

# SULLA TECNICA DI ESPLORAZIONE DEL SOTTOSUOLO CON TOMOGRAFIE SISMICHE: UN ESEMPIO DI CONFRONTO TRA TOMOGRAFIA CON ONDE SH E MISURE SISMICHE IN FORO CON ONDE P ED SV NELLA ZONA DI FOLIGNO (PG).

Chiara Amerighi<sup>1</sup> – Vincenzo Castigli<sup>3</sup> - Gianfranco Censini<sup>1</sup> - Gabriele Ciacci<sup>1</sup> - Francesco Ponziani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Georisorse Italia sas – Sinalunga (SI) - <sup>2</sup> Regione Umbria - Servizio Geologico - <sup>3</sup> Libero professionista (PG)

## INTRODUZIONE

Nel mese di Aprile 2004, nell'area del costruendo Centro Servizi della Protezione Civile a Foligno, su richiesta dei tecnici della Regione Umbria, titolare di tutti i dati delle indagini geofisiche qui eseguite, è stata effettuata un'indagine sismica con onde SH ed elaborazione tecnica tomografica, con lo scopo di avere una verifica metodologica ed integrazione dell'interpretazione stratigrafica ottenuta nel Novembre 1999 con misure sismiche in foro tipo Cross-Hole.

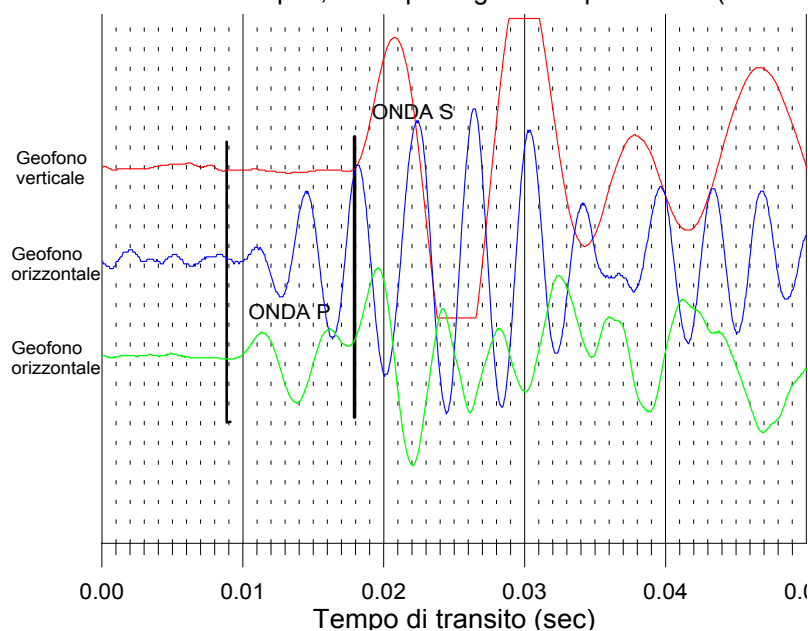
Operativamente è stato eseguito un profilo sismico con dispositivo di 24 geofoni distanziati di 3 metri con onde di taglio polarizzate sul piano orizzontale (SH) generate da impulsi orizzontali sui lati opposti di un asse metallico reso solidale al terreno dalla zavorra di un autovettura e disposto perpendicolarmente alla direzione del profilo. Lungo lo stendimento sono stati effettuati tiri sismici ad intervalli regolari di 6 geofoni a partire da 1.5 metri prima del geofono 1 e fino 1.5 m oltre il geofono 24. Per la registrazione delle misure è stato usato il sismografo ECHO24-2002 della AMBROGEO di Piacenza e geofoni orizzontali OYO-GEOSPACE. Il tempo di registrazione usato è stato di 400 msec.

