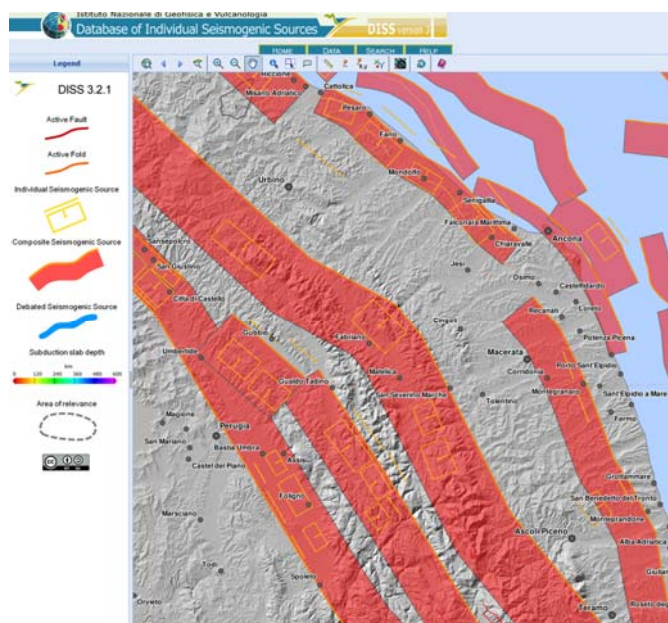
### Estrazione delle storie temporali – grafico disaggregazione

Il grafico di disaggregazione serve ad ottenere la coppia magnitudo – distanza che maggiormente contribuiscono all'occorrenza o al superamento dell'accelerazione di progetto



83

## Selezione Input Sismici



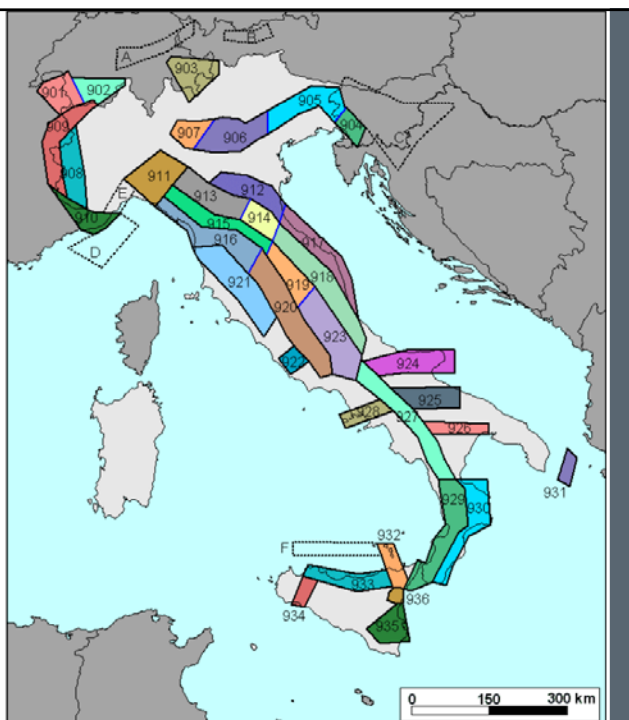
84

## Selezione Input Sismici

### Zonazione Sismogenetica ZS9

Le diverse zone sono individuate da un numero, le zone sono state utilizzate per la valutazione della pericolosità sismica.

Il colore delle zone non è significativo.



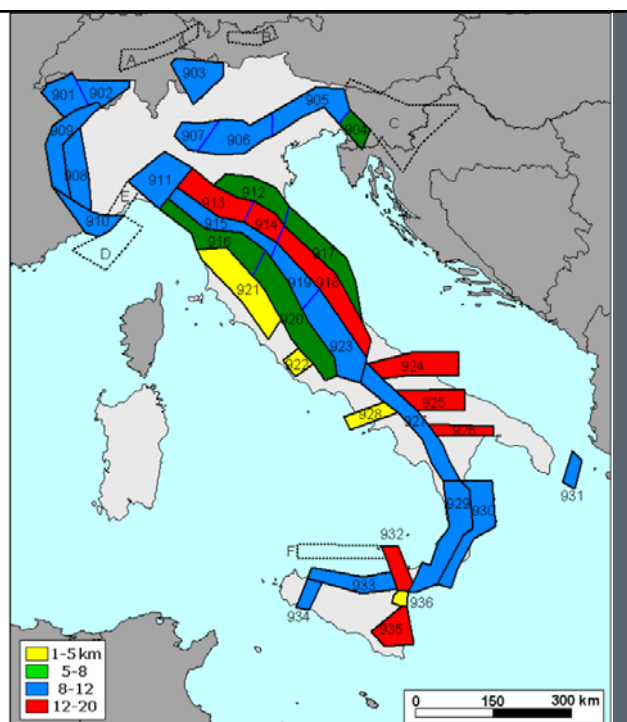
App.2 al rapporto conclusivo – Zonazione sismogenetica ZS9

