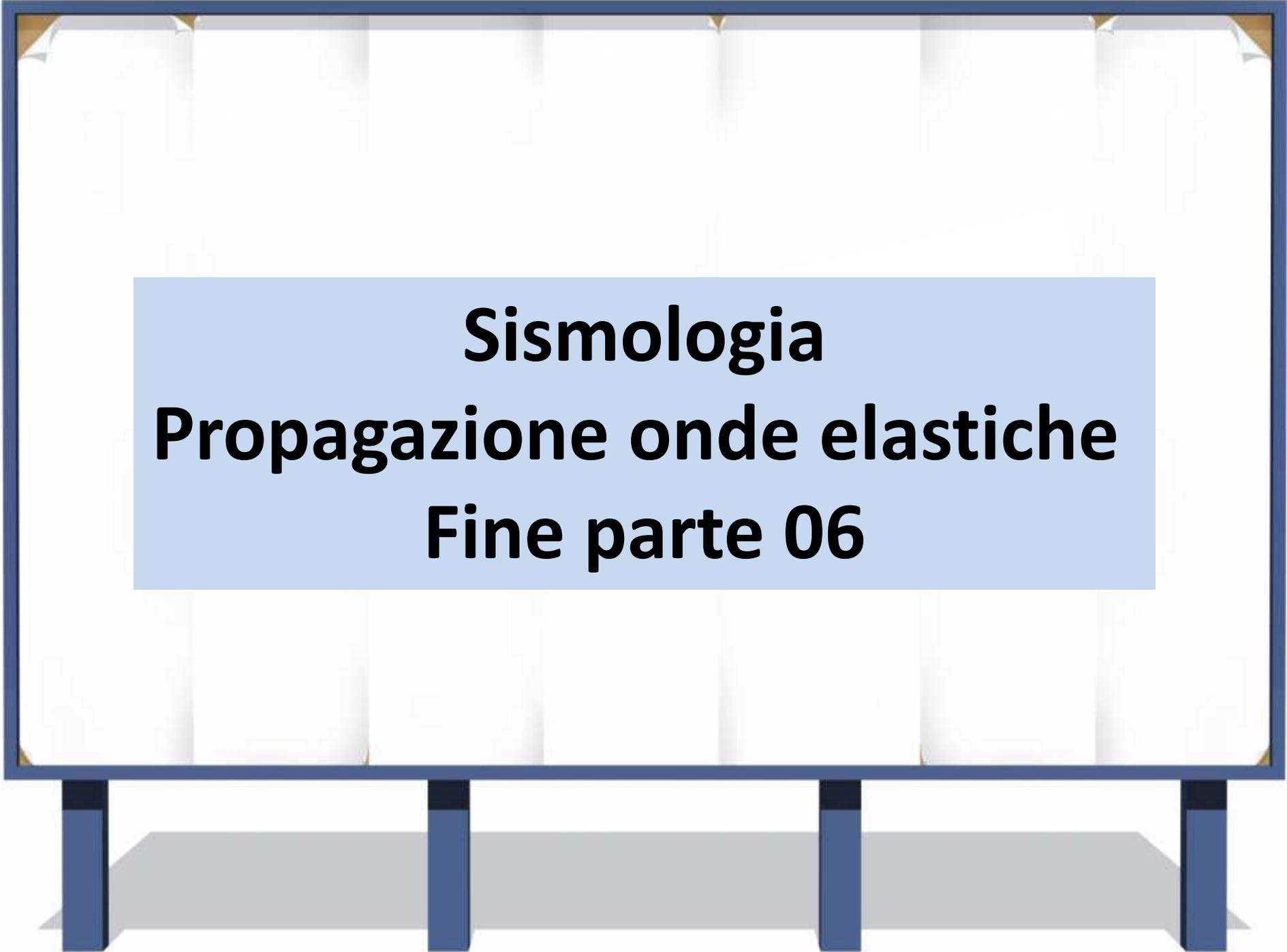


# Sismologia e rischio sismico

concetti fisici – applicazioni - normativa



**Sismologia**  
**Propagazione onde elastiche**  
**Fine parte 06**

# Velocità onde elastiche di volume (P ed S)

Uno sforzo normale  $N$  produce  
un'onda longitudinale

Onde longitudinale (P)

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

Onde di taglio (S)

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Uno sforzo tangenziale  
Alla superficie produce  
un'onda trasversale

$$V_P > V_S$$

$$V_P \cong 1.4 V_S$$

**se** 0.2  $\leftarrow (v) \rightarrow$  0.3

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{3} \quad (\text{con } \nu = 0.25)$$

# Velocità onde elastiche di superficie (R ed L)

## L ed R sono onde dispersive

- Le onde di **Rayleigh (R)** si formano alla superficie libera dei corpi per interferenza costruttiva delle onde P ed SV,
- Le onde di **Love** si formano per interferenza costruttiva delle riflessioni multiple delle onde SH alla superficie libera del suolo.,
- le onde di Love si formano solo se tali riflessioni possono avvenire,
- Ovvero, la velocità vari con la profondità o a gradini (in aumento od in diminuzione) o che cresca con continuità,
- Risulta che le onde di Love non si formano alla superficie di un semispazio omogeneo.
- Mentre, in un semispazio omogeneo, le onde R si generano e si propagano ad una velocità di fase Rayleigh  $V_R$  data da

$$V_R = \left( \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \right) \times V_S$$

**Il rapporto  $V_p/V_s$  si determina sperimentalmente mediante indagini sismiche.**

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{(2-2\nu)}{(1-2\nu)}}$$

**Avendo sperimentalmente  $V_p$  e  $V_s$  si ricava il coefficiente di Poisson**

Esempio: Conoscendo il rapporto  $V_p/V_s = 1.73$  mediante l'esecuzione di prove geofisiche il coeff. di Poisson ricavato dalla formula è pari a 0.25.

