



# ANAS – DIREZIONE GENERALE

Via Monzambano, 10 - Roma

## INDAGINI GEOSISMICHE APPLICATE

### STATO DELL'ARTE

Presentazione a cura di:

**Dott. Maurizio Furani**

**Dott. Gabriele Pulelli**

**Dott. Giuseppe Galassi**

**28 MAGGIO 2007**



**PROGEO srl**

Via Talete 10/8

47100 Forlì

tel. 0543 -723580

fax. 0543 721486

[mail.progeo@gmail.com](mailto:mail.progeo@gmail.com)

[www.progeo.info](http://www.progeo.info)



# IMPIEGO DI METODI GEOSISMICI PER LA PROGETTAZIONE DELLE OPERE STRADALI

## STATO DELL'ARTE

### **PROGRAMMA**

#### **a) Introduzione alla Metodologia sismica**

- Nozioni
- Cenni sulle tecnologie sismiche (tomografia sismica, riflessione, Down Hole, Cross Hole, misure di rumore sismico)
- Specifiche tecniche generali

#### **b) Esempi di applicazioni**

- 1 Stato dell'arte delle tecniche di indagine per grandi frane DGPV (Deformazioni Gravitative Profonde di Versante)
- 2 Gallerie
- 3 Rilevati
- 4 Scavi
- 4 Cavità
- 5 Consolidamenti (jet grouting, pali ..)

#### **c) Caratterizzazione sismica secondo la nuova normativa (opere d'arte su progetti lineari)**

- Cenni sull'attuale quadro normativo
- Vs30
- Livello di approfondimento (bassa, media, alta risoluzione)
- Problematica del sito
- Caratterizzazione del sito
- Frequenze naturali di risonanza del sito



# INDAGINI GEOSISMICHE

La prospezione sismica si occupa dell'esplorazione del sottosuolo attraverso l'analisi e lo studio della propagazione di onde sismiche. Queste onde elastiche vengono generate mediante esplosioni, energizzazioni o vibrazioni prodotte sulla superficie e/o in foro; l'impiego di varie fonti di energizzazione dipende dallo scopo dell'indagine e dalla profondità da investigare.

Le discontinuità ricercate, su cui ci si basa per la determinazione della geometria e natura del sottosuolo, sono **discontinuità elastiche determinate da reali variazioni litologiche, tettoniche e di consistenza.**

Pertanto la prospezione sismica è una tecnica di esplorazione del “sottosuolo” e di “manufatti” che trova largo impiego nella geologia applicata all'ingegneria e nelle indagini non distruttive; **conoscere la struttura e le caratteristiche elastiche di un terreno o opera d'arte è infatti essenziale ai fini progettuali.**



# CENNI ELASTICITA'

## ELASTICITA'

Un corpo che si trova in condizioni di equilibrio, se viene sollecitato elasticamente in un punto, reagisce alla sollecitazione deformandosi con modalità ed entità dipendenti dal tipo di sollecitazione impressa e dalle proprie caratteristiche elastiche.

Le **costanti elastiche** determinano la relazione tra gli sforzi e le deformazioni.

Se la deformazione è temporanea il comportamento è “**Elastico**” mentre se è permanente è “**Plastico**”.

**Viscoelastico** è il comportamento di un corpo che si comporta come elastico sotto l'azione di sforzi di piccola intensità e come plastico sotto l'azione di sforzi più intensi.

**I materiali naturali hanno un comportamento viscoelastico.**



# LEGGE DI HOOKE

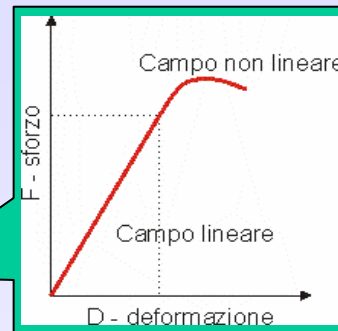
Se si sottopone un provino ad uno sforzo crescente nel tempo esso si deforma ed entro un certo campo iniziale la curva sforzi-deformazioni è lineare.

La teoria dell'elasticità prevede sforzi e deformazioni molto ridotti in modo che sia lecito supporre solo relazioni lineari, cioè rientrare nel campo delle deformazioni linearmente proporzionali alle forze.

In questo campo lineare è valida la “**Legge di Hooke**”

Sotto quindi sollecitazioni di piccola entità i materiali si deformano assumendo un comportamento elastico ed a questa scala è possibile attribuirgli caratteristiche di isotropia, omogeneità e continuità.

**Nessun materiale naturale presenta queste caratteristiche però a seguito di sollecitazioni a bassa energia e durata la risposta può rientrare nel campo della legge di Hooke.**



Qualsiasi materiale è caratterizzabile sotto il profilo elastico da 5 costanti:

**Modulo di Elasticità**  
**Modulo di Taglio (Rigidità)**  
**Modulo di Compressibilità**  
**Coefficiente di Poisson**  
**Costante di Lamè**

## Misura costanti elastiche

### Prove geomeccaniche in sito

(es. prove di carico su piastra)

### Prove di laboratorio

(es. prova triassiale)

### Indagini sismiche

(es. misura onde di taglio)

Ogni tipologia di prova fornisce informazioni relativamente ad un proprio range di misura definito dall'intensità dello sforzo e dalla durata.



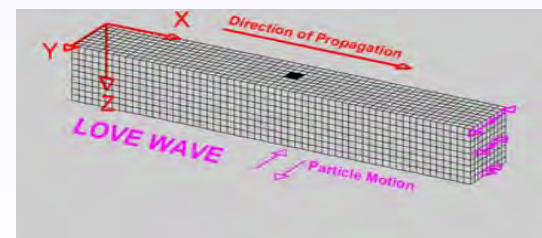
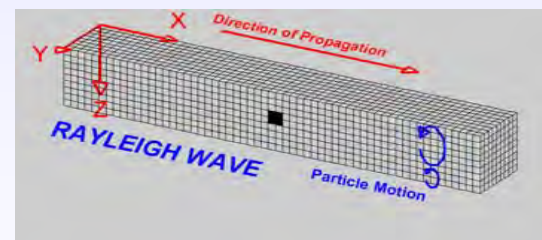
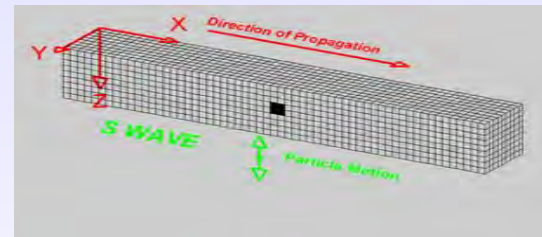
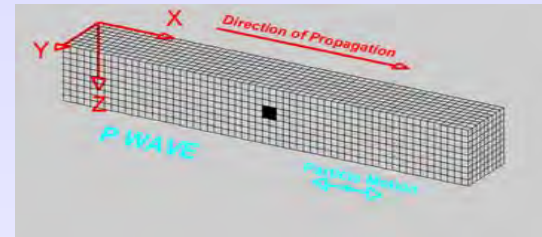
# ONDE SISMICHE

L'applicazione di una sollecitazione dinamica ad un mezzo continuo produce vibrazioni che si trasmettono sotto forma di onde sismiche. La distinzione tra i differenti tipi di onde va operata in base alla loro direzione di propagazione ed a quella del moto degli elementi di volume investiti.

Le onde di compressione (**primarie – P Wave**) si trasmettono sotto forma di deformazioni di contrazione ed estensione nel mezzo.

Nel caso delle onde di taglio (**secondarie o trasversali – S Wave**) le deformazioni sono puramente distorsionali e le vibrazioni sono dirette perpendicolarmente alla direzione di propagazione (SH se contenute su un piano orizzontale e SV se nel piano verticale).

Le onde di superficie (**Rayleigh e Love**) sono caratterizzate da componenti longitudinali e trasversali. Sono onde nelle quali l'ampiezza decade rapidamente con la profondità.



# VELOCITA' E PARAMETRI ELASTICI

Consideriamo un corpo elastico sottoposto ad uno sforzo impulsivo normale e la serie di particelle allineate.

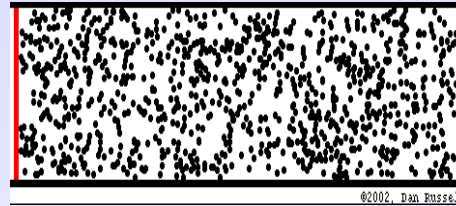
Una causa perturbatrice sposterà le particelle in avanti avvicinandole a quelle successive e così via per inerzia mantenendo inalterata la distanza tra le particelle; per reazione elastica queste torneranno al proprio punto di riposo e dopo vari cicli si stabilizzeranno.

E' una oscillazione intorno ad una posizione di equilibrio che consente la propagazione della perturbazione che sarà caratterizzata da una velocità finita funzione della elasticità di volume rappresentata dal **MODULO DI COMPRESSIBILITA'**.

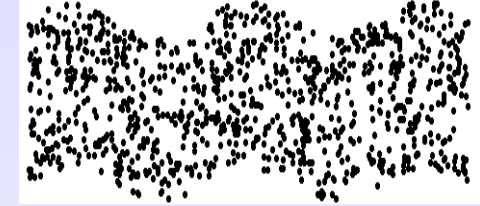
La vibrazione longitudinale si trasmette nella stessa direzione del movimento alla velocità delle onde di compressione (**V<sub>p</sub>**) per compressione e dilatazione mentre quella trasversale invece è determinata dalla reazione elastica che impedisce lo scorrimento delle particelle tra di loro dando origine ad una variazione di forma per sforzi di taglio. Questa sollecitazione si propaga alla velocità delle onde di taglio (**V<sub>s</sub>**).

A seguito di una sollecitazione impulsiva possono propagarsi entrambe le onde dando origine alle onde di massa (Rayleigh **V<sub>r</sub>** e Love **V<sub>l</sub>**) che si producono alla superficie libera del mezzo con la massima intensità.

Onde di compressione (P)



Onde di taglio (S)



## Relazioni tra velocità sismiche e parametri elastici

Coefficiente di Poisson	$\nu = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$
Peso di volume	$\gamma_{din} = 0.51 \cdot V_p^{0.19} \text{ m/sec}$
Densità geofisica	$\delta_{din} = \frac{\gamma}{g} \quad (g = 9.8 - \text{accelerazione di gravità m/sec})$
Modulo di Elasticità	$E_{din} = V_p^2 \cdot \delta_{din} \cdot \frac{(1-\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)}$
Modulo di Taglio	$G_{din} = \delta_{din} \cdot V_s^2$
Modulo di Compressibilità	$K_{din} = \frac{E_{din}}{3 \cdot (1-2 \cdot \nu)}$



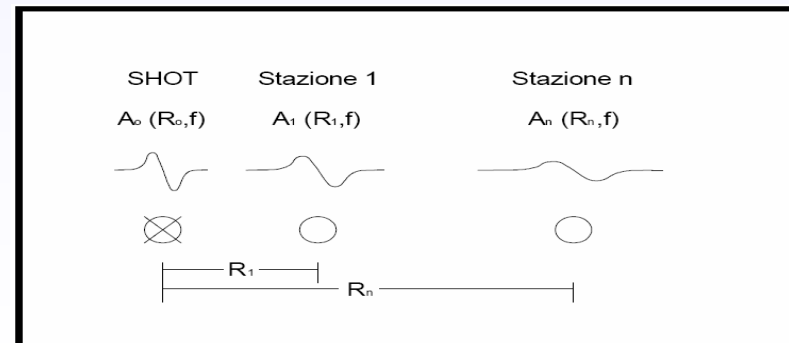
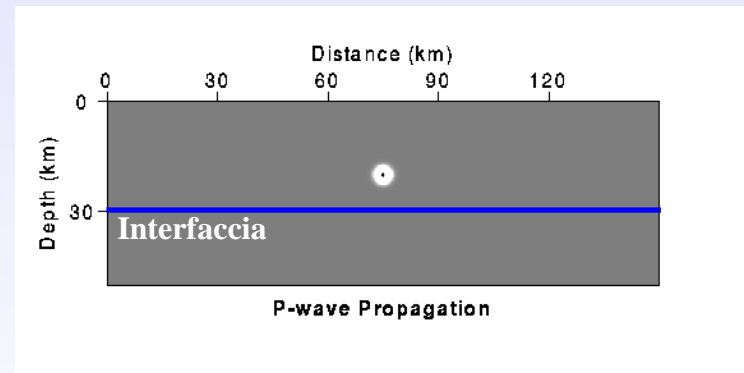
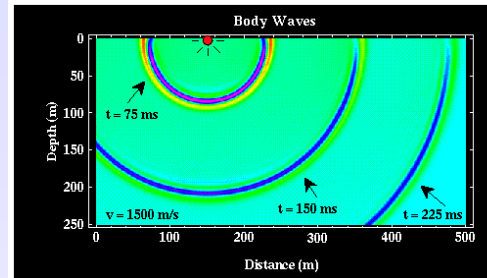
# ATTENUAZIONE E ASSORBIMENTO SISMICO

Propagandosi i fronti d'onda si allargano e quindi l'energia diminuisce con il quadrato della distanza poiché i fronti d'onda si distribuiscono su superfici sempre maggiori; questa diminuzione di energia provoca una riduzione di ampiezza. In un mezzo elastico la riduzione di ampiezza del segnale sismico è funzione solo della distanza (spreading geometrico).

Poiché i terreni non hanno un comportamento elastico l'analisi dello smorzamento fornisce elementi utili alla caratterizzazione dei materiali nel parametro dell'attenuazione intrinseca.

La relazione è la seguente:

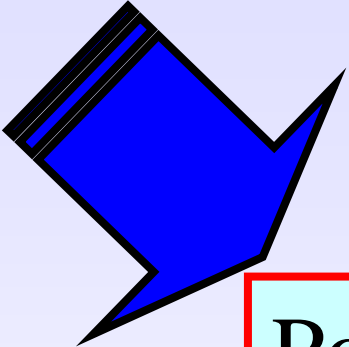
$$A(R, f) = \left( \frac{1}{R} \right) \cdot A_0(R_0, f)^{(-\alpha R)} \left( -if \frac{R}{V} \right)$$



Attenuazione

Grado di saturazione

Valutabile dal rapporto tra il rapporto dei moduli di attenuazione delle onde di taglio e di compressione



Porosità



Litologia



Fratturazione

Densità

Tipo di fluido (acqua, olio ..)

Presenza di gas

Carico litostatico

Temperatura

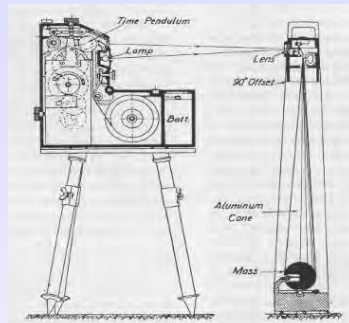


# STRUMENTAZIONI - DALLE PRIME SPERIMENTAZIONI AD OGGI

Ieri



Sismometro cinese del 132 A.D.



Mintrop Mechanical Seismograph  
Data: 1922.

Oggi

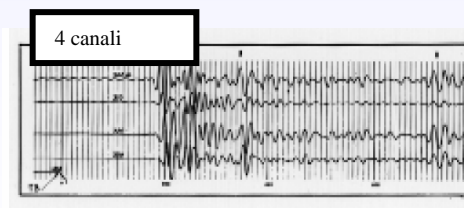
Sismografo per sismica a rifrazione e riflessione, tomografia.  
**Sistema modulare Geometrics Geode**

fonte Progeo



6-12 canali

Sismografo per sismica a rifrazione Geometrics ES-1224 Data: 1977 – 1987  
fonte Progeo

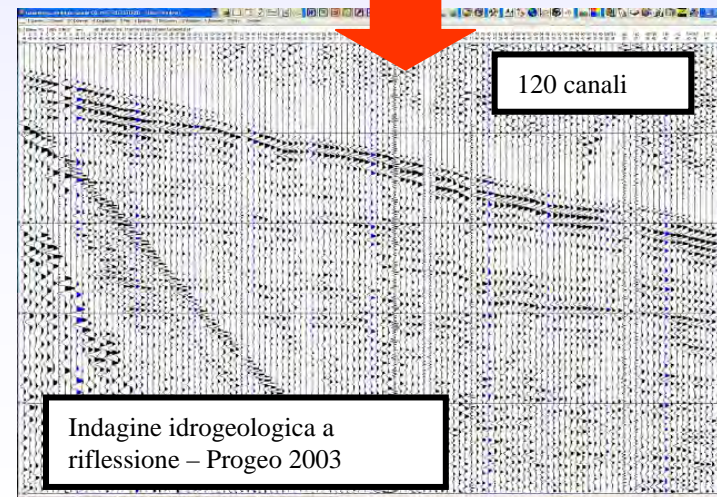


4 canali



24 canali

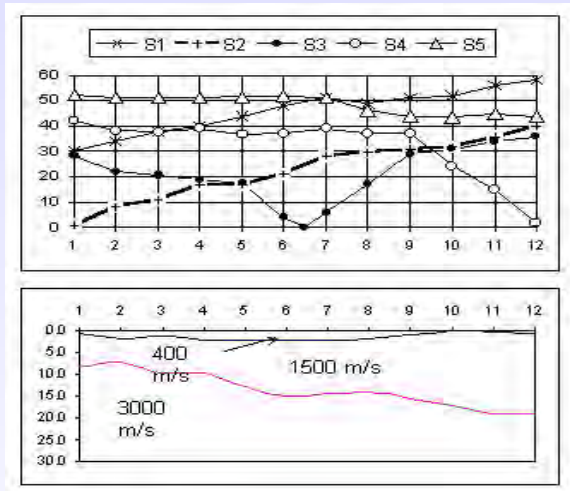
Sismografo per sismica a rifrazione Geometrics ES-2401 Data: 1991 – 2001 fonte Progeo



# PROCESSING - DALLE PRIME SPERIMENTAZIONI AD OGGI

Ieri

Sezione sismica a rifrazione



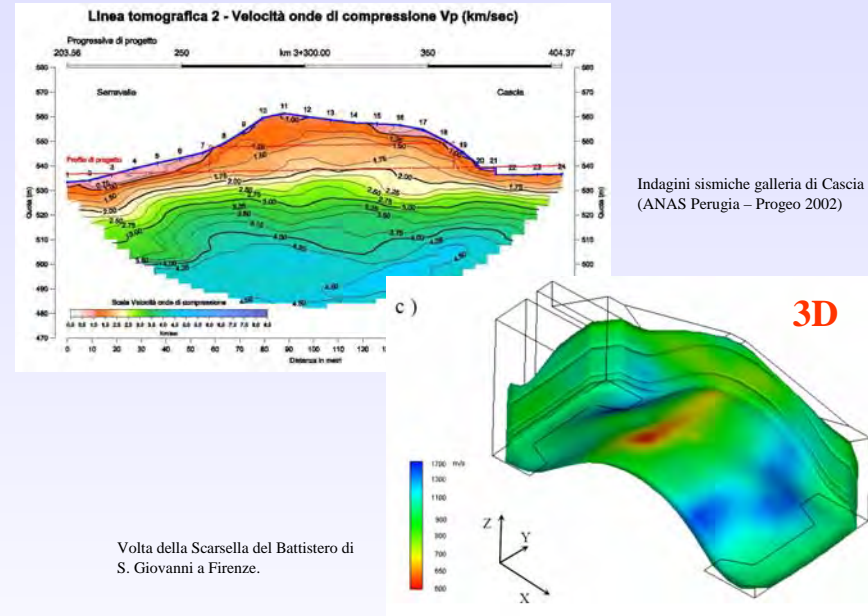
Il metodo sismico si occupa dell'esplorazione del sottosuolo, attraverso lo studio della propagazione delle onde elastiche generate mediante l'utilizzazione di masse battenti o tramite esplosioni controllate. L'impiego dell'una o dell'altra fonte di energizzazione dipende essenzialmente dalla profondità d'investigazione richiesta e dallo scopo del lavoro.

Il fine delle indagini sismiche è di risalire a modelli di terreni caratterizzati da una differente velocità delle onde elastiche, nell'individuare i loro spessori e la loro distribuzione spaziale. Inoltre poiché la velocità delle onde elastiche di volume (onde "P" ed onde "S") è funzione dei parametri elastici del mezzo in cui si propagano, conoscendone la densità, si possono ricavare i moduli elastici dinamici che caratterizzano il mezzo stesso.

La sismica a rifrazione considera i tempi di propagazione delle onde elastiche che, nel loro tragitto, si rifrangono sulle superfici di discontinuità. Dalla misurazione dei tempi di percorso dalla stazione energizzante ad una successione di geofoni riceventi, è possibile dedurre la velocità e gli spessori degli orizzonti in cui si propagano le onde elastiche.

Oggi

Sismica tomografica



Indagini sismiche galleria di Cascia (ANAS Perugia - Progeo 2002)

Volta della Scarsella del Battistero di S. Giovanni a Firenze.

Il metodo tomografico consente la ricostruzione bidimensionale o tridimensionale della distribuzione della velocità delle onde sismiche, tra due o più allineamenti costituiti da energizzatori e rilevatori. La radiazione sismica, attraversando le rocce, è alterata dal corpo stesso per cui i valori di velocità e l'ampiezza delle onde risentono di differenti stati geomeccanici della roccia quali, ad esempio, la presenza di intense fasce di fratturazione o di zone a maggiore o minore velocità sismica quali giacimenti minerali o presenza di acqua. La regione da investigare è suddivisa al computer in una griglia di celle (pixels) in ognuna delle quali sono assunte costanti le caratteristiche fisiche del mezzo che sono descrivibili mediante una funzione parametrica  $f(x,y)$ . L'indagine tomografica è eseguita in modo che gli "n" sensori utilizzati, ricevano contemporaneamente i raggi sismici generati mediante un solo scoppio. La procedura è ripetuta per tutti i punti di scoppio, fino ad ottenere una copertura di raggi sismici intersecanti tra loro nello spazio da investigare.



## TIPOLOGIE INDAGINI SISMICHE

### Indagini dalla superficie

### Parametrizzazioni in

Sismica a rifrazione tradizionale e <b>Tomografica</b>	Vp + Vs + <b>Attenuazione</b>
Sismica a riflessione	Vp + Vs
SASW (Signal Analysis Surface Wave)	Vs
MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave)	Vs
RE.MI. (Refraction Microtremor)	Vs
HVSR (H/V Spectral Ratio – Nakamura)	Frequenza di sito

### Indagini in foro

Down Hole	Vp + Vs + Attenuazione
Cross Hole	Vp + Vs + Attenuazione
Cross Hole Tomografico	Vp + Vs + Attenuazione
VSP (Vertical Seismic Profile)	Riflessioni profonde



# STRUMENTAZIONI INDAGINI SISMICHE

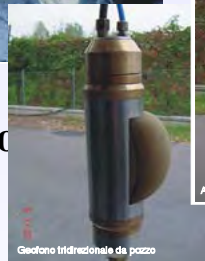
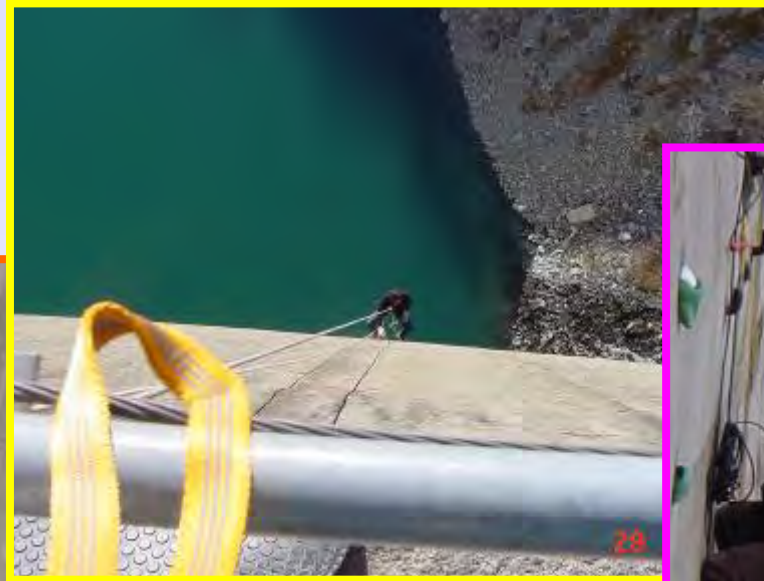
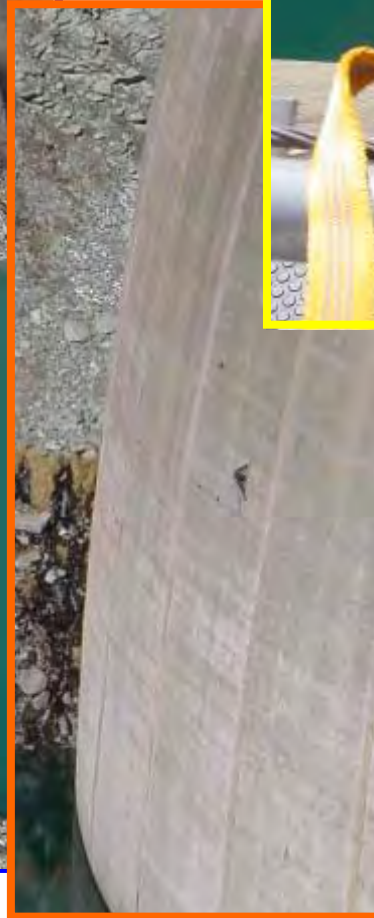


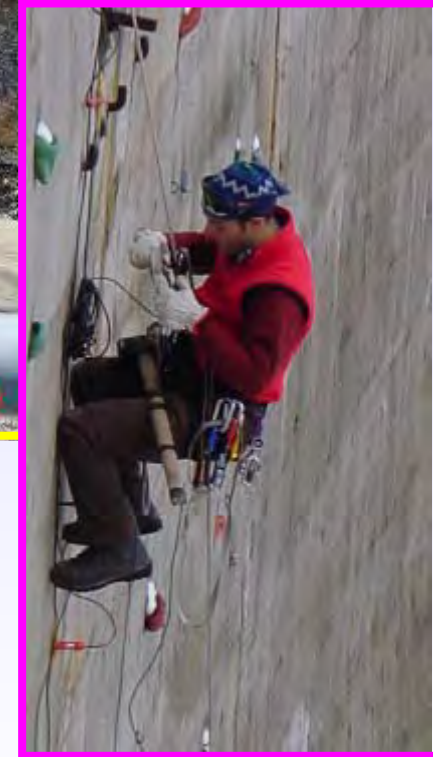
Foto archivio  
Progeo



## INSTALLAZIONI SENSORI



Archivio Progeo [2002]



Indagini sismiche in  
situazioni estreme



## PROCESSING INDAGINI SISMICHE APPROCCIO METODOLOGICO

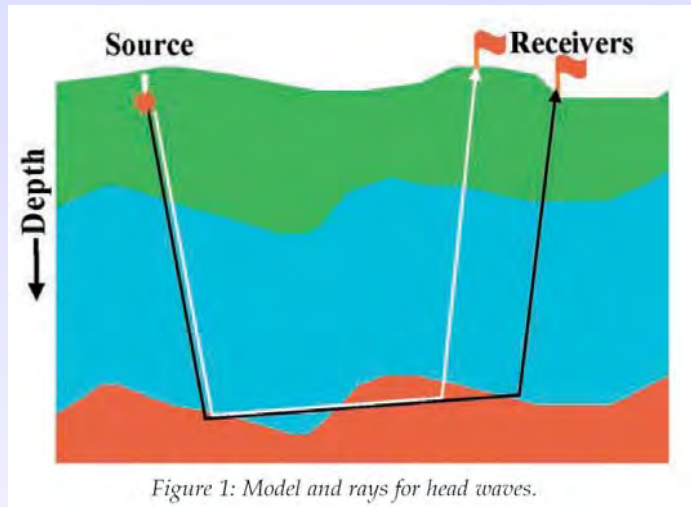
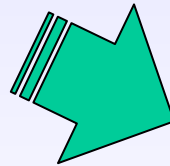


Figure 1: Model and rays for head waves.

### *Elaborazione Tradizionale*

L'elaborazione della sismica a rifrazione tradizionale richiede modelli di calcolo semplificati come ad esempio velocità costante degli strati, anisotropie di velocità laterali ridotte, spessori degli strati crescenti vs profondità, gradiente di velocità crescente in profondità.

La rifrazione totale avviene sulla superficie del rifrattore secondo l'angolo limite il quale è funzione delle velocità degli strati.



### *Elaborazione Tomografica*

La rifrazione tomografica è stata sviluppata per risolvere i gradienti di velocità, le anisotropie verticali rapide operando, con elementi finiti o distinti, nella definizione di un modello del terreno il più verosimile e completo.

Le traiettorie dei raggi sismici sono curvilinee il cui andamento è determinato da un processo iterativo di affinamento del sistema tempo di percorrenza-velocità.