## Selezione Input Sismici

### Zonazione Sismogenetica ZS9

Classi di profondità efficace assegnate alle diverse zone sismogenetiche.

Il colore delle zone identifica le classi di profondità.



App.2 al rapporto conclusivo – Zonazione sismogenetica ZS9



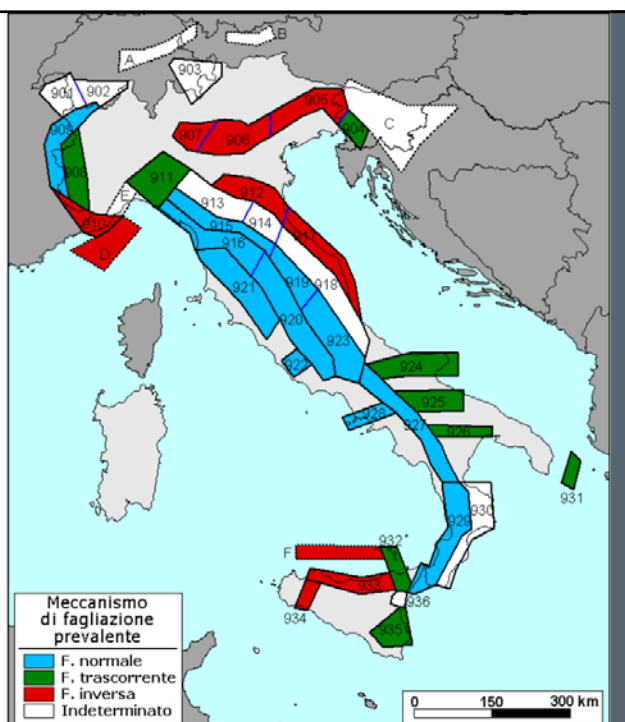
## Selezione Input Sismici

### Zonazione Sismogenetica ZS9

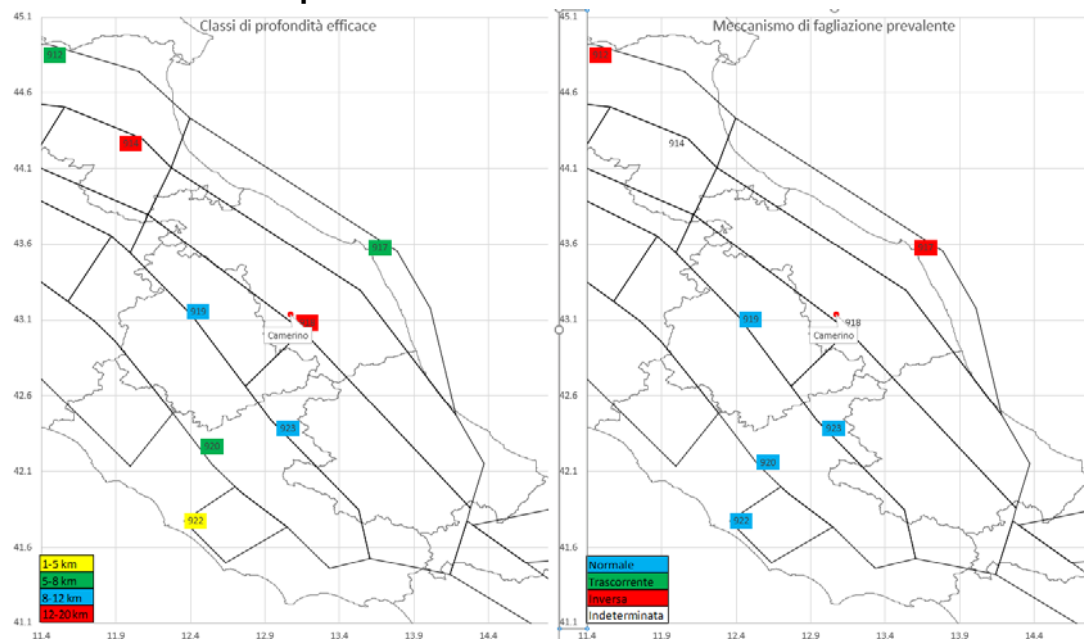
Meccanismo di fagliazione prevalente atteso per le diverse zone sismogenetiche che compongono la ZS9.