**Non è possibile ottenere la  $V_s$  conoscendo la  $V_p$  ed assumendo il valore del coeff. di Poisson come alcuni usano fare.**

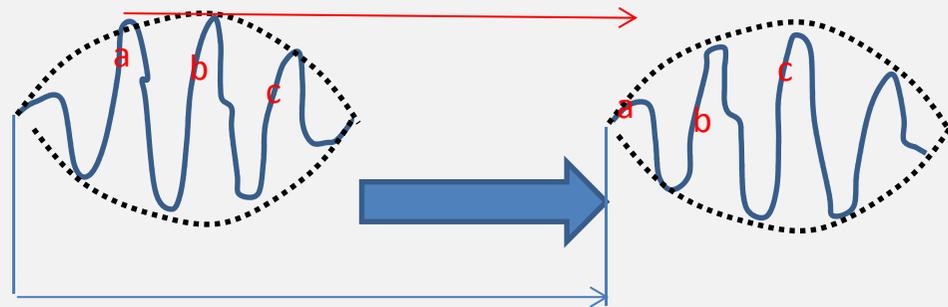
# Velocità onde elastiche di superficie (R ed L)

## L ed R sono onde dispersive

- Le onde di **Rayleigh (R)** e di Love sono dette onde **dispersive** cioè la velocità di fase è funzione della frequenza. Siccome l'interferenza costruttiva tra le onde P e le onde SV può avvenire a diverse frequenze il che significa differenti lunghezze d'onda quindi le onde di superficie prodotte avranno diverse velocità in funzione appunto della frequenza,
- Le animazioni riportate nella diapositiva successiva illustra il fenomeno dell'interferenza costruttiva sia per le onde R che per quelle di Love.

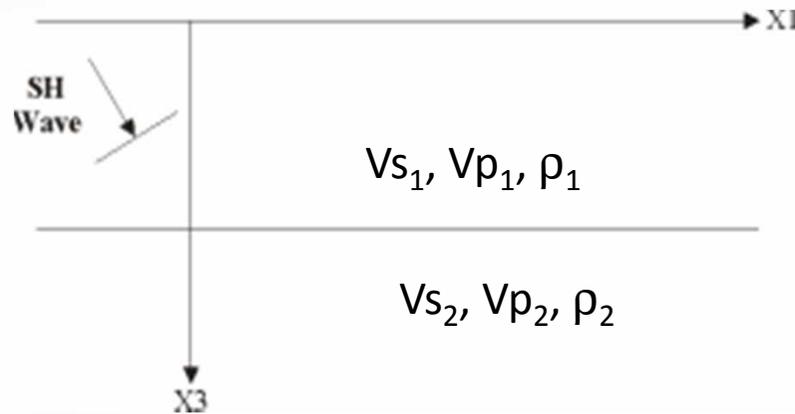
concetto della dispersione delle onde superficiali

Velocità di fase ondina (a) Rayleigh



# vibrazione particelle delle onde superficiali: Love e Rayleigh

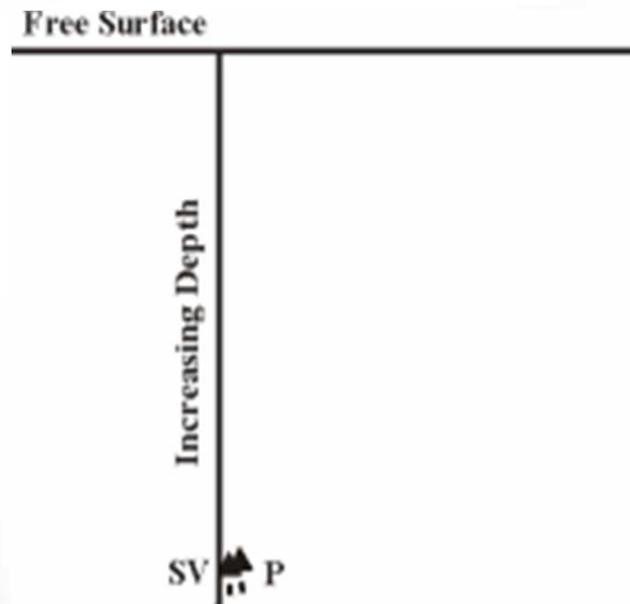
## Onde L



Le onde SH **non si trasformano** in altri tipi di onde nell'attraversamento di mezzi differenti.

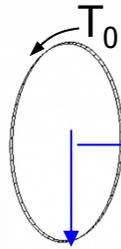
NB: le onde Love per la loro formazione richiedono che il mezzo superficiale sia caratterizzato da bassi valori di velocità al fine di permettere la formazione di onde riflesse multiple come si vede nell'animazione

## Onde R



Trasformazione onde P in  $S_v$ . Ciò spiega perché l'energizzazione verticale non può essere impiegata per la determinazione della  $V_s$ . Occorrono sorgenti polarizzate.

# Onde sismiche superficiali e loro importanza negli studi sismologici e geotecnici

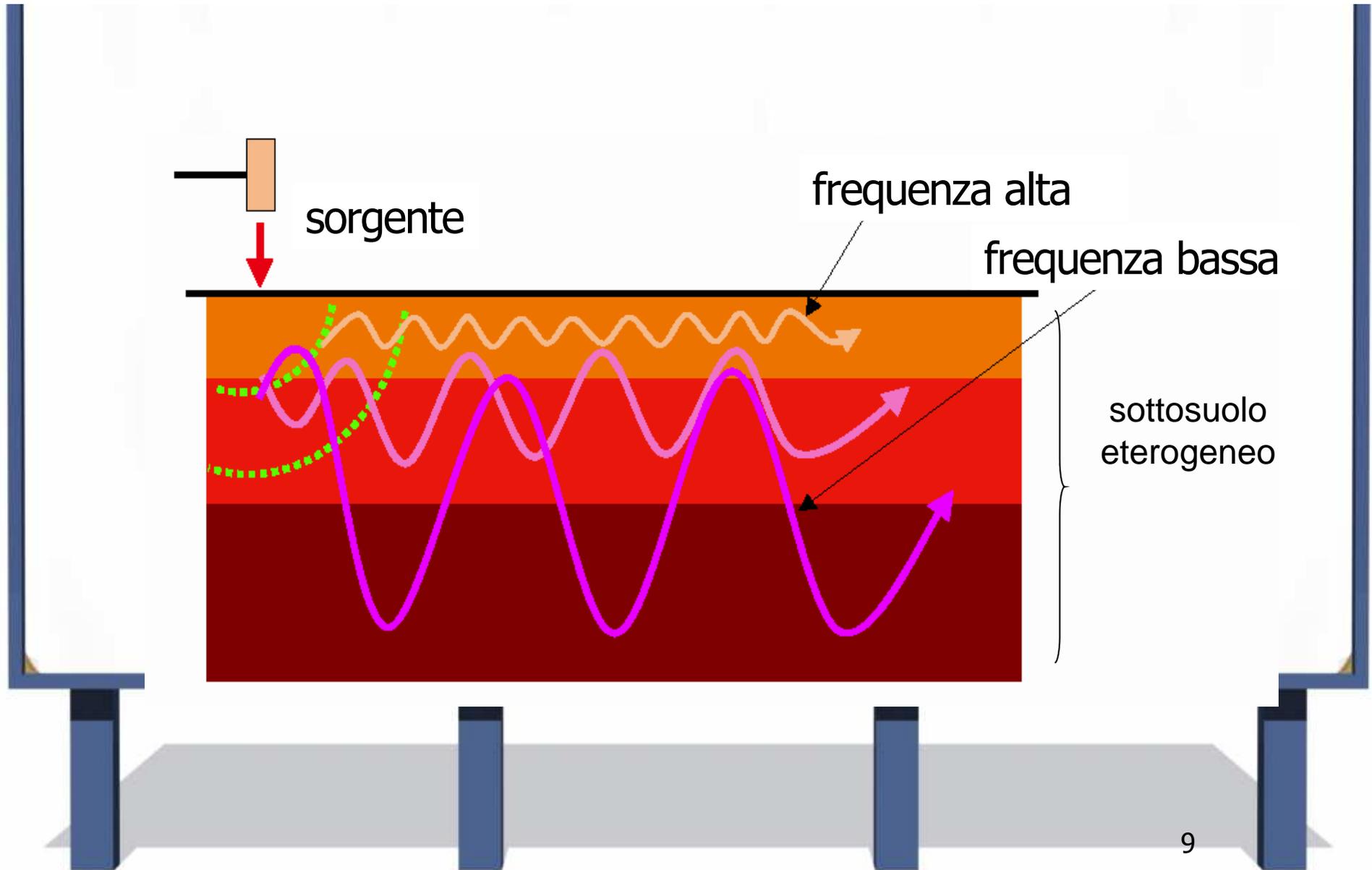


**direzione di propagazione dell'onda**

**direzione di vibrazione delle particelle**

- Le onde di Rayleigh (R) durante la propagazione in mezzi stratificati (cioè eterogenei) inducono vibrazioni, a forma di elisse con asse maggiore in direzione verticale, perpendicolari alla direzione di propagazione.
- **L'ampiezza** delle vibrazioni decresce esponenzialmente con la profondità e la maggior parte dell'energia associata è contenuta in uno spessore all'incirca equivalente a quello della lunghezza d'onda ( $\lambda$ ). Già a quella profondità l'ampiezza è  $< 10\%$  di quella in superficie.

**L'onda R** è composta da numerose ondivine ognuna con frequenza propria: le frequenze più elevate indagano profondità più superficiali cioè lente mentre quelle a frequenza più bassa interessano strati più profondi.



## Velocità delle onde elastiche nelle rocce cristalli (onde P)

La velocità è funzione di diversi fattori:

- età geologica: normalmente la relazione è diretta,
- porosità: può aumentare come abbassare il valore,
- anisotropia elastica:  $V_p$  lungo lo strato è  $>$  normale allo strato,
- natura litologica: componente mineralogica può aumentare come abbassare (p.es. il tenore di silice abbassa la velocità, mentre la percentuale di carbonati la incrementa);
- alterazione: normalmente la relazione è inversa.

## relazione tra velocità e porosità, tra saturazione ed età

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_{\text{fluido}}} + \frac{(1-\phi)}{V_m}$$

$$V_p = 46.5(ht)^{1/6}$$

h: profondità (m) e t: età (anni) Faust (1951).

Da usare con prudenza e solo per avere un'indicazione di massima!

### p.es.

Ad una profondità di 10 m e 5000 anni  $\Rightarrow V_p = 282$  m/s

Per una profondità di 100 m e 5000 anni  $\Rightarrow V_p = 414$  m/s

## Valori indicativi della velocità delle onde elastiche (P) nei materiali geologici

Litotipo	$v_p$ (m/sec)
- Aerato superficiale: .....	300 ÷ 800
- Sabbia asciutta: .....	500 ÷ 1000
- Sabbia umida: .....	600 ÷ 1800
- Argilla: .....	1800 ÷ 2900
- Terr.Alluv. sciolti: .....	400 ÷ 2000
- Acqua: .....	1450 ÷ 1500
- Lave:.....	2500 ÷ 4000
- Calcare: .....	3500 ÷ 5000
- Arenarie:.....	2500 ÷ 4500
- Graniti:.....	4000 ÷ 6000
- Piroclastiti coerenti (tufo).....	750 ÷ 2450
- Piroclastiti incoerenti (pozzolana).....	350 ÷ 1000

# Vs, $\nu$ , Gmax ( $G_0$ ) e smorzamento ( $\xi$ ) nel territorio italiano

TERRENI DI COPERTURA (per Vs crescenti)	Vs (m/s)	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Go (MPa)	$\xi$
Colluvioni	Valori $\leq 1000$ m/s	0.35	17.7	162	0.03
Detrito		0.35	19.6	320	0.01
Fluvio lacustre sabbioso ghiaioso e Alluvioni limoso argillose	400	0.40	19.6	320	0.04
Fluvio lacustre sabbioso ghiaioso e Alluvioni sabbioso ghiaiose 1 - 2	400-700	0.35	19.6	320-980	0.01
Travertino	550-1000	0.30	19.6	605-2000	0.02
FORMAZIONI DEL SUBSTRATO (bedrock)	Vs (m/s)	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Go (MPa)	$\xi$
Marnoso-Arenacea	Valori $\geq 1000$ m/s	0.30	20.6	2100	0.005
Schlier		0.30	21.6	2200	0.005
Bisciario		0.25	22.6	3312	0.005
Scaglia Cinerea (media)		0.30	21.6	2200	0.005
Scaglia Variegata		0.25	22.6	3312	0.005
Scaglia Rossa		0.25	23.5	5400	0.005
Marne a Fucoidi		0.25	22.6	3312	0.005
Maiolica		0.25	23.5	5400	0.005
Calcere Massiccio		0.25	24.5	10000	0.005

Tab. 2.2.3 – Tabella dei parametri geotecnici per i vari litotipi

# Valori indicativi della velocità delle onde elastiche (P) nei materiali geologici

	Litotipo	$v_p$ (m/sec)
SEDIMENTI CLASTICI	- Aerato superficiale: .....	300 ÷ 800
	- Sabbia asciutta: .....	500 ÷ 1000
	- Sabbia umida: .....	600 ÷ 1800
	- Argilla: .....	1800 ÷ 2900
	- Terr.Alluv. sciolti: .....	400 ÷ 2000
	- <u>Acqua:</u> .....	<u>1450 ÷ 1500</u>
	- Lave: .....	2500 ÷ 4000
ROCCIA CARBONATICA	- Calcare: .....	3500 ÷ 5000
	- Arenarie: .....	2500 ÷ 4500
ROCCIA CRISTALLINA	- Graniti: .....	4000 ÷ 6000
	- Piroclastiti coerenti (tufo) .....	750 ÷ 2450
	- Piroclastiti incoerenti (pozzolana) .....	350 ÷ 1000



## Valori indicativi di velocità $V_s$ in relazione alla litologia

Materiale	$V_s$ (m/s)
Argille molto soffici (città del Messico)	40 – 80
Argille e limi normalmente consolidati	150 – 300
Sabbie da mediamente a ben addensate	200 – 400
Ghiaie	400 – 800
Rocce tenere	500 – 1000
Calcari fratturati	700 – 1500
Rocce cristalline non alterate	2500 - 3500

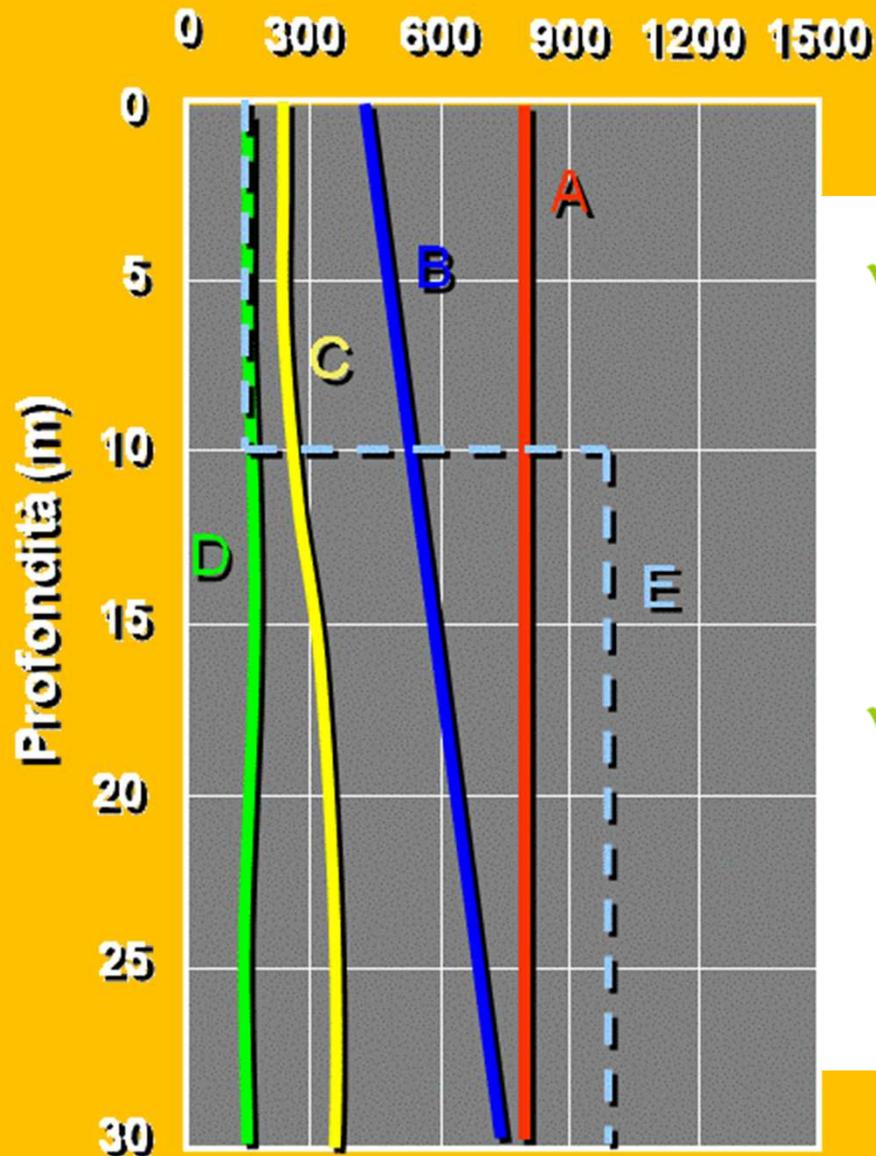


## Valori indicativi di velocità $V_R$ in relazione alla litologia

<i>Materiale</i>	<i>Poisson</i>	<i>VR/VS</i>
Sabbia	0.42	0.945
Argilla	0.45	0.949
Fondo granulare per strade	0.40	0.942

Da Irwin, 1994





L'uso di queste tecniche è l'oggetto del corso di Geofisica applicata della LM

### ✓ Metodi di superficie

- non-invasivi
- efficienti
- buon rapporto costo/benefici

### ✓ Metodi in foro

- cross-hole
- down-hole
- cono sismico (SCPT)

# costanti elastiche dinamiche in termini di velocità, densità, rapporto di Poisson

Conoscendo i valori di Velocità di propagazione Delle onde di volume oltre alla densità si possono determinare tutti i moduli elastici dinamici

Table 3.3 Relationships between the elastic constants of an isotropic body.

	$K$	$E$	$\lambda$	$\nu$	$\rho V_p^2$	$\rho V_s^2 = \mu$
$\lambda, \mu$	$\lambda + \frac{2\mu}{3}$	$\mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}$		$\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	$\lambda + 2\mu$	
$K, \lambda$		$9K \frac{K - \lambda}{3K - \lambda}$		$\frac{\lambda}{3K - \lambda}$	$3K - 2\lambda$	$\frac{3(K - \lambda)}{2}$
$K, \mu$		$\frac{9K\mu}{3K + \mu}$	$K - \frac{2\mu}{3}$	$\frac{3K - 2\mu}{2(3K + \mu)}$	$K + \frac{4\mu}{3}$	
$E, \mu$	$\frac{E\mu}{3(3\mu - E)}$		$\mu \frac{E - 2\mu}{3\mu - E}$	$\frac{E}{2\mu} - 1$	$\mu \frac{4\mu - E}{3\mu - E}$	
$K, E$			$3K \frac{3K - E}{9K - E}$	$\frac{3K - E}{6K}$	$3K \frac{3K + E}{9K - E}$	$\frac{3K}{9K - E}$
$\lambda, \nu$	$\lambda \frac{1 + \nu}{3\nu}$	$\lambda \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu}$			$\lambda \frac{1 - \nu}{\nu}$	$\lambda \frac{1 - 2\nu}{2\nu}$
$\mu, \nu$	$\mu \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	$2\mu(1 + \nu)$	$\mu \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$		$\mu \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}$	
$K, \nu$		$3K(1 - 2\nu)$	$3K \frac{\nu}{1 + \nu}$		$3K \frac{1 - \nu}{1 + \nu}$	$3K \frac{1 - 2\nu}{2 + 2\nu}$
$E, \nu$	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$		$\frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$		$\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{E}{2 + 2\nu}$
$V_p, V_s, \rho$	$\rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$	$\rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}$	$\rho(V_p^2 - 2V_s^2)$		$\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	

The constant names and units in Table 3.3 are as follows:

- $K$  bulk modulus (Pa)
- $E$  Young's modulus (Pa)
- $\lambda$  Lamé's constant (Pa)
- $\nu$  Poisson's ratio (dimensionless)
- $\mu$  shear modulus (Pa)
- $\rho$  density (kg/m<sup>3</sup>)
- $V_p$  compression wave velocity (m/s)
- $V_s$  shear wave velocity (m/s)

Geotechnicians primarily use  $K$  and  $\mu$ . The shear modulus,  $\mu$ , is often labeled  $G$  in civil engineering.

foglio Excel per il calcolo dei moduli elastici dinamici in base a valori di velocità delle onde di volume "Vp e Vs"

# Foglio Excel: Calcolo Moduli elastici dinamici (da misure sperimentali)

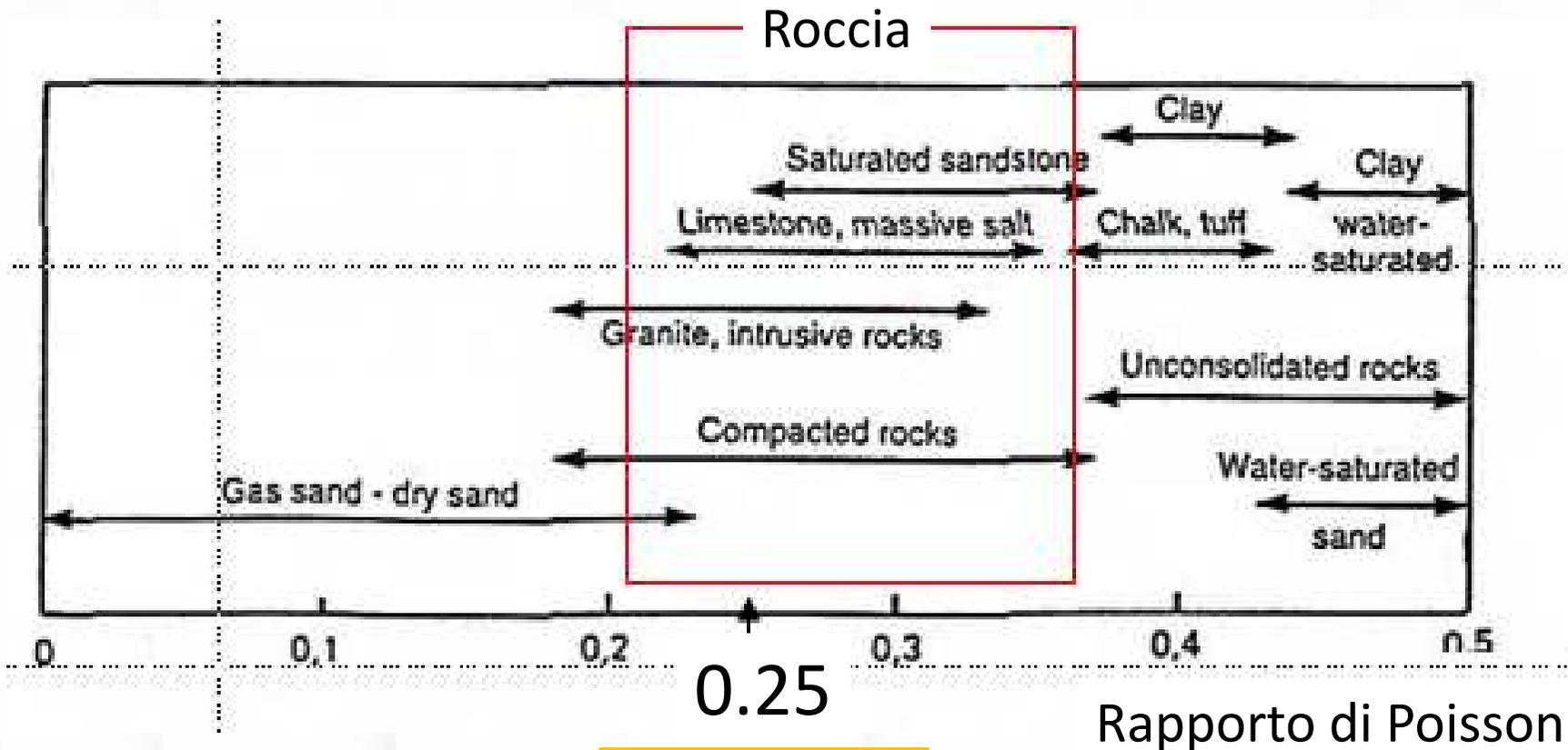
## Relazione tra i parametri sismici

N. Abu Zeid, 2004

Inserisci il parametro noto nella relativa casella (evidenziata in giallo)  
per osservare l'effetto sugli altri parametri lungo la stessa riga

										Onde di volume	
	$\rho(\text{kg/m}^3)$	E(pa)	$\nu$	k(pa)	$\mu(\text{pa})$	$\lambda(\text{pa})$	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Vp/Vs	Vp da $\lambda, \mu, \rho$	Vs da $\mu, \rho$
	densità	Young	Poisson	Bulk	Rigidità	Lamè-1	Longitudinale	Taglio	rapporto		
E, $\nu$	2600	5.00E+10	0.25	3.33E+10	2.00E+10	2.00E+10	4803.84	2773.50	1.732	4803.84	2773.50
E, k	2600	5.00E+10	0.25	3.30E+10	2.00E+10	1.96E+10	4792.65	2776.31	1.726	4792.65	2776.31
E, m	2600	5.00E+10	0.25	3.33E+10	2.00E+10	2.00E+10	4803.84	2773.50	1.732	4803.84	2773.50
$\nu, \kappa$	2600	4.95E+10	0.25	3.30E+10	1.98E+10	1.98E+10	4779.77	2759.60	1.732	4779.77	2759.60
$\nu, \mu$	2600	5.00E+10	0.25	3.33E+10	2.00E+10	2.00E+10	4803.84	2773.50	1.732	4803.84	2773.50
$\nu, \lambda$	2600	5.00E+10	0.25	3.33E+10	2.00E+10	2.00E+10	4803.84	2773.50	1.732	4803.84	2773.50
k, m	2600	4.99E+10	0.25	3.30E+10	2.00E+10	1.97E+10	4790.48	2773.50	1.727	4790.48	2773.50
k, $\lambda$	2600	4.89E+10	0.25	3.30E+10	1.95E+10	2.00E+10	4763.64	2738.61	1.739	4763.64	2738.61
$\mu, \lambda$	2600	5.00E+10	0.25	3.33E+10	2.00E+10	2.00E+10	4803.84	2773.50	1.732	4803.84	2773.50
Vp, Vs	3000	5.77E+10	0.25	3.85E+10	2.31E+10	2.31E+10	4803.84	2773.5	1.732	4803.84	2773.50
$\nu$			0.25						1.732		
Vp/Vs			0.25						1.732		
Vp/Vs			0.25				4803.84	2773.50	1.732		
Vp/Vs			0.25				4803.70	2773.5	1.732		

# Velocità onde elastiche e rapporto di Poisson nei materiali

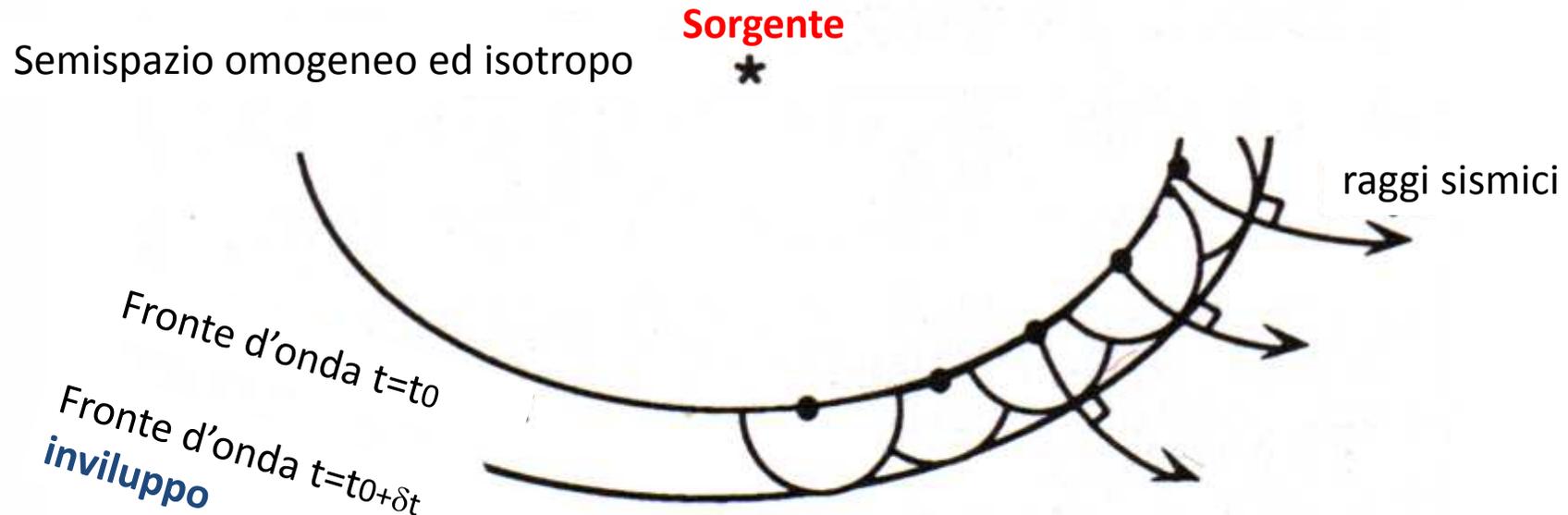


$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{3}$$

$$v = \frac{(V_p^2 - 2 \times V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

# Onde elastiche – propagazione onde elastiche - principi

- Il fronte d'onda è sempre perpendicolare al raggio sismico a condizione che il mezzo sia omogeneo ed isotropo



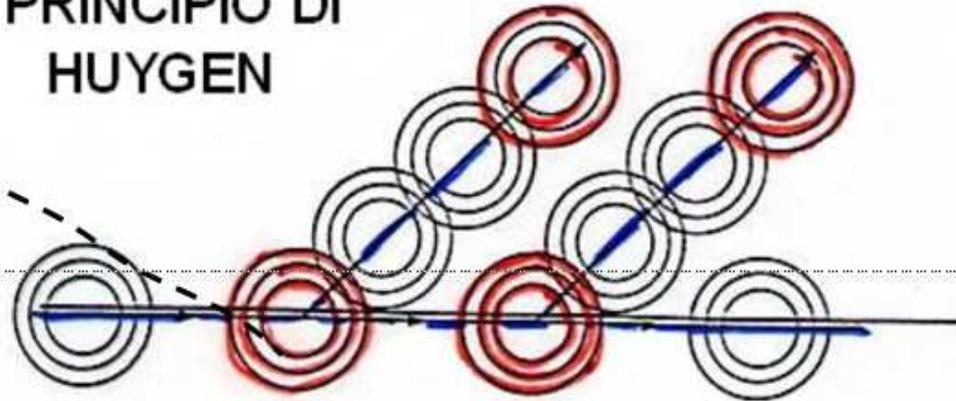
**Fronte d'onda indica tutti i luoghi (spazio-temporali) di fase identica della perturbazione elastica si trovi di fase raggi sismici**

## Come si trasmettono le onde elastiche



Il mezzo è omogeneo ed isotropo. La superficie di discontinuità è solo indicativa

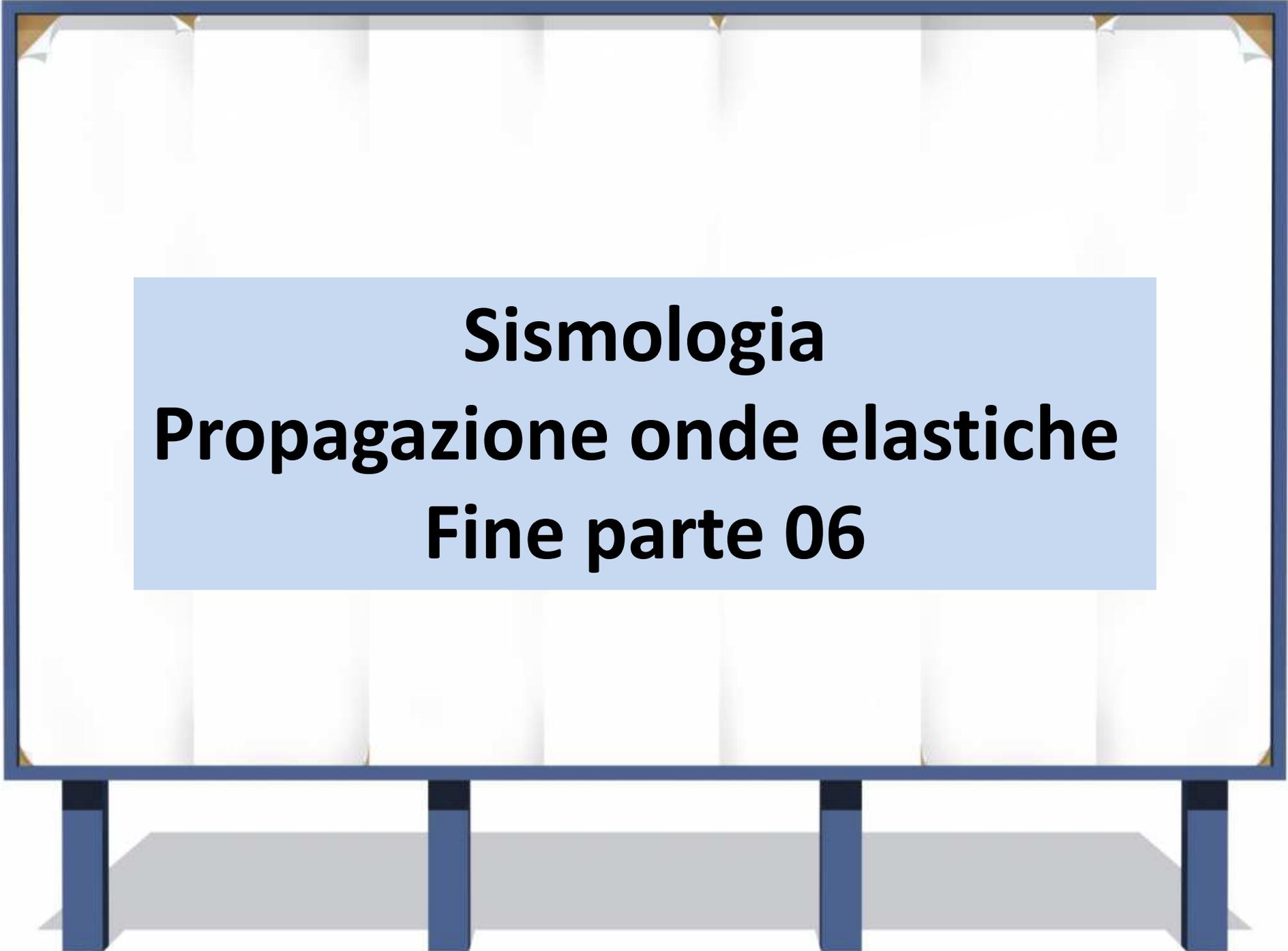
### PRINCIPIO DI HUYGEN



### Principio di Huygen

un fronte d'onda rappresenta l'inviluppo dei tanti fronti d'onda elementari generati dalle particelle sollecitate dal passaggio dell'energia elastica.

Ogni punto sul fronte d'onda genera pertanto altri fronti d'onda spiegando così la trasmissione delle onde elastiche.



**Sismologia**  
**Propagazione onde elastiche**  
**Fine parte 06**