Nella fase di elaborazione sui sismogrammi registrati in campagna sono stati individuati i tempi di primo arrivo delle onde S (picking), ottenendo le dromocrone (travel time) relative ad ogni tiro. Le dromocrone sono state utilizzate per una modellizzazione tomografica del sottosuolo con il software RAYFRACT ver. 2.50. In particolare RAYFRACT opera l'inversione dei dati con la tecnica WET (Wawepath Eikonal Traveltime tomography) creando un modello del sottosuolo derivante da progressivi aggiustamenti, con iterazioni successive, del modello iniziale costruito mediante interpolazione numerica delle successioni stratigrafiche interpretate con la tecnica Delta V-T. Un stima quantitativa della bontà del modello ottenuto dall'inversione dei dati è fornita dal confronto tra le dromocrone ottenute dal picking e quelle ottenute dal calcolo dei percorsi dei vari fronti d'onda in un sottosuolo costituito da blocchi di dimensioni decimetriche o centimetriche.

La tomografia delle VS così ottenuta è stata confrontata con la sismostratigrafia derivata dalle misure sismiche in foro eseguite mediante dispositivo Cross-Hole, su due sondaggi di 25 metri di profondità e posti a distanza reciproca di circa 5 metri.

## MISURE SISMICHE IN FORO CROSS-HOLE (NOVEMBRE 1999)

Di seguito si riporta un esempio di sismogramma del geofono tridimensionale, relativo al Cross-Hole alla profondità di 3 metri dal p.c., con il picking dei tempi di arrivo (linee verticali) dell'onda P e dell'onda SV, cioè



polarizzata in senso verticale.

Come si nota dal sismogramma, il tempo di arrivo dell'impulso di compressione, visibile meglio nella componente orizzontale è a 8.8 msec, mentre il tempo di arrivo dell'impulso di taglio, visibile chiaramente nel geofono verticale, è pari a 18 msec. Le velocità relative a questi tempi di arrivo, per una distanza dei fori pari a 5.01 m a 3 m dal p.c., sono state calcolate in 569 m/s per la  $V_p$  e 278 m/s per la  $V_s$ .

Dal calcolo delle velocità secondo intervalli di misura di 2 metri, fino alla profondità a fondo foro di 25 metri dal p.c., è stata elaborata la stratigrafia delle  $V_p$  e delle  $V_s$  e correlata con la stratigrafia litologica derivante dai sondaggi geognostici.

Nella figura seguente si riporta la

tabella dei dati fino a fondo foro, con indicazione delle distanze tra i fori alle varie profondità, determinate in base a misure inclinometriche, i tempi di arrivo delle onde P ed S e le relative velocità sismiche.

PROFONDITÀ A. SENSORE	DISTANZA RETTILINEA	PRIMO ARRIVO onde P (msec)	PRIMO ARRIVO onde S (msec)	VELOCITÀ INTERVALLO onde P (m/sec)	VELOCITÀ INTERVALLO onde S (m/sec)
1	5.00	10.8	19.5	463	256
3	5.01	8.8	18	569	278
5	5.03	7.8	17	645	296
7	5.06	3.5	8	1446	633
9	5.09	2.5	5.8	2034	877
11	5.12	2.1	4.9	2438	1045
13	5.12	2.5	6	2048	853
15	5.17	2.5	5.9	2066	875
17	5.18	2.4	5.8	2158	893
19	5.20	2.4	5.8	2165	896
21	5.20	2.3		2261	
23	5.24	2.2	5.2	2380	1007
24.5	5.24	2.3	5.3	2278	989

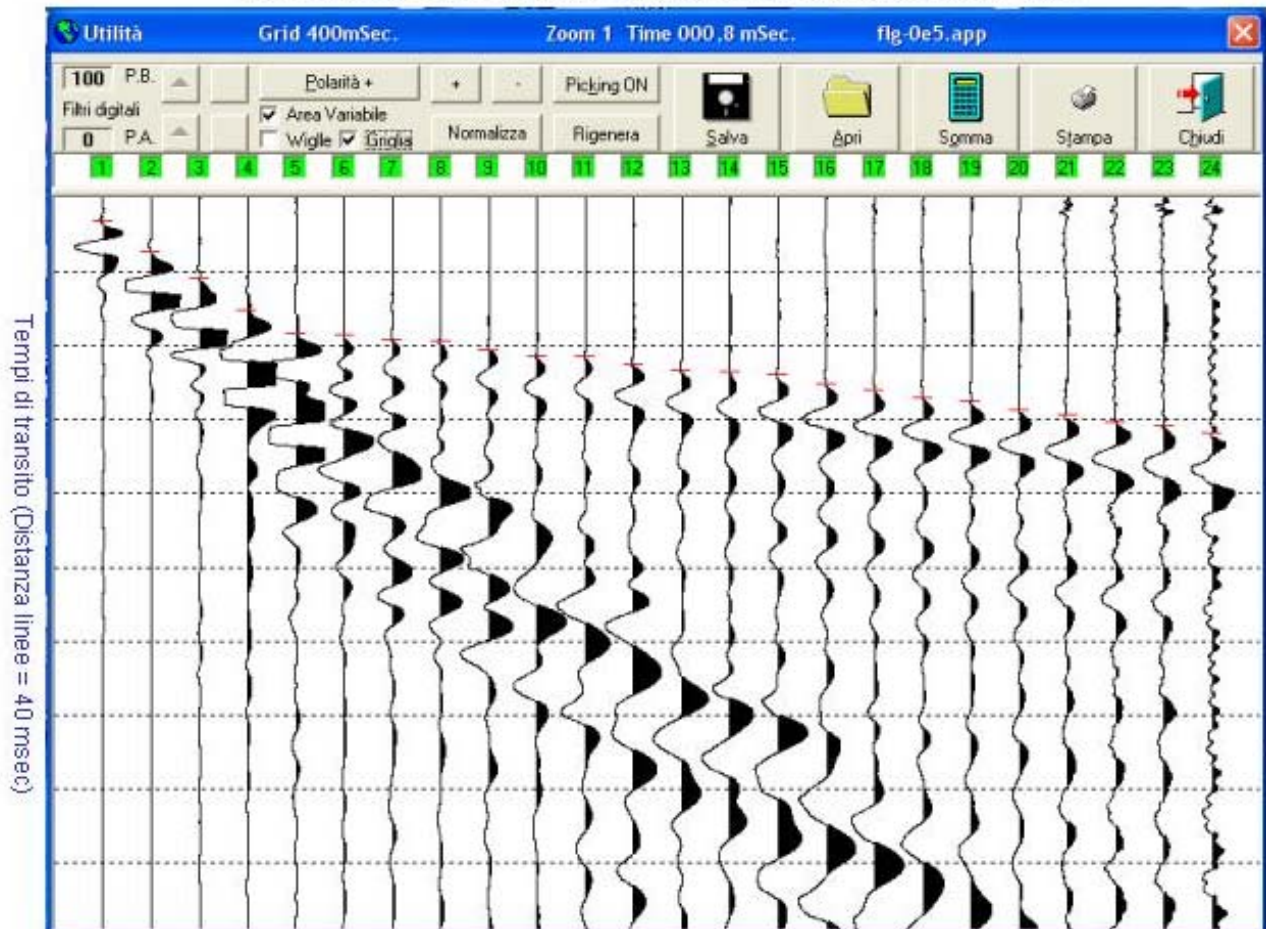
La tabella riportata a fianco mette in evidenza un progressivo aumento delle velocità sismiche con Vp che da profondità di 9 metri sono sempre superiori a 2000 m/s e Vs superiori a 850 m/s. A circa 11 metri dal p.c. è presente una zona con Vp e Vs che raggiungono i valori massimi calcolati nell'intero cross-hole. Oltre questa profondità si ha una diminuzione e, quindi, un successivo, ulteriore, aumento.