Il colore delle zone identifica il meccanismo prevalente.

App.2 al rapporto conclusivo – Zonazione sismogenetica ZS9



## Selezione Input Sismici



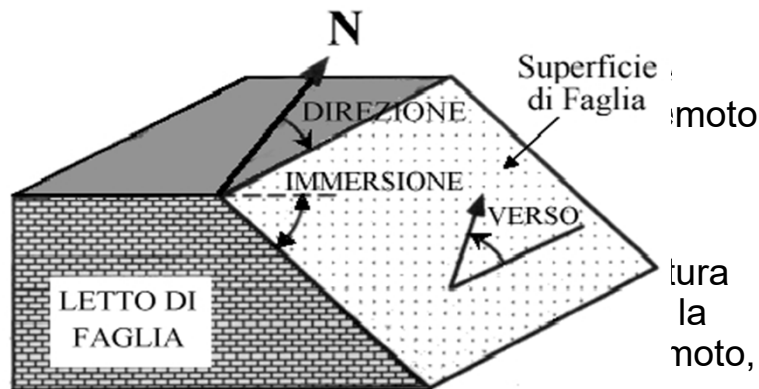
## Selezione Input Sismici

Ma che forma deve avere il moto di input?

La “dimensione” della sorgente determina la quantità di energia rilasciata ma anche la forma dello spettro di scuotimenti

In particolare controllata che corrisponda

Dove  $\mu$  è la profondità all'origine della dislocazione  
S è la superficie



Rielaborazione slide: La risposta sismica locale – D. Albarello 89

## Selezione Input Sismici

La magnitudo del terremoto viene stimata dall'ampiezza massima dello scuotimento (opportunamente scalato per tenere conto delle diverse distanze dalla sorgente) esiste una stretta relazione fra momento sismico e magnitudo:

$$m = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 6$$

Quindi si può dire che l'ampiezza massima dello scuotimento “dipende” dalla magnitudo

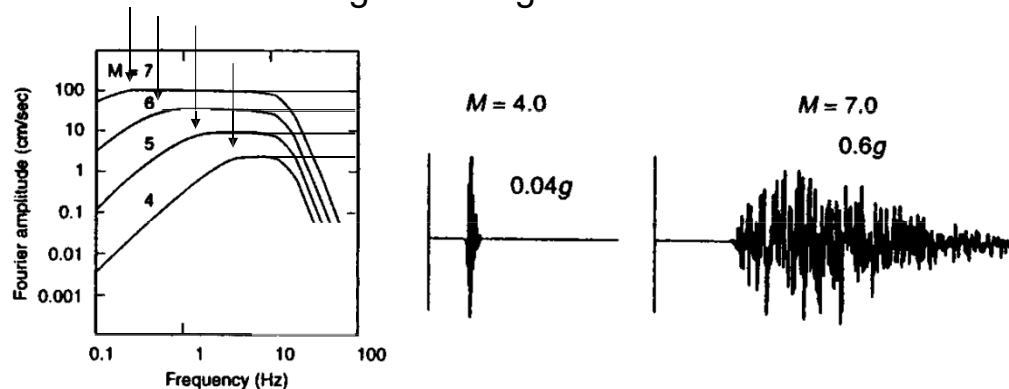
La dimensione della sorgente controlla la forma dello spettro

Rielaborazione slide: La risposta sismica locale – D. Albarello 90

## Selezione Input Sismici

La forma dello spettro di accelerazione si modifica all'aumentare della magnitudo

La durata complessiva del terremoto che è proporzionale alle dimensioni della faglia sismogenica



Rielaborazione slide: La risposta sismica locale – D. Albarello 91

## Selezione Input Sismici

La quantità di energia trasportata per unità del fronte d'onda diminuisce con la distanza dalla sorgente.