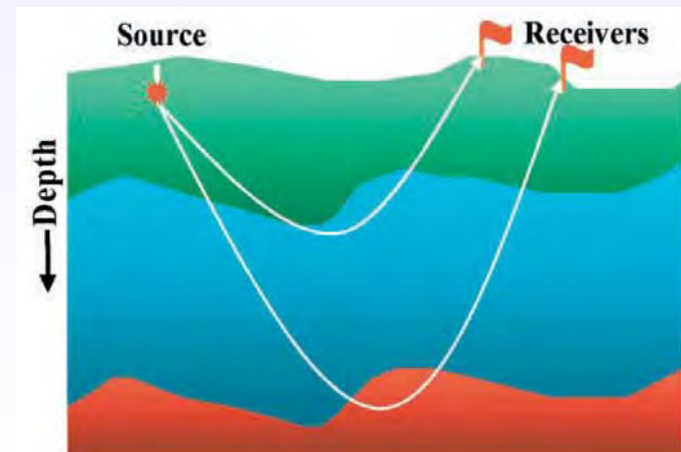
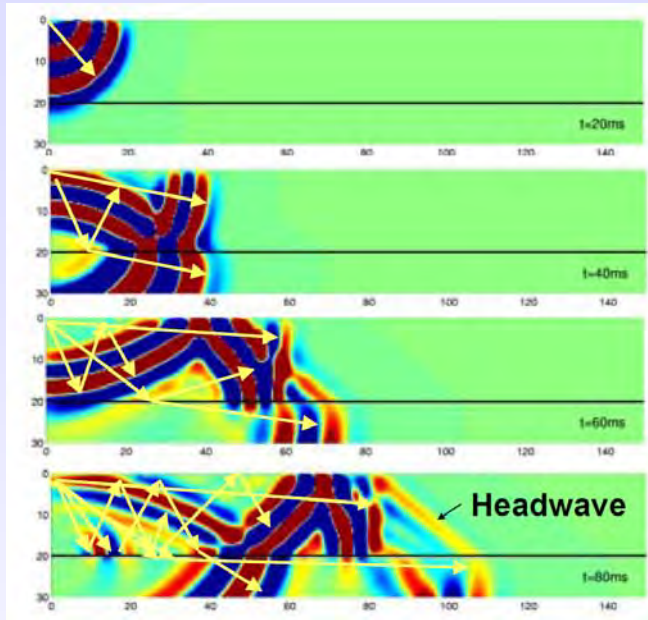


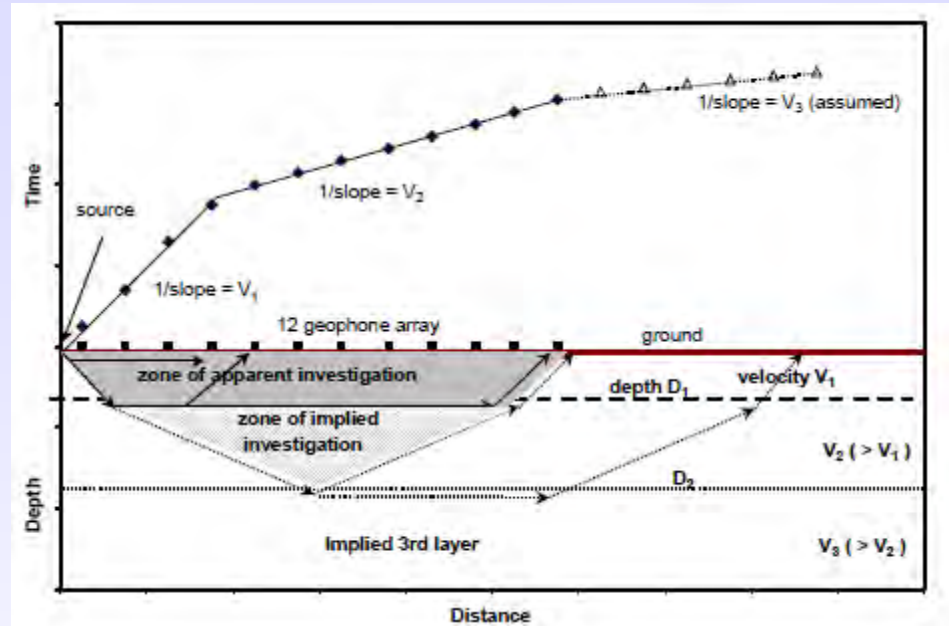
Figure 2: Model and rays for diving waves.



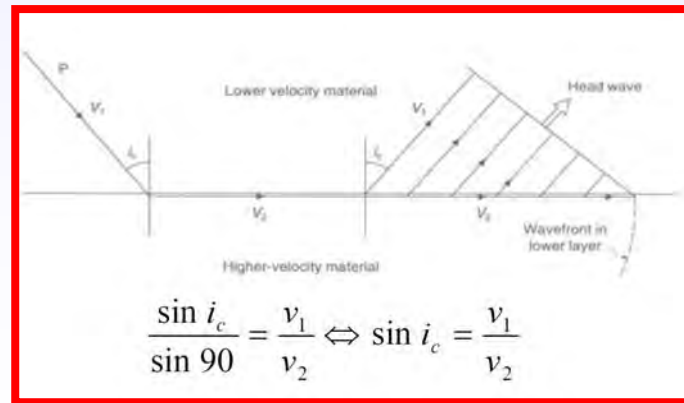
# SISMICA A RIFRAZIONE – METODOLOGIA TRADIZIONALE GRM



Fronti d'onda



Metodica sismica a rifrazione

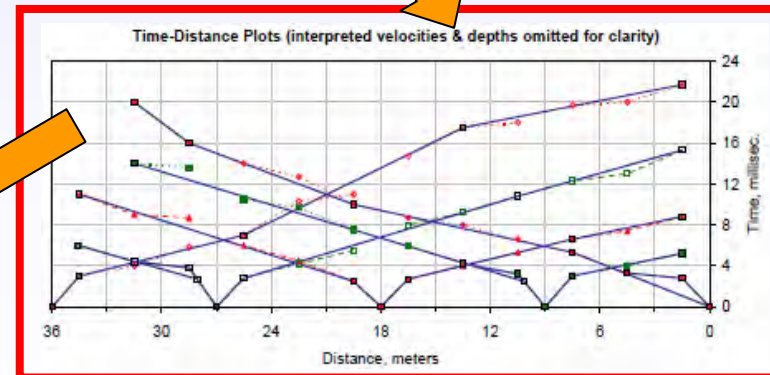
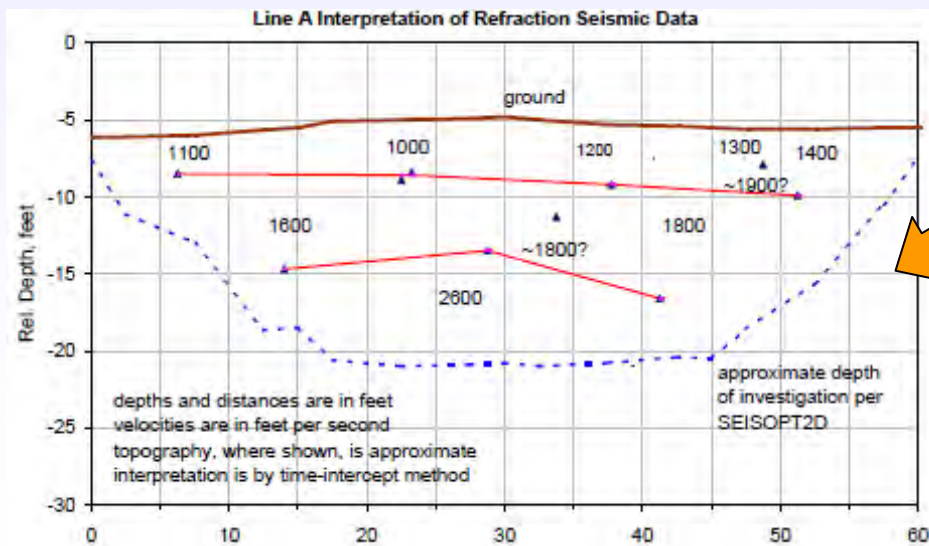
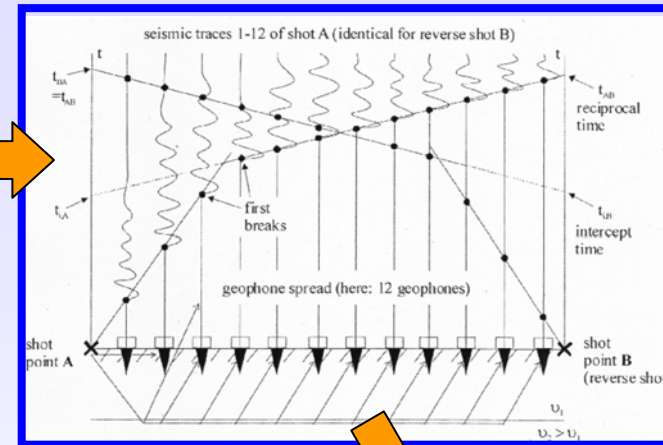
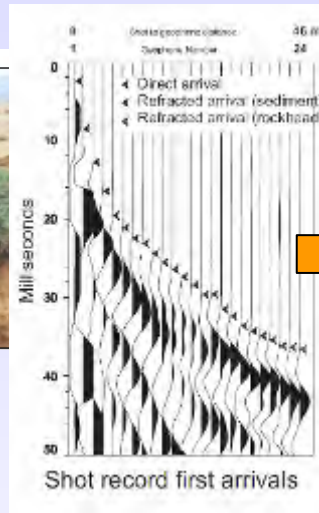
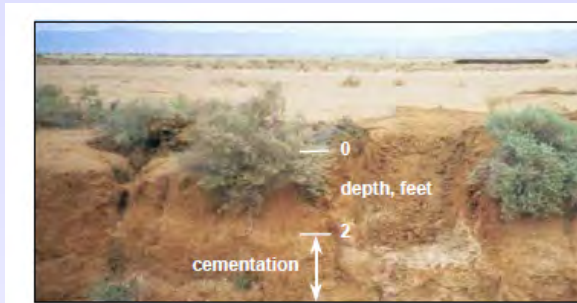


Angolo di rifrazione



# SISMICA A RIFRAZIONE – METODOLOGIA TRADIZIONALE GRM

## ESEMPIO DI SITO



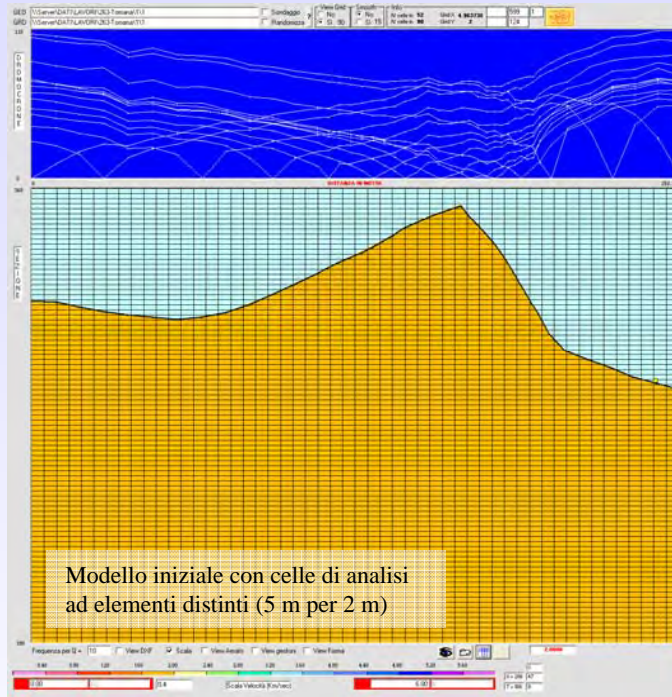
## Processing ordinario



# SISMICA A RIFRAZIONE – METODOLOGIA TOMOGRAFICA

Software Progeo srl

Dromocrone

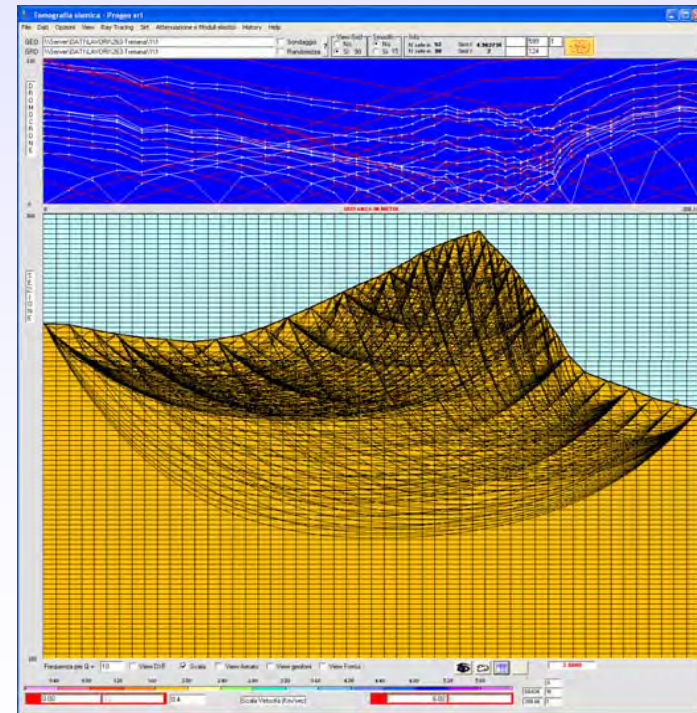


Sezione sismica



## PROCESSING TOMOGRAFICO

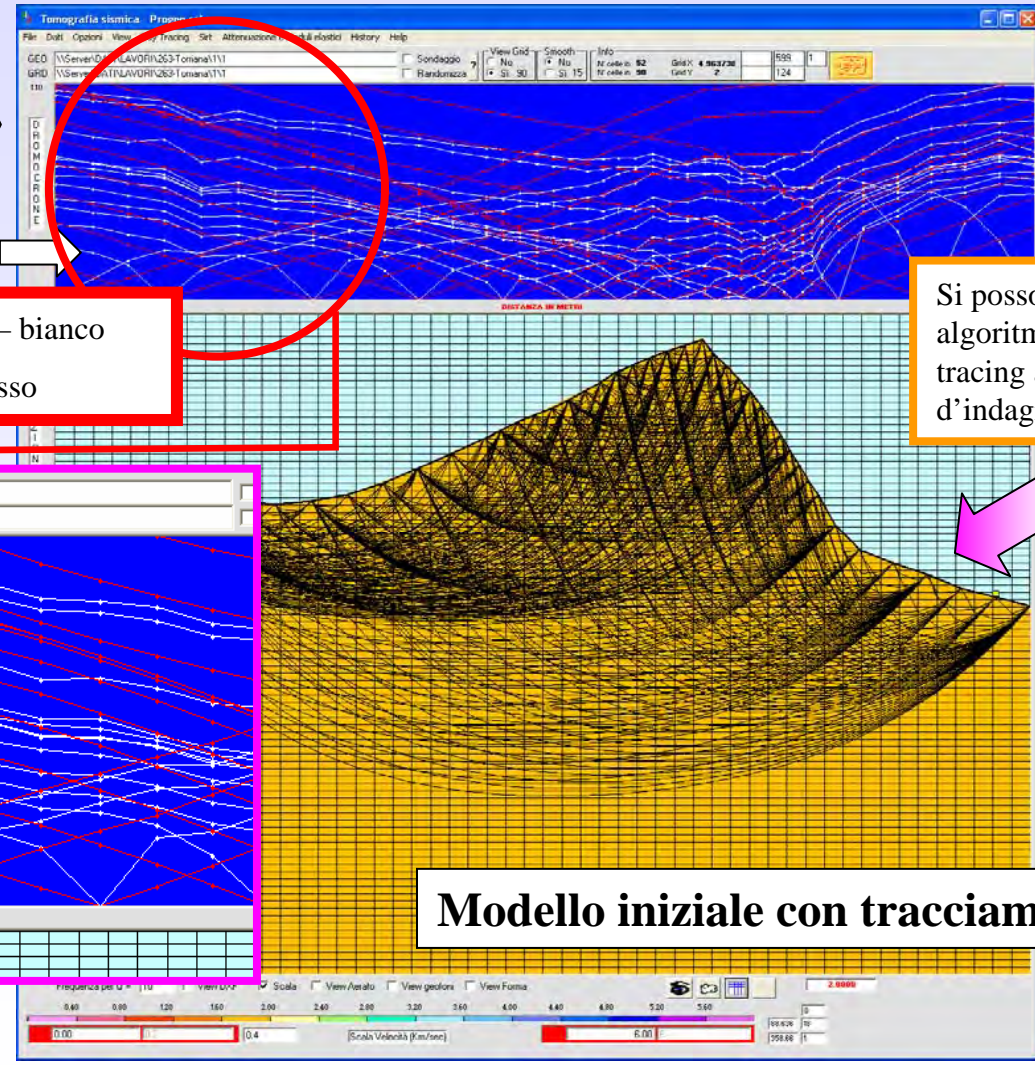
Ray tracing



# SISMICA A RIFRAZIONE – METODOLOGIA TOMOGRAFICA

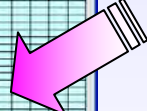
## PROCESSING

Dromocrone

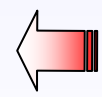


Dromocrone sperimentali – bianco  
Dromocrone calcolate - rosso

Si possono utilizzare svariati algoritmi di processing per il ray tracing adattandolo alla tipologia d'indagine



Sezione sismica



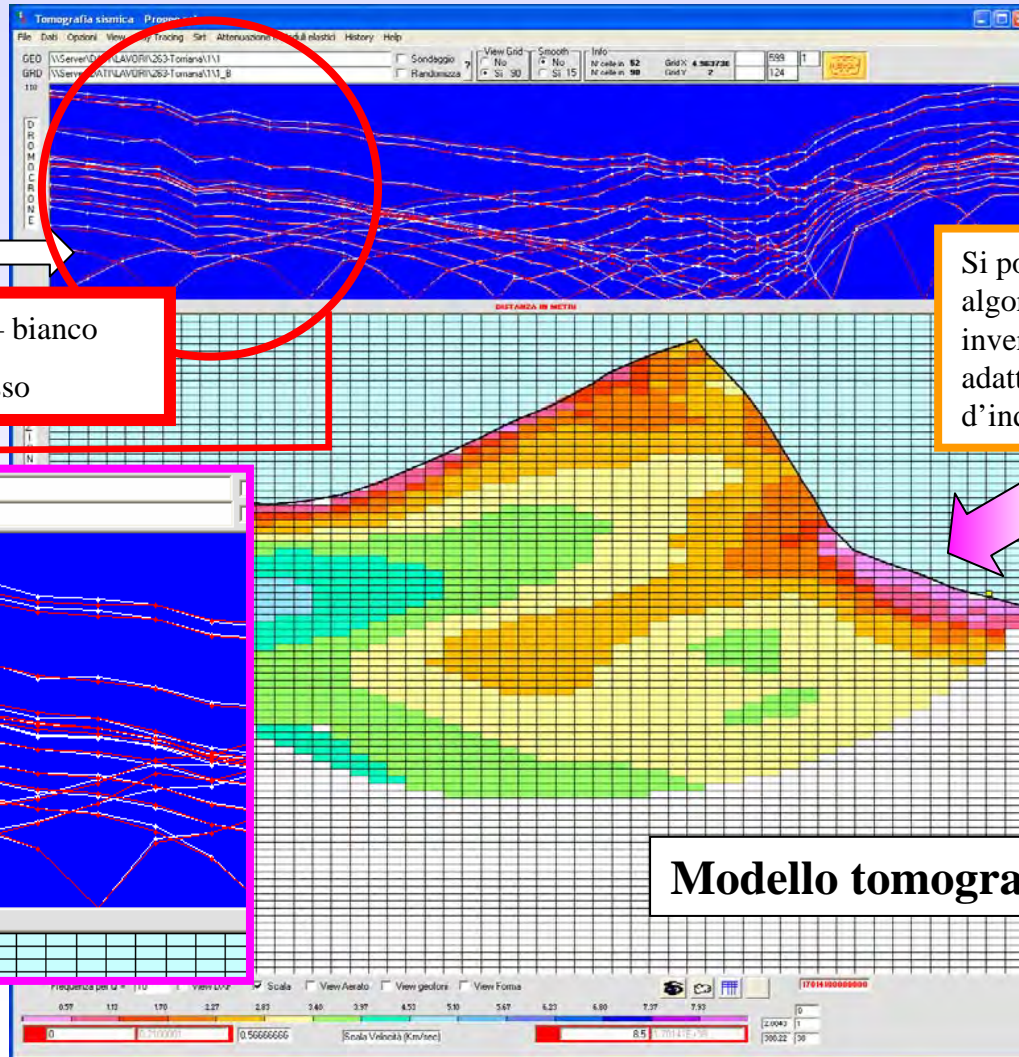
**Modello iniziale con tracciamento raggi sismici**



# SISMICA A RIFRAZIONE – METODOLOGIA TOMOGRAFICA

## PROCESSING

Dromocrone



Dromocrone sperimentali – bianco

Dromocrone calcolate - rosso

Si possono utilizzare svariati algoritmi di processing di inversione tomografica per adattarlo alla tipologia d'indagine

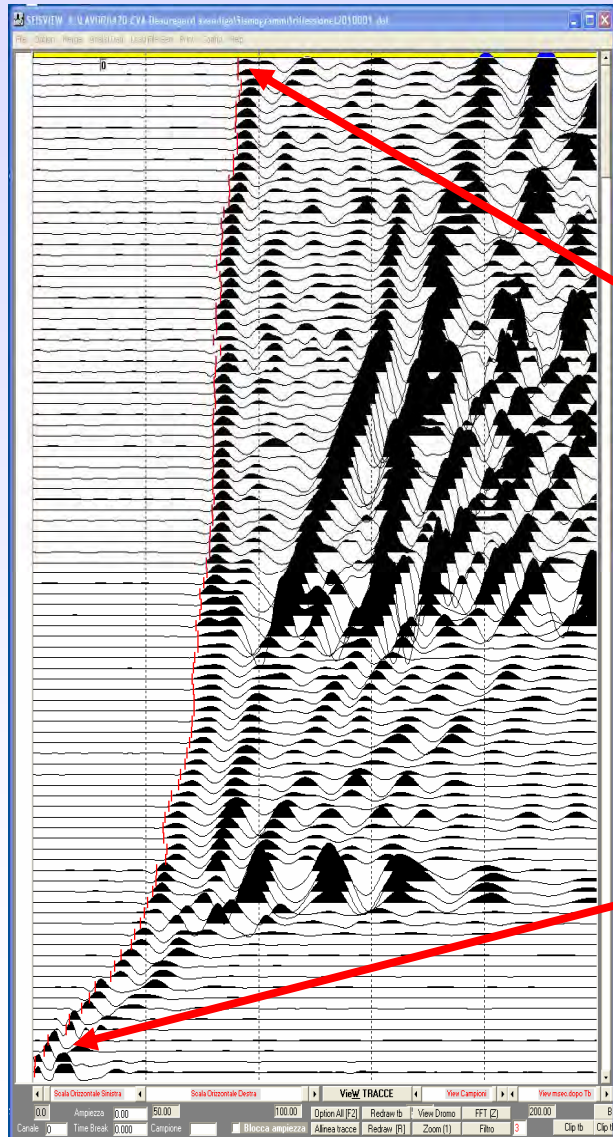
Sezione sismica



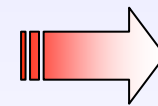
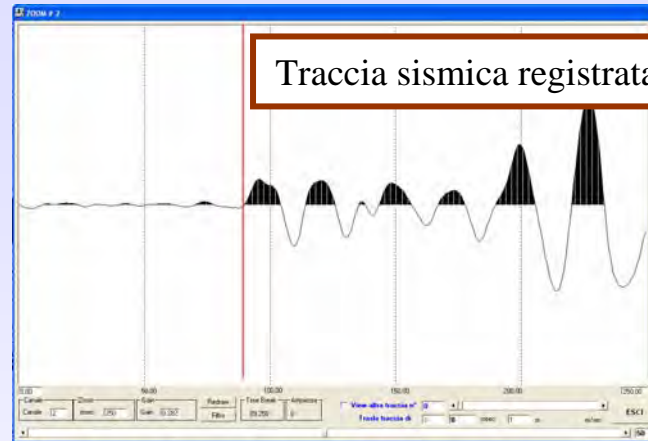
**Modello tomografico finale**



# ANALISI SISMICA DELL'ATTENUAZIONE



Canale 2

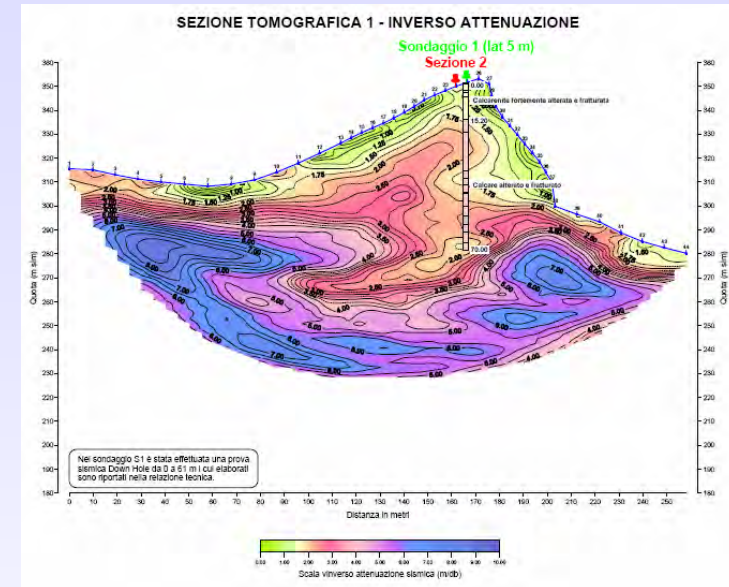
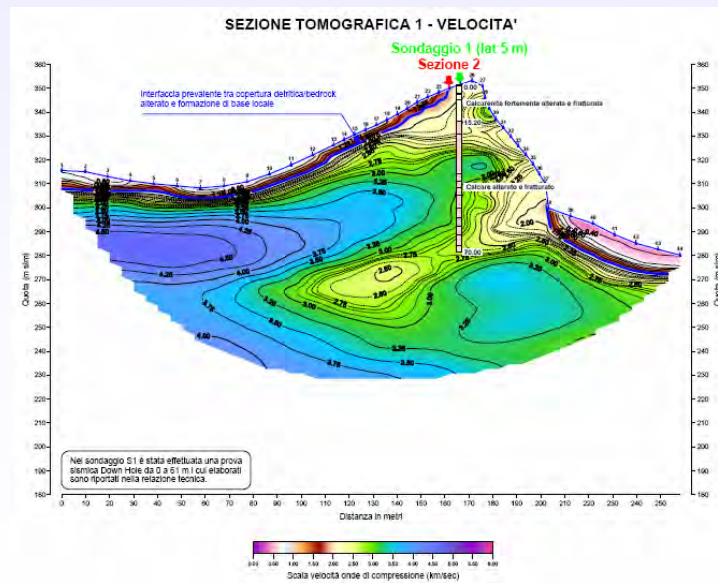


**Attenuazione**

Canale 94



# SEZIONI FINALI



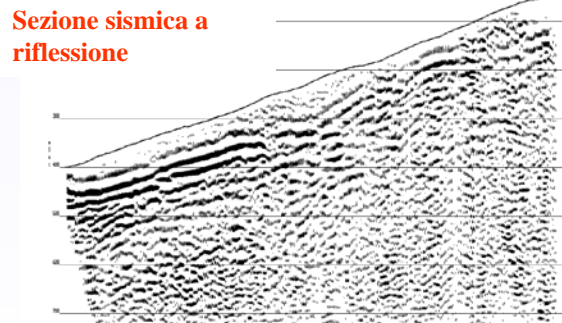
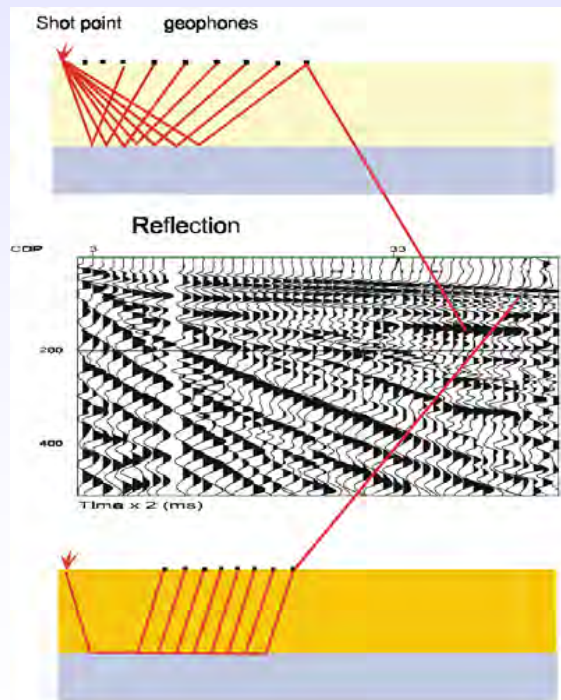
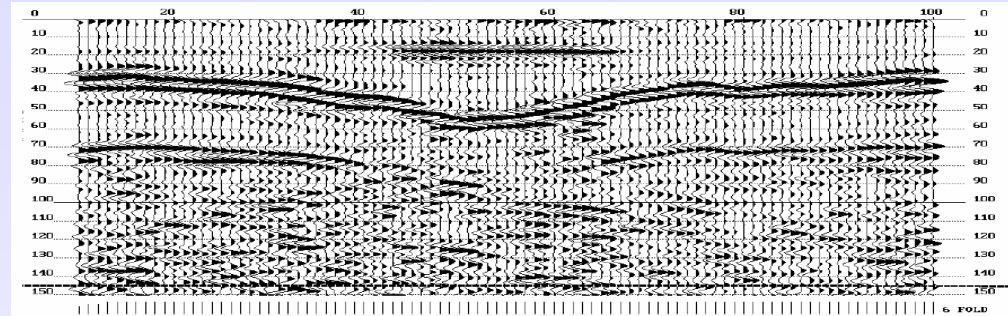
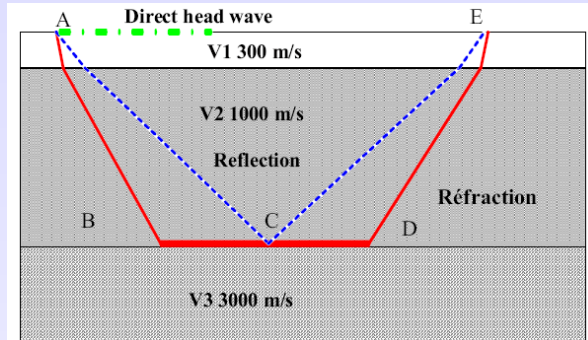
La sismica tomografica fornisce informazioni su:

- Stratigrafia del sito
- Consistenza dei materiali
- Localizzazione settori fratturati
- Cavità
- .....