La stratigrafia del terreno ottenuta dai sondaggi geognostici mostra livelli ghiaiosi a scarso grado di maturazione con buon grado di compattezza e con valori di SPT molto elevati fino al rifiuto.

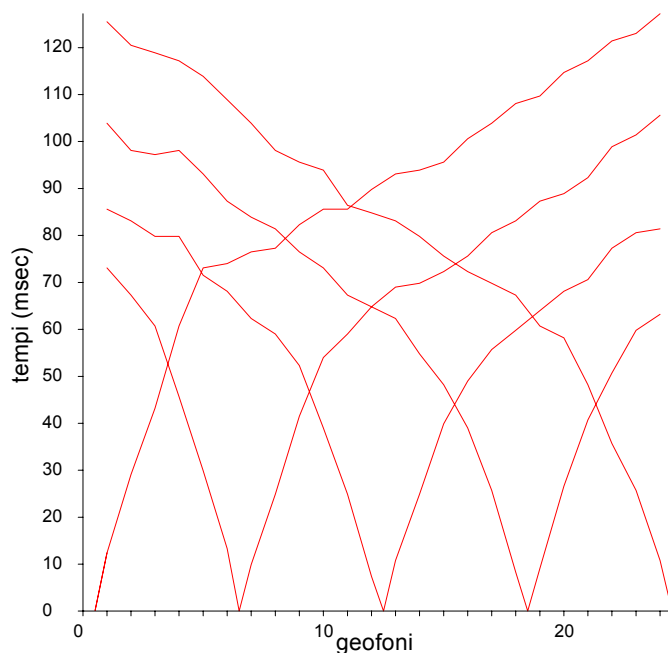
Il profilo sismico a rifrazione con registrazione delle onde SH è stato eseguito nel 2004, lungo l'unico allineamento accessibile, in prossimità dei fori di sondaggio in cui era stato effettuato il rilievo Cross-Hole; questi sono risultati in prossimità delle progressive 47.5 e

52.5 metri del profilo. Nelle figure seguenti si riportano i risultati del profilo sismico a rifrazione. In particolare la prima figura riporta un sismogramma relativo ad un tiro di esempio con evidenziato il picking dei tempi di arrivo delle onde SH.

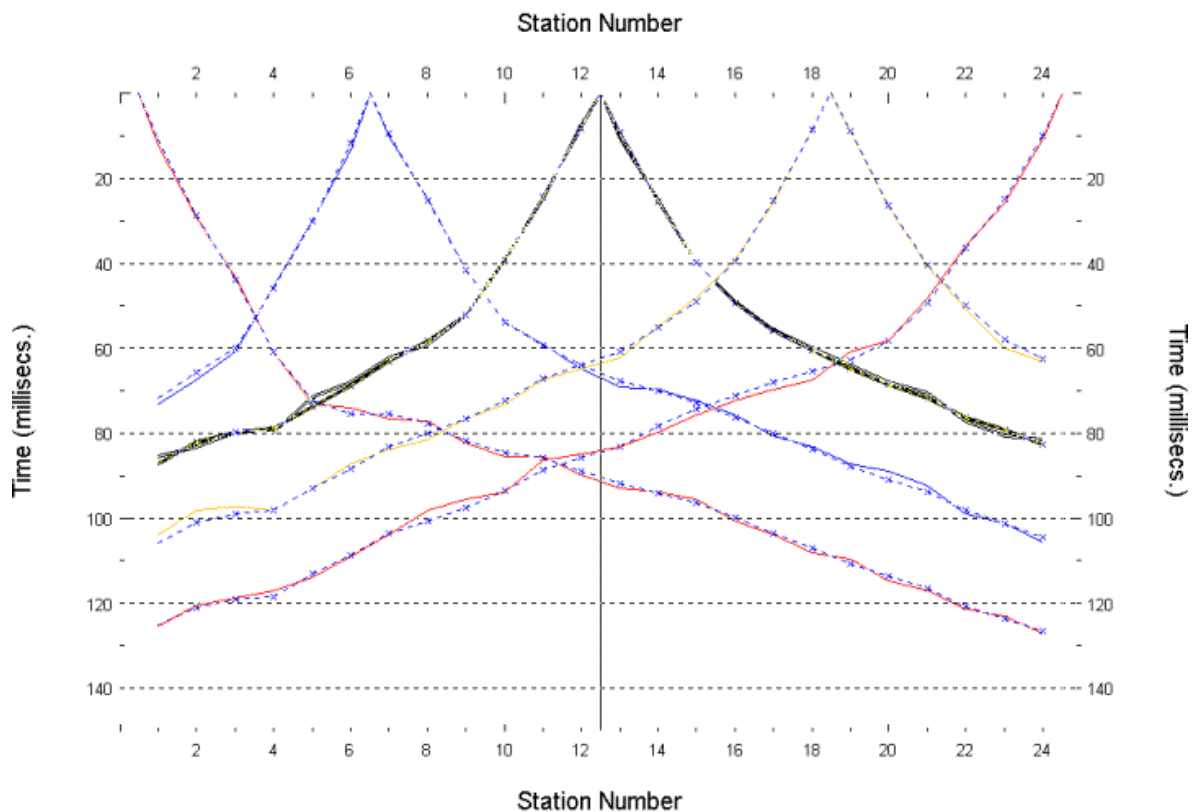
Punto di tiro all'estremità della linea, lato geofono 1 (Cadenza geofoni = 3 m)



Dalla lettura dei sismogrammi di tutti i tiri sismici sono state ottenute le dromocrone (travel time) relative ai primi arrivi delle onde SH. Queste dromocrone rappresentano il punto di partenza per l'elaborazione della tomografia sismica con il software RAYFRACT.



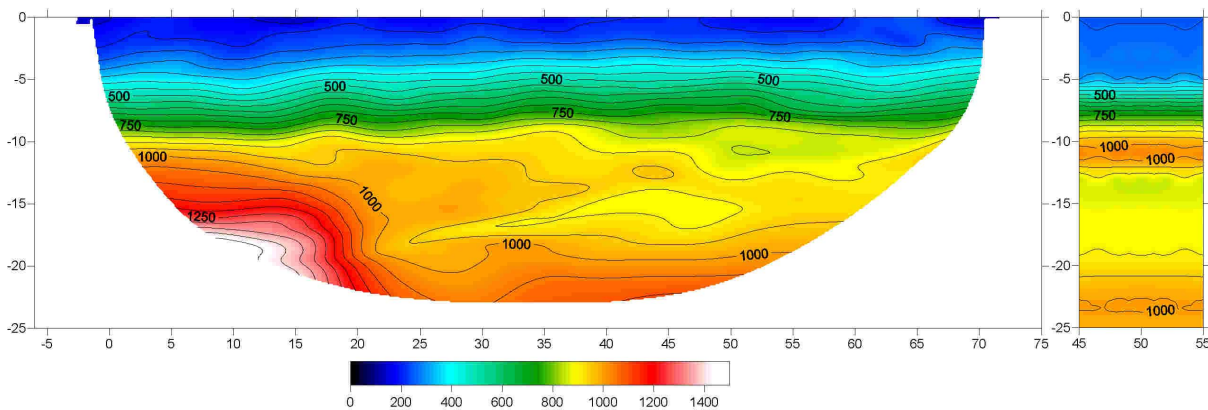
La bontà del modello sismico del sottosuolo, creato dal software suddividendo il sottosuolo in elementi di dimensioni centimetriche, ad ognuno dei quali viene assegnata una velocità sismica, viene indicata al termine dell'elaborazione in forma numerica in termini di scarto quadratico medio RMS ed in forma grafica visualizzando la differenza tra le dromocrone calcolate rispetto a quelle misurate. La figura seguente illustra le dromocrone calcolate secondo il modello sismico elaborato (linee tratteggiate con crocette) confrontate con quelle di partenza (linee continue).



Il risultato ottenuto consiste nella tomografia sismica con le variazioni delle Vs evidenziate da variazioni cromatiche e linee isovalore con equidistanza di 50 m/sec. Nella figura seguente si riporta questa tomografia, affiancata alla stratigrafia delle onde S ottenuta con le misure Cross-Hole nei fori di sondaggio S21 e S22 ubicati in corrispondenza delle progressive 47.5 e 52.5 del profilo sismico. La stratigrafia del Cross-Hole qui riportata è stata estesa per un tratto di 10 metri di larghezza interpolando i dati tra 2.5 metri prima del foro S21 e 2.5 m oltre il foro S22. La scala cromatica delle velocità ed il contour ad isolinee con equidistanza di 50 m/s sono le stesse per la stratigrafia e la tomografia.

TOMOGRAFIA SISMICA DELLA VELOCITA' DELLE ONDE SH  
OTTENUTA DAL PROFILO ESEGUITO IL 19/04/04

STRATIGRAFIA DI VS  
OTTENUTA DAI DATI RELATIVI  
AL CROSS-HOLE S21-S22  
ESEGUITO NEL NOVEMBRE 1999  
UBICABILE TRA LE PROGRESSIVE  
45 E 55 DEL PROFILO



Dall'analisi dei due elaborati riportati sopra si nota una sostanziale corrispondenza in termini di Vs e spessori dei sismostrati interpretabili; in particolare si possono fare le seguenti considerazioni, relativamente alle progressive di corrispondenza della tomografia con il cross-hole:

- \* In ambedue le stratigrafie vengono confermate Vs minori di 500 m/s entro i primi 6 metri di profondità, questo sismostrato appare costante anche lungo il resto della tomografia;
- \* Un aumento di Vs fino a circa 10-12 m di profondità è visibile in ambedue le stratigrafie, in particolare valori intorno a 1000 m/s a tali profondità vengono evidenziati nella tomografia da un alto relativo di Vs in corrispondenza delle progressive di misura del cross-hole. Questo livello nel resto della tomografia è abbastanza costante nella prima metà del profilo e tende ad aumentare di profondità dalla zona di esecuzione del cross-hole (progressive 45-50) fino alla fine.
- \* Sempre nella stessa zona a profondità superiori a 12-13 metri è presente una diminuzione delle Vs evidenziabile benissimo anche nella tomografia oltre che nel cross-hole. La possibilità di evidenziare diminuzioni di velocità con la profondità e definirle anche nello sviluppo laterale, rappresenta uno dei principali vantaggi dell'elaborazione tomografica dei profili sismici a rifrazione rispetto ai classici metodi di elaborazione, con i quali, invece, non è possibile individuare inversioni di velocità con la profondità, se non qualitativamente dall'analisi delle dromocrone.
- \* A profondità superiori a circa 20 metri si ha, in ambedue le stratigrafie, un aumento delle Vs con valori intorno a 1000 m/s.
- \* Infine, nell'elaborazione tomografica si nota che nella zona la Vs può raggiungere anche valori superiori e si potrebbe ipotizzare la presenza di un "alto del substrato litoide" non evidenziato dai sondaggi in quanto eseguiti solo altrove.

## CONCLUSIONI

Con il presente lavoro si è potuto constatare l'elevato livello di affidabilità delle tecniche di elaborazione tomografica dei profili sismici in base al riscontro con misure sismiche in foro eseguite lungo lo stesso allineamento del profilo. L'inversione dei dati permette, infatti, di evidenziare in modo dettagliato le variazioni delle velocità sismiche in profondità, superando i limiti delle elaborazioni classiche della sismica a rifrazione che non permettono di individuare zone ad inversione di velocità con la profondità.