Il modo in cui questa diminuzione avviene dipende dai dettagli del percorso seguito dai diversi fronti d'onda e quindi dalle specifiche caratteristiche del mezzo.

Questa attenuazione (spreading geometrico) riguarda tutte le frequenze e si riflette in un generale abbassamento dello spettro con la distanza: tuttavia la forma complessiva non cambia

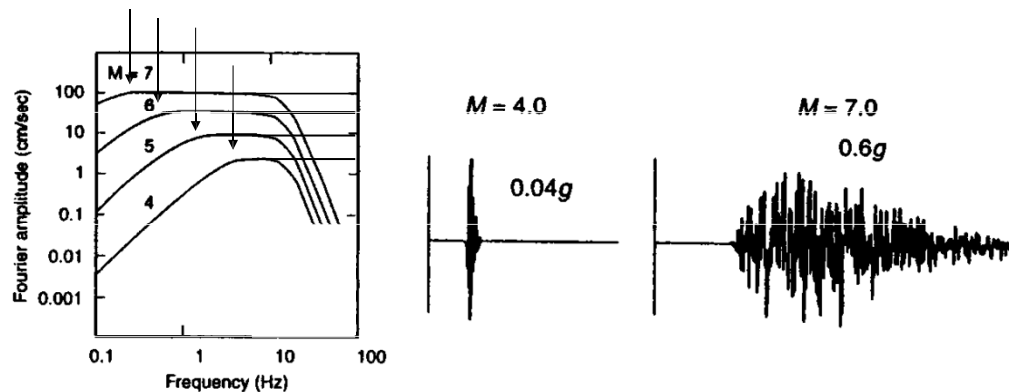
Rielaborazione slide: La risposta sismica locale – D. Albarello 92



## Selezione Input Sismici

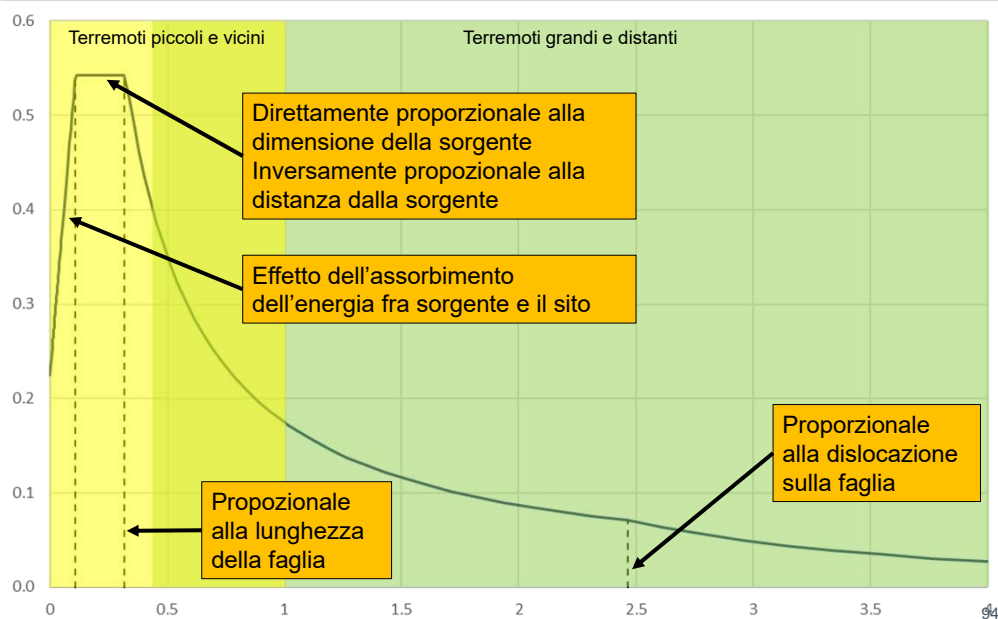
La Terra si comporta come un filtro passa-basso.

Questo effetto modifica la forma complessiva dello spettro in funzione della distanza percorsa dall'onda riducendo l'ampiezza delle alte frequenze



Rielaborazione slide: La risposta sismica locale – D. Albarello 93

## Selezione Input Sismici



Rielaborazione slide: La risposta sismica locale – D. Albarello

94

## Selezione Input Sismici

### NTC2018 – 7.3.5

Gli effetti sono rappresentati dai valori medi degli effetti più sfavorevoli ottenuti dalle analisi se si utilizzano almeno 7 accelerogrammi;

dai valori più sfavorevoli degli effetti, in caso di utilizzo di meno di 7 accelerogrammi;

Non si possono estrarre meno di 3 accelerogrammi.

**Ricordiamo che Accelerogrammi = Storie Temporal**

95

## Selezione Input Sismici

Esistono ad oggi varie soluzioni per la estrazione delle 7 registrazioni necessarie per la RSL tutti liberi:

1. **SEISM-HOME** – Eucentre  
<https://www.eucentre.it/seism-home-accelerogrammi/>
2. **REXEL** – Reluis  
[http://www.reluis.it/index.php?option=com\\_content&view=article&id=118&Itemid=105&lang=it](http://www.reluis.it/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=105&lang=it)
3. **REXELITE** – INGV  
<https://esm.mi.ingv.it/>
4. **REXELWEB** – INGV  
<https://esm-db.eu/#/home>  
[http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet\\_31/#/home](http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_31/#/home)

96



## Selezione Input Sismici

### Nota Bene:

Le storie temporali del moto del terreno registrate devono essere selezionate e **possono essere scalate** in modo tale che i relativi spettri di risposta approssimino gli spettri di risposta elastici nel campo dei periodi propri di vibrazione di interesse per il problema in esame (C3.2.3.6);

### OCCHIO

**non esagerare nella scalatura massima**

**Alcuni autori consigliano 0.25/4  
personalmente preferisco 0.5/2**

**Tale indicazione DEVE essere riportata in relazione**

97

## Selezione Input Sismici

### Spettro Target

**Selezione mappa**

☒ Visualizza punti della griglia riferiti a:

☐ Ridisegna mappa

Parametro dello scuotimento: **a(g)**

Probabilità in 50 anni: **10%**

Percentile: **50**

Periodo spettrale (sec):

**a(g)**

**Se(T)**

81% 16

63% 50

50% 84

39%

30%

22%

10%

5%

2%

Gráfico di disaggi

Scala: 100000

Coordinate del centro de mappa

Latitudine: 43.141

Longitudine: 13.069

Campis scala/centro

Ricerca Comune:

Il nome contiene:

Ricerca

Comune evidenziato: **Camerino**

Inststituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 ka

Selezione mappa

☒ Visualizza punti della griglia riferiti a:

☐ Ridisegna mappa

Parametro dello scuotimento: **a(g)**

Probabilità in 50 anni: **10%**

Percentile: **50**

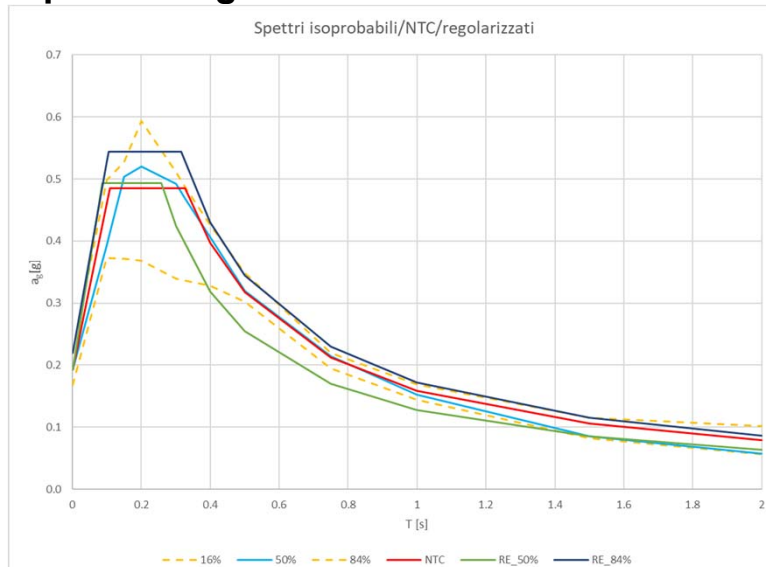
Periodo spettrale (sec):

98



## Selezione Input Sismici

### Spettro Target



101

## Selezione Input Sismici

Perché di tutta questa digressione sulla estrazione degli spettri?