# SISMICA A RIFLESSIONE

## Sismosezione



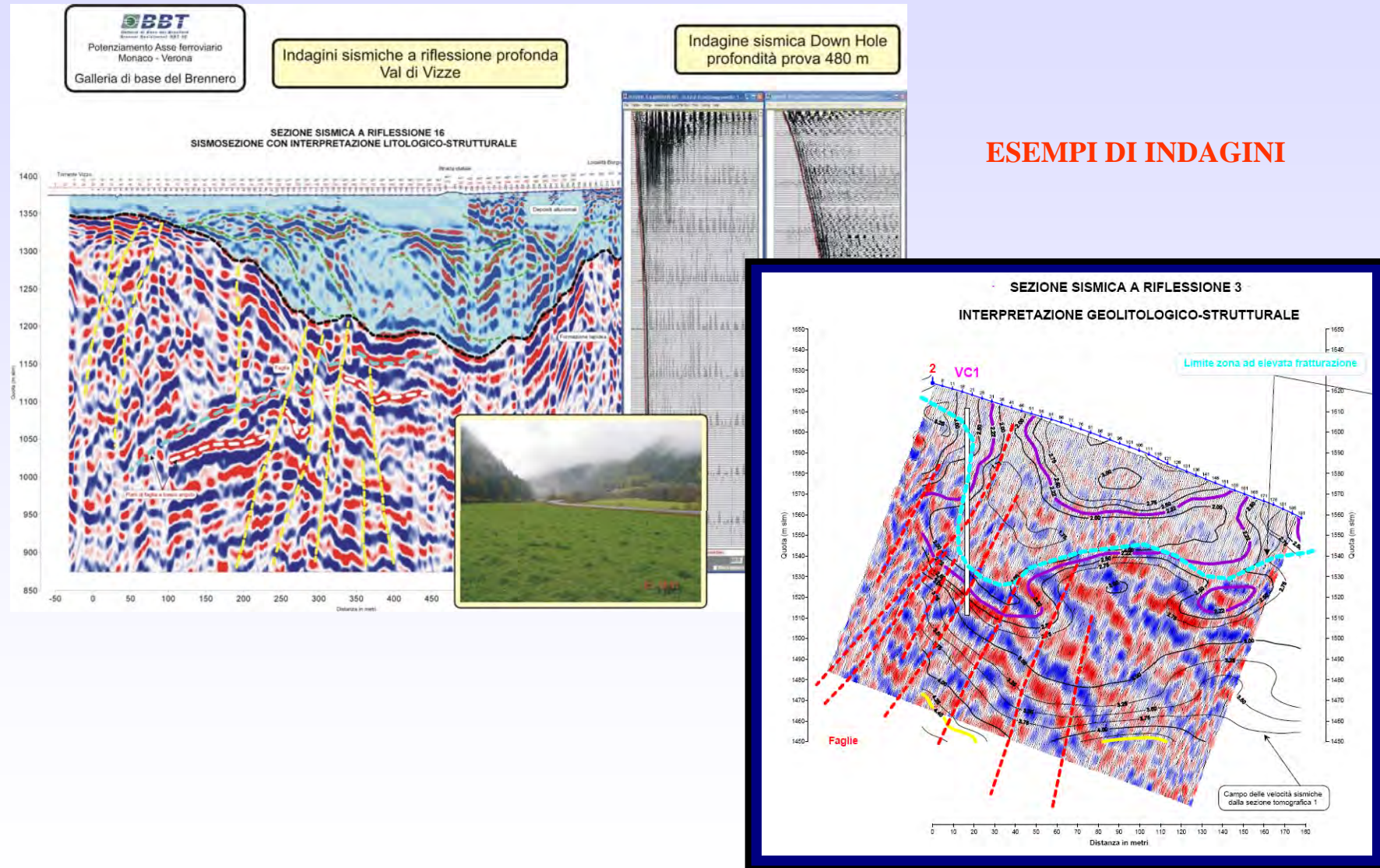
La sismica a riflessione fornisce informazioni su:

- Stratigrafia del sito
- Tettonica locale
- Cavità...

Refraction



# SISMICA A RIFLESSIONE



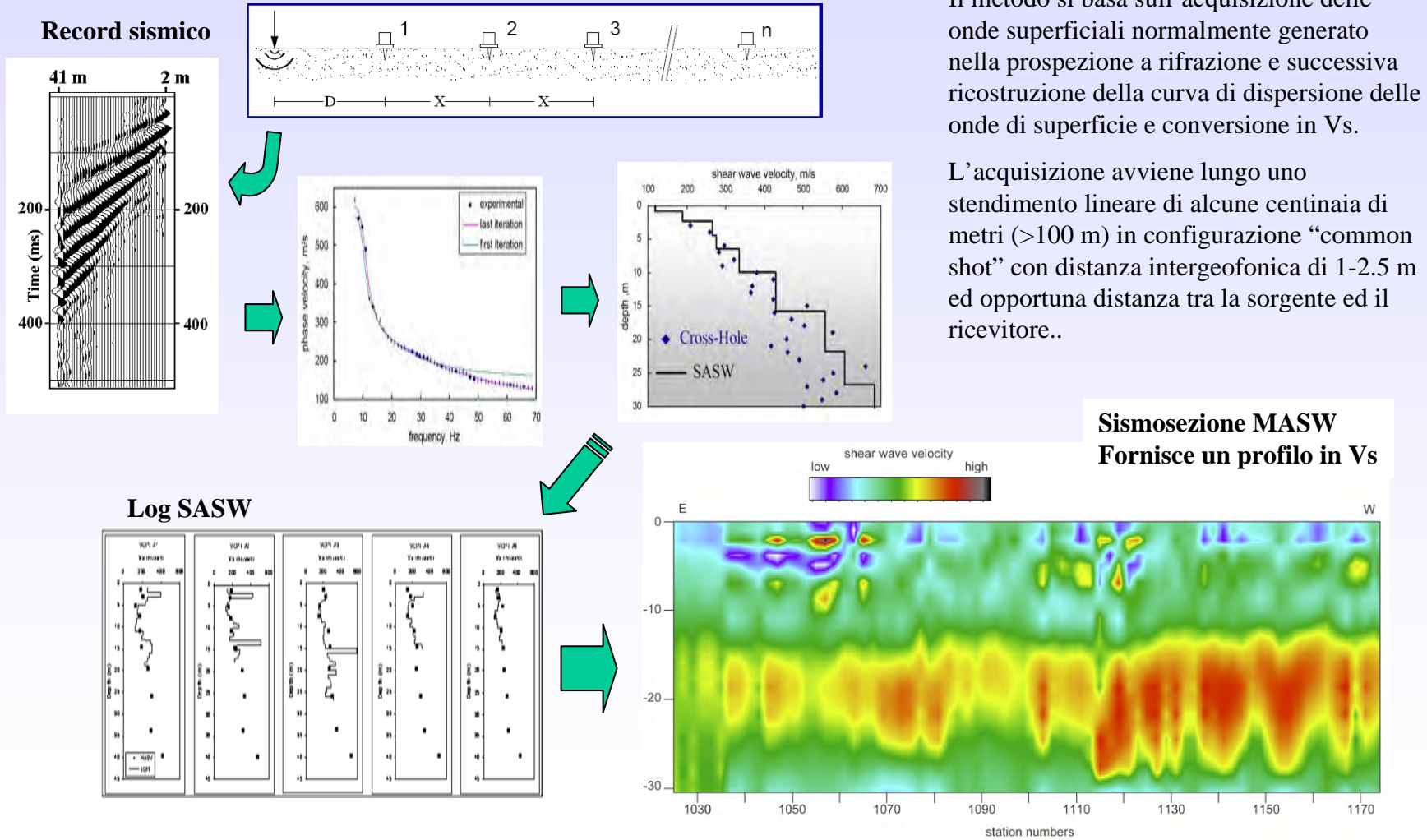
## ESEMPI DI INDAGINI



# SASW - MASW

Si utilizzano sensori con frequenza naturale < 4.5 Hz

## Metodologia di analisi delle onde superficiali



Il metodo si basa sull'acquisizione delle onde superficiali normalmente generato nella prospezione a rifrazione e successiva ricostruzione della curva di dispersione delle onde di superficie e conversione in Vs.

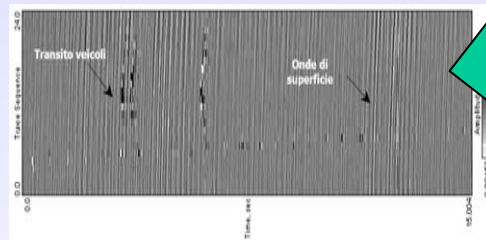
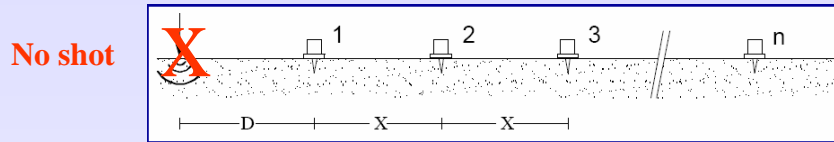
L'acquisizione avviene lungo uno stendimento lineare di alcune centinaia di metri (>100 m) in configurazione "common shot" con distanza intergeofonica di 1-2.5 m ed opportuna distanza tra la sorgente ed il ricevitore..

**Sismosezione MASW**  
Fornisce un profilo in Vs



# RE.MI. – REFRACTION MICROTREMOR

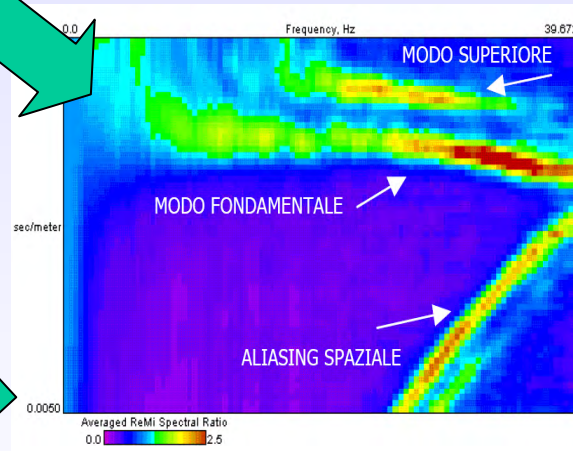
## Metodologia di analisi del noise ambientale



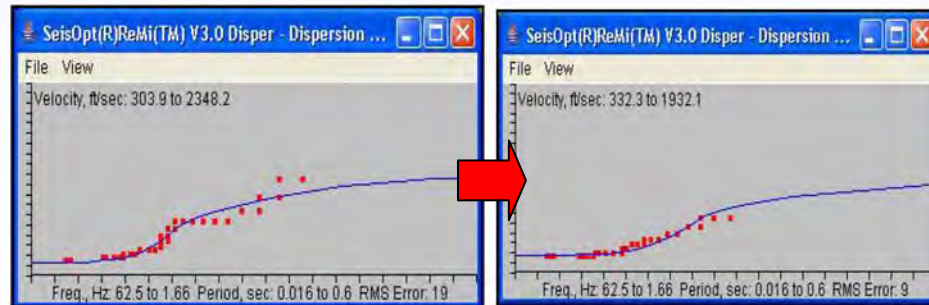
Record sismico  
(15 minuti)

Si utilizzano sensori  
con frequenza naturale  
< 4.5 Hz

### Curva di dispersione



### Fit dati



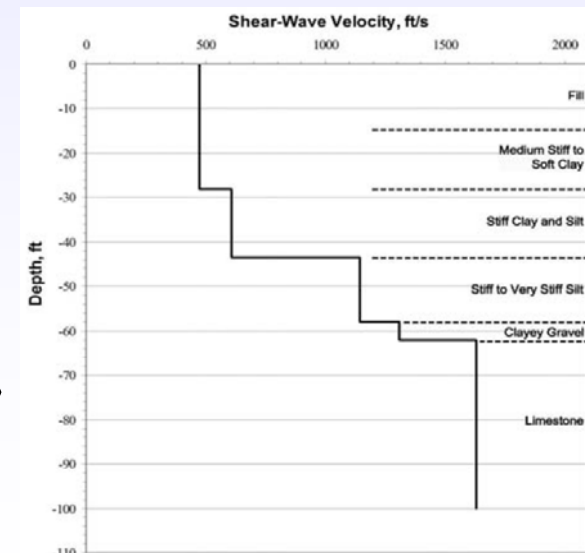
## Sismica a bassa risoluzione

Il rumore sismico è principalmente costituito da onde di superficie ed è di origine naturale ed antropica e si suppone essere isotropo.

In presenza di sorgenti di rumore può essere caratterizzato da una direzione preferenziale di propagazione che può essere o meno in linea con lo stendimento di misura.

L'acquisizione deve prevedere almeno due stendimenti tra loro ortogonali.

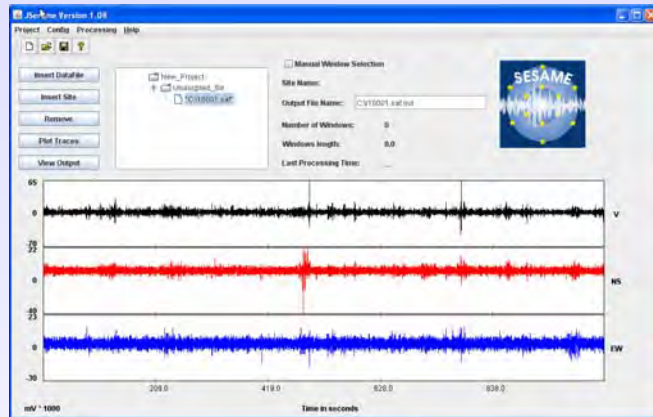
### Log REMI



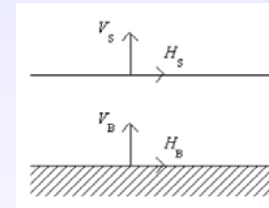
# HVSR – ANALISI RUMORE SISMICO (NAKAMURA)

## Metodologia di analisi del noise ambientale

Misura noise sede Progeo (30 minuti)



Si utilizzano sensori  
con frequenza  
naturale < 1-2 Hz



Seis Monitor Mark GS-1 (1 Hz)



Nella sua formulazione originaria, tale metodologia assume che i microtremori consistano principalmente di onde di Rayleigh che si propagano in un singolo strato sofficie su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito. Tale tecnica permette di separare i termini di sorgente-percorso e di sito tramite i rapporti tra le componenti del moto, senza utilizzare alcun sito di riferimento. Nel dominio della frequenza, 4 sono gli spettri coinvolti: le componenti orizzontali e verticali del moto in superficie ( $HS$  e  $VS$ ) e alla base dello strato ( $HB$  e  $VB$ ).

Le ipotesi su cui si basa la tecnica di Nakamura sono le seguenti:

i microtremori sono generati da sorgenti locali, e non da sorgenti profonde il cui contributo viene trascurato;

le sorgenti dei microtremori in superficie non influenzano i microtremori alla base;

la componente verticale del moto non risente di effetti di amplificazione locale.



# DOWN HOLE – CROSS HOLE

## Down Hole

I rilievi consistono nella misura dei tempi di percorso che le onde elastiche (P ed S), generate in un punto in superficie vicino alla bocca-foro impiegano per raggiungere uno o più geofoni posti nel foro a profondità diverse.

La misura dei tempi di percorso è effettuata mediante un'apparecchiatura di acquisizione di segnali sismici digitale, adottando di norma la tecnica di "averaging" dei segnali rilevati per aumentare il rapporto segnale/rumore. Il geofono nel foro è spostato tra una misura e l'altra di una quantità fissa, compresa di norma tra 1 m e 4 m.

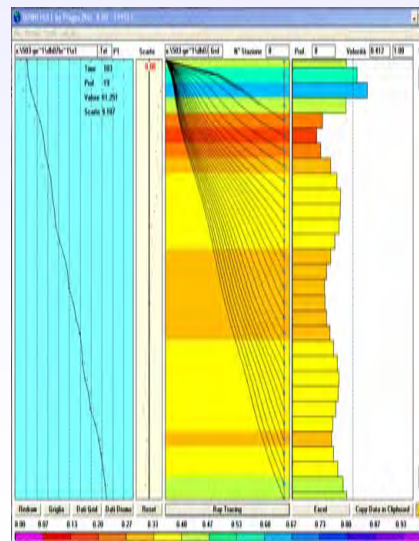
Note le distanze ed i tempi sono quindi calcolate le velocità medie o d'intervallo delle onde P e delle onde S. I risultati sono quindi rappresentati sotto forma di diagrammi delle velocità in funzione della profondità.

L'esecuzione dei rilievi down-hole viene di norma eseguita in fori provvisti di una tubazione di rivestimento in PVC che deve essere cementata con continuità ai materiali circostanti; infatti il geofono calato nel foro è vincolato al casing e tramite questo riceve le sollecitazioni trasmesse dal terreno.

## Sonda 3D



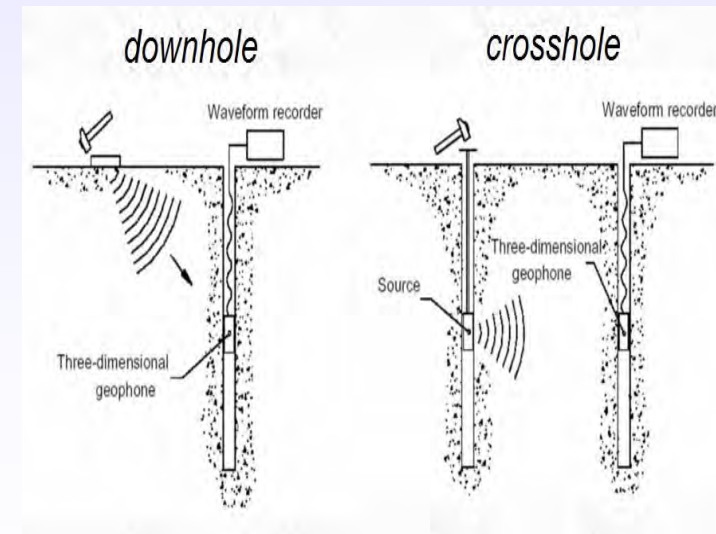
## Processing



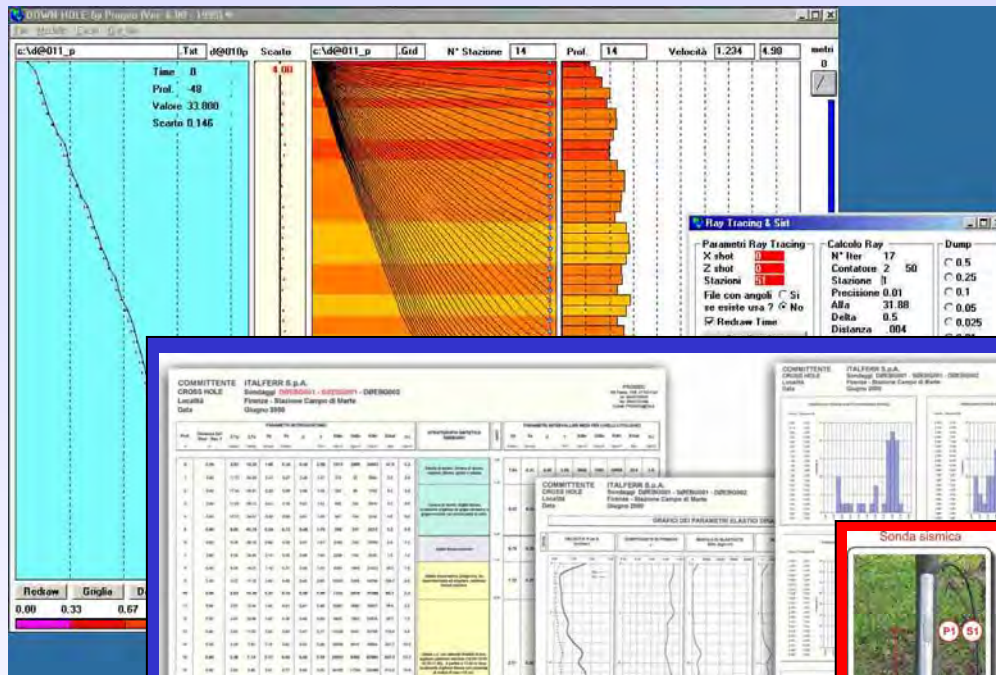
## Cross Hole

Per effettuare la caratterizzazione di terreni, finalizzata alla determinazione dei profili di velocità delle onde di taglio (onde SHV e SHH) e di compressione (onde P) ed ottenere quindi i moduli elastico-dinamici degli strati attraversati dalla perforazione, si adotta il metodo del cross-hole.

La prova viene eseguita in conformità con lo standard ASTM D 4428-M, utilizzando due o tre perforazioni appositamente predisposte.



# DOWN HOLE – CROSS HOLE – CONO SISMICO



Esempi di certificati

E' una misura che viene realizzata in foro e permette una completa caratterizzazione elastica dei materiali ad alta risoluzione

E' possibile ricavare per piccoli intervalli i seguenti parametri elastici:

- Velocità onde di compressione e taglio;
- Moduli di Attenuazione;
- Costanti elastiche (E, G, K, Poisson, Lamè).



**Sonda sismica**

**PROVA PENETROMETRICA SISMICA**

La prova penetrometrica con cono sismico è una tecnica rigida ed affidabile per determinare le velocità sismiche in situ. Viene effettuata a seguito di una prova penetrometrica statica per caratterizzare il sito anche dal punto di vista dinamico. Il metodo sismico della prova consiste nel misurare i tempi di percorrenza delle onde sismiche che si propagano fra una sorgente dell'onda posizionata sulla superficie del suolo e due serie di geofoni inseriti entro la punta sismica. Il treno di onde sismiche polarizzato contiene onde di taglio (SH) e onde di compressione (P). I valori di velocità si calcolano per differenza tra i tempi rilevati dai sensori del primo e del secondo gruppo interspaziati di 1 metro. La conoscenza della velocità sismica consente di ottenere indicazioni sulle caratteristiche del suolo nel campo elastico e quindi a bassa deformazione quali i moduli di taglio  $G_{max}$ , il coefficiente di Poisson e il modulo di Elasticità e Compressibilità. Questi parametri sono fondamentali per valutare la risposta delle fondazioni soggette a carico dinamico, per gli studi di microzonazione sismica e per caratterizzare i terreni secondo la normativa P.C.M. n° 3274 del 2003. E' possibile effettuare inoltre correlazioni tra i dati sismici (Down Hole) e quelli geotecnici, ottenuti dalle prove penetrometriche statiche (C.P.T.E. - C.P.T.U.).

**Esempio di record sismico**

**Esempio di tabella di output**

Prof. (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	G (MPa)	E (MPa)	K (MPa)	nu	G/G0	E/E0	K/K0	nu/nu0
0.00	1234	456	2.7	100	100	100	0.33	1.0	1.0	1.0	0.33
0.33	1250	460	2.7	105	105	105	0.33	1.0	1.0	1.0	0.33
0.67	1265	465	2.7	110	110	110	0.33	1.0	1.0	1.0	0.33

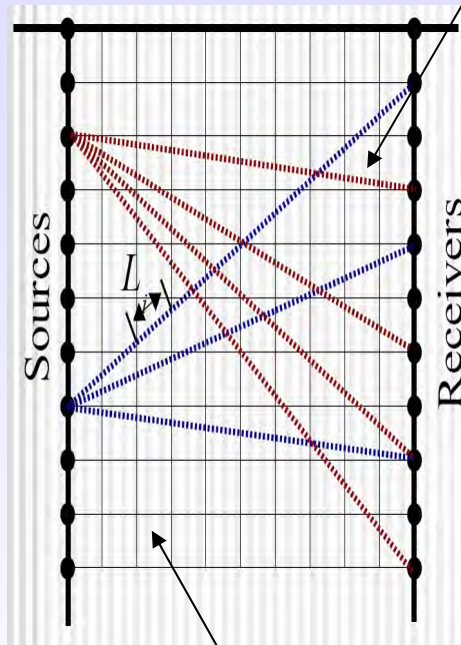
**CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SUOLO**

ES



# CROSS HOLE TOMOGRAPHY

## Indagine sismica tomografica tra fori



Traiettorie sismiche

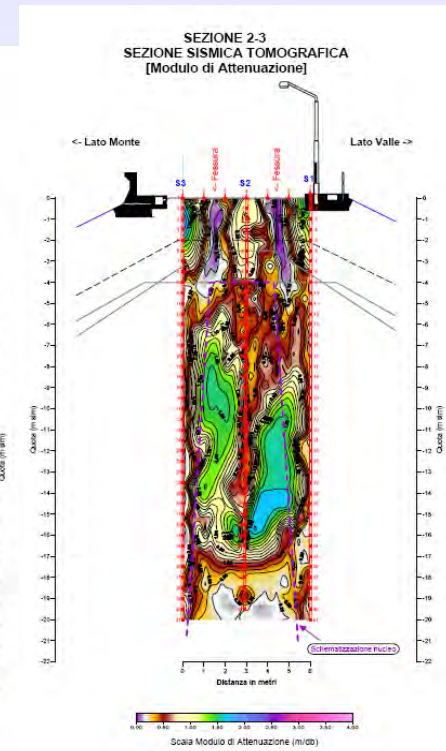
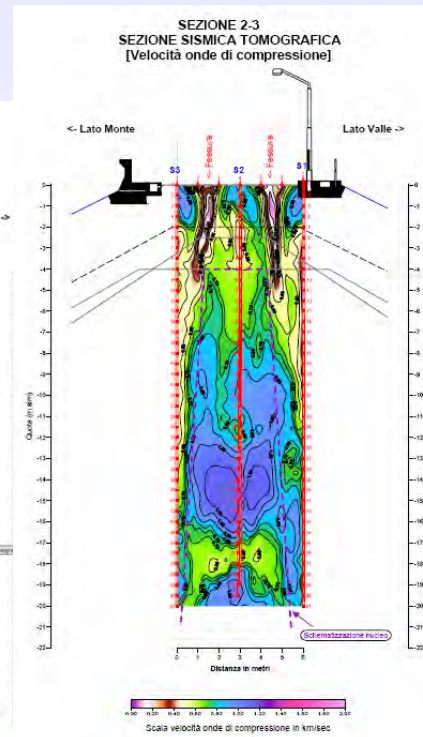
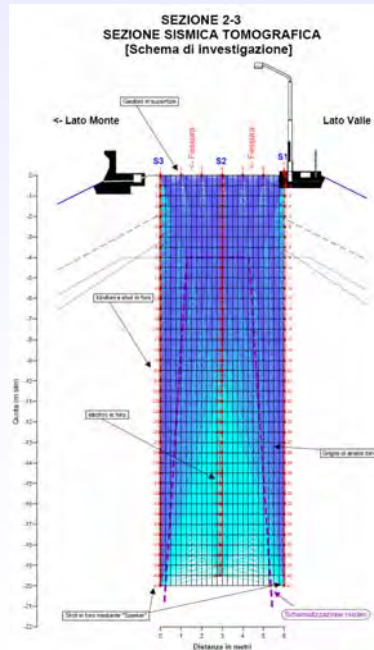
E' una misura che viene realizzata tra fori e permette una completa caratterizzazione elastica dei materiali ad alta risoluzione tra i sondaggi stessi

E' possibile ricavare per piccole celle i seguenti parametri elastici:

- Velocità onde di compressione e taglio;
- Moduli di Attenuazione;
- Costanti elastiche (E, G, K, Poisson, Lamè).

Celle di analisi

Esempio di indagine



## SPECIFICHE TECNICHE GENERALI INDAGINI SISMICHE

		Cross-Hole	Down-Hole	SASW	MASW	MICROTREMORI	RIFRAZIONE
Caratteristiche Prove Strumenti	Perforazione fori	2, 3	1	NO	NO	NO	5-7 microfoni se con esplosivo
	Tipo sorgente	Energizzatore da pozzo S	Energizzatore da superficie S. con blocco superficie	Martelli di peso 2kg 5kg Masse cadenti	Mazze Can. Sism. Vibratore Microcarica	Rumore sismico	Mazze Can. Sism. Vibratore Microcarica
	Tipo di onde	SV, SH	SH,SV	R	R	R	P, SV,SH
	Tipo Sensore	2 Geofoni 3C da pozzo 10 hz	1 o 2 Geofoni 3C da pozzo Geofono da superficie 3C 10 hz	6 Coppie di geofoni verticali 1 hz 2 hz 4.5 hz 1 coppia Accelerometri	12-48 Geofoni Verticali 4.5 - 8 - 14 hz	12-48 Geofoni Verticali 4.5 - 8 - 14 hz	12-48 Geofoni Verticali 4.5 - 8 - 14 hz 4-16 Geofoni orizzontali 4.5 - 8 - 14 hz
	Orientazione	SI (misure inclin.)	SI	NO	NO	NO	SI per SV, SH
	Dip. Rumore amb.	Bassa	Medio-Bassa	Medio-Alta	Media	Inesistente	Media
	Dip. Attenuazione	Bassa	Media	Bassa	Bassa	Bassa	Alta
	Risoluzione	Alta	Medio-Alta	Media	Alta	Media	Alta
	Data logger	Acquistore digitale 6 canali 18-24 bit	Acquistore digitale 6 canali 18-24 bit	Analizzatore di Spettri min 2 canali	Acquistore digitale 6 canali 18-24 bit	Acquistore digitale 12-48 canali 18-24 bit	Acquistore digitale 6 canali 18-24 bit
Logistica Spetim.	Complessità misure	alta	Medio alta	Alta	Medio-Alta	Bassa	Medio-Alta
	Ingombro	Basso	Basso	medio	alto	alto	Alto
	Disturbo terreno	Alto	Alto	basso	medio	inesistente	Medio
	Tempi misura	Alti	Medio-Alti	Medio-bassi	Medio	Bassi	Medi
Interpretaz.	Modello	1-D o 2D discontinuità I°, II°	1D e 2D discontinuità I°, II°	1D	1D->2D	1D->2D	1D, 2D, 3D discontinuità I°, II°
	Parametri	H, Vp, Vs, Q	H, Vp, Vs, Q	H, Vr->Vs, Q	Vr, Q-	Vr->Vs, Q	H, alfa, Vp, Vs, Q
	Know-how	Basso	Basso	Alto	Alto	Alto	Medio
	Software Comm.	SI	SI	WINSASW	SURFSEIS	OPT REMI	GREMIX, SEISOPT, RAYFRACT
Costi	Acquisizione+ interpretazione	Alti	Medio-Alti	Medio-bassi	Medio	Bassi	Medio-Alti (tomo) Medi (standard)

# APPLICAZIONI SISMICHE

**DGPV** (Deformazioni Gravitative Profonde di Versante)

Gallerie

Scavi e Rilevati

Cavit 

Consolidamenti



# DGPV

## Deformazioni Gravitative Profonde di Versante

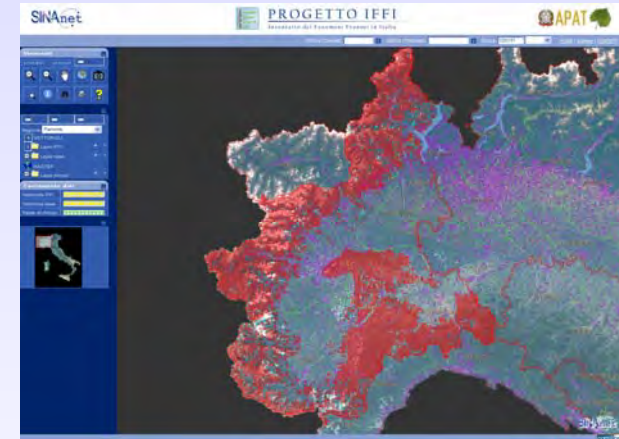
### PROGETTO IFFI

[http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/default\\_nosso.asp](http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/default_nosso.asp)

Tale espressione racchiude in sé le principali caratteristiche del fenomeno che consiste nel lento scivolamento gravitativo del versante verso valle e coinvolge spessori di roccia dell'ordine di centinaia di metri. Al contrario di quanto si potrebbe pensare, le DGPV sono un fenomeno molto diffuso e caratterizzano le fasi finali della formazione di una catena montuosa.

Le caratteristiche tipiche di questi fenomeni sono in genere le seguenti:

1. grande estensione (vari kmq) e spessore della massa di roccia coinvolta (decine, talvolta centinaia di metri);
2. spostamento limitato rispetto alle dimensioni delle masse rocciose coinvolte;
3. assenza di una superficie netta che delimiti la massa soggetta a movimento;
4. evoluzione molto lenta, con lunghi periodi di inattività, o di attività estremamente ridotta, durante i quali si può assistere a una repentina riattivazione in conseguenza a eventi sismici, o meteorici estremi;
5. meccanismo di rottura legato a creep;
6. cinematica spesso influenzata da tettonica attiva e dalla presenza di stress tettonici residui ed alta pressione di confinamento;
7. movimento controllato più dalle caratteristiche geologico-strutturali piuttosto che dalle caratteristiche morfologiche locali.



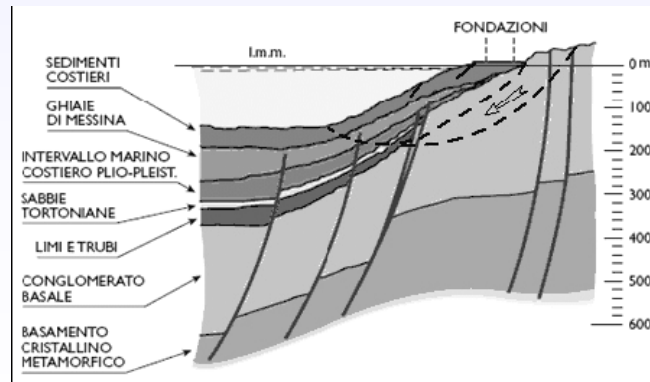
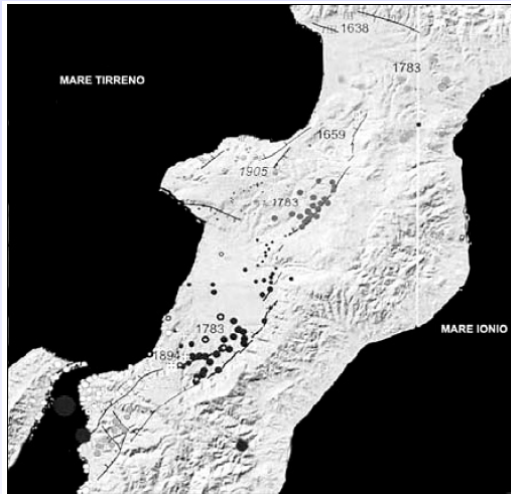
**Frana di Rosone (Locana – Torino)**



# DGPV

## ESEMPI DI INTERCONNESSIONE DGPV – OPERE D'ARTE

### PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



### FRANA DI BEAUREGARD (VAL D'AOSTA)



Foto 1: Diga di Beauregard

Foto 2: Versante destro della valle di Beauregard (sezione 4)



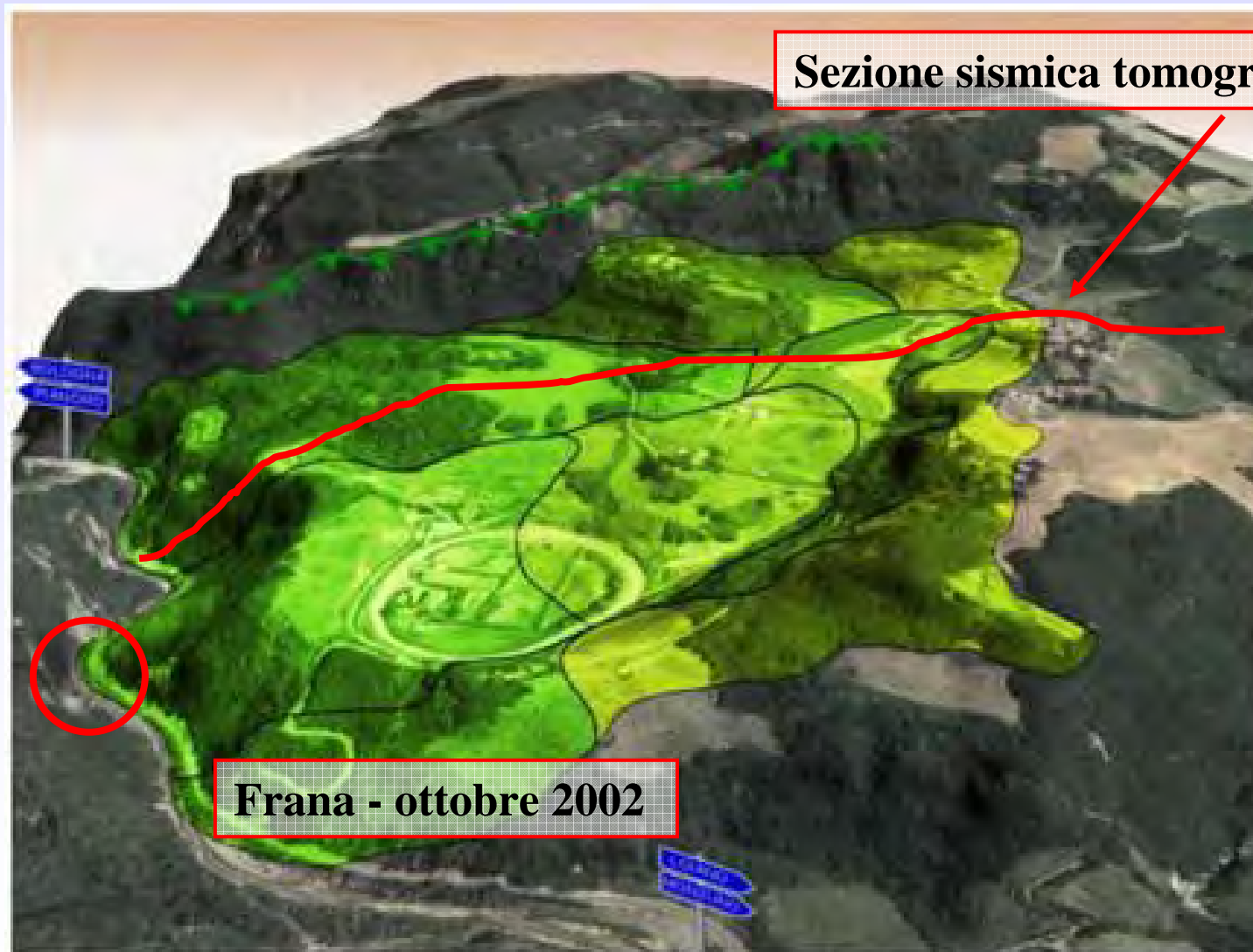
Foto 3: Alpettaz (Versante sinistro)



# FRANA DI SCASCOLI (BOLOGNA)



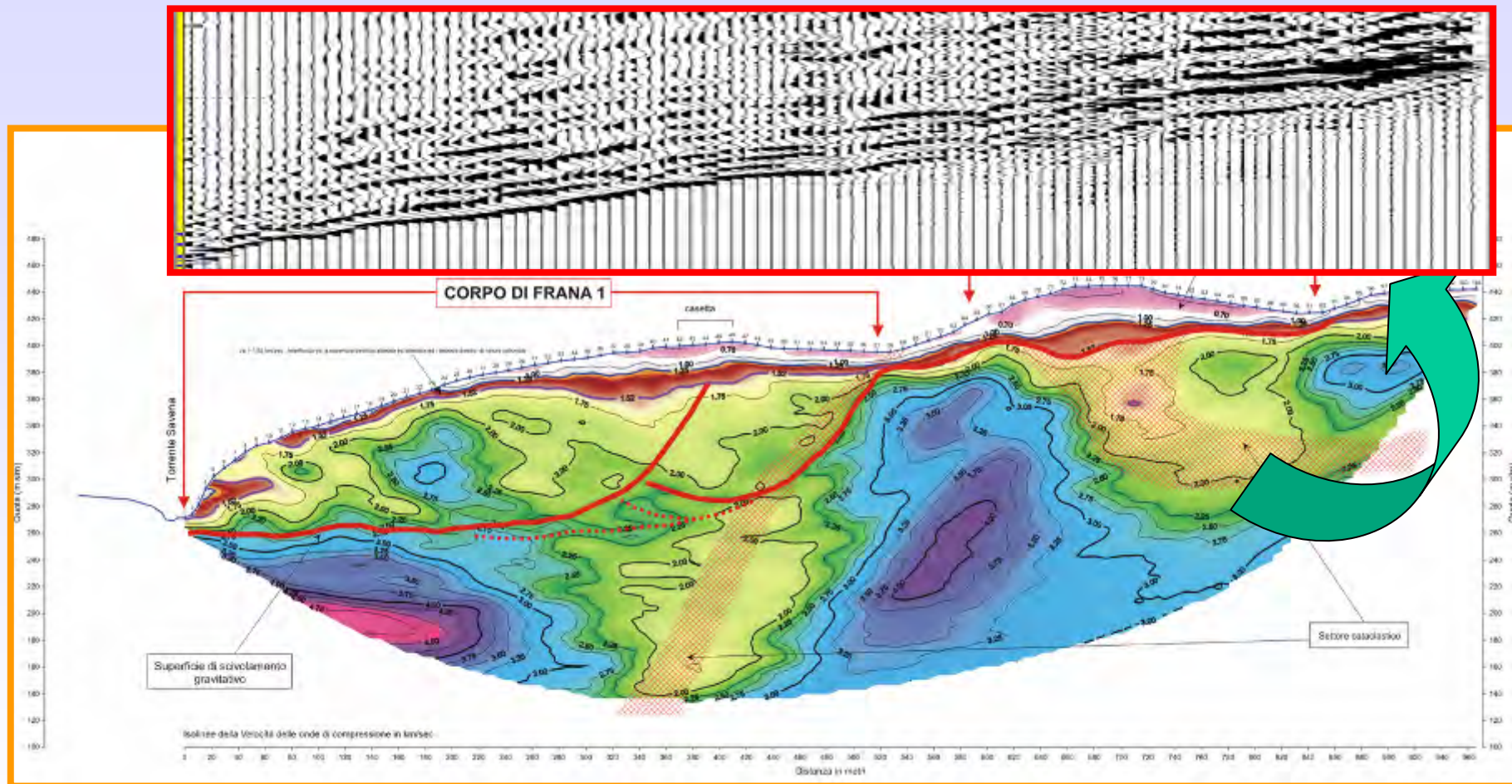
# FRANA DI SCASCOLI (BOLOGNA)



Elaborazione immagine a cura di



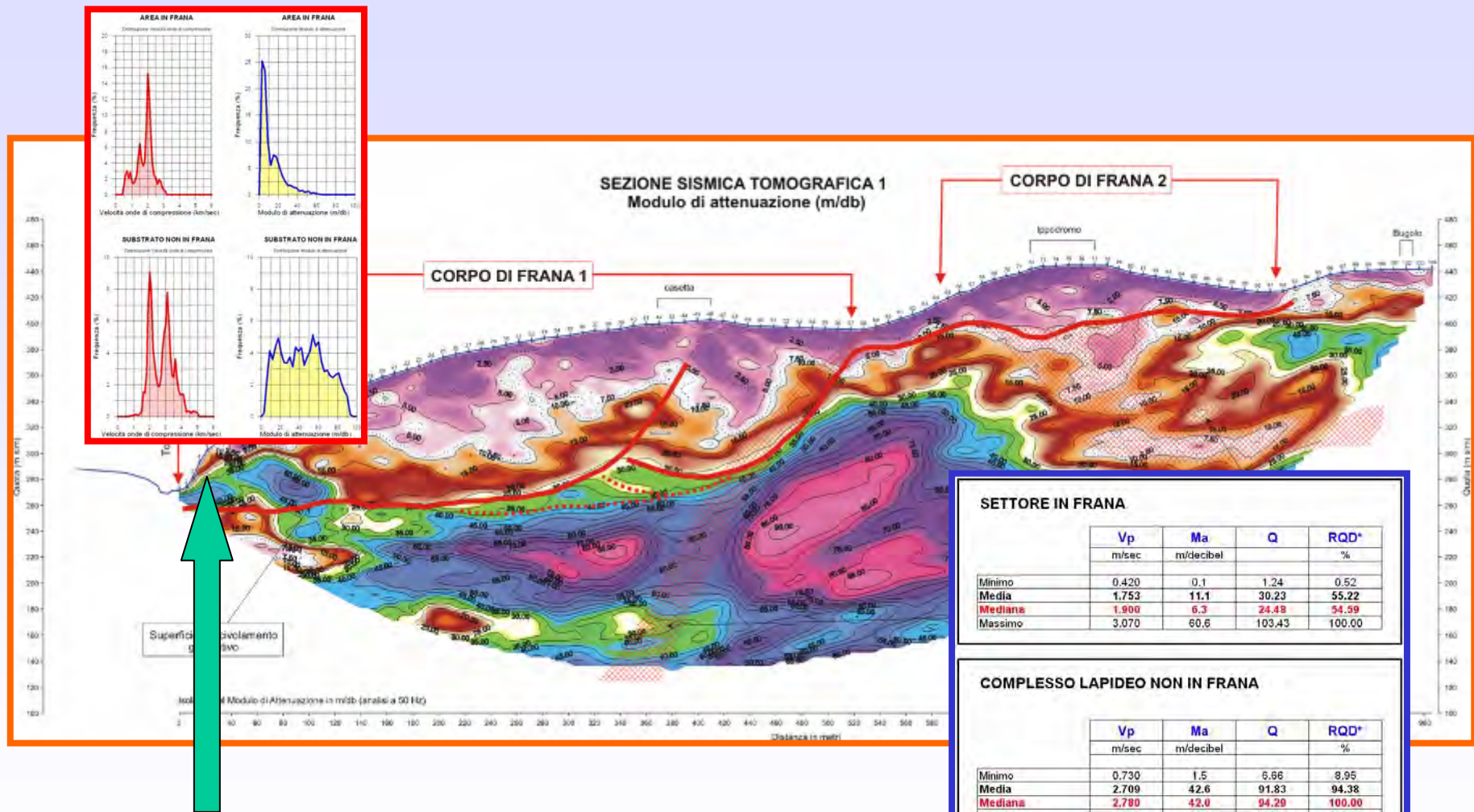
# FRANA DI SCASCOLI (BOLOGNA)



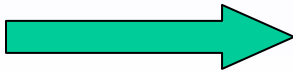
**I migliori risultati con la sismica tomografica si ottengono mettendo il target al centro della sezione d'indagine**



# FRANA DI SCASCOLI (BOLOGNA)



Analisi statistica d'ammasso



SETTORE IN FRANA				
	Vp	Ma	Q	RQD*
	m/sec	m/decibel		%
Minimo	0.420	0.1	1.24	0.52
Media	1.753	11.1	30.23	55.22
Mediana	1.900	6.3	24.48	54.59
Massimo	3.070	60.6	103.43	100.00

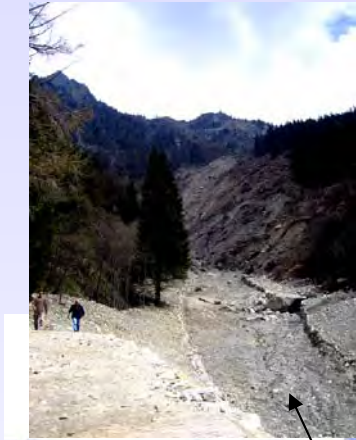
COMPLESSO LAPIDEO NON IN FRANA				
	Vp	Ma	Q	RQD*
	m/sec	m/decibel		%
Minimo	0.730	1.5	5.66	8.95
Media	2.709	42.6	91.83	94.38
Mediana	2.780	42.0	94.29	100.00
Massimo	4.990	91.1	184.09	100.00

Vp = Velocità onde di compressione  
 Ma = Modulo di Attenuazione (1/coefficiente di attenuazione)  
 Q = Fattore Qualità  
 RQD\* = Valore ricavato da una funzione correlativa



# Frana di Mussolier - Bosmatto – Gressoney (Val d'Aosta)

Committente – Regione Valle D'Aosta



2150 m slm

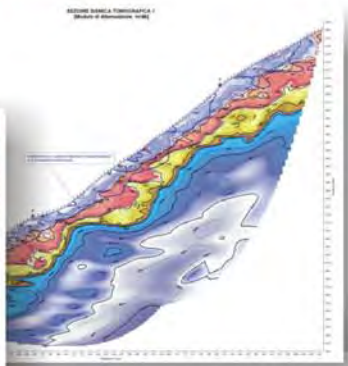
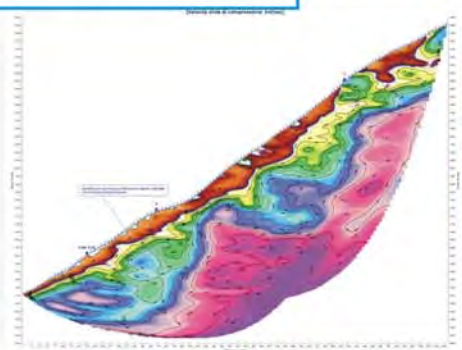


1450 m slm

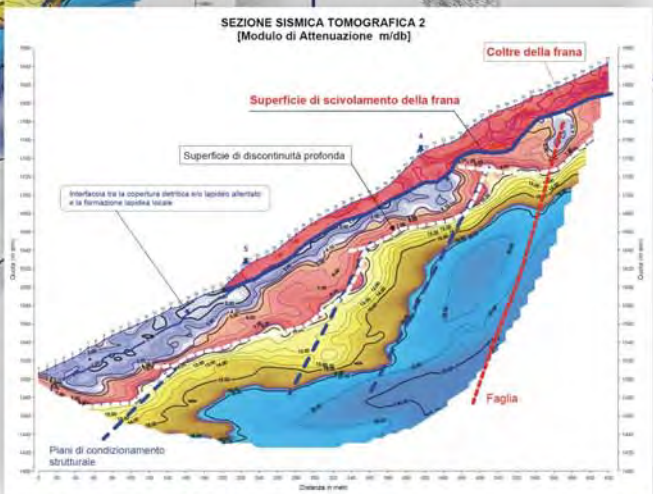
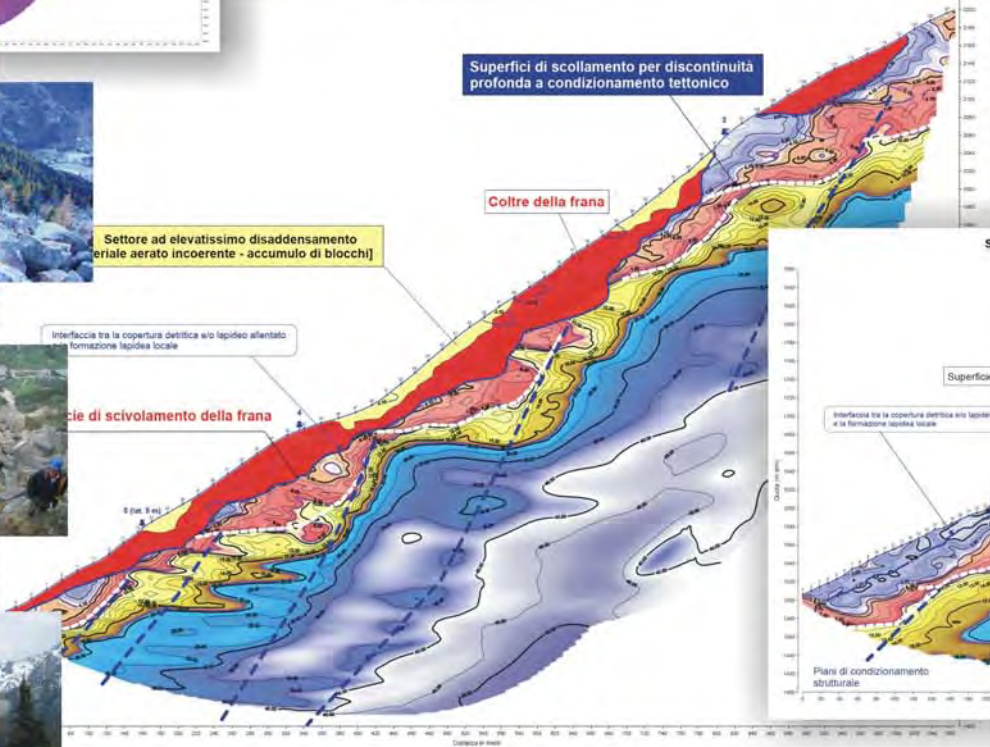
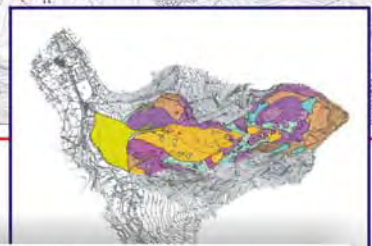
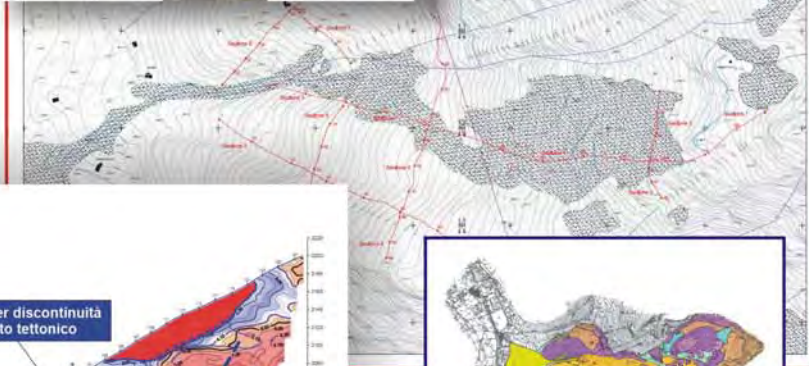


**Frana di Mussolier - Bosmatto - Gressoney (Val d'Aosta)  
Luglio 2006**

**INDAGINI SISMICHE TOMOGRAFICHE**  
 / Velocità onde di compressione  
 / Modulo di Attenuazione



**SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 1**  
[Modulo di Attenuazione m/db]



**SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 2**  
[Modulo di Attenuazione m/db]



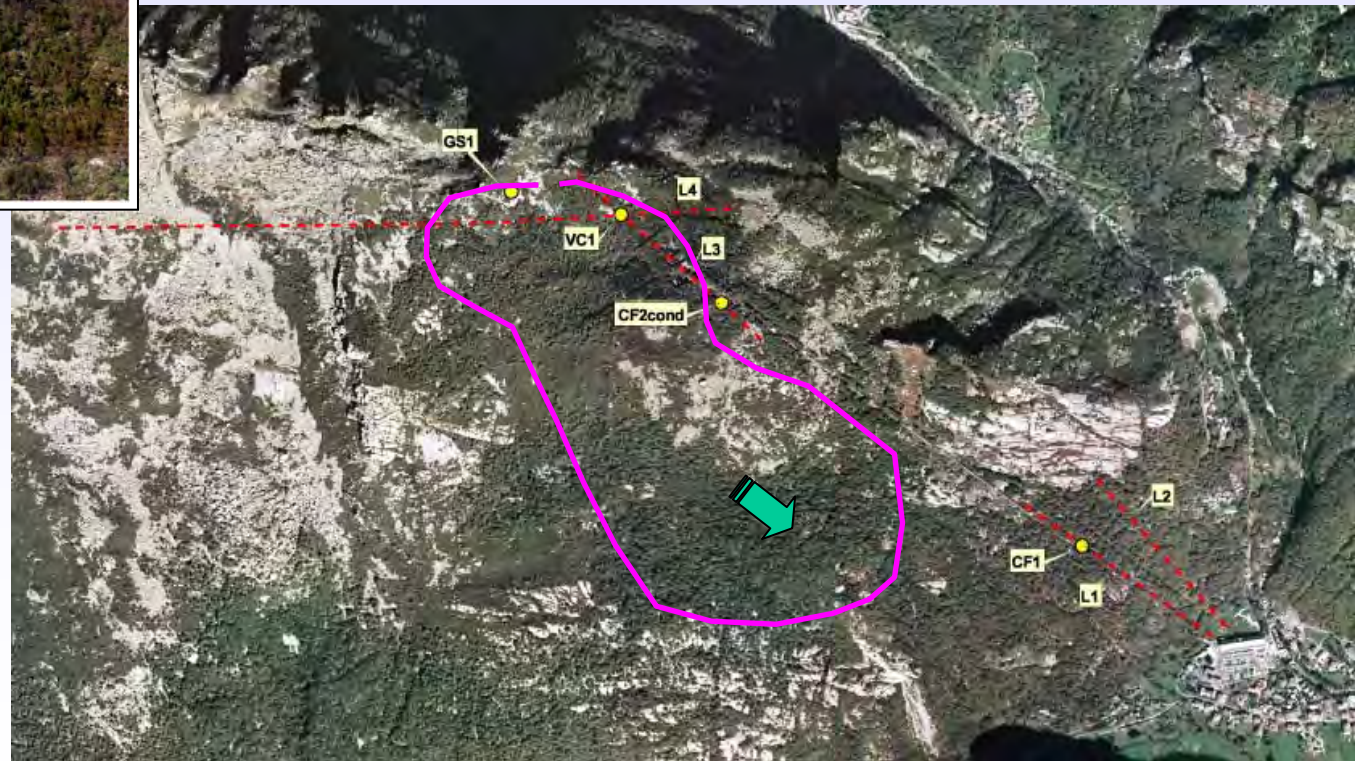
## Frana di Rosone – Locana (Torino)

Committente - AEM TORINO - IMPIANTO IDROELETTRICO CERESOLE - ROSONE



Sezioni sismiche tomografiche profonde

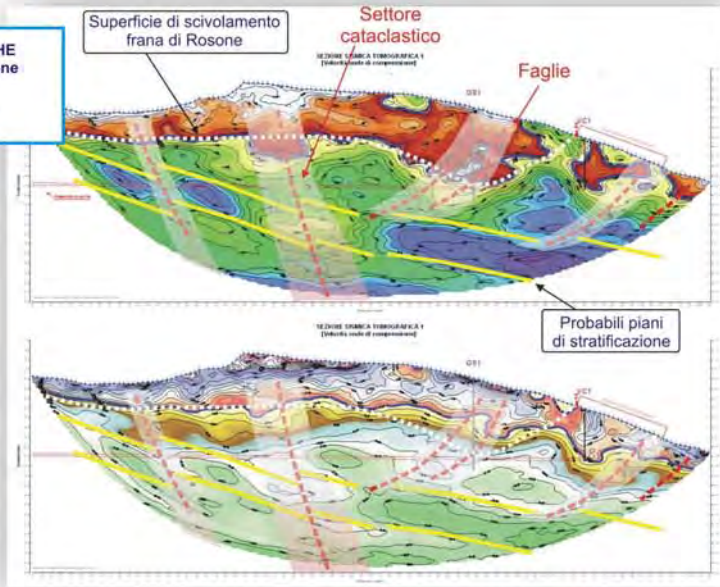
Sezioni sismiche a riflessione ad alta risoluzione



**Frana di Rosone - Locana (TO)**  
**Giugno 2006**

**INDAGINI SISMICHE TOMOGRAFICHE**  
 Velocità onde di compressione  
 Modulo di Attenuazione

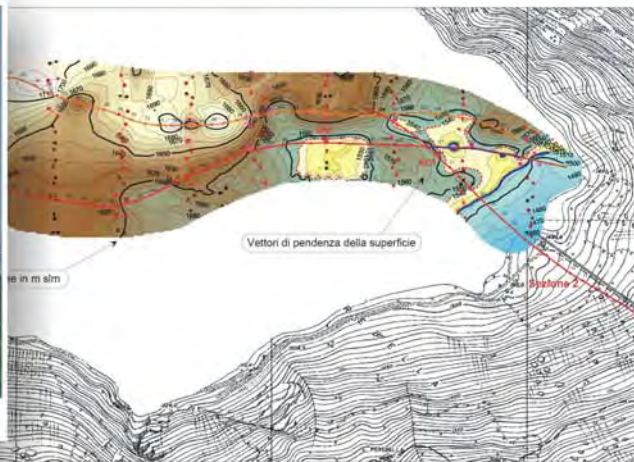
**INDAGINI SISMICHE RIFLESSIONE**



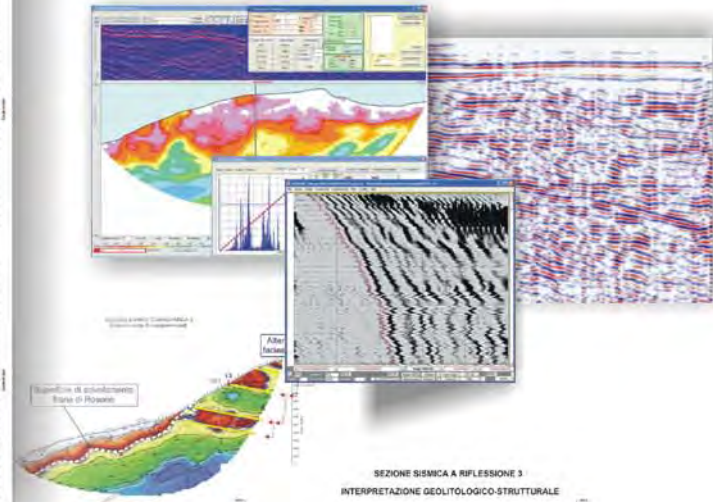
**PLANIMETRIA DEL TETTO DELLA FORMAZIONE COMPATTA (BASE DEL CORPO DELLA FRANA DI ROSONE)**  
 ISOSUPERFICIE IN VELOCITA' DELLE ONDE DI COMPRESSIONE ( $V_p=2.22 \text{ km/sec}$ )



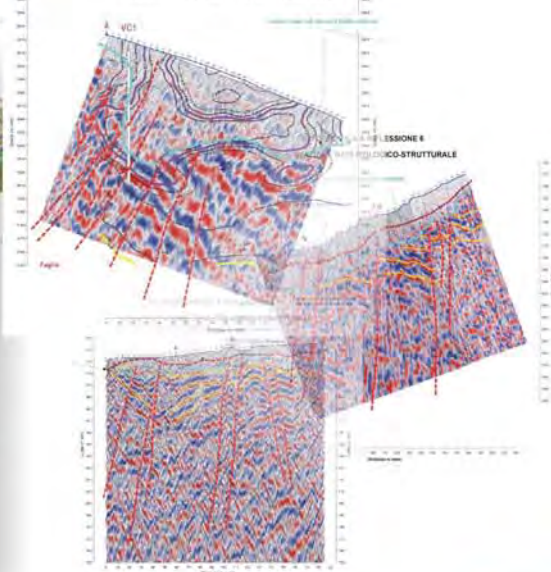
Piano di scivolamento della frana di Rosone



**PROCESSING DATI - Software**  
**SRA (Progeo) per elaborazione sismica tomografica**  
**SPW (Parallel Geoscience) per elaborazione sismica a riflessione**



**SEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE 3**  
 INTERPRETAZIONE GEOLITOGICO-STRUTTURALE



# Diga di Beauregard

(Valgrisanche - Aosta)

Indagini in sito [2002 – 2005]

- Campagna d'indagine sul corpo della diga
- Campagna d'indagine di dettaglio sulle fessure
- Campagna d'indagine sul versante sinistro in frana
- Campagna d'indagine per il progetto della briglia
- Campagna d'indagine sull'avandiga

9 14:40



INDAGINI GEOFISICHE TOMOGRAFICHE  
SUL VERSANTE DELLA DIGA DI BEAUREGARD  
(Val d'Aosta)  
Estate 2004

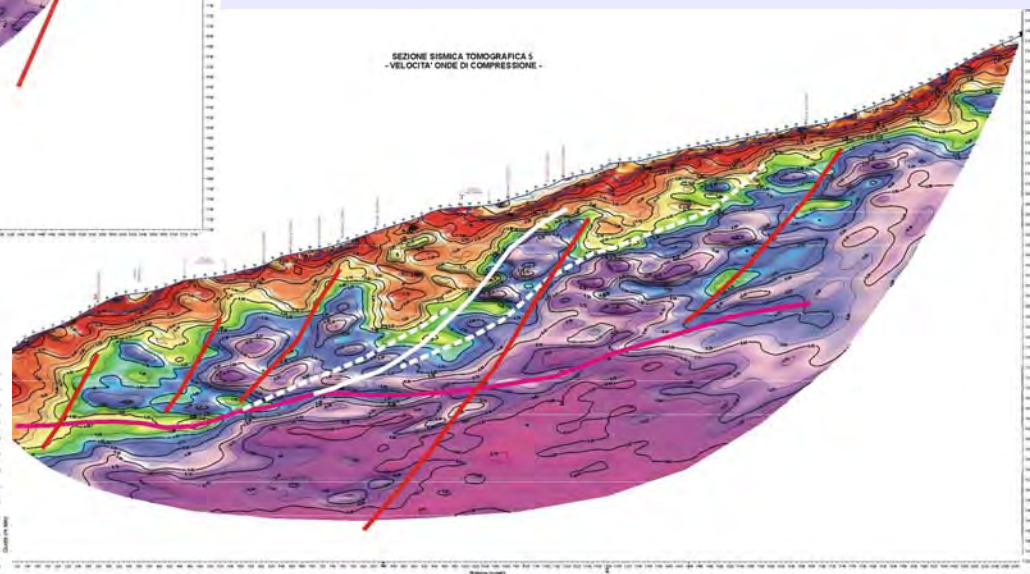
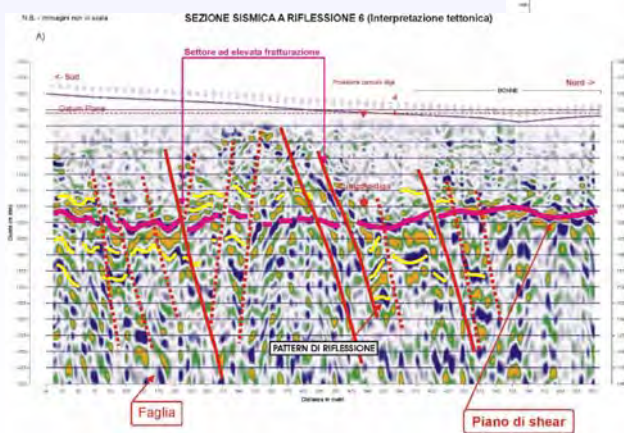
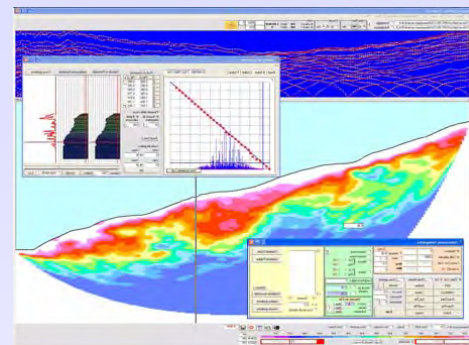
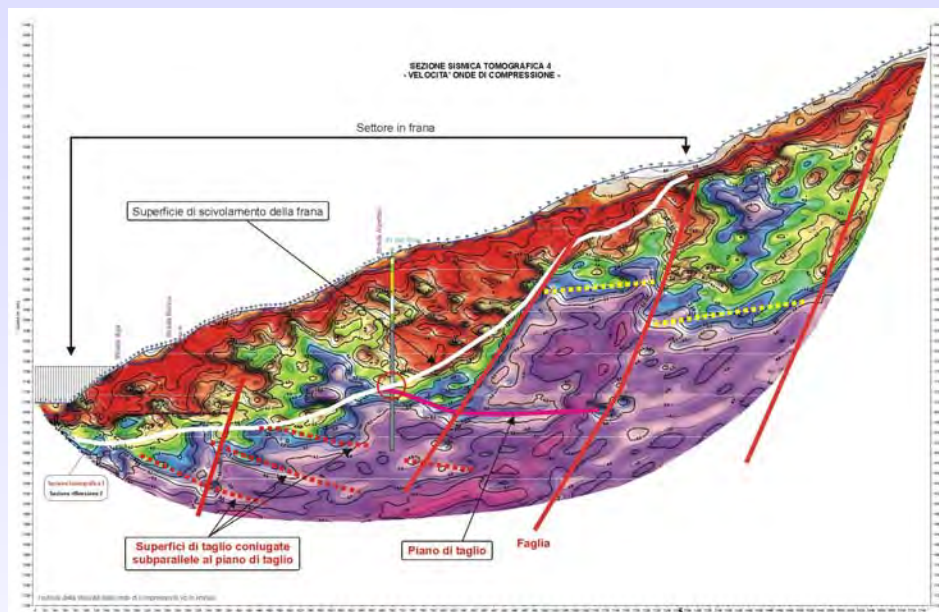


## Frana di Beaugard



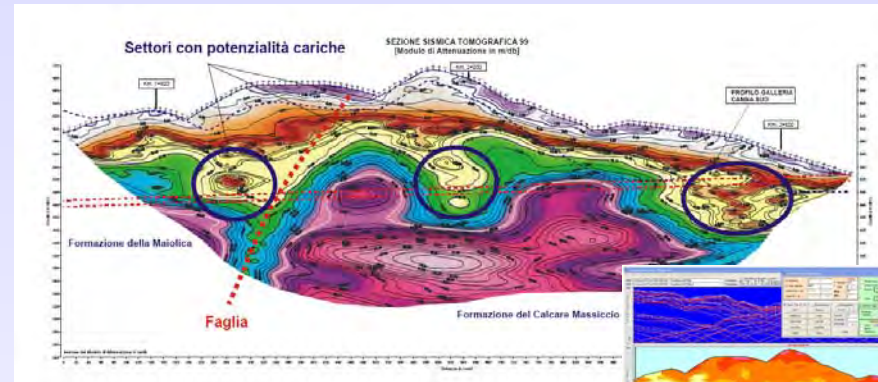
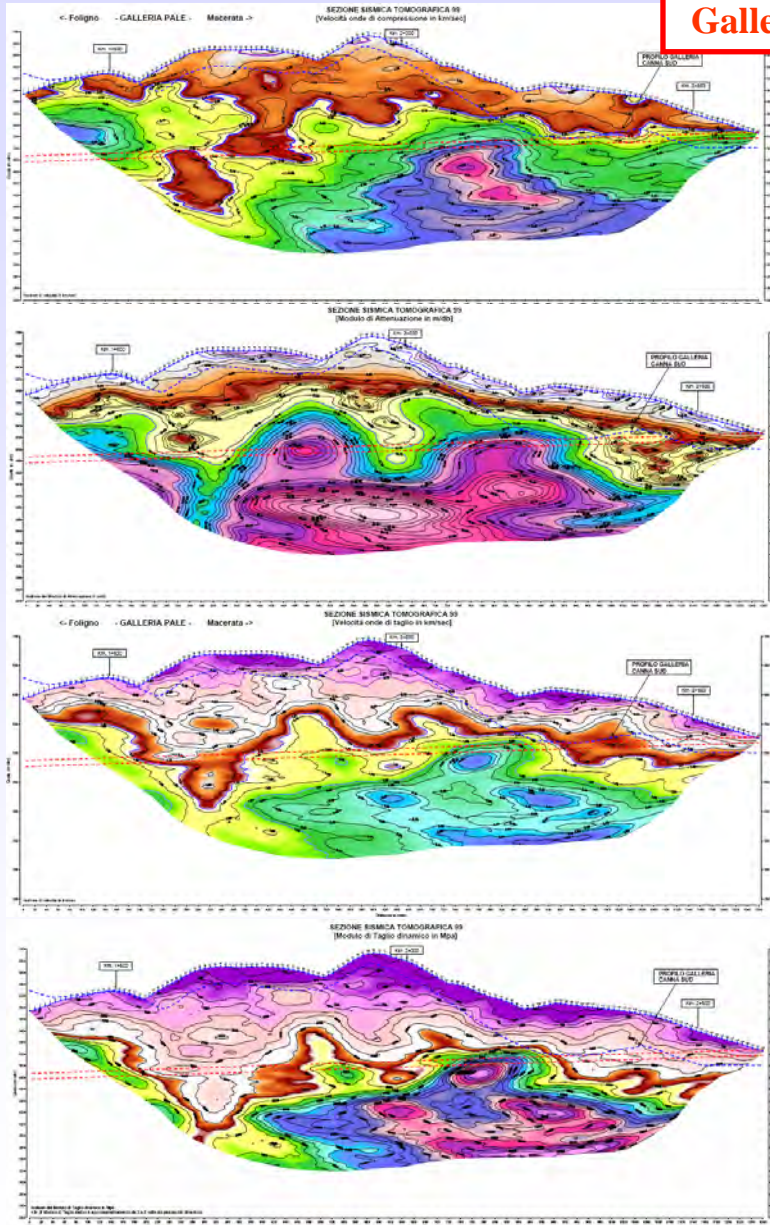
# Frana di Beauregard – Sezioni sismiche

Analisi del gradiente tomografico

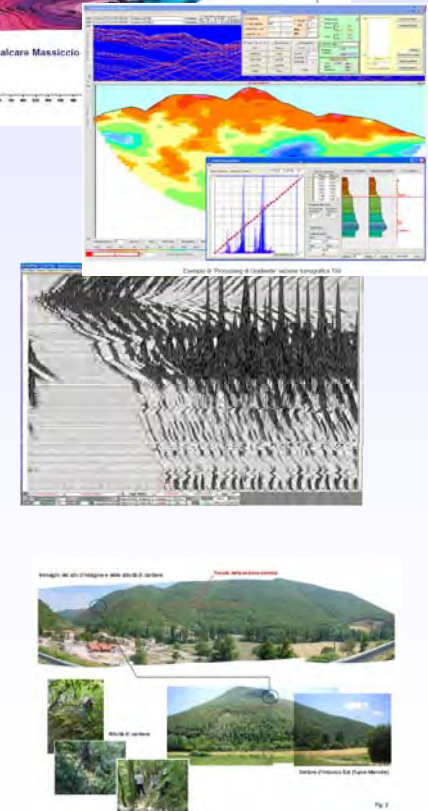
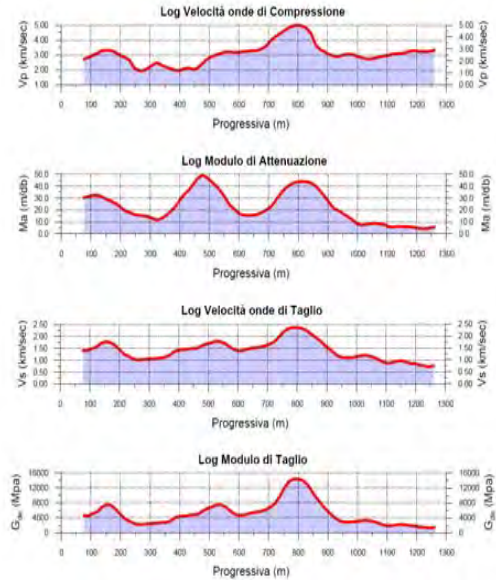


# Galleria Pale - Quadrilatero

# GALLERIE

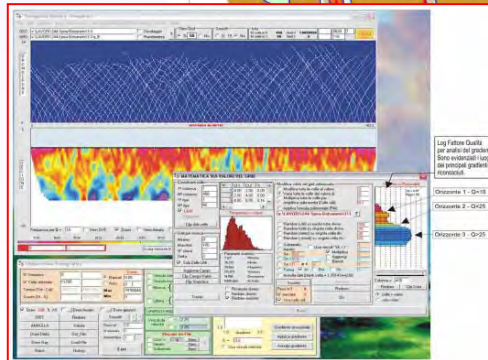
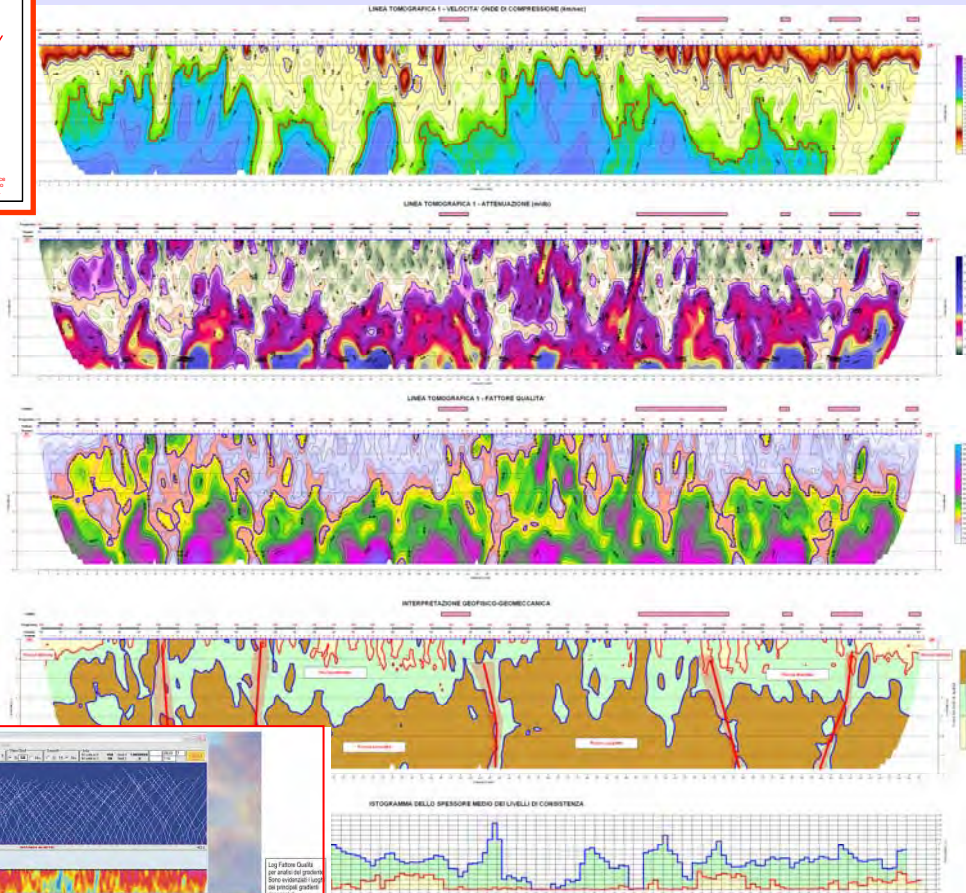


## LOG PARAMETRI ELASTICI IN ASSE ALLA GALLERIA



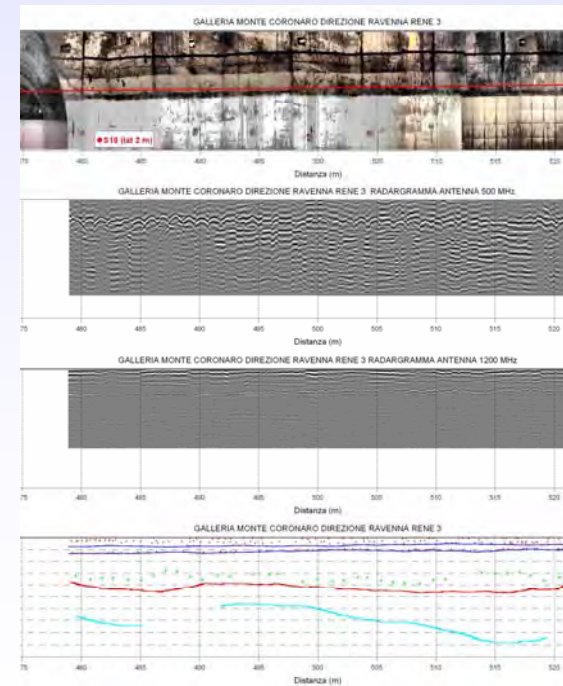
# Galleria Brasile – A7

## Indagine per allargamento galleria

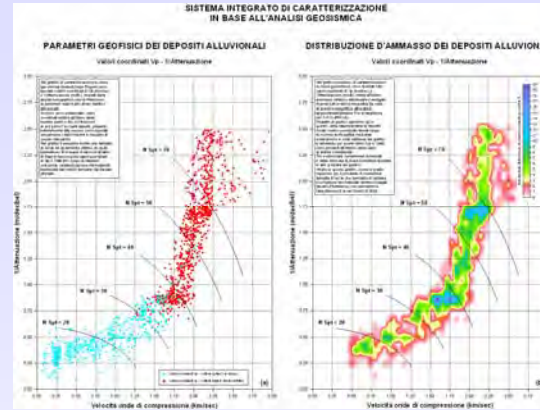
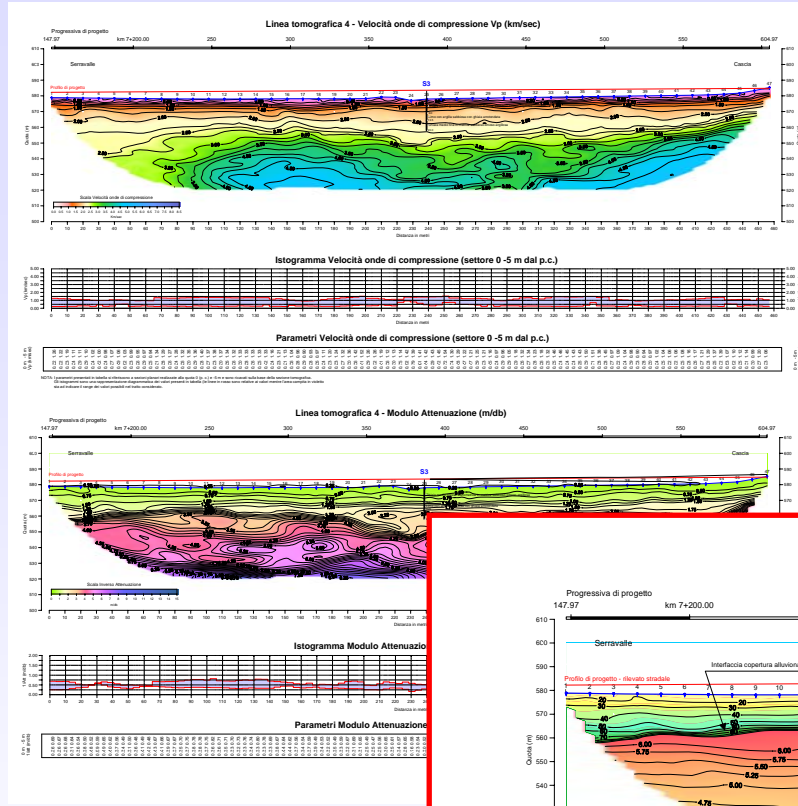


# GALLERIE

**Indagine per valutazione  
roccia incassante  
ed anello plastico  
finalizzato al ripristino della  
Funzionalità  
(INDAGINE GEORADAR)**

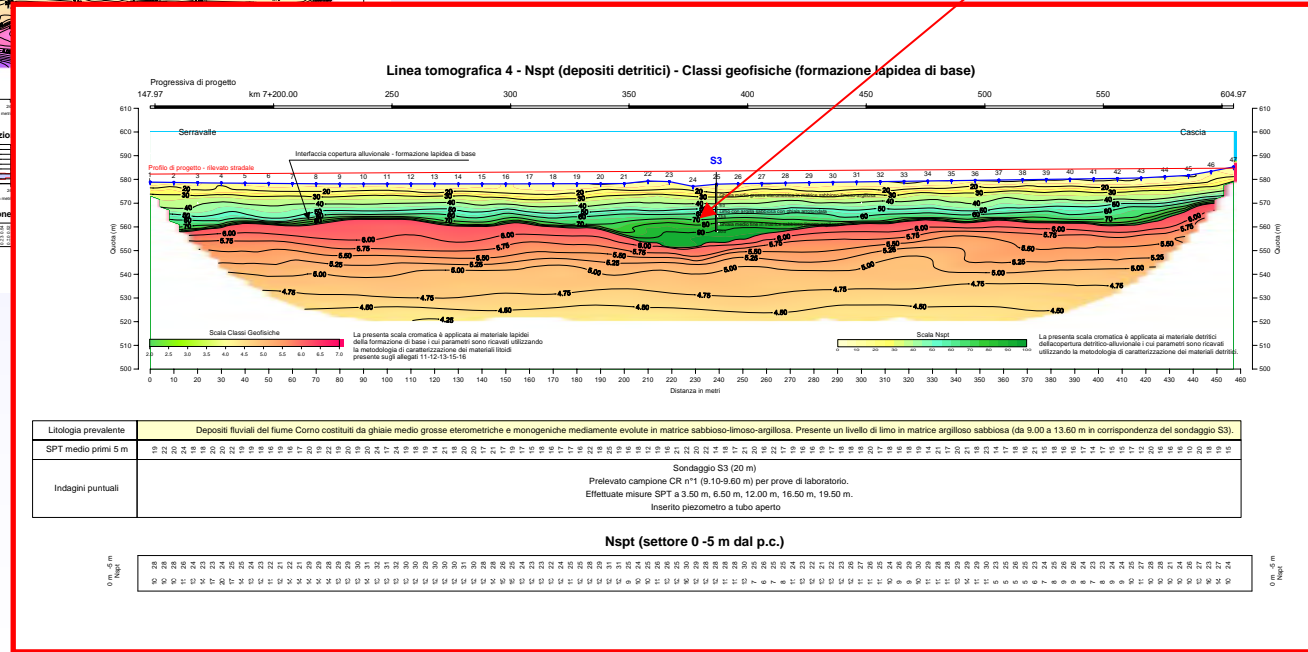






Sistema di caratterizzazione dei materiali

Paleoalveo



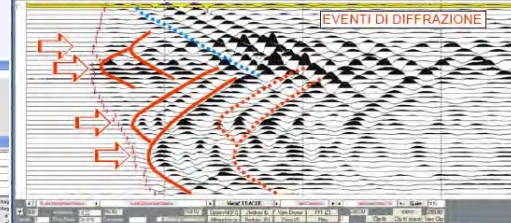
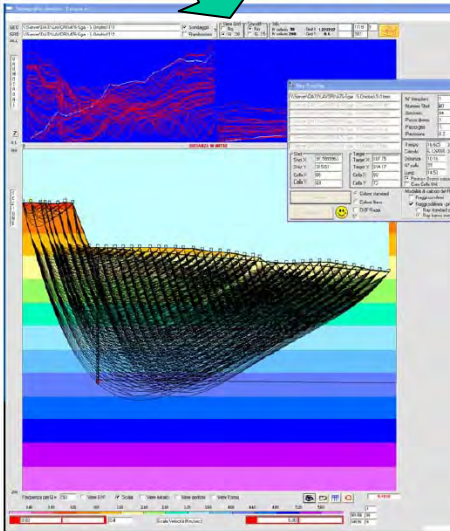
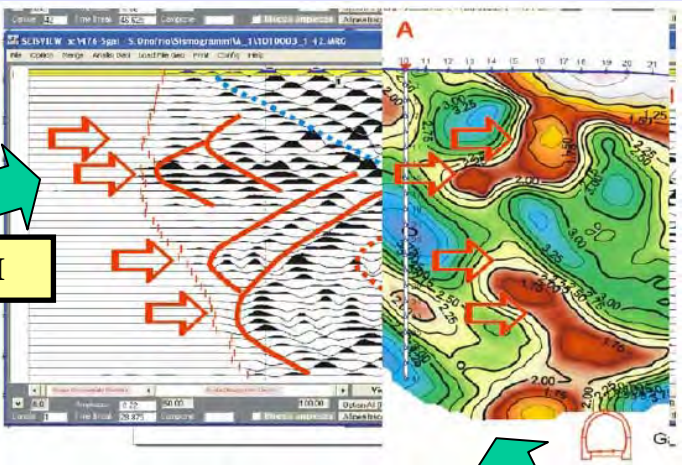
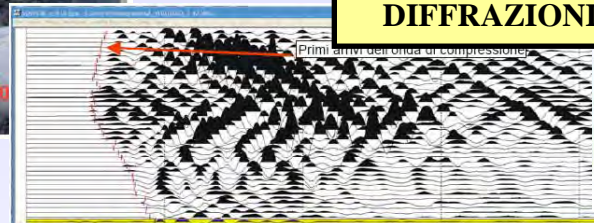
Indagini sismiche tomografiche – Applicazioni particolari

# CAVITA'

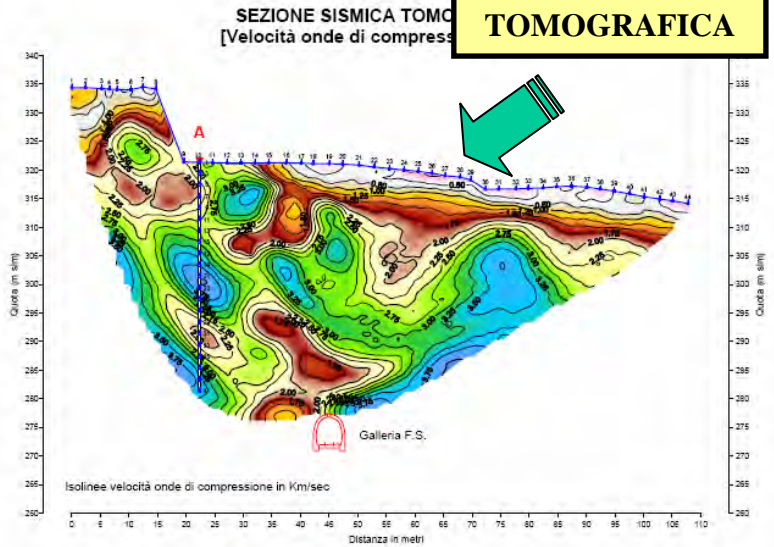
Durante il consolidamento delle fondazioni ci si è accorti della presenza di cavità di non ben definibile dimensione. Si è provveduto allora alla realizzazione di n° 2 sondaggi e n° 6 sezioni sezioni sismiche tomografiche con analisi in Velocità ed in Attenuazione.

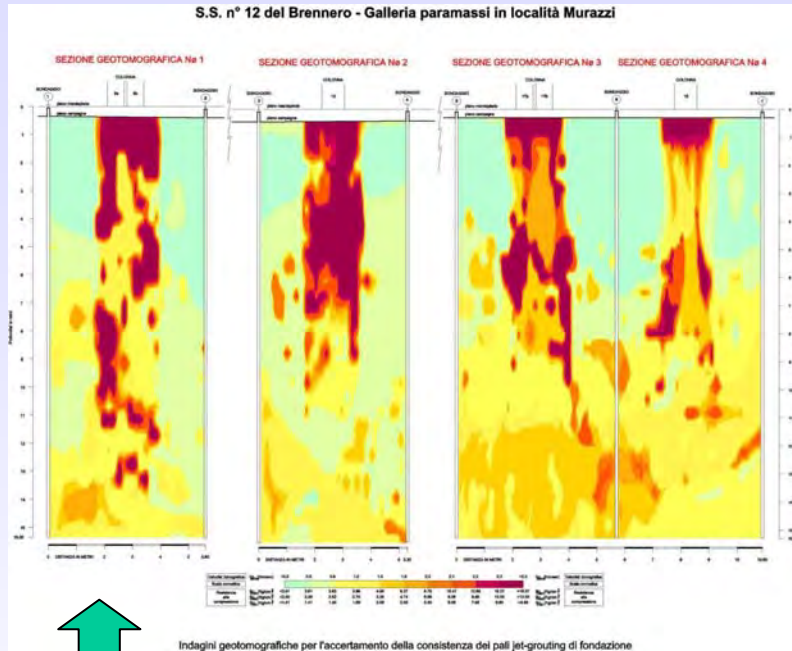


**MODELLO INIZIALE DI CALCOLO**

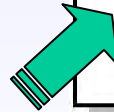
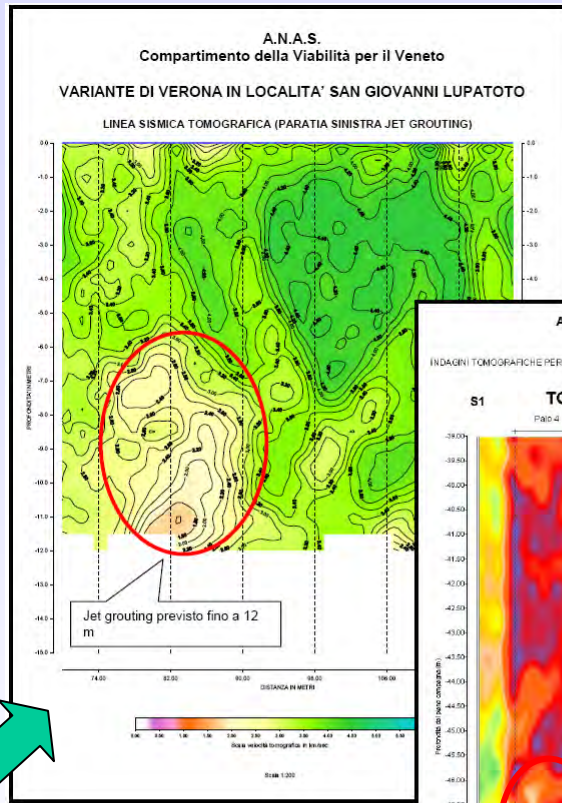


**ANALISI DELLE DIFFRAZIONI DEI SEGNALE SISMICI**



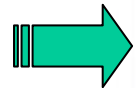
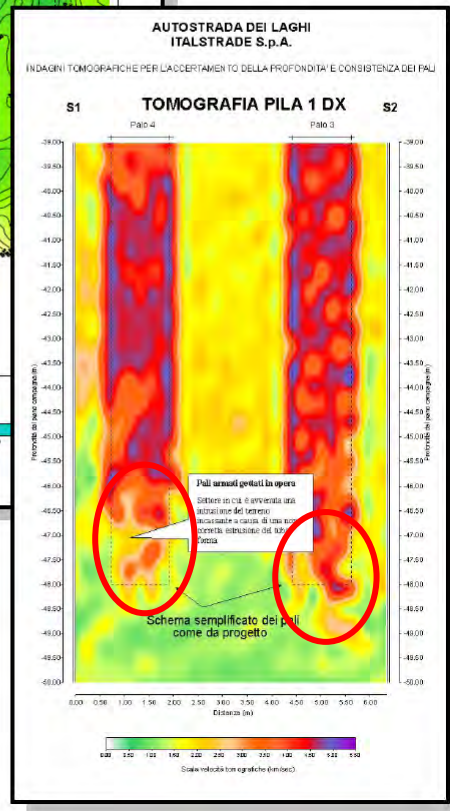


Consolidamento sotto le pile



Creazione di una paratia (setto impermeabile)

Verifica Jet Grouting per collaudo opera



Verifica pali armati gettati in opera con tubo forma



**$V_{S30}$**

# **MICROZONAZIONE SISMICA**

**TECNICHE DI MISURA DIRETTA CON METODI GEOSISMICI**



# V<sub>S30</sub> – NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

## 3.2.1. CATEGORIE DI SUOLO DI FONDAZIONE

- A - *Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi* caratterizzati da valori di V<sub>S30</sub> superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.
- B - *Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti*, con spessori di diverse decine di metri, 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 resistenza penetrometrica media N<sub>SPT</sub> > 50, o coesione non drenata media c<sub>u</sub> > 250 kPa).
- C - *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V<sub>S30</sub> compresi tra 180 e 360 m/s (15 < N<sub>SPT</sub> < 50, 70 < c<sub>u</sub> < 250 kPa).
- D - *Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti*, caratterizzati da valori di V<sub>S30</sub> < 180 m/s (N<sub>SPT</sub> < 15, c<sub>u</sub> < 70 kPa).
- E - *Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali*, con valori di V<sub>S30</sub> simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con V<sub>S30</sub> > 800 m/s.

Per i terreni di seguito illustrati andranno svolti studi speciali per la definizione dell'azione sismica:

- S1 - Terreni che includono uno strato di almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità (PI > 40) e contenuto di acqua, con 10 < c<sub>u</sub> < 20 kPa e caratterizzati da valori di V<sub>S30</sub> < 100 m/s.
- S2 - Terreni soggetti a liquefazione, argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

Nelle definizioni precedenti V<sub>S30</sub> è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}} \quad [3.2.1]$$

dove h<sub>i</sub> e V<sub>i</sub> indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio γ < 10<sup>-6</sup>) dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

Il sito verrà classificato sulla base del valore di V<sub>S30</sub>, se disponibile, altrimenti sulla base del valore di N<sub>SPT</sub> (per terreni prevalentemente granulari) ovvero di c<sub>u</sub> (per terreni prevalentemente coesivi).

Nelle definizioni precedenti N<sub>SPT</sub>, c<sub>u</sub> e V<sub>s</sub> sono i valori rappresentativi degli strati considerati, valutati dal progettista e/o committente sulla base di insiemi statistici sperimentali.

## Calcolo dell'azione sismica

Zona sismica

Tipologia azione sismica

Spettro di risposta elastico

I valori dei parametri che definiscono lo spettro derivano dalle indagini di risposta sismica locale

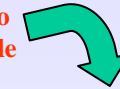


Tabella 3.2.II - Valori dei parametri nelle espressioni [3.2.2] dello spettro di risposta elastico delle componenti orizzontali

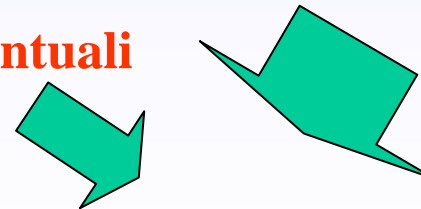
Categoria suolo	S	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>D</sub>
A	1,0	0,15	0,40	2,0
B, C, E	1,25	0,15	0,50	2,0
D	1,35	0,20	0,80	2,0

### 3.2.5.3. Variabilità spaziale del moto

Nei punti di contatto dell'opera con il terreno (fondazioni delle pile, spalle), il moto sismico è generalmente diverso, a causa del suo carattere intrinsecamente di propagazione, delle disomogeneità e delle discontinuità eventualmente presenti, e della diversa risposta locale del terreno dovuta a particolari caratteristiche meccaniche e morfologiche.

Degli effetti sopra indicati dovrà tenersi conto quando tali effetti possono essere significativi e in ogni caso quando le condizioni di sottosuolo sono variabili lungo lo sviluppo del ponte in misura tale da richiedere l'uso di spettri di risposta diversi.

Indagini puntuali e aerali



Sismica a varie risoluzioni



Gli studi sulla vulnerabilità hanno come obiettivo:

- 1) Individuare le aree dove i terremoti possono creare effetti locali
- 2) Stimare e quantificare la risposta sismica locale dei depositi (RSL)
- 3) Suddividere il territorio in zone a diversa pericolosità (Microzonazione)

## RISPOSTA SISMICA LOCALE

### I FASE

#### 1) Studio iniziale

La prima fase è impostata per la definizione degli scenari di pericolosità sismica locale cioè deve portare ad identificare nel territorio porzioni suscettibili di effetti locali (amplificazione locale del segnale sismico, cedimenti, frane, liquefazioni, ecc.).

Siamo in una fase di rilievo delle aree con osservazioni e valutazioni geologiche e geomorfologiche, a scala territoriale, utilizzando dati disponibili e/o eventualmente realizzati (sondaggi, penetrometrie, rilievi ecc.).

### II – III FASE – Zonazione Sismica

#### 2) Analisi semplificata

L'analisi della pericolosità locale si può basare su una integrazione del data base geologico/geomorfologico anche su prove geofisiche e prove geotecniche standard. Il numero di tali prove sarà tale da consentire una adeguata e areale caratterizzazione del sito.

#### 3) Analisi approfondita

E' questo un tipo di attività, ad integrazione dei precedenti, che può essere richiesto e/o necessario laddove siano possibili episodi di liquefazione, in presenza di aree instabili, per coperture di spessore fortemente variabile (aree pedemontane, di fondovalle sui fianchi vallivi) oppure nel caso di realizzazione di rilevanti opere d'interesse pubblico.

In questi casi saranno necessarie, sempre partendo dai livelli precedenti, ulteriori indagini geofisiche e geotecniche sia in sito che in laboratorio ma in questo caso volta alla definizione del comportamento dei terreni sotto sollecitazione dinamica..

Sono da realizzare analisi ed indagini nell'ambito della pianificazione provinciale:

per la fase 1 - **PTCP (Piano territoriale di Coordinamento Provinciale)**

per le fasi 2 e 3 viene richiesta per la predisposizione degli strumenti di pianificazione urbanistica a livello comunale e la redazione del

**PSC (Piano Strutturale Comunale)** dal quale scaturiranno le prescrizioni necessarie alla progettazione attuativa assegnata al

**RUE - Regolamento Urbanistico ed Edilizio** ed al **POC - Piano Operativo Comunale**.

**Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica**

### **CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO**

$V_s - V_{s_{30}} - G_o$

Frequenze naturali



## MICROZONAZIONE SISMICA – INDAGINI DI FASE 2 E 3

### SISMICA PASSIVA

#### Bassa risoluzione

Indagini RE. MI. (REfraction Microtremor);  
HVSr (Metodologia NAKAMURA – NO Vs)

Su che base scegliere il  
tipo di indagine  
sismica ?

- 1) Analisi del sito
- 2) Anisotropia del sito
- 3) Metodologia di analisi
- 4) Problema del log sismico

## INDAGINI SISMICHE

### SISMICA ATTIVA

#### Alta risoluzione

Misure tra fori Cross Hole;  
Misure in foro Down Hole;  
Misure di Cono Sismico;

#### Media risoluzione

Indagini sismiche tomografiche ad onde di taglio;  
Indagini elettriche tomografiche utili alla  
ricostruzione geolitologica;

#### Bassa risoluzione

Indagini sismiche con elaborazione tradizionale ad  
onde di taglio;  
SASW, MASW;

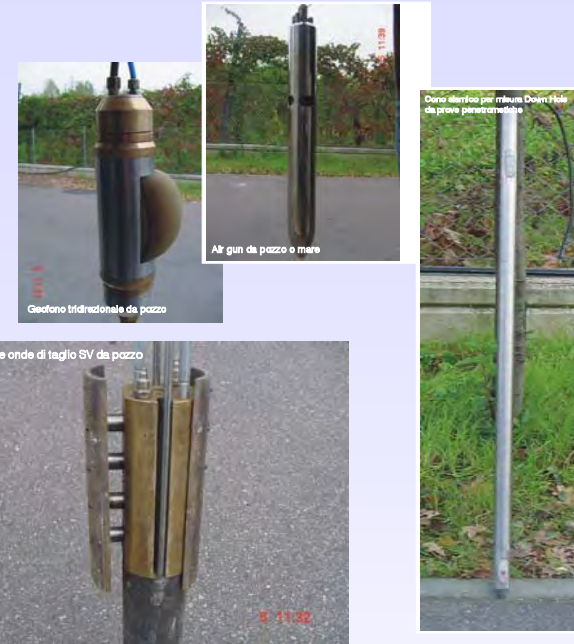
#### Obiettivi per le indagini sismiche per lo studio della RSL

- Geometria dei terreni;
- Geometria del bedrock;
- Velocità delle onde di taglio Vs – profilo Vs del suolo;
- Modulo di Taglio Go – profilo Go del suolo;
- Modulo di Elasticità dinamico Eo (non sempre necessario);
- Analisi dell'anisotropia
- Rigidità sismica;
- Frequenza e periodo fondamentale del suolo;



# TECNOLOGIE DI MISURA IN SITO

Sismica dalla superficie



Strumentazioni per prove in foro



Cono sismico

Seis Monitor Mark GS-1 (1 Hz)

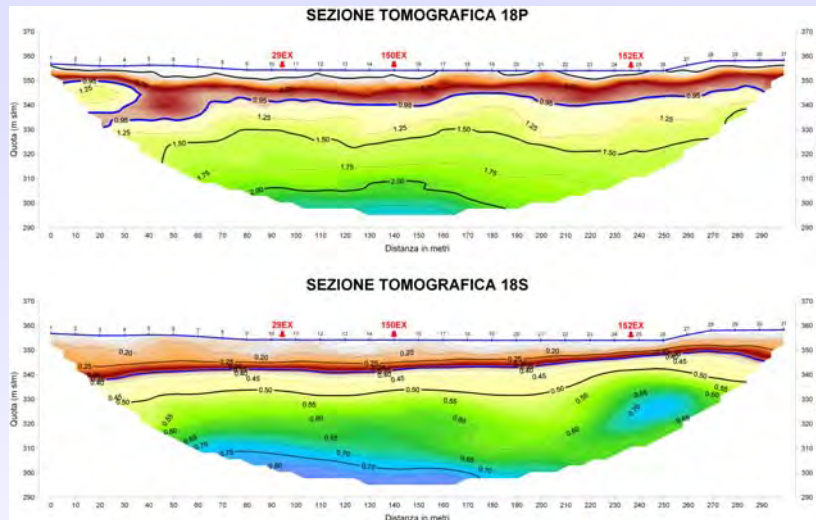


Misura rumore sismico



# VARIABILITA' ED ANISOTROPIA ONDE DI TAGLIO

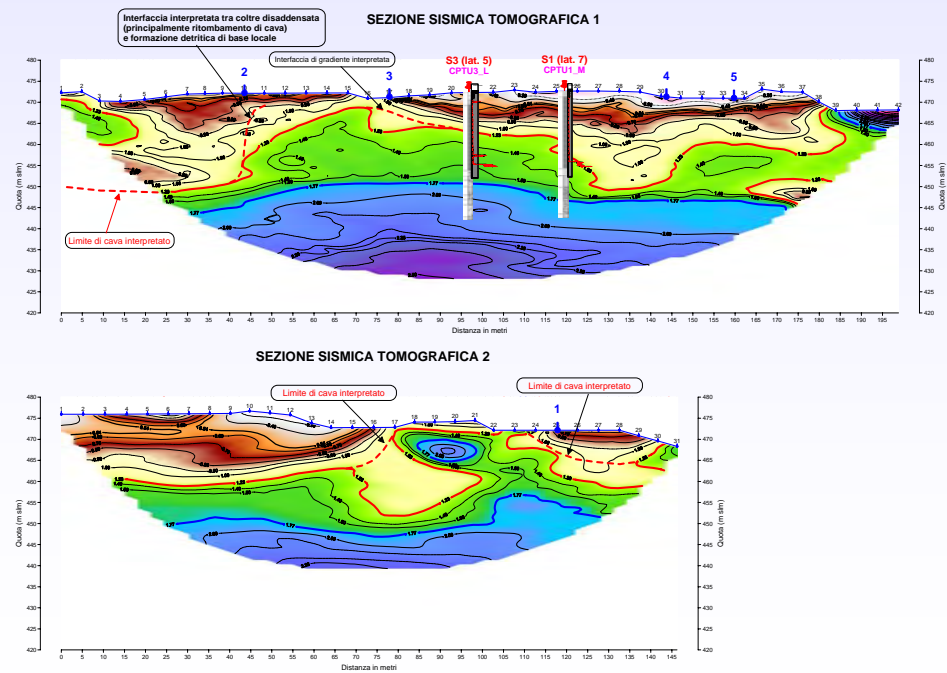
## SITO SEMPLICE



Cantiere in Romania per nuova sede ferroviaria

## ANALISI DEL SITO

## SITO COMPLESSO

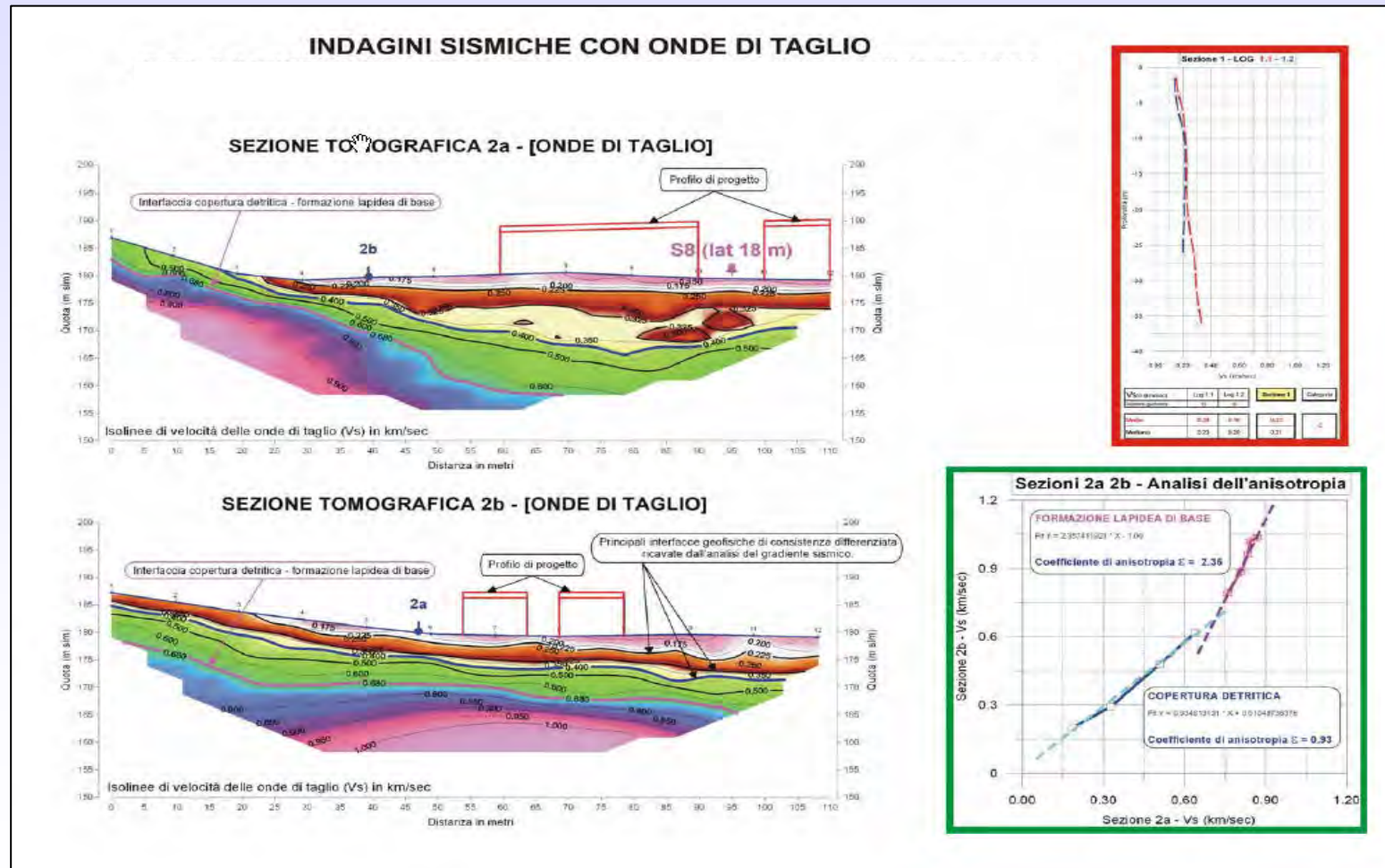


Cantiere in Italia per costruzione di nuova casa circondariale



# VARIABILITA' ED ANISOTROPIA ONDE DI TAGLIO

## ANALISI ANISOTROPIA DEL SITO

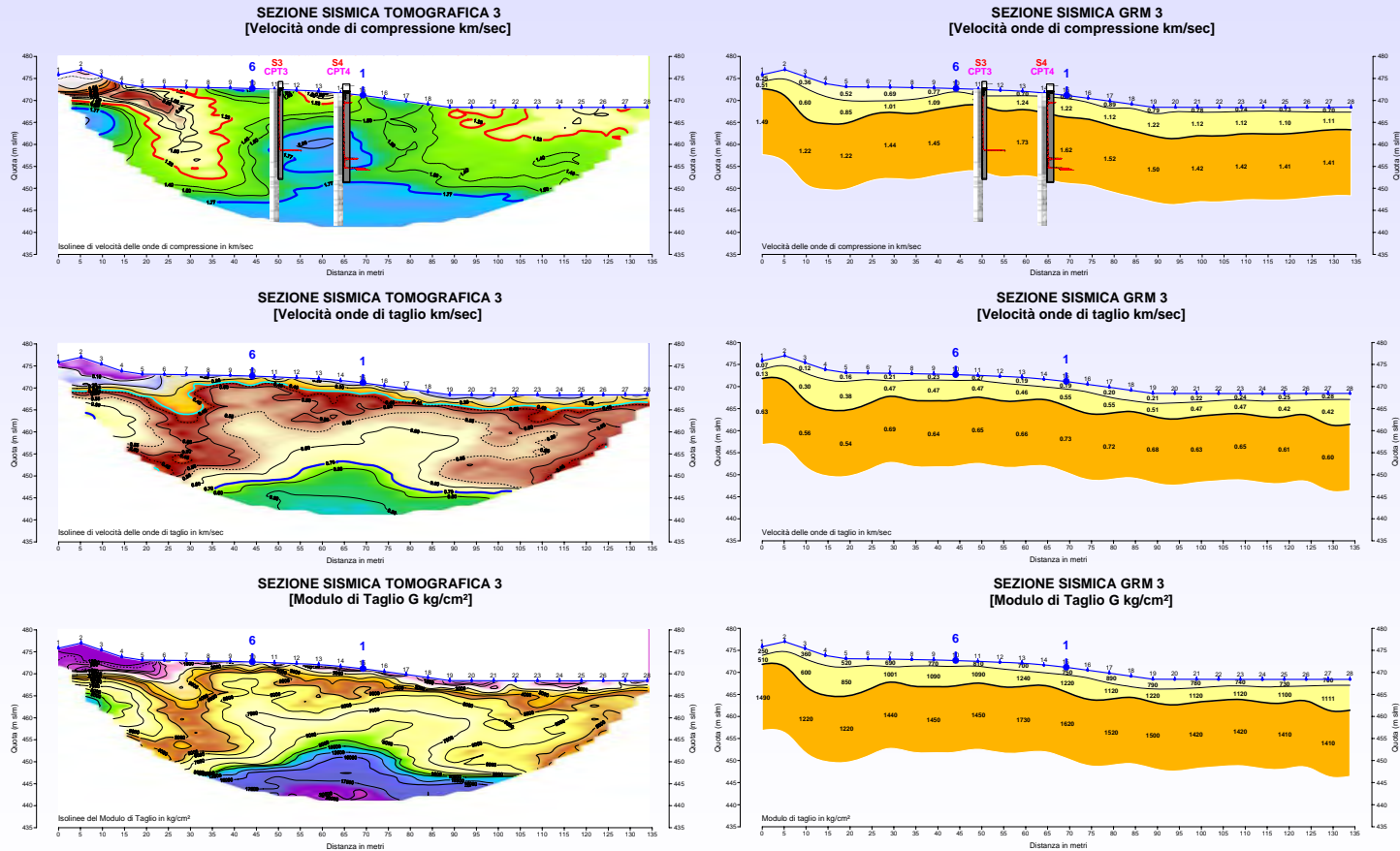


# VARIABILITA' ED ANISOTROPIA ONDE DI TAGLIO

## METODOLOGIA DI ANALISI

### ELABORAZIONE TOMOGRAFICA

### ELABORAZIONE TRADIZIONALE GRM

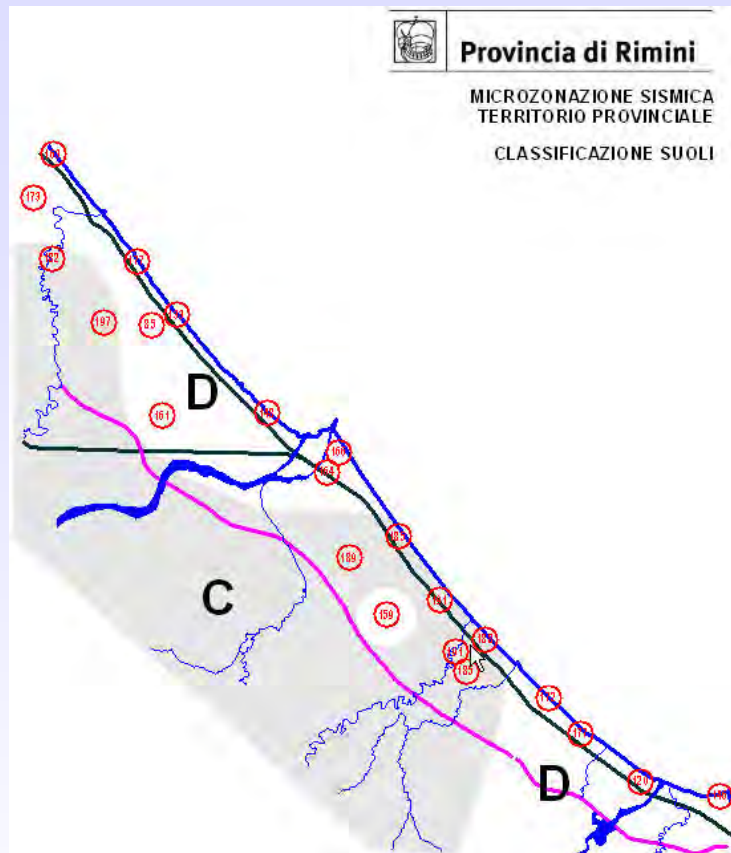


Cantiere in Italia in zona di ritombamento di cava



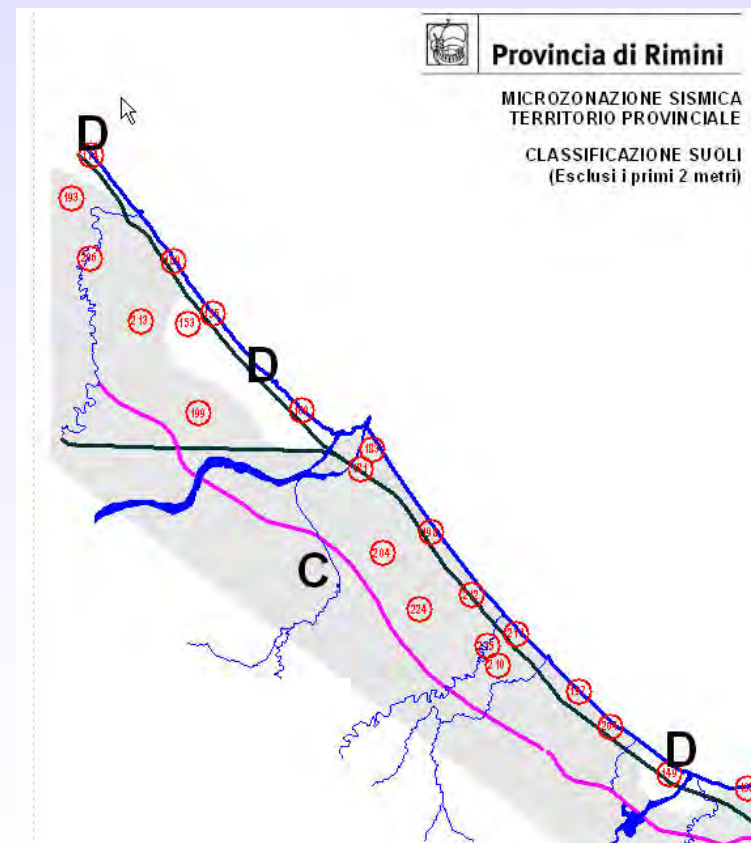






Variabilità del parametro  $V_{s30}$

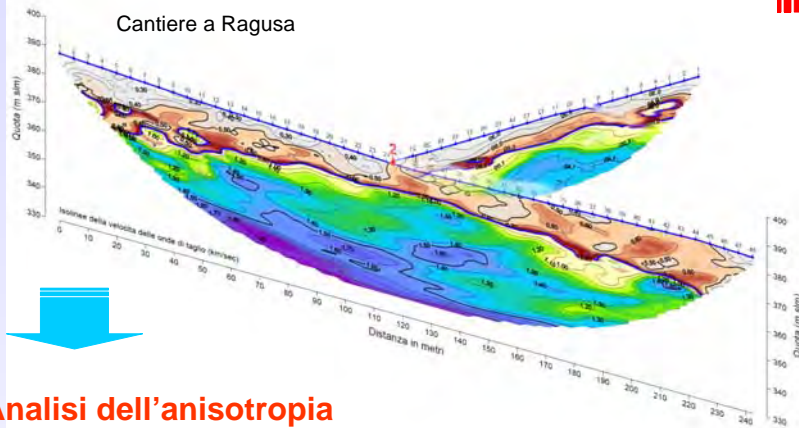
## Effetto superficiale sulle $V_{s30}$



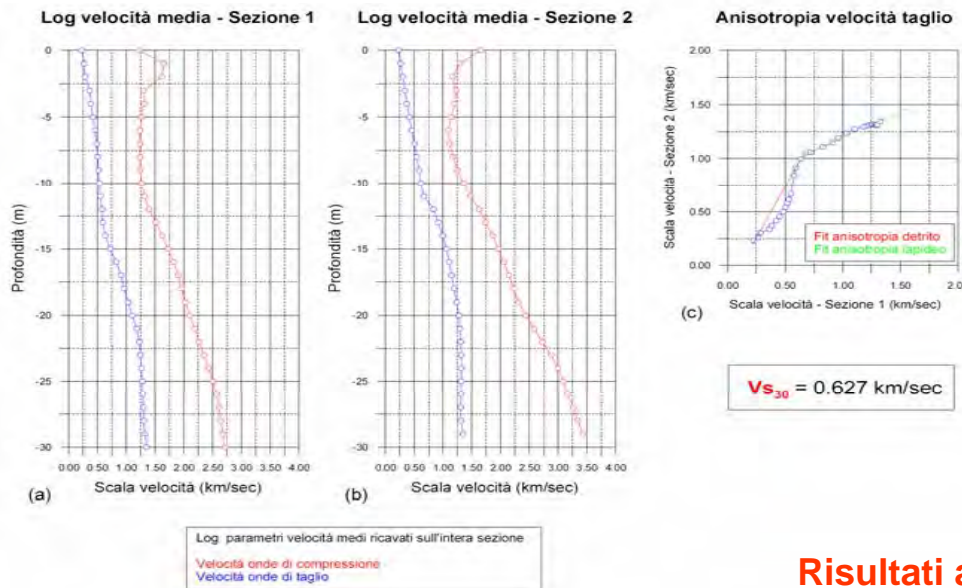


# SISMICA MEDIA RISOLUZIONE

## Indagini sismiche tomografiche ad onde di taglio



## Analisi dell'anisotropia



- Acquisizione di una elevata quantità di dati
- Elaborazione con software adeguato per rintracciare inversioni e geometrie affidabili.
- Log sismici con misura valori superiore a 1-2 metri.
- Disponibilità di spazi per gli stendimenti di lunghezza minima di 150 m. (la profondità di indagine è circa 1/5 della lunghezza quindi per 30 m di profondità occorrono sezioni da 150 m).
- Difficoltà di realizzazione in ambiente urbano per traffico, presenza di sottoservizi, asfalto, rumore ambientale.
- E' in grado di fornire risultati adeguati in qualsiasi condizione geolitologica e topografica
- Necessità di realizzare, a volte, due sezioni incrociate per valutare il grado di anisotropia del sito.

Risultati adeguati per l'analisi della RSL di secondo e terzo livello 13



# SISMICA MEDIA RISOLUZIONE

Indagini sismiche tomografiche ad onde di taglio

## Mappatura in periodo fondamentale

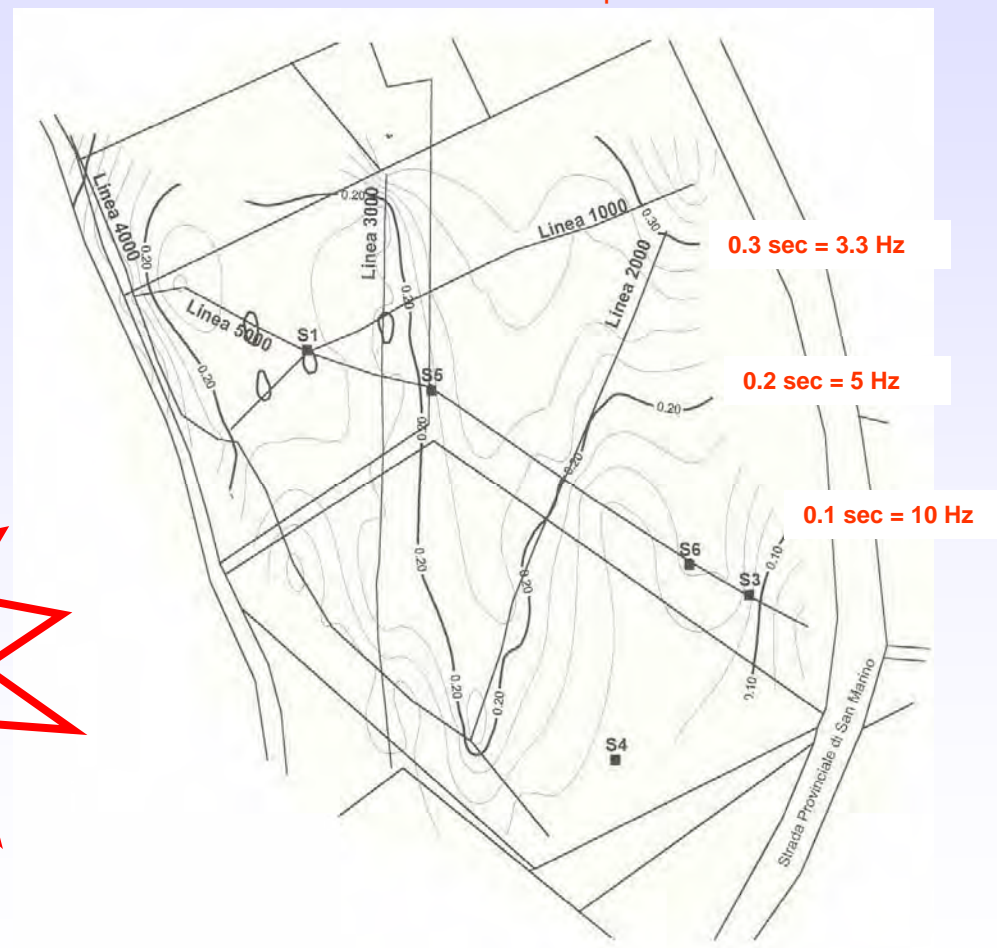
Esempio di zonazione sismica per una lottizzazione

### Caratterizzazione areale del sito

- 1) Mappatura in  $V_s$
- 2) Mappatura in  $G_o$
- 3) Mappatura in frequenza e periodo fondamentale

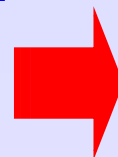
$$T_n = \frac{4 \cdot H}{V_s (2n - 1)}$$

H = Spessore dello strato  
 $T_n$  = Periodo fondamentale  
 $V_s$  = Velocità onde di taglio  
n = Forma modale dell'onda  
(n = 0, 1, 2, ...)



# SISMICA BASSA RISOLUZIONE

Indagini sismiche GRM ad onde di taglio;  
SASW, MASW;



## SISMICA PASSIVA PER ANALISI MICROTREMORI

Re.Mi. (fornisce LOG Vs)

HVSR – Nakamura (SOLO per l'analisi delle frequenze di risonanza)

Risultati adeguati per l'analisi della  
RSL di secondo livello nei casi dove  
non sono previste significative o  
sono minime le



1) inversioni di velocità

2) anisotropie nei parametri elastici  
dei suoli

3) effetti topografici.

Solo l'indagine sismica a rifrazione  
può fornire indicazioni sulla  
geometria dei suoli.

Acquisizione di una ridotta quantità di dati (mediamente 5 shot per sezione sismica a rifrazione o SASW [MASW]).

La sezione sismica porta ad una analisi bidimensionale mentre le misure SASW forniscono un log sismico a bassa risoluzione (max 2-3 strati) al centro della sezione.

Non c'è possibilità di localizzare inversioni.

Sia le SASW (misura attiva) sia le RE.MI. (misura passiva) operano su onde sismiche superficiali (ground roll – onde di Rayleigh) la cui inversione porta alle onde di taglio, di poco più veloci.

Si ottengono parametri medi di Vs a volte non validi per la presenza di parametri di impedenza molto elevati nelle misure SASW [MASW] e RE.MI.

Per le indagini di sismica attiva Rifrazione, SASW, MASW è necessario un ridotto rumore di fondo senza presenza di traffico.

Le misure SASW, MASW e RE.MI. sono meno attendibili se effettuate in presenza di asfalto in quanto questo opera filtrando le basse frequenze da analizzare.

Le misure SASW, MASW e RE.MI. rendono un log sismico in Vs al centro della stesa.

Acquisizione dati abbastanza speditiva in particolare per le misure di rumore sismico RE.MI. (30 minuti + il tempo per il posizionamento della sezione).

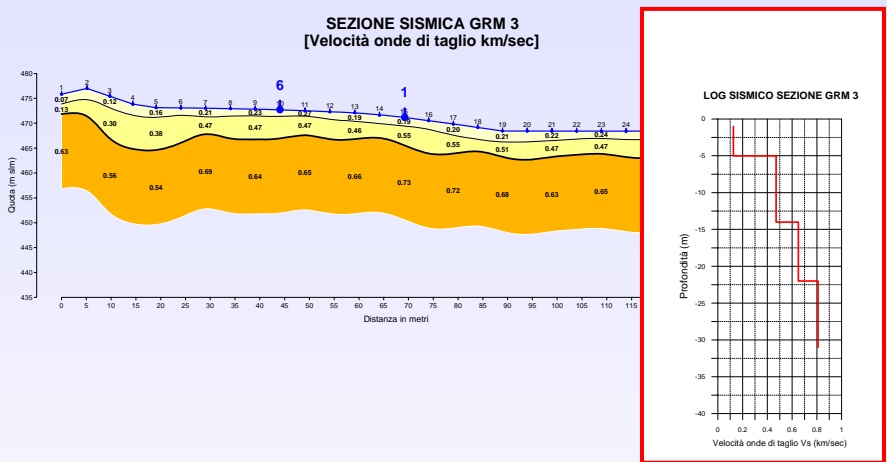


# SISMICA BASSA RISOLUZIONE

## SISMICA ATTIVA

### GENERAZIONE ONDE DI TAGLIO

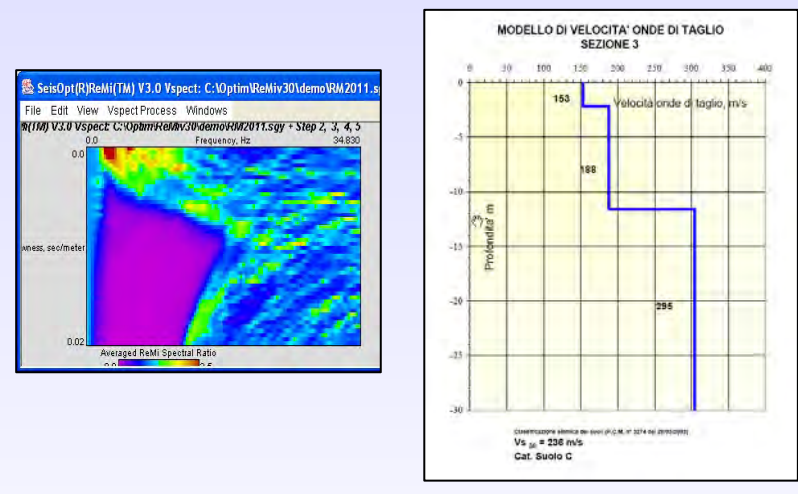
Indagini sismiche a rifrazione GRM ad onde di taglio;



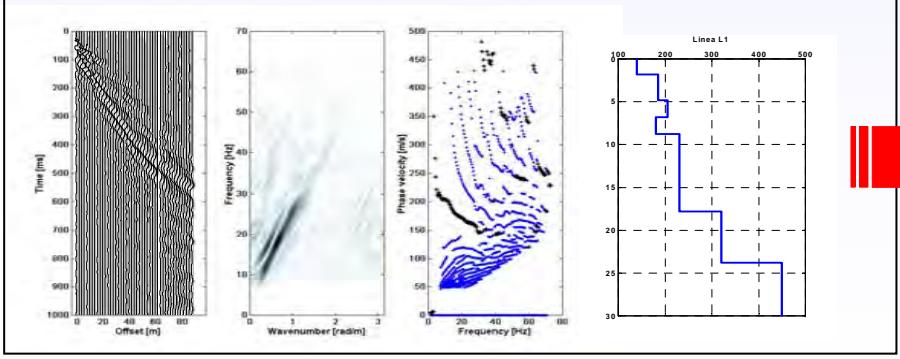
## SISMICA PASSIVA

### ANALISI MICROTREMORI (NOISE AMBIENTALE)

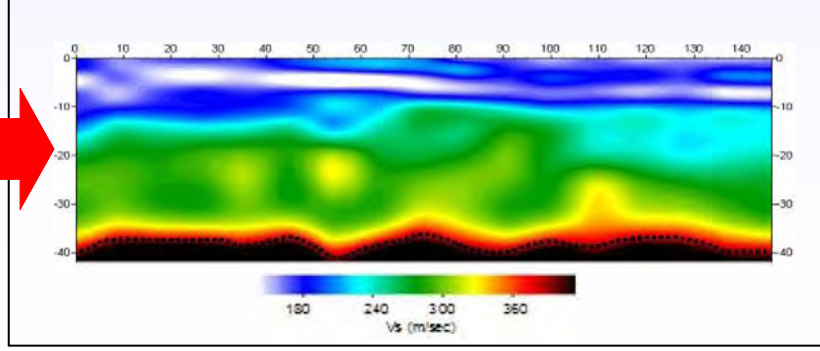
Re.Mi. (fornisce LOG Vs)



## SASW con analisi delle onde di Rayleigh (fornisce LOG Vs)

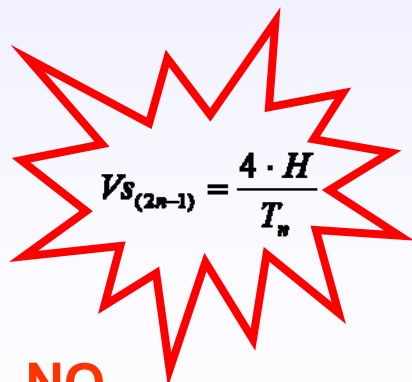
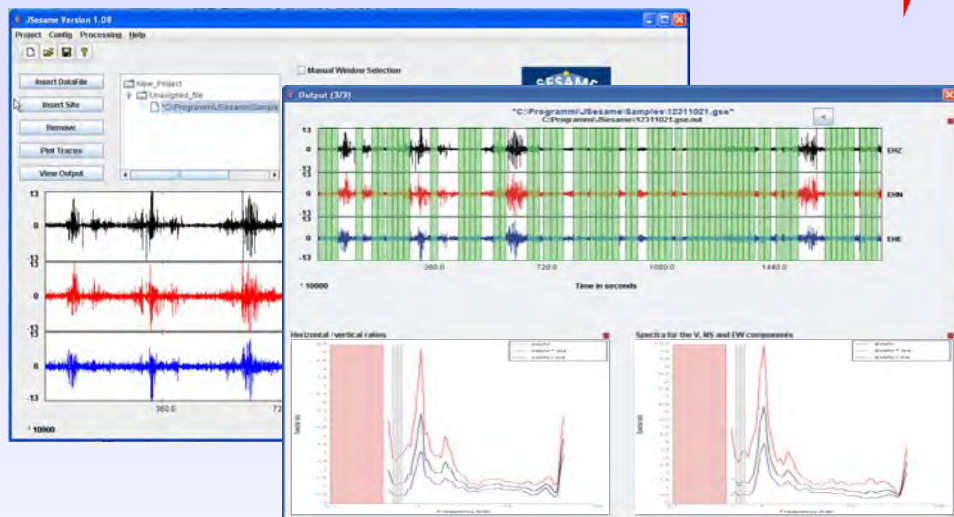


## + SASW = MASW (interpolazione tra LOG Vs)



# HVSR - NAKAMURA

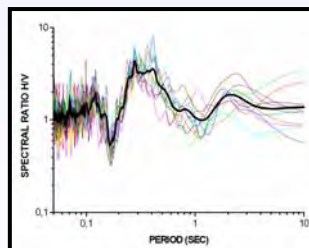
(SOLO per l'analisi della frequenza di risonanza)



**NO**

Il suolo non è né monodimensionale né isotropo !!

Occorrono svariate misure per una caratterizzazione HVSR del sito



**Risultati adeguati per integrare l'analisi della RSL di secondo livello e terzo livello per una caratterizzazione areale del sito**

Metodologia semplice ed economica, a bassa risoluzione, che permette di riconoscere le frequenze fondamentali e di risonanza del suolo attraverso un campionamento del rumore sismico di fondo (30 minuti).

Può dare indicazioni sulla origine lito-stratigrafica dei suoli e sulla morfologia sepolta.

**Non permette di ricavare un log in Vs né la Vs media**

Il metodo non è in grado di tenere conto di comportamenti non lineari o fragili dei terreni fornisce una risposta nel solo campo elastico.

Esiste, per una caratterizzazione areale, la difficoltà di scegliere il sito "giusto" di riferimento per cui occorrono sempre numerose prove in orari diversi con ripetizione delle prove e tempi di acquisizione abbastanza lunghi.

**Il metodo si basa sui seguenti assiomi:**

La componente verticale del moto non risente di effetti di amplificazione;

Al bedrock il rapporto tra la componente verticale e quella orizzontale del moto è prossimo all'unità;

Il rapporto tra la componente orizzontale e quella verticale del moto fornisce un fattore di amplificazione e il periodo proprio dei depositi;

In generale è necessario effettuare la media di quanti più eventi possibile; in questo modo si può inoltre valutare l'effetto di più sorgenti di rumore tra loro combinate, superando il problema di una loro eventuale accentuata localizzazione.



# HVSR - NAKAMURA

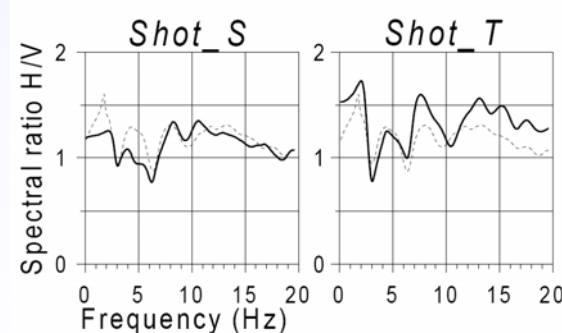
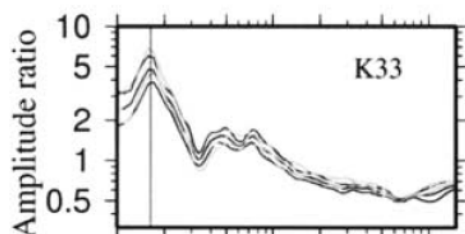
(SOLO per l'analisi della frequenza di risonanza)

## Esempio di mala sismica

Frequenza		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	5								60	80	100	120	140	160	180	200	
7.5								60	90	120	150	180	210	240	270	300	
10								80	120	160	200	240	280	320	360	400	
15					54	60	90	120	180	240	300	360	420	480	540	600	
20			56	64	72	80	120	160	240	320	400	480	560	640	720	800	
25	50	60	70	80	90	100	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
30	60	72	84	96	108	120	180	240	360	480	600	720	840	960	1080		
35	70	84	98	112	126	140	210	280	420	560	700	840	980	1120			
40	80	96	112	128	144	160	240	320	480	640	800	960	1120				
45	90	108	126	144	162	180	270	360	540	720	900	1080					
50	100	120	140	160	180	200	300	400	600	800	1000	1200					
60	120	144	168	192	216	240	360	480	720	960	1200						
70	140	168	196	224	252	280	420	560	840	1120							
80	160	192	224	256	288	320	480	640	960								
90	180	216	252	288	324	360	540	720	1080								
100	200	240	280	320	360	400	600	800	1200								

$$Vs_{(2n-1)} = \frac{4 \cdot H}{T_n}$$

NO



Metodo H/V - aspetti positivi:

- si può sempre eseguire, perché basato sulla registrazione di rumore ambientale;
- è di facile esecuzione in quanto basta spostare da un sito all'altro un sensore verticale e uno orizzontale (due se si vogliono esaminare effetti di direzionalità);
- è di rapida esecuzione perché in generale 4-5 campionamenti nell'arco di una giornata (ed eventualmente della notte) riescono a caratterizzare completamente il sito;
- per quanto detto è a basso costo;
- nella situazione per cui è stato inizialmente proposto (strato sedimentario sovrapposto a un semispazio omogeneo e forte contrasto di impedenza tra le due formazioni), il metodo permette una buona stima della frequenza fondamentale dello strato.

Metodo H/V - aspetti negativi:

- sottostima comunque il coefficiente di amplificazione;
- in situazioni differenti da quella per cui è stato proposto da Nakamura non ha giustificazioni teoriche: a volte può dare risultati positivi, ma l'uso esclusivo di questa tecnica non assicura di aver preso in considerazione tutti i fenomeni amplificativi possibili nel sito in esame (ovviamente non possono essere evidenziati effetti di amplificazione che si manifestano anche sulla componente verticale del moto).

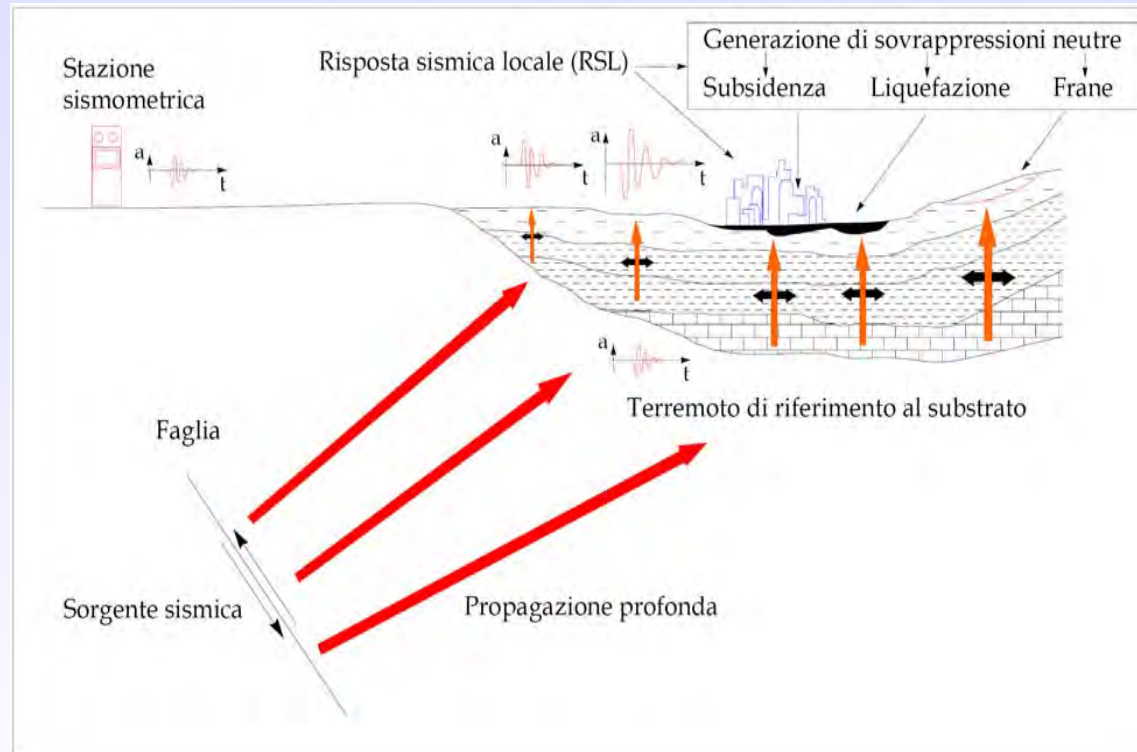
Campagna di misure con sito di riferimento:

- è più complessa e richiede comunque analisi sismiche e geotecniche preliminari per la scelta e la verifica del sito di riferimento;
- può essere svolta solo in aree nelle quali ci sia un livello accettabile di sismicità (*weak motion*) e prevede comunque tempi di acquisizione più lunghi rispetto a quelli della tecnica H/V (da qualche settimana a qualche mese);
- volendo prendere in esame situazioni differenti, è necessario utilizzare contemporaneamente varie stazioni di acquisizione e quindi un maggior numero di sensori;



# RISPOSTA SISMICA LOCALE

Propagazione di un evento sismico dalla sorgente al sito e problematiche geotecniche



Per giungere alla determinazione della risposta sismica locale un sito deve essere sottoposto a specifiche indagini di dettaglio finalizzate alla definizione di tutte le proprietà puntuali che la caratterizzano. Tali indagini riguardano la definizione dei seguenti aspetti:

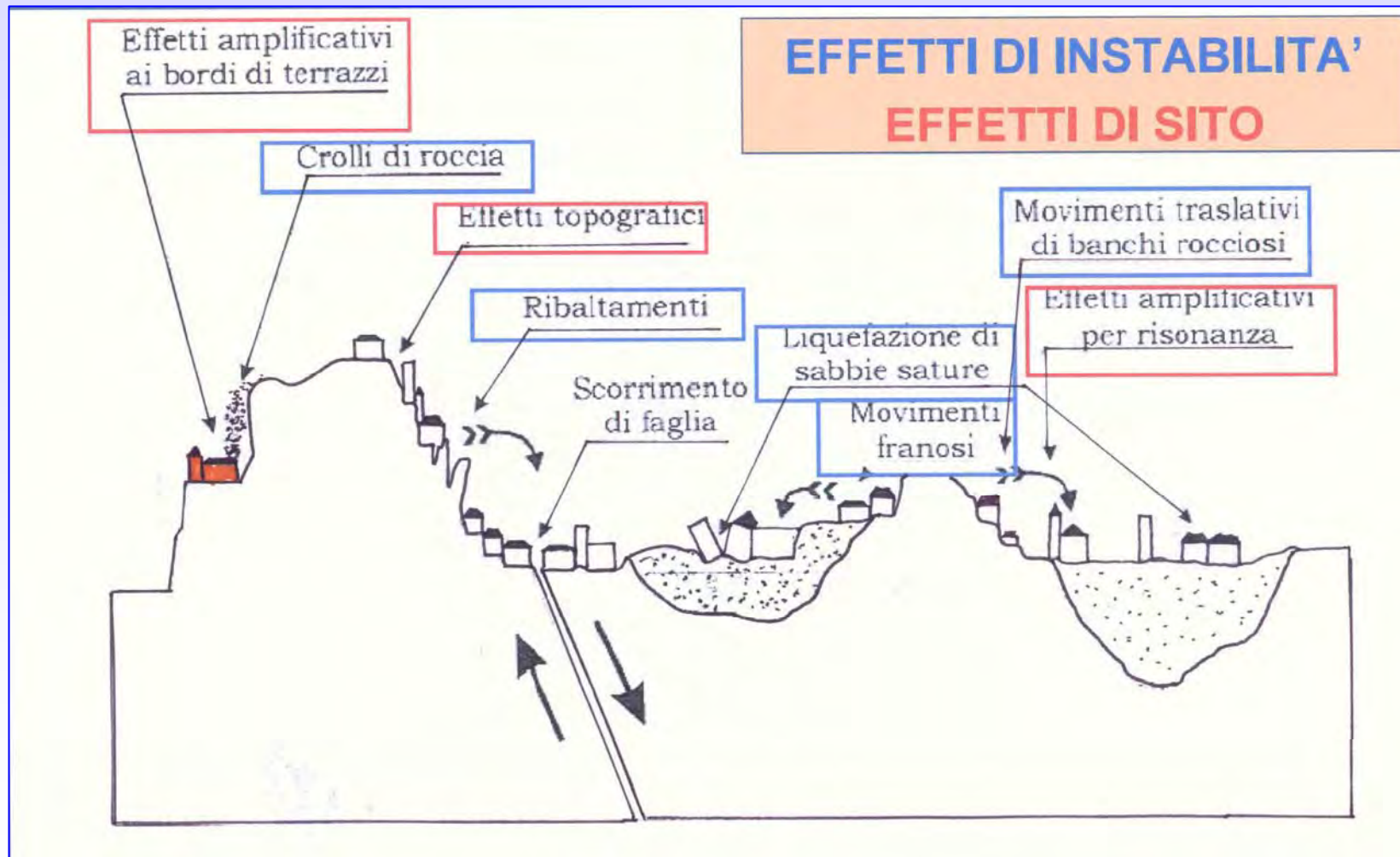
1. Stratigrafia delle formazioni superficiali con dettagliata definizione dell'andamento dei contatti tra di esse;
2. Profili di velocità delle onde sismiche trasversali e longitudinali dentro le formazioni superficiali;
3. Caratteristiche meccaniche dei terreni delle formazioni superficiali con particolare riferimento al loro comportamento sotto l'azione di carichi ciclici e dinamici;
4. Morfologia di dettaglio dell'area.

**Fattori geometrici e meccanici responsabili della variabilità della risposta sismica locale di un sito:**

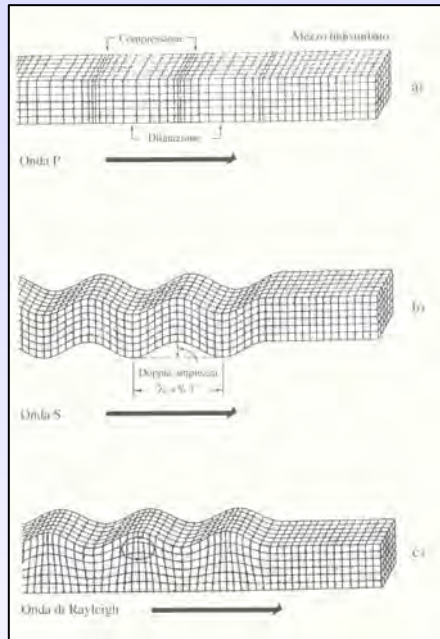
- 1) eterogeneità dei depositi in direzione orizzontale e verticale;
- 2) comportamento non lineare e dissipativo dei terreni;
- 3) irregolarità morfologiche superficiali e sepolte.



# RISPOSTA SISMICA LOCALE – EFFETTI DI SITO



# AZIONE SISMICA E MECCANICA DEI TERRENI



Il fenomeno di vibrazione prodotto da un terremoto è il risultato della propagazione a distanza dalla sorgente di onde elastiche di volume.

In un mezzo elastico ideale le onde sismiche associate ad episodi deformativi si propagano con velocità  $V_p$  pari a:

$$V_p = \sqrt{\frac{M_v}{\rho}}$$

dove:

$M_v$  = modulo di rigidezza a compressione monodimensionale

$\rho$  = densità del mezzo

La direzione di propagazione è quella parallela allo spostamento dell'elemento di volume.

Le onde connesse a fenomeni deformativi di tipo distorsionale sono invece caratterizzate da una velocità di propagazione  $V_s$  pari a:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

dove:

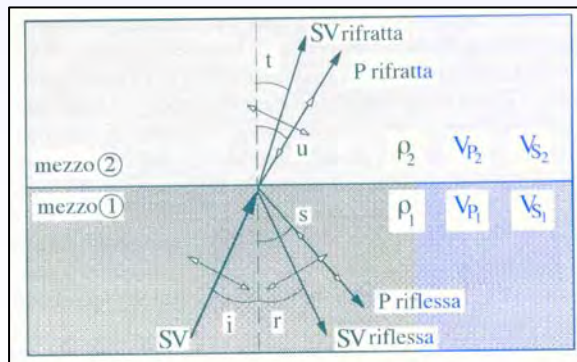
$G$  = modulo di rigidità al taglio del materiale

$\rho$  = densità del mezzo

La direzione di propagazione è quella perpendicolare allo spostamento dell'elemento di volume.

Generalmente il campo di spostamenti prodotti dalle onde S è secondo due componenti perpendicolari: le onde  $S_h$  polarizzate sul piano orizzontale e le  $S_v$  polarizzate sul piano verticale. **Un'onda S è quindi la somma vettoriale delle sue componenti.**

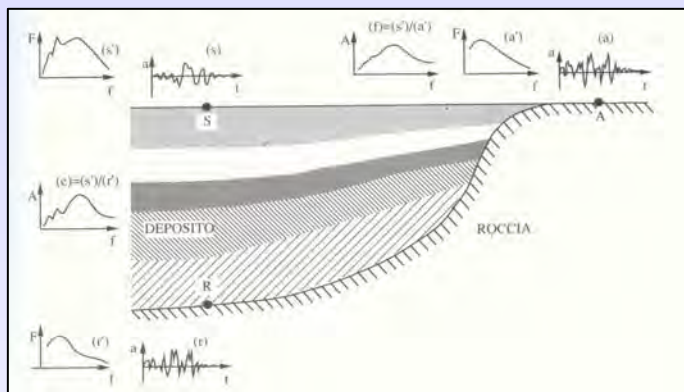
$$G = \rho \cdot V_s^2 = \frac{\gamma}{g} \cdot V_s^2$$



Nell'attraversare l'interfaccia tra due materiali si verificano:

- 1) Rifrazioni e riflessioni di onde;
- 2) Generazione di onde superficiali;
- 3) Variazioni di ampiezza.

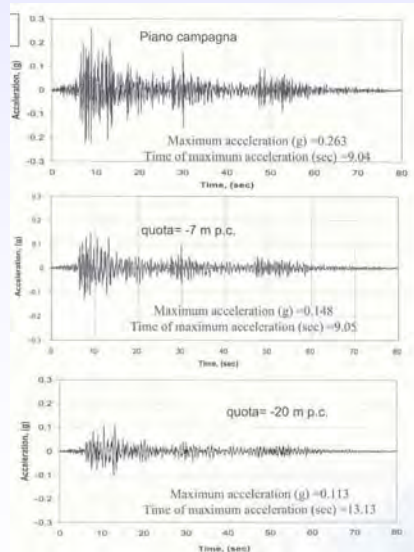
# SUOLO IDEALE



## FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE

La **funzione di amplificazione** è una proprietà del sito e può essere espressa in funzione della geometria e delle proprietà meccanica del sottosuolo.

La **funzione di amplificazione** corrisponde al modulo del rapporto tra gli spettri al terreno ed al bedrock ed indica quali componenti quali componenti del moto sismico sono state amplificate nel passaggio attraverso il terreno e quali smorzate.



## MODELLI DI SUOLO

La valutazione quantitativa della risposta sismica locale può effettuarsi sulla base del confronto tra diverse grandezze rappresentative del moto sismico alla superficie del terreno e quello di riferimento (roccia affiorante ecc.) nel dominio del tempo o delle frequenze.

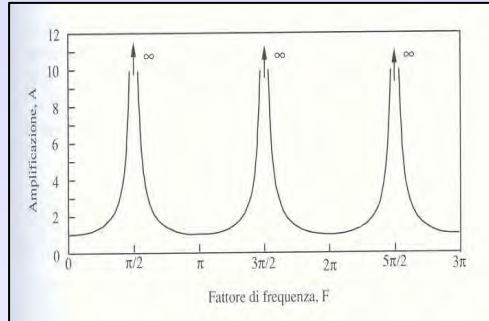
Nel dominio del tempo il parametro più significativo è il rapporto tra l'accelerazione massima alla superficie del terreno e quella in corrispondenza del bedrock, rapporto che prende il nome di **Fattore di Amplificazione** e può essere maggiore o minore dell'unità.

Per la risposta del suolo non ci si può limitare alle variazioni di ampiezza ma anche alle modifiche in frequenza.

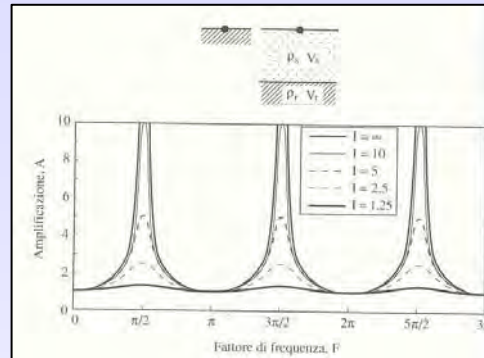
Il terreno agisce come filtro incrementando le ampiezze in corrispondenza di alcune frequenze e riducendole in altre.

La valutazione dell'effetto filtraggio esercitato dal terreno sul moto sismico di riferimento si ottiene attraverso la cosiddetta **Funzione di Amplificazione**.

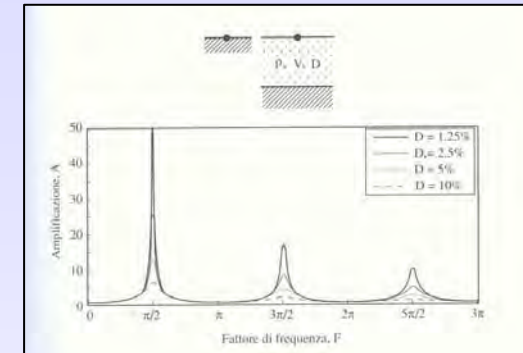
I **profili di suoli** possono essere via via più complessi ed esistono soluzioni teoriche dal punto di vista geotecnico da un modello semplicistico monodimensionale rappresentato da uno strato omogeneo di spessore H che si appoggia sul bedrock rigido ad un complesso multistrato a parametri geotecnici variabili con modi di oscillazione e frequenze proprie diverse e smorzate.



**Funzione di amplificazione relativa ad uno strato elastico su substrato rigido**



**Funzione di amplificazione relativa ad uno strato omogeneo elastico su substrato deformabile**



**Funzione di amplificazione relativa ad uno strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido**

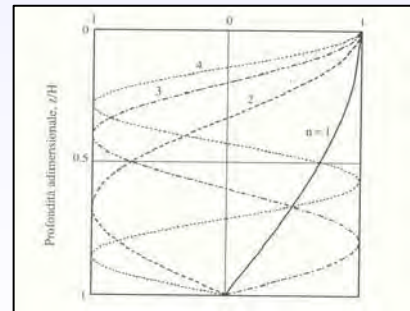
Le frequenze ( $\omega_n$  e  $f_n$ ) corrispondenti ai massimi della funzione di amplificazione si chiamano **frequenze naturali** di vibrazione dello strato e sono in numero infinito ed equispaziate essendo la  $A_r(\omega)$  periodica.

Ad ogni frequenza naturale corrisponde una forma modale di frequenza principale ed armoniche.

Analogamente i periodi  $T_n = 1/F_n$  si chiamano periodi naturali di vibrazione dello strato ed essendo proporzionali allo spessore dello stesso ed inversamente proporzionali alla velocità delle onde di taglio del terreno, aumentano di periodo con la deformabilità trasversale dello strato.

$$T_n = \frac{1}{F_n} = \frac{4H}{V_s(2n-1)}$$

dove  $n$  = numero della forma modale della frequenza



**FORME MODALI**

**RISVOLTO PRATICO → ANALISI DEI MICROTREMORI**

La risposta di un deposito di terreno ad una eccitazione sismica è fortemente influenzata dalla frequenza originale: le frequenze in corrispondenza delle quali si verificano elevate amplificazioni dipendono dalla geometria (spessore) e dalle caratteristiche fisico-meccaniche ( $V_s$ ) del deposito di terreno.

La situazione più pericolosa in termini di amplificazione si verifica quando la frequenza di eccitazione ( $\omega$ ) è corrispondente ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ).

Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la **risonanza** dello strato ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito.

# SUOLO REALE

Ai fine della valutazione quantitativa dell'effettiva risposta sismica locale, la determinazione del terremoto di riferimento va accoppiata ad una modellazione realistica del sottosuolo, per definire la funzione di amplificazione locale che non è una proprietà univoca del sito ma dipende anche dai caratteri del moto di riferimento, dai suoi contenuti in frequenza e dal suo contenuto energetico.

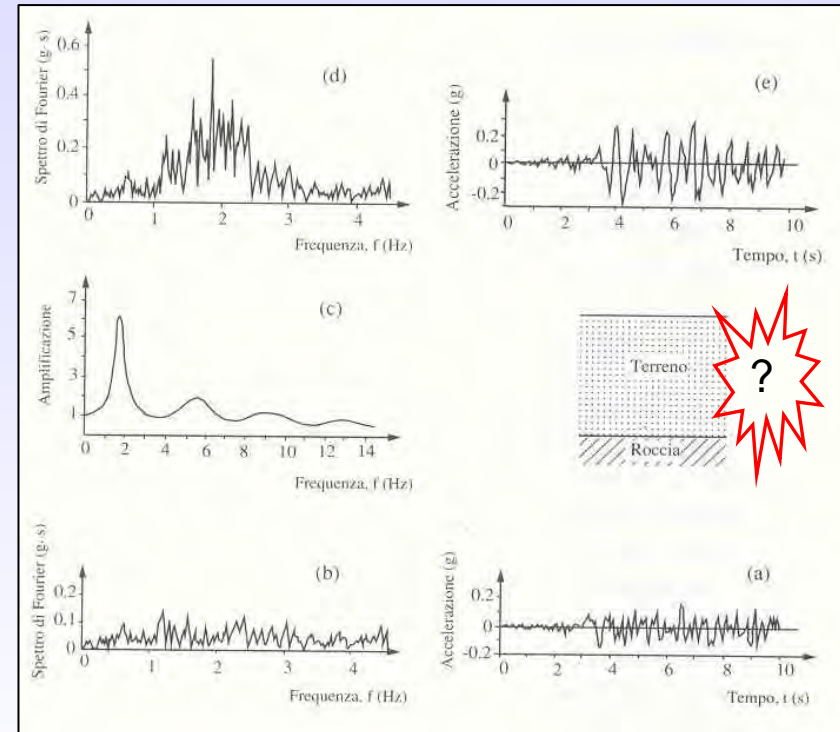
Se ad esempio la frequenza di vibrazione del suolo è prossima ai 2 Hz ed il maggiore contenuto energetico è sui 5-6 Hz allora la risposta di sito potrà risultare più elevata per queste frequenze che non sulla fondamentale.

E' necessario quindi porre attenzione ai fenomeni di risonanza come coincidenza tra il segnale di ingresso e di uscita e le frequenze fondamentali del sito ed alla possibile interazione tra il segnale sismico in uscita dal suolo e quelle dei manufatti (***fenomeno della doppia risonanza***).

Si rammenta che per un edificio in cemento armato senza particolari irregolarità o asimmetrie la frequenza fondamentale è approssimativamente  $f=10/N$  (con N=numero dei piani).

INPUT

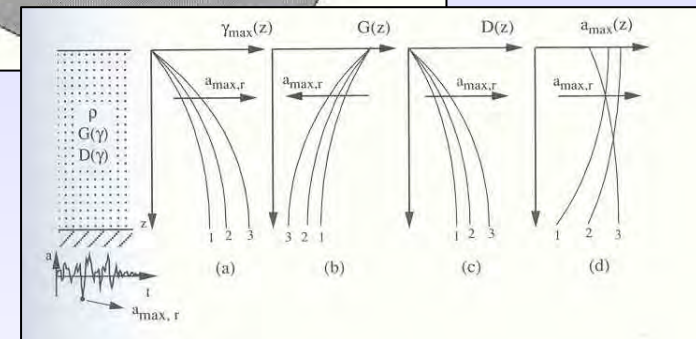
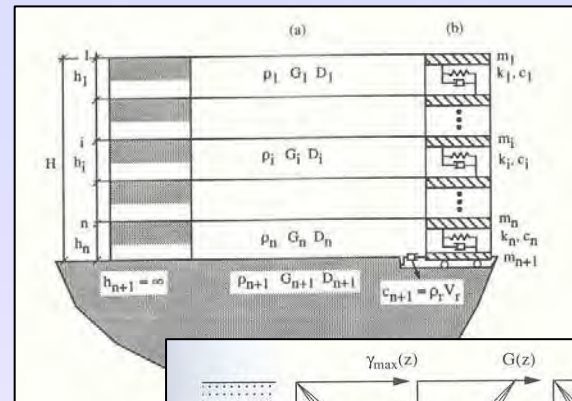
OUTPUT



Per garantire la massima affidabilità di un'analisi della risposta sismica locale è necessario tenere conto delle inevitabili disomogeneità del sottosuolo, della variazione tra strato e strato dei parametri di rigidità e smorzamento, della geometria dei depositi e della morfologia del sito allo scopo di realizzare una modellazione la più reale possibile.

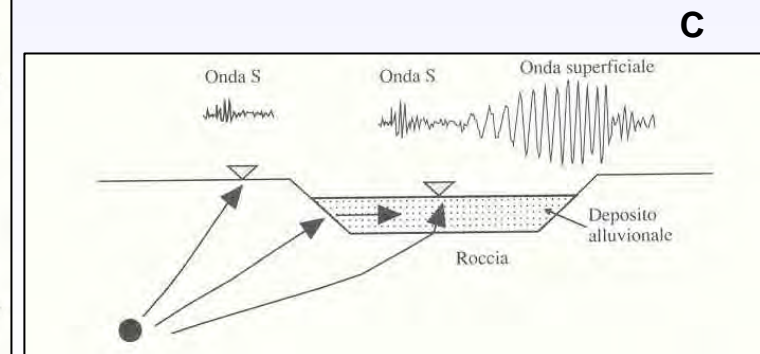
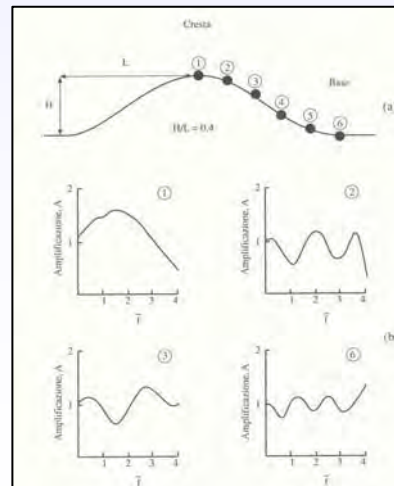
**I SUOLI REALI** sono:

- A) eterogenei e stratificati;**
- B) presentano un comportamento non lineare;**
- C) esistono effetti di bordo di valli alluvionali;**
- D) effetti della topografia.**



per cui l'analisi può essere da monodimensionale per i casi più semplici e situazioni isotrope a bidimensionale quando intervengono effetti litologici e geometrici complessi.

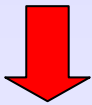
Questi parametri possono essere calcolati sulla base di conoscenze acquisite mediante indagini sismiche.



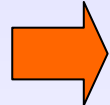
**MODELLO DI CALCOLO  
RISPOSTA SISMICA LOCALE DI UN SOTTOSUOLO IDEALE  
FASE 1- FASE 2**

-----  
**Studio iniziale  
Analisi semplificata e approfondita**

CARTA  
GEOLOGICA 1: 5000



CARATTERIZZAZIONE  
GEOTECNICA

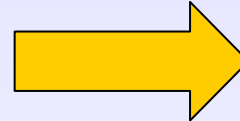


Indagini penetrometriche

Indagini sismiche a  
Rifrazione (onde P e S)

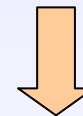
Sondaggi geognostici

Prove di laboratorio



Parametri ricavati dalle indagini,  
necessari per la realizzazione della  
carta litotecnica e della RSL:

- Modulo di taglio
- Rigidità sismica
- Frequenza e periodo fondamentale
- Spessori



**Vs Go**

Carta litotecnica e della RSL



**Vs Go  
Frequenze di  
sito**

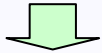
Coltre, detrito, ect.

Formazione lapidea.

Modello geologico tecnico

SUOLO CATEGORIE

Individuazione aree a maggior rischio



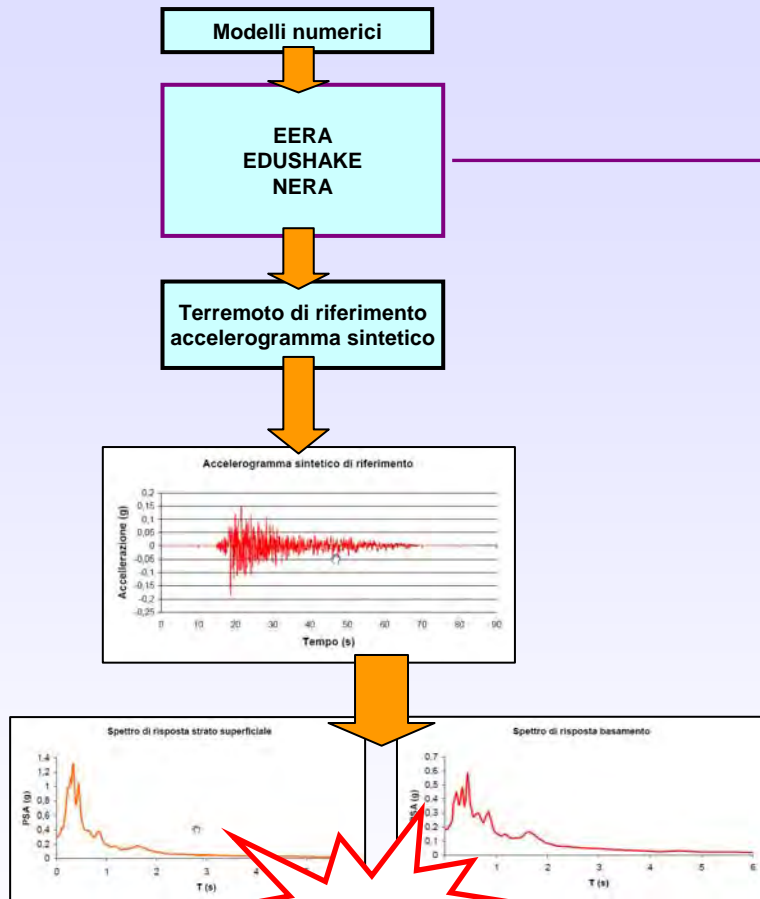
**MICROZONAZIONE SISMICA**



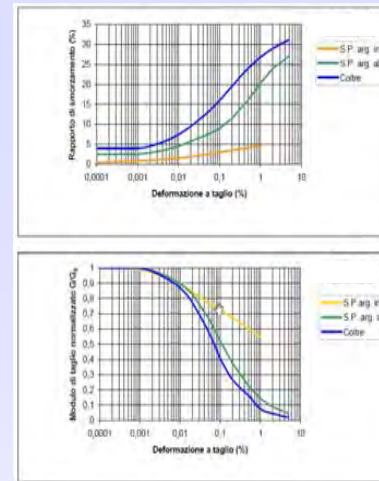
**FASE 2**



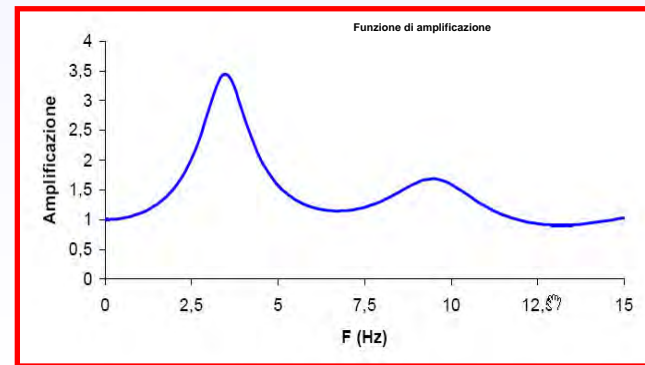
**INDIVIDUAZIONE AREE A MAGGIOR RISCHIO  
FASE 1 – FASE 2**



**Vs Go**



**FASE 3  
RISPOSTA SISMICA LOCALE  
DI UN SOTTOSUOLO REALE**



**Le presenti slide sono scaricabili dal sito**

**[WWW.PROGEO.INFO](http://WWW.PROGEO.INFO)**

**GRAZIE DELL'ATTENZIONE**