CONSORZIO NUOVO RIONE PESCARA

COMUNE DI EBOLI (SA)

PROSPEZIONI SISMICHE MASW

(Multichannel Analysis of Surface Waves)

CARATTERIZZAZIONE SISMICA AI FINI DELLA REDAZIONE DELLA RELAZIONE GEOLOGICA PRELIMINARE INERENTE IL PIANO URBANISTICO ATTUATIVO "AMBITO TRIDENTUM".

I Tecnici

Dott. Geol. Marco Catalano

Dott. Geol. Francesco Cuccurullo

INDICE

1. INDICE 2

2. PREMESSA 3

3. PROSPEZIONI SISMICHE BASATE SULL'ANALISI DELLE ONDE SUPERFICIALI DI RAYLEIGH 4

4. PROSPEZIONI SISMICHE MASW 8

5. INDAGINI ESEGUITE 15

6. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI 18

7. INTERPRETAZIONE ED ANALISI DEI DATI 22

8. RISPOSTA SISMICA LOCALE 24

9. CONCLUSIONI 26

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

1. PREMESSA

Su incarico del Consorzio Nuovo Rione Pescara, con sede in via C.A. Dalla Chiesa 11 Eboli (Sa), sotto indicazione del tecnico incaricato, dott. geol. Fabio Di Feo, sono state effettuate n. 6 prospezioni sismiche M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh) (Fig. 1), al fine di classificare sismicamente i suoli dell'area perimetrata nel Piano Urbanistico Attuativo –" **Ambito Tridentum**", nel comune di Eboli (SA), secondo la normativa vigente (D.M. 14 gennaio 2008).

È stata inoltre condotta un'analisi della risposta sismica del suolo fornendo il calcolo degli spettri di risposta elastici delle componenti orizzontale e verticale delle azioni sismiche di progetto.

Alla presente relazione si allegano i seguenti elaborati, da considerarsi parte integrante della stessa:

- Allegato n° 1: Elaborazioni Prospezioni Sismiche Masw;
- Allegato n° 2: Spettri di risposta elastici;
- Allegato n° 3: Report fotografico;
- Allegato n° 4: Planimetrie con ubicazione delle prospezioni masw.

Fig. 1 – Prospezione sismica MASW n. 3.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

2. PROSPEZIONI SISMICHE BASATE SULL'ANALISI DELLE ONDE SUPERFICIALI DI RAYLEIGH

Le onde di Rayleigh sono polarizzate in un piano verticale (Fig. 2) e si generano in corrispondenza della superficie libera del mezzo quando questo viene sollecitato acusticamente. In questo tipo di onde le particelle descrivono un movimento di tipo ellittico la cui ampiezza decresce esponenzialmente con la distanza dalla superficie libera. L'asse maggiore delle ellissi è normale alla superficie libera del mezzo ed alla direzione di propagazione delle onde e le particelle compiono questo movimento ellittico in senso retrogrado rispetto alla direzione di propagazione delle onde che vengono generate.

Le onde superficiali di Rayleigh, quando si propagano in un mezzo omogeneo, non presentano dispersione e la loro velocità è uguale a $0.92V_S$. In un mezzo disomogeneo, quale la Terra, la loro velocità varia in funzione della lunghezza d'onda tra i limiti 0 e 0.92 V_S. La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).

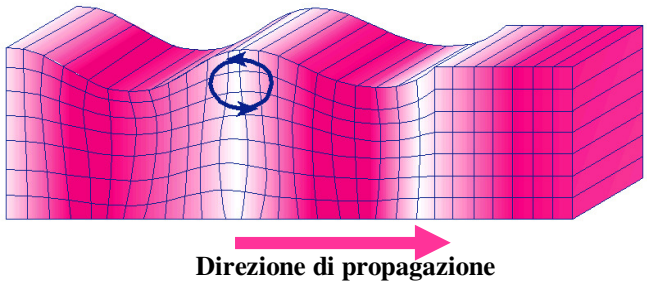

Fig. 2 - Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

La determinazione della velocità delle onde di taglio V_S tramite le misure delle onde superficiali di Rayleigh risulta particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti e ambienti rumorosi poiché la percentuale di energia convertita in onde di Rayleigh è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde *P* (7%) ed *S* (26%). Inoltre l'ampiezza delle onde superficiali dipende da $\sqrt{r}$ e non da *r* come per le onde di volume.

I metodi basati sull'analisi delle onde superficiali di Rayleigh forniscono una buona risoluzione e non sono limitati, a differenza del metodo a rifrazione, dalla

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

presenza di inversioni di velocità in profondità. Inoltre la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_P e dalla densità, è funzione innanzitutto della V_S, parametro di fondamentale importanza per la caratterizzazione geotecnica di un sito secondo quanto previsto dalle recenti normative antisismiche (O.P.C.M. 3274/03; O.P.C.M. 3431/05; D.M. 14 gennaio 2008). Infatti, mentre la velocità delle onde *P* misurata in terreni saturi dipende in maniera sostanziale dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale, la velocità delle onde *S* è caratteristica delle vibrazioni trasmesse dal solo scheletro solido e, pertanto, a differenza delle onde *P*, risulta rappresentativa delle reali proprietà meccaniche del terreno.

La proprietà fondamentale delle onde superficiali di Rayleigh, sulla quale si basa l'analisi per la determinazione delle V_S, è costituita dal fenomeno della dispersione che si manifesta in mezzi stratificati (Fig. 3).

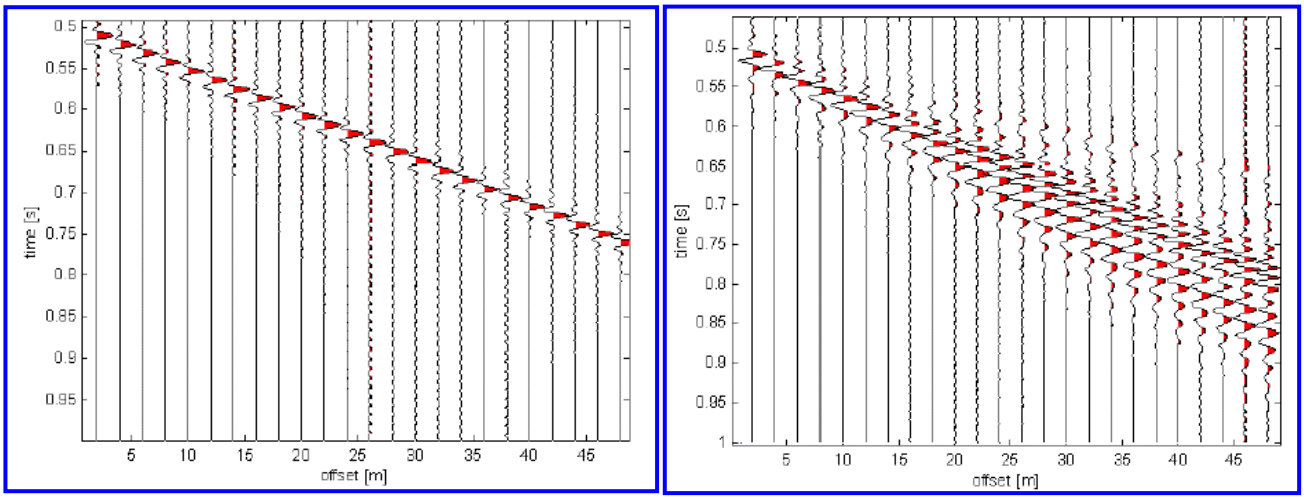

Fig. 3 – Segnali sismici che evidenziano (in rosso) le onde superficiali di Rayleigh in un mezzo non stratificato (a sinistra) e in un mezzo stratificato (a destra). Risulta evidente il fenomeno della dispersione delle onde superficiali di Rayleigh in un mezzo stratificato.