1. La selezione degli accelerogrammi è uno degli elementi fondamentali della RSL;
2. Sbagliare o prendere una settupla non conforme può dare risultati critici;
3. Prendere una settupla o alcuni accelerogrammi della settupla non conformi potrebbero creare problemi alla modellazione;
4. Due settuple possono avere risultati diversi, analizzare più modelli è necessario per capire quanto il modello è "sensibile" a tale variazione di accelerogrammi.

102

Stiamo per finire!!!!



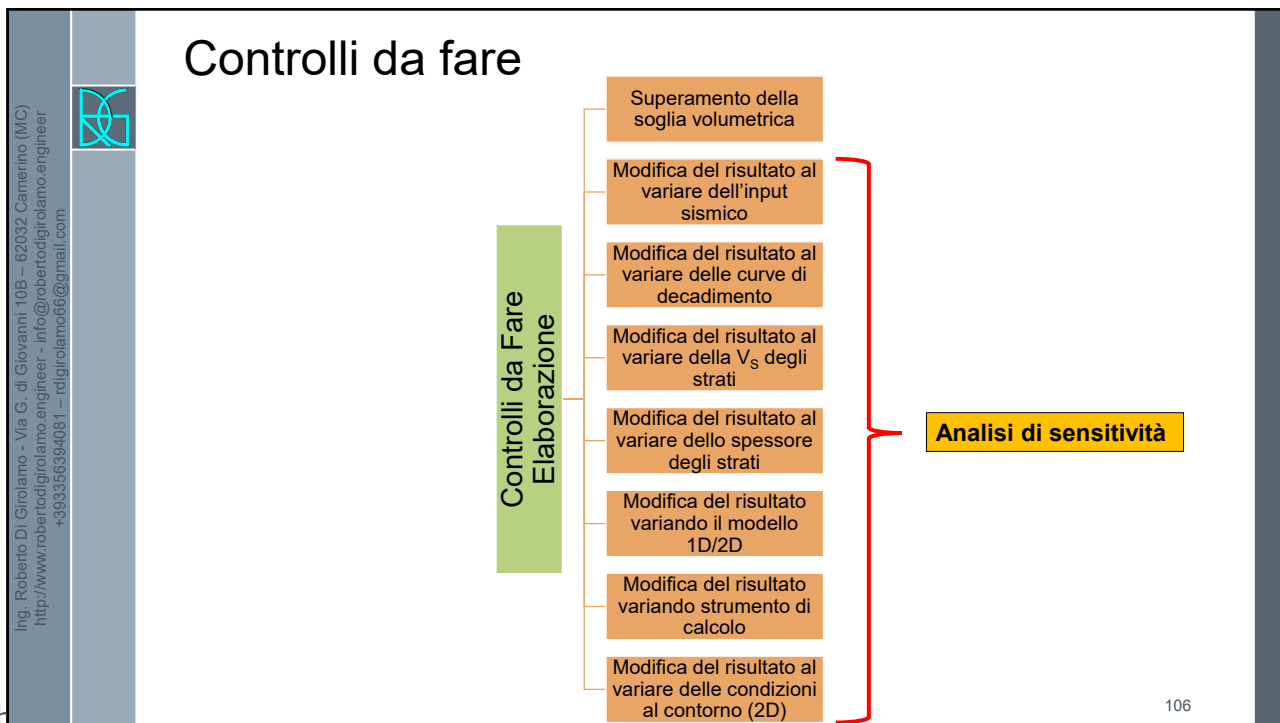
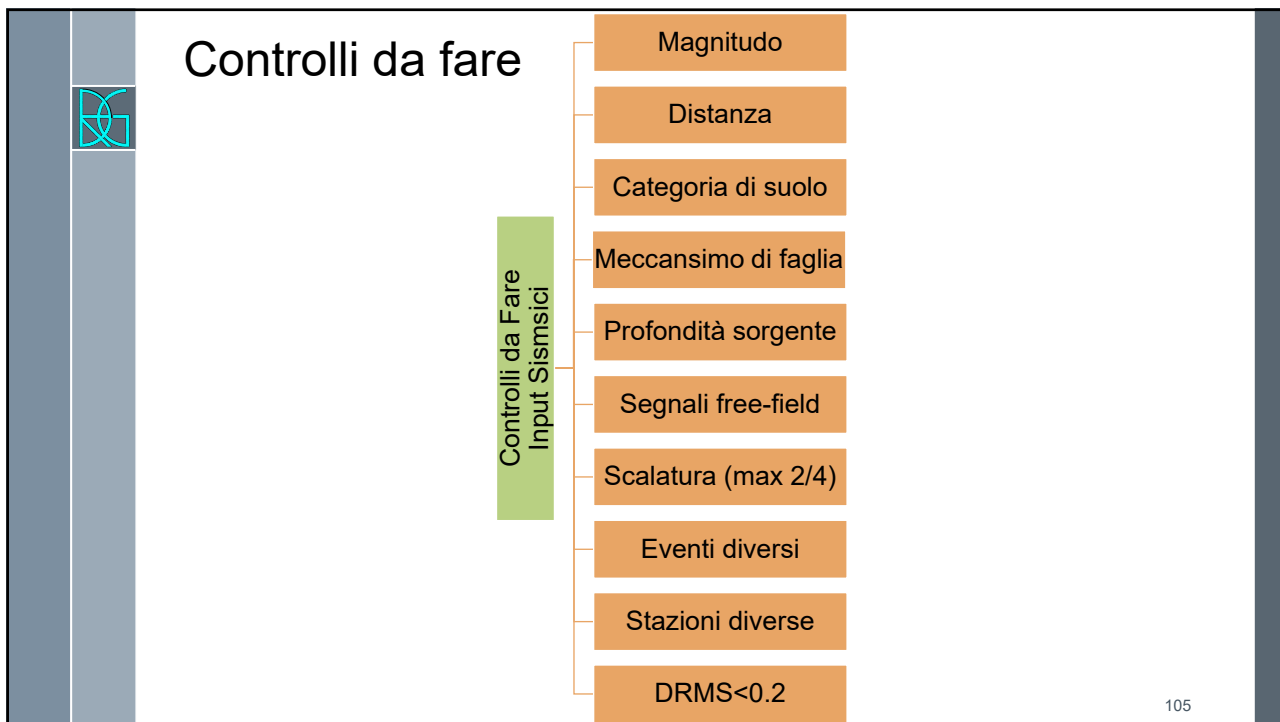
103

## Controlli da fare

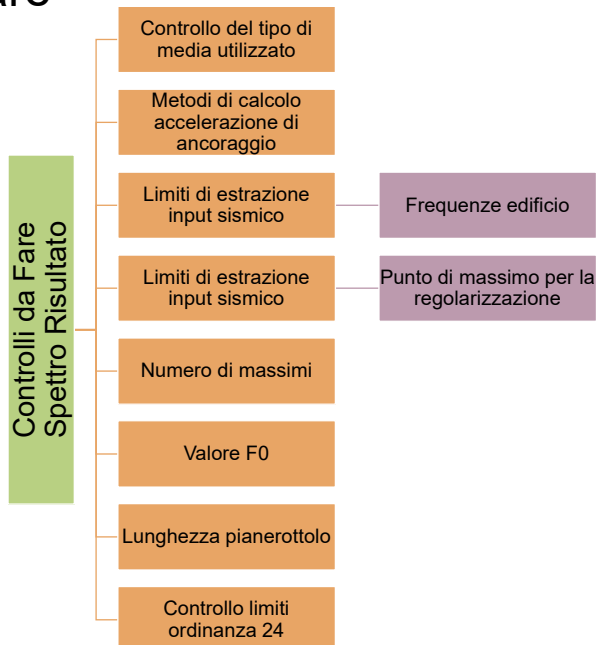
Controlli da Fare  
Dati di ingresso

- Coerenza tra sezione stratigrafica e modello 1D o 2D
- Coerenza fra modello 1D/2D e metodo utilizzato
- Coerenza fra sezione stratigrafica e sezione sismostratigrafica
- Coerenza fra HVSR, sezione stratigrafica e sezione sismostratigrafica
- Coerenza fra DH, sezione stratigrafica e sezione sismostratigrafica
- Controllo se effettuata Analisi Congiunta MASW/HVSR
- Variabilità VS
- Controllo curve decadimento e classificazione USCS
- Valore soglia volumetrica input sismici/profilo sismostratigrafico
- Calibrazione del Modello

104



## Controlli da fare



107

## FUMETTI PALLOSI #88



108