Pertanto, analizzando la curva di dispersione, ossia la variazione della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della lunghezza d'onda (o della frequenza, che è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda), è possibile determinare la variazione della velocità delle onde di taglio con la profondità tramite processo di inversione (Fig. 4).

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

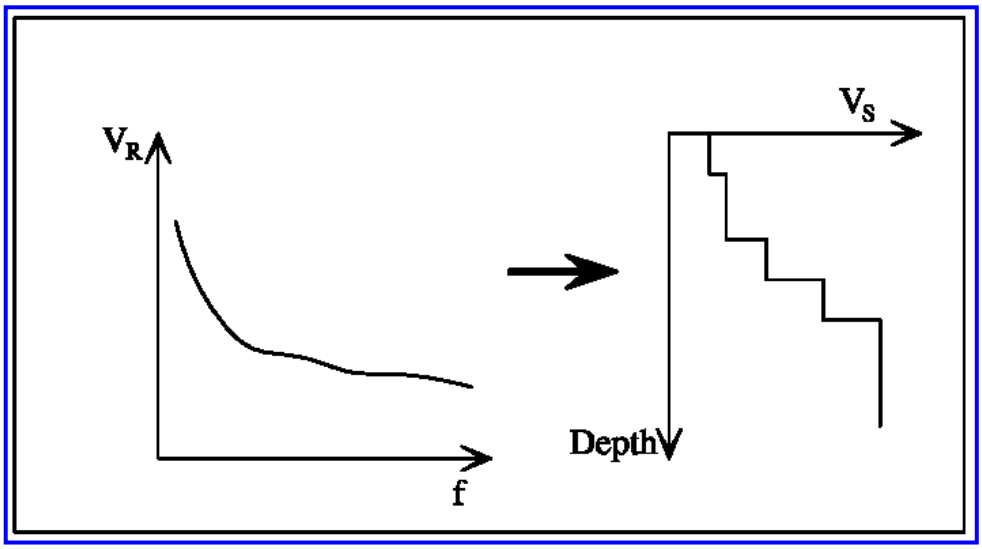

Fig. 4 – Velocità delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza (a sinistra) e profilo di velocità delle onde di taglio in funzione della profondità (a destra) ricavato tramite processo d'inversione.

La velocità delle onde di Rayleigh (V_R) è pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio (V_S). Le tecniche di analisi delle onde di Rayleigh vengono realizzate con procedure operative meno onerose della comune sismica a rifrazione e delle prove in foro e hanno un grado di incertezza nella determinazione delle V_S <15%.

La modellazione del sottosuolo mediante l'impiego di comuni geofoni verticali a 4.5Hz e l'analisi delle onde superficiali di Rayleigh viene ottenuta con le seguenti metodologie: ReMi (Refraction Microtremor), FTAN (Frequency Time ANalysis), SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La tecnica ReMi consente di raggiungere profondità ragguardevoli fornendo un profilo verticale medio delle V_S relative al volume di sottosuolo sotteso dallo stendimento messo in opera. Questa tecnica viene estensivamente utilizzata negli Stati Uniti nell'ambito del NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) tanto che il software fornisce anche direttamente il valore di V_{S30} e la categoria della classificazione del suolo secondo la normativa americana.

Il metodo FTAN per la determinazione delle V_{S30}, basato sull'analisi della velocità di gruppo delle onde di Rayleigh, ha bisogno di un solo ricevitore e permette la definizione di un profilo medio su distanze di decine-centinaia di metri. Inoltre il metodo fornisce valori di velocità delle onde di taglio in buon

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

accordo con le misure in foro.

Il metodo SASW, basato sull'analisi della velocità di fase delle onde di Rayleigh, viene generalmente impiegato per la determinazione delle V_S di strati superficiali (<30m) e per la determinazione delle proprietà elastiche di strade e pavimentazioni (Stokoe & Nazarian, 1985) e, pertanto, sembra essere tra i metodi non invasivi quello più popolare tra gli ingegneri.

La tecnica MASW, fondata sulla tecnica SASW, consente una dettagliatissima ricostruzione della distribuzione della velocità delle onde *S* nel sottosuolo.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

3. PROSPEZIONI SISMICHE MASW

L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una efficiente ed accreditata metodologia sismica per la determinazione delle velocità delle onde di taglio V_S. Tale metodo utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale. Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione, vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali, simili alla tecnica SASW, basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno.

La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW prevede 4 passi fondamentali:

1. Ripetute acquisizioni multicanale dei segnali sismici (Fig. 5), generati da una sorgente energizzante artificiale (maglio battente su piastra in alluminio), lungo uno stendimento rettilineo di sorgente-geofoni (Fig. 6) che viene spostato lungo la linea dello stendimento stesso dopo ogni acquisizione;

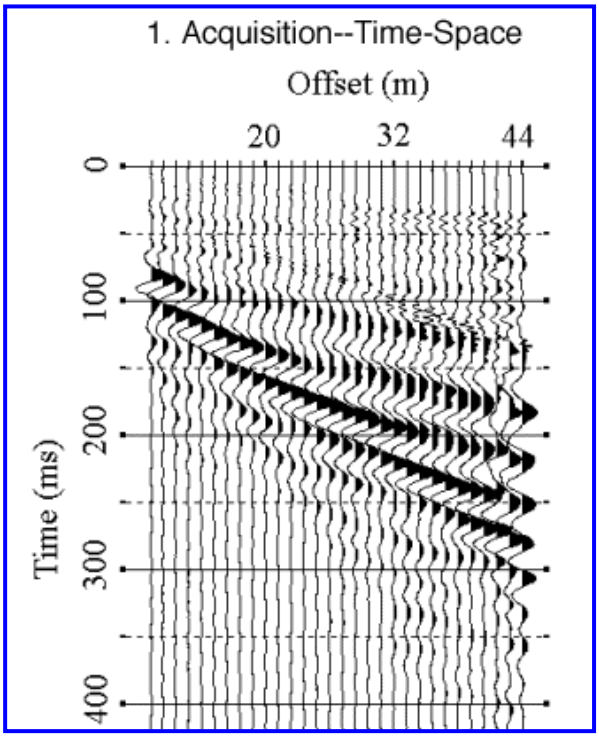

Fig. 5 – Segnali sismici acquisiti dai geofoni lungo uno stendimento.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

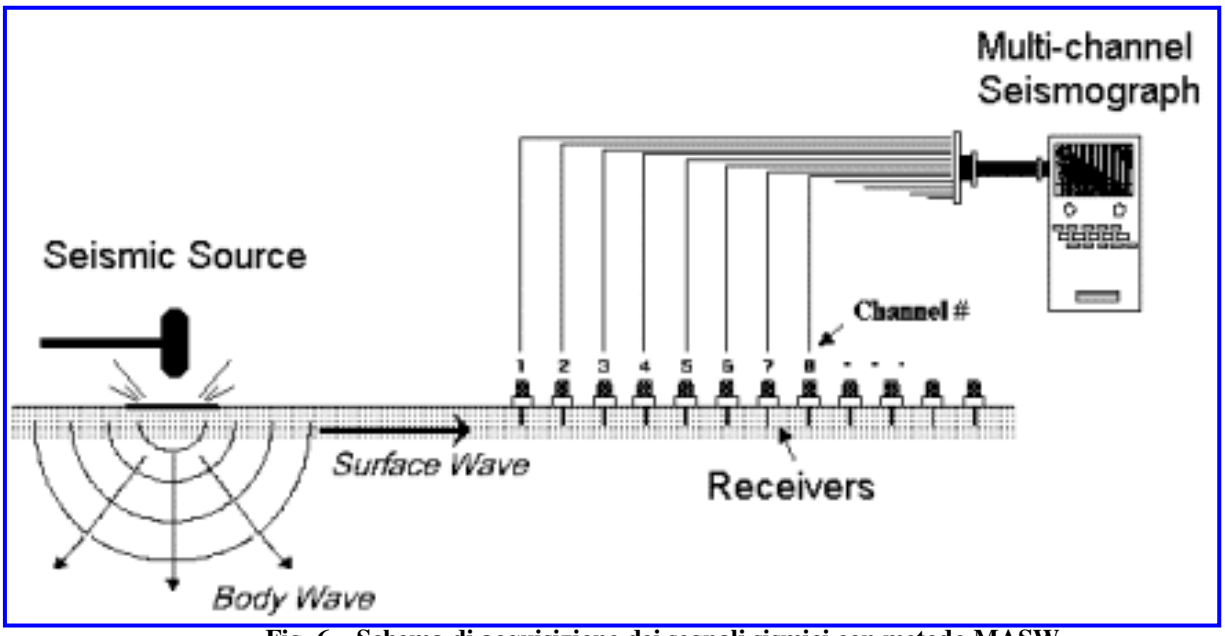

Fig. 6 – Schema di acquisizione dei segnali sismici con metodo MASW.

2. Estrazione del modo fondamentale dalle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (una curva per ogni acquisizione) (Fig. 7);

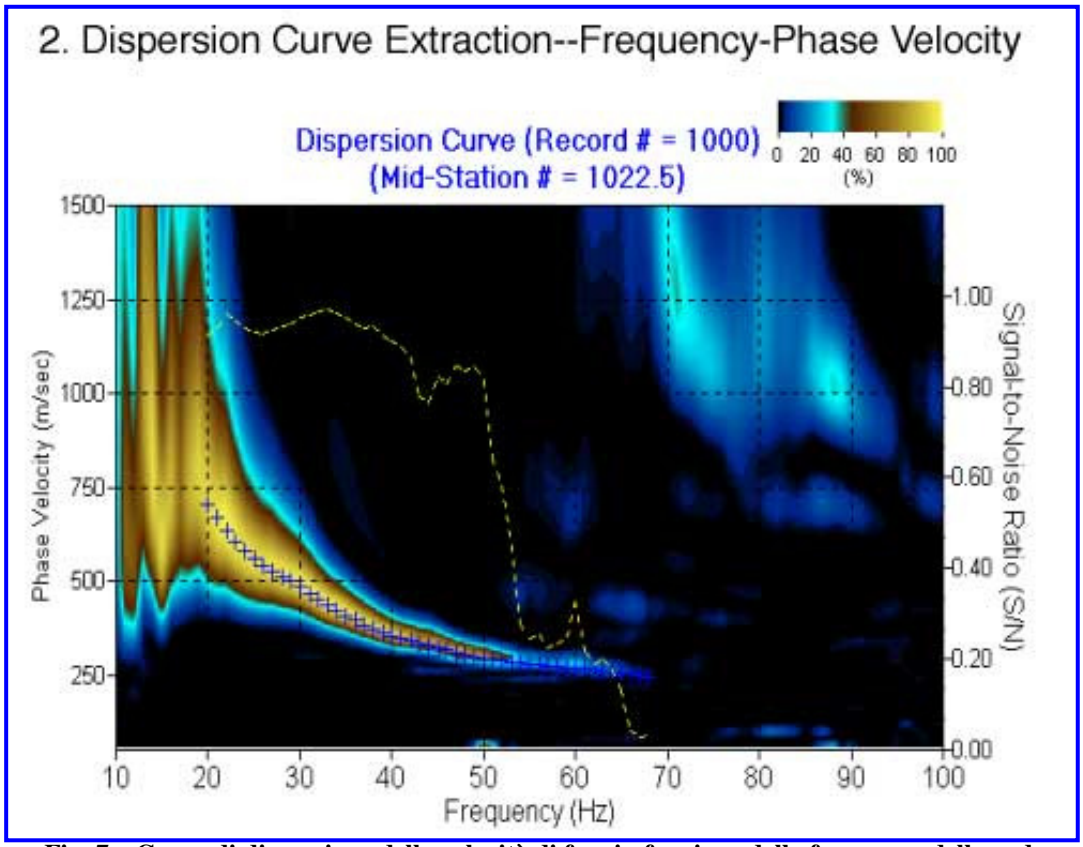

Fig. 7 – Curva di dispersione della velocità di fase in funzione della frequenza delle onde superficiali di Rayleigh.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

3. Inversione delle curve di dispersione per ottenere profili verticali 1D delle V_S (Fig. 8) (un profilo verticale per ogni curva di dispersione, posizionato nel punto medio di ogni stendimento geofonico);

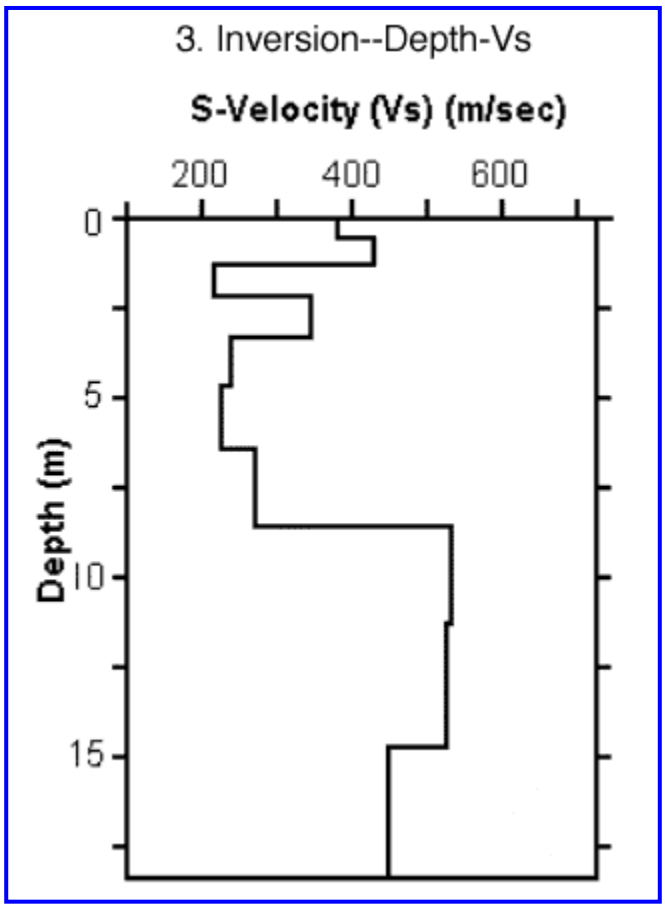

Fig. 8 – Modello di velocità delle onde di taglio (V_S) ottenuto dalla curva di dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh attraverso l'inversione di un modello multistrato di terreno. La velocità delle onde di taglio è approssimativamente pari a 1.1V_R (V_R=velocità delle onde di Rayleigh) e la profondità è pari a circa 0.4λ (λ=lunghezza d'onda).

4. Ricostruzione di una sezione (modello 2D) delle V_S dei terreni con approccio multicanale (con almeno due acquisizioni dei segnali, ovvero uno spostamento lungo la linea dello stendimento) (Fig. 9).

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

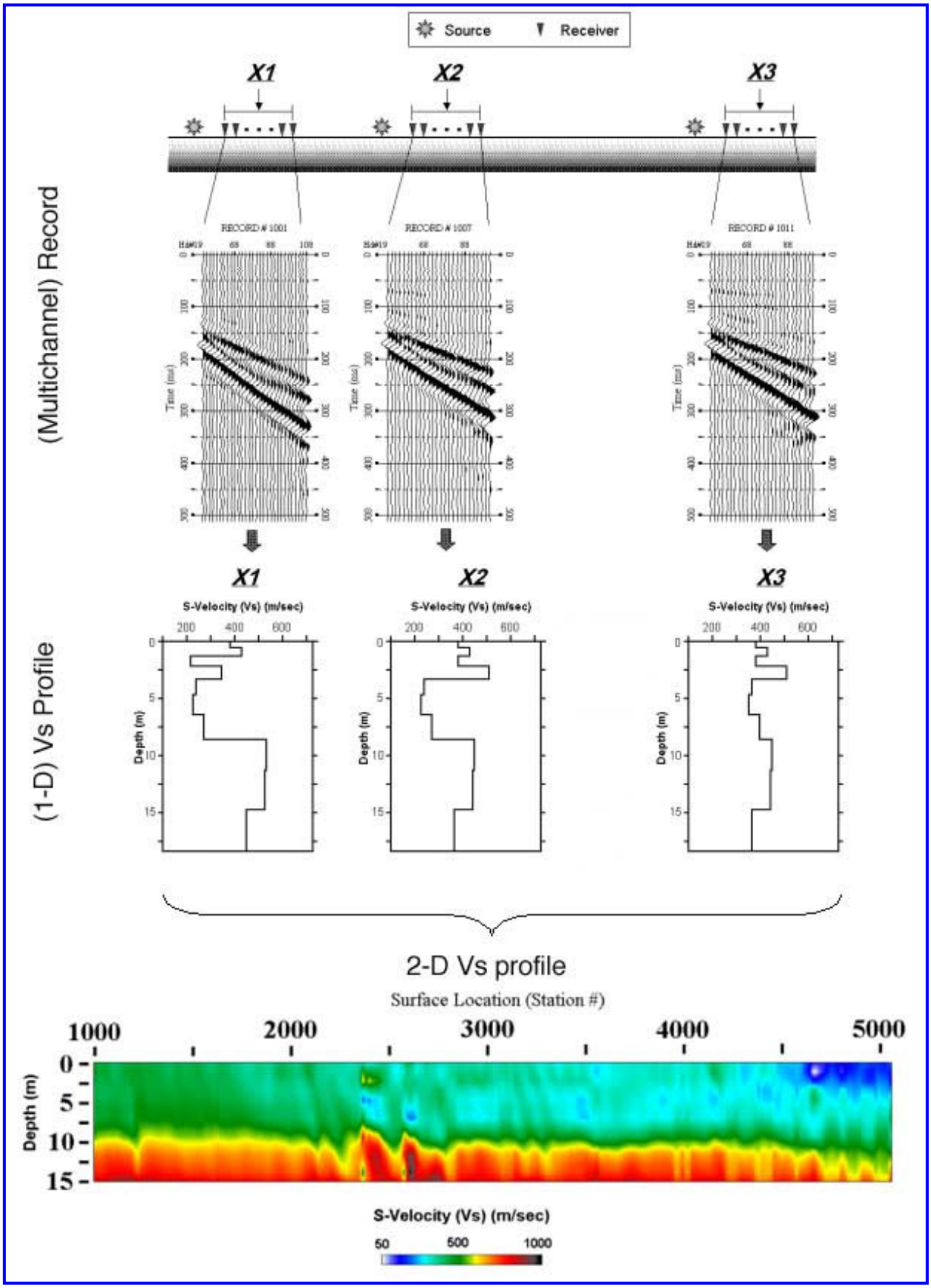

Fig. 9 – Modello 2D di velocità delle onde di taglio (V_S) ottenuto dalle inversioni delle curve di dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

Quando vengono generate onde sismiche usando una sorgente impattante come un martello su una piastra vengono generate sia onde di volume (*P* ed *S*), sia onde di superficie (Rayleigh e Love), che si propagano in tutte le direzioni. Alcune di queste onde vengono riflesse e disperse quando incontrano oggetti superficiali o poco profondi (ad esempio, fondazioni di edifici, canali sotterranei, trovanti lapidei, ecc.) e diventano rumore (Fig. 10).

Inoltre, vengono quasi sempre rilevate vibrazioni da rumore ambientale proveniente dal traffico veicolare, dall'attività industriale e, in generale, dall'attività umana (Fig. 10).

Il vantaggio principale dell'approccio multicanale della tecnica MASW sta nella sua intrinseca capacità di distinguere tutte queste onde dovute al rumore e di isolarle dalle onde superficiali di Rayleigh evidenziando solo il modo fondamentale di oscillazione dei terreni. L'isolamento del modo fondamentale di oscillazione si basa su molteplici caratteristiche sismiche dei segnali.

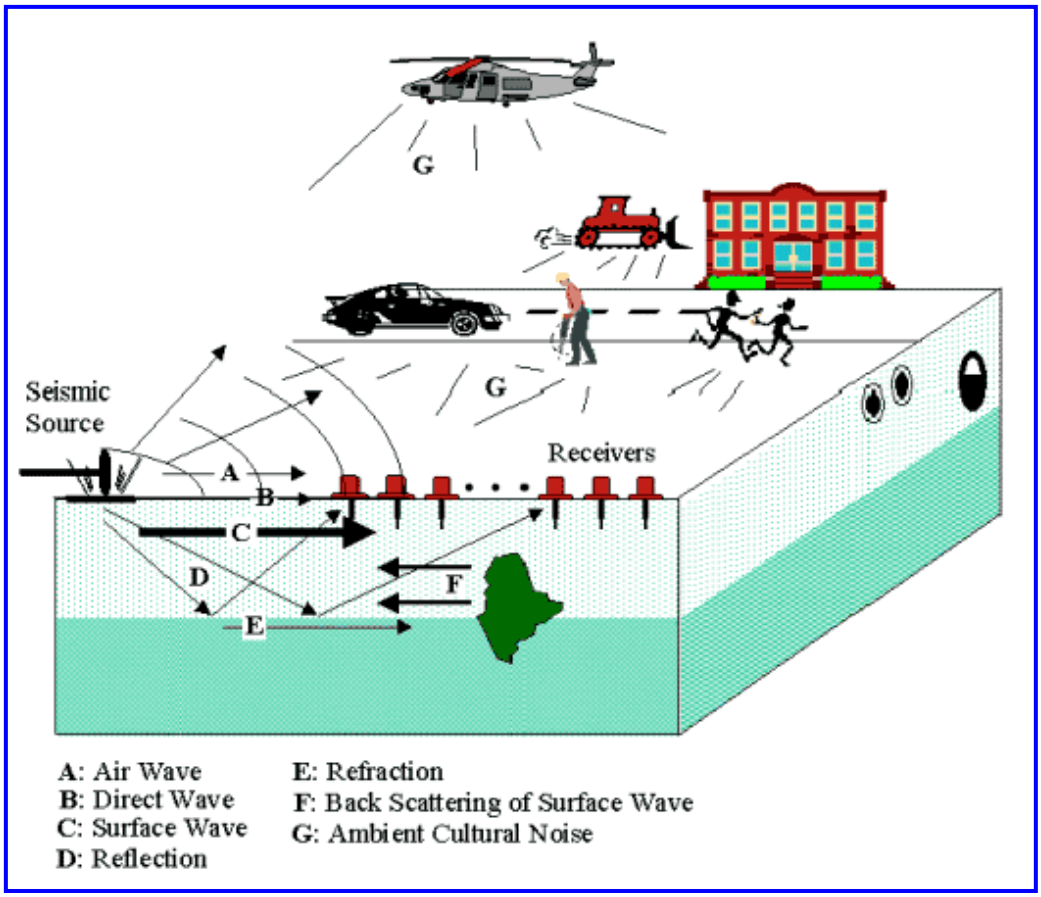

Fig. 10 – Schematizzazione dei vari tipi di onde (di volume e superficiali) e di alcune possibili sorgenti di rumore ambientale.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

Le proprietà della dispersione di tutti i tipi di onde (di volume e superficiali) sono visualizzate attraverso un metodo di trasformazione (basato sull'analisi spettrale dei segnali sismici) del campo d'onda che converte direttamente i segnali sismici acquisiti (Fig. 11) in una immagine dove un modello di dispersione è riconosciuto nella distribuzione dell'energia trasformata in oscillazioni (Fig. 12).

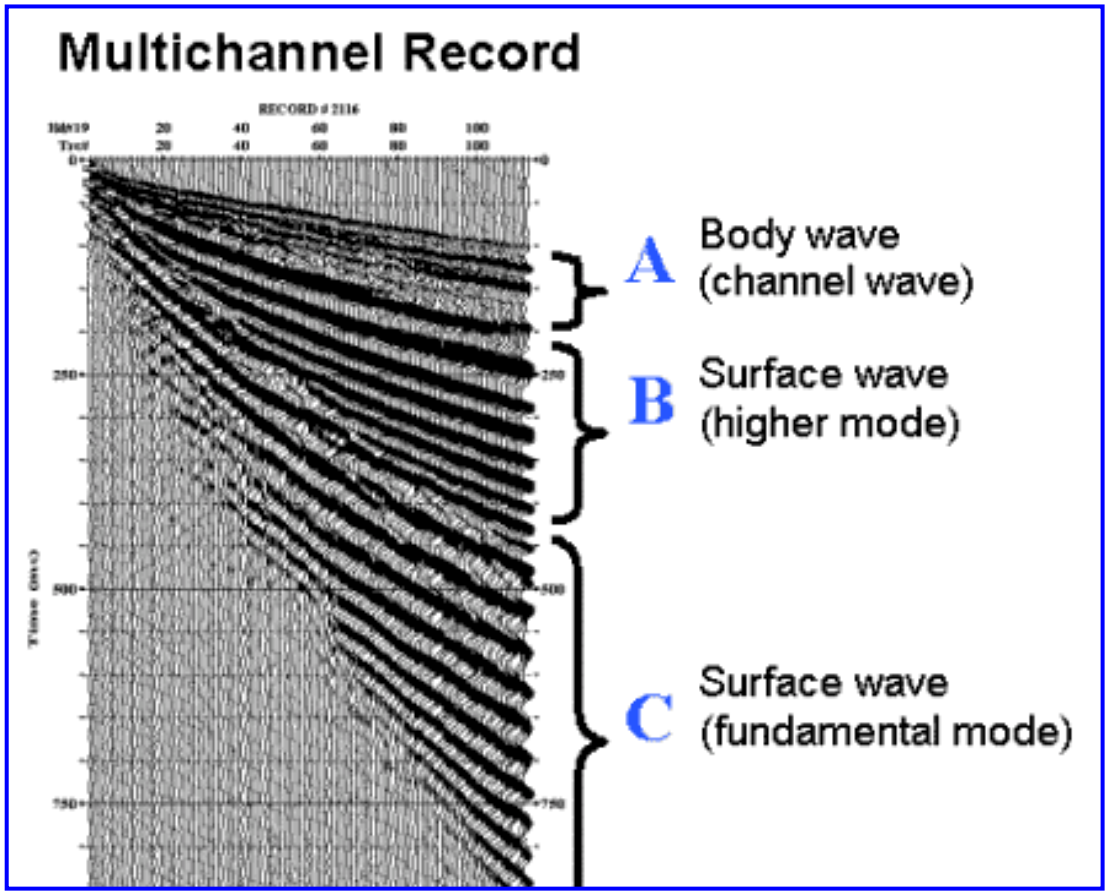

Fig. 11 – Segnali sismici con acquisizione multicanale e riconoscimento delle varie fasi sismiche (onde di volume *P* ed *S*, modo fondamentale e modi superiori delle onde superficiali).

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

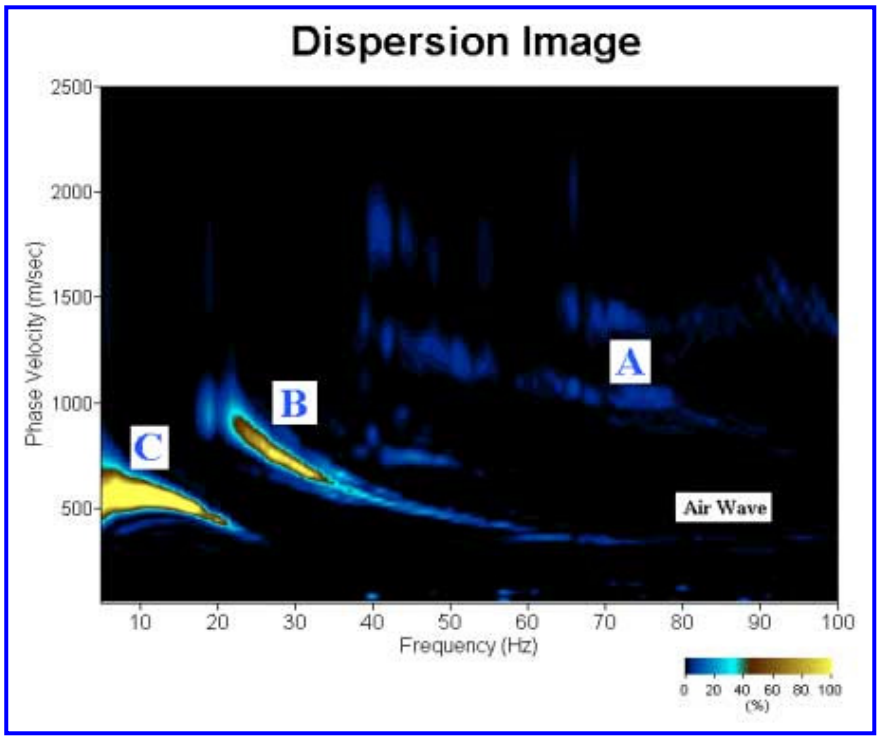

Fig. 12 – Curva di dispersione della velocità di fase in funzione della frequenza delle onde superficiali di Rayleigh relativa ai segnali sismici in Fig. 11. Il picco energetico in corrispondenza di C rappresenta, nel modello della dispersione, il modo fondamentale da estrarre. Il picco energetico in B rappresenta il primo modo mentre quello in A, poco evidente, rappresenterebbe il secondo modo.

Successivamente, il modo fondamentale (proprietà fondamentale della dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh) viene estratto da un modello specifico. Tutte le altre onde (riflesse, disperse, modi superiori delle onde superficiali, noise ambientale) vengono quindi rimosse durante il processo di elaborazione.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

4. INDAGINI ESEGUITE

Al fine di caratterizzare sismicamente il suolo nelle aree oggetto di indagine, sono state eseguite n. 6 prospezioni sismiche MASW, con stendimenti geofonici di 35*m*, considerando anche la sorgente energizzante e la traslazione su se stesso del singolo stendimento di 4 stazioni geofoniche (Fig. 1 – Allegato 3).

Le indagini sono state condotte mediante l'utilizzo di sismografo M.A.E. A6000-S 24 bit 24 canali, strumento compatto e versatile progettato e realizzato appositamente per eseguire indagini di prospezione sismica convenzionali (rifrazione, riflessione) e non convenzionali [Re.Mi. (Refraction Microtremor) - M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) - S.A.S.W. (Spectral Analysis of Surface Waves)].

L'elevata dinamica (24 bit di risoluzione) unita alla notevole memoria per l'acquisizione, ne consente l'utilizzo per tecniche di indagine di tipo non convenzionale. Tali indagini risultano particolarmente adatte in aree fortemente antropizzate (aree urbane e industriali) con notevole presenza di rumore di fondo (noise).

La gestione dell'apparecchiatura è notevolmente semplificata dall'interfaccia grafica e dall'interazione con essa tramite il sistema di puntamento touch-screen, che consente di eseguire tutte le operazioni toccando con un pennino gli oggetti interessati direttamente sullo schermo.

L'ambiente operativo dello strumento è quello di Microsoft Windows XP embedded.

La sorgente sismica (Fig. 13) è costituita da un impatto transiente verticale (maglio dal peso di 6*kg* che batte su una piastra circolare in alluminio). Come trigger/starter è stato utilizzato un geofono verticale Geospace a 14*Hz*, posto in prossimità della piastra.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

Fig. 13 – Sorgente energizzate, costituita da massa battente su piastra di alluminio. Come starter/trigger è stato utilizzato un geofono verticale Geospace a 14*Hz*.

Quando la battuta sulla superficie della piastra non risultava netta o veniva colpita due volte erroneamente, la prova veniva ripetuta.

Le oscillazioni del suolo sono state rilevate da 24 geofoni verticali (Geospace – 4.5*Hz*) posizionati lungo il profilo di indagine con offset e spacing di 1.25*m* (Fig. 14). La lunghezza complessiva di ogni stendimento geofonico è stata sufficiente a determinare la sismostratigrafia 2D dei terreni nei siti prescelti fino a profondità comprese tra 32*m* e 35*m* dal p.c.

I segnali sismici acquisiti sono stati successivamente elaborati con apposito programma (SurfSeis2.05 della Kansas Geological Survey) per la determinazione della sismostratigrafia del sottosuolo.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

Fig. 14 – Geofono verticale della Geospace a 4.5*Hz* utilizzato per il rilevamento delle oscillazioni del suolo.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

5. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI

Le acquisizioni dei segnali, di lunghezza temporale T=2.048s, sono state effettuate con passo di campionamento dt=0.5ms. La frequenza di campionamento è data da: $f_{campionamento}$=1/dt=2000Hz. La frequenza massima dei segnali, ovvero la frequenza di Nyquist, è data da: $f_{Nyquist}$ =1/2dt=1000Hz. La frequenza minima dei segnali è data da: f_{min}=1/T=0.488Hz.

L'elaborazione dei dati e l'inversione delle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh sono state effettuate con il programma SurfSeis2.05 della Kansas Geological Survey che ha permesso di eseguire l'intero processo di elaborazione di 6 sezioni sismostratigrafiche 2D delle V_S (Figg. 15 - 20).

Gli elaborati relativi alle prove effettuate sono riportati in allegato alla presente relazione illustrativa (Allegato 1).

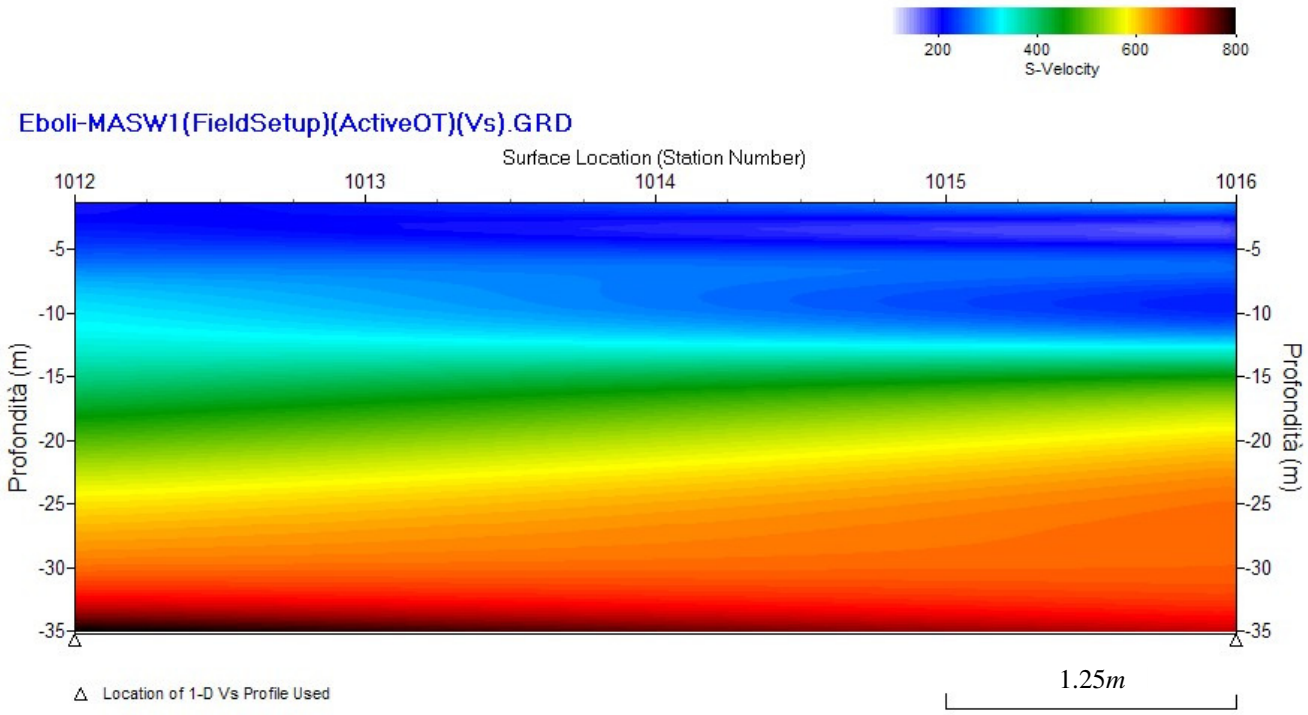

Fig. 15 – Modello sismostratigrafico 2D delle V_S ottenuto dall'indagine Sismica MASW n. 1.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

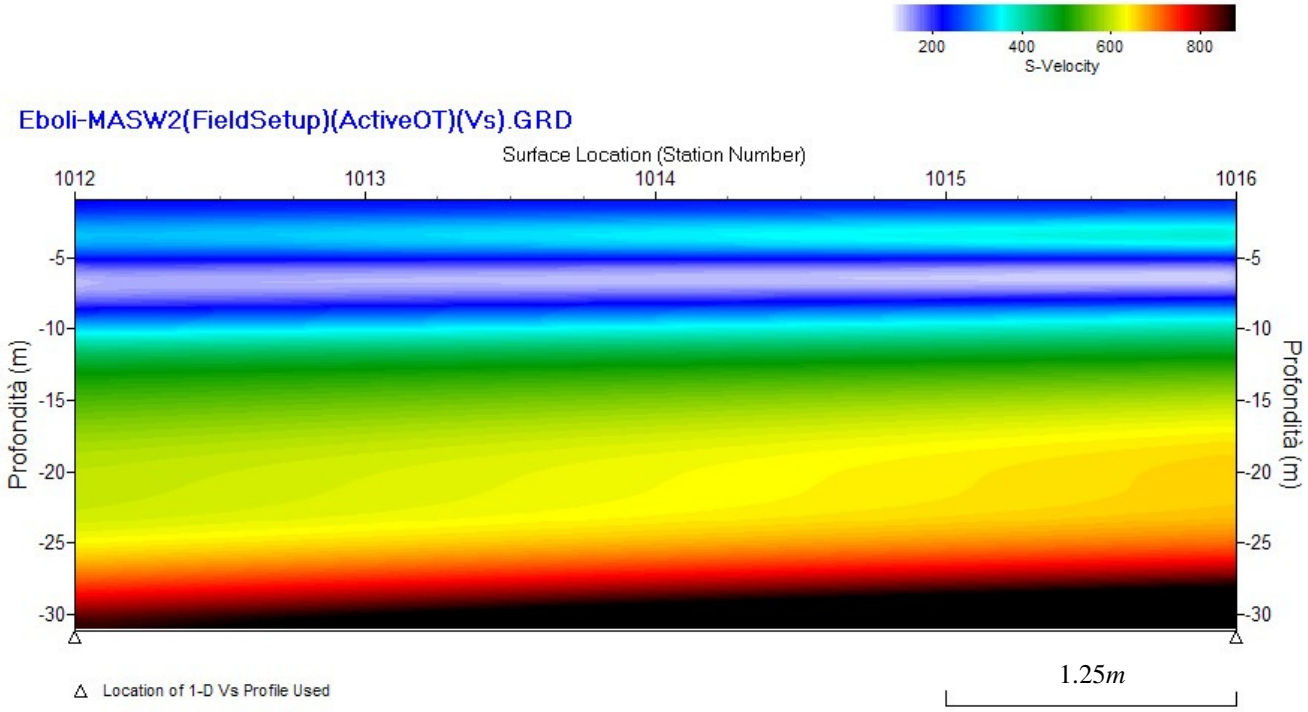

Fig. 16 – Modello sismostratigrafico 2D delle V_S ottenuto dall'indagine Sismica MASW n. 2 .

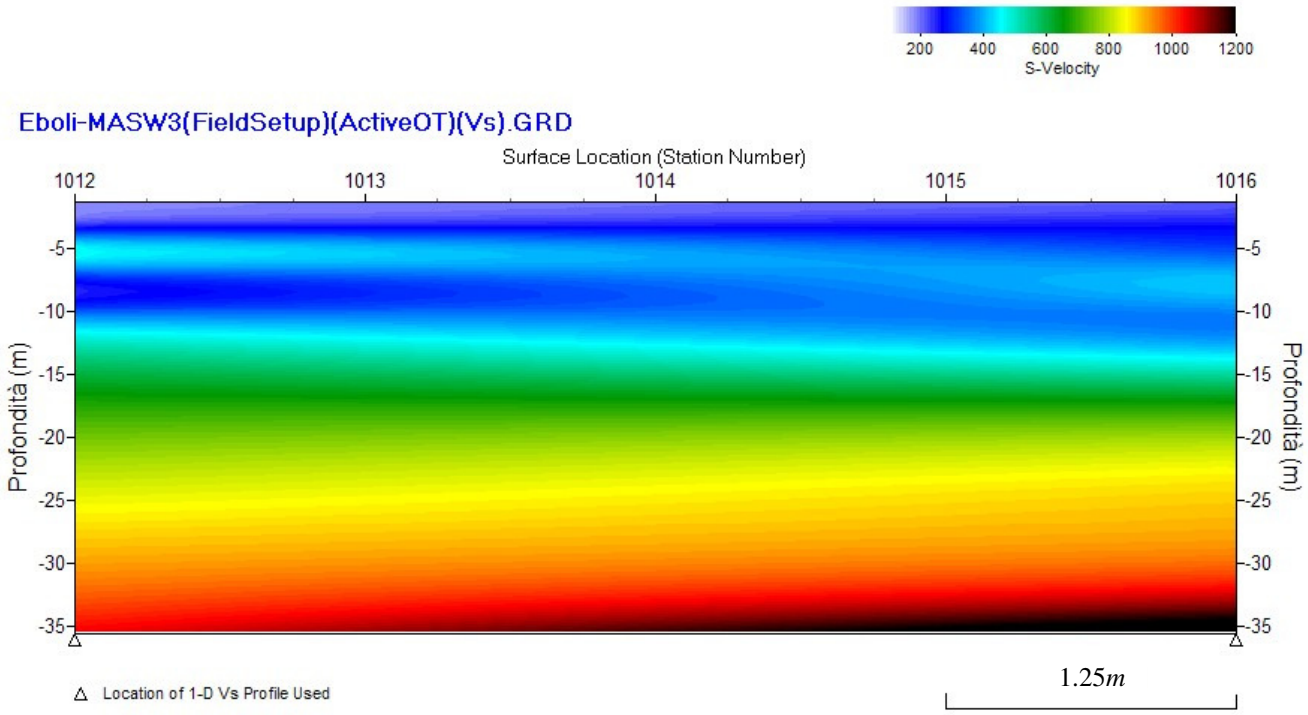

Fig. 17 – Modello sismostratigrafico 2D delle V_S ottenuto dall'indagine Sismica MASW n. 3.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

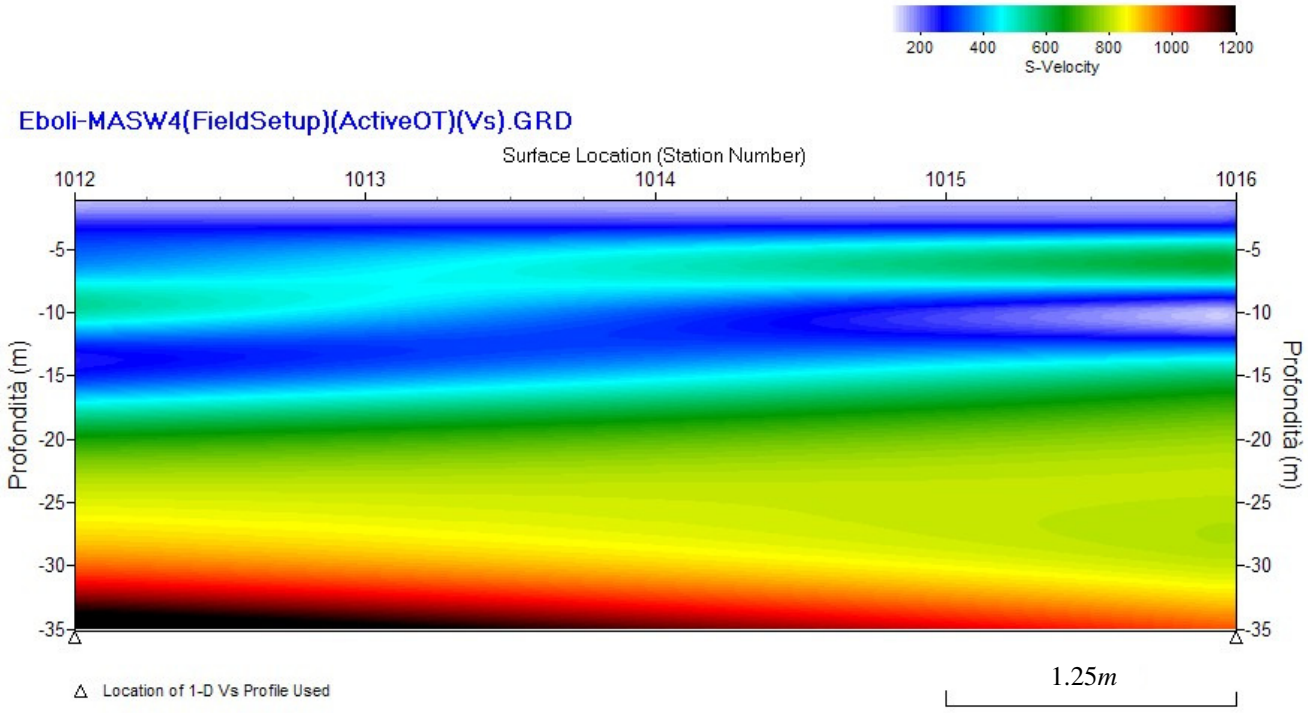

Fig. 18 – Modello sismostratigrafico 2D delle V_S ottenuto dall'indagine Sismica MASW n. 4.

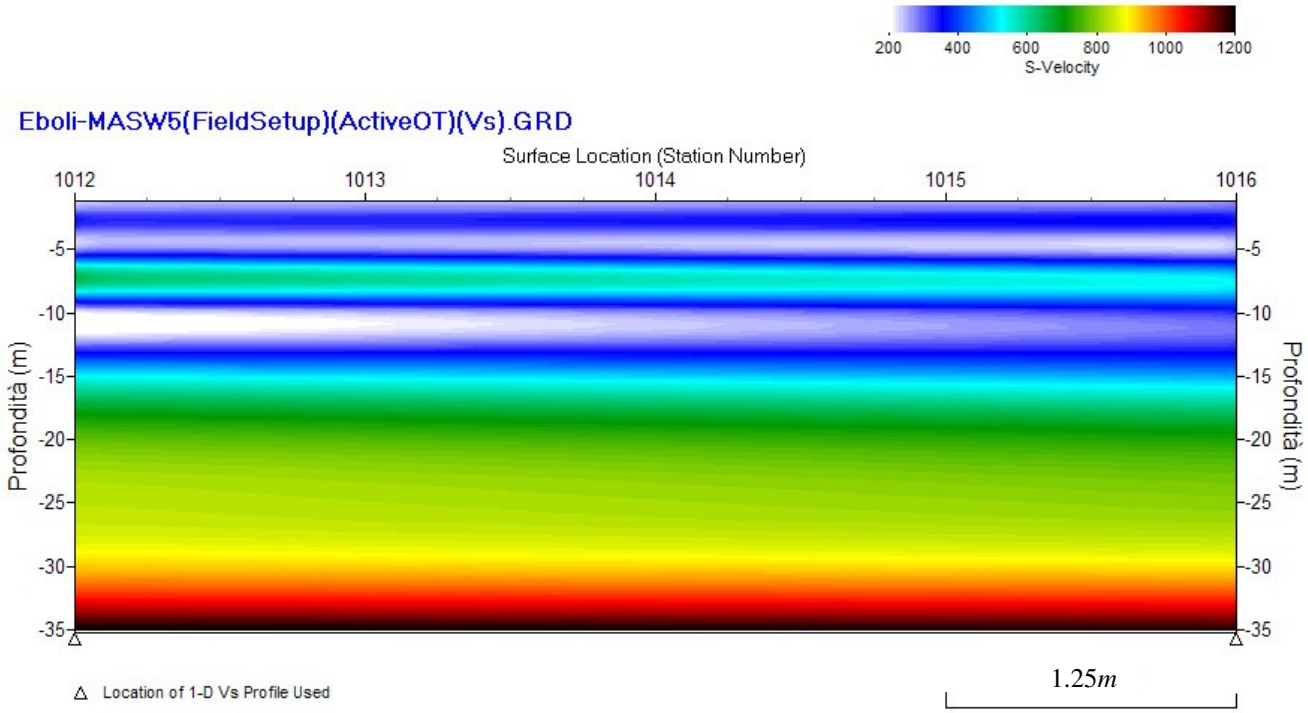

Fig. 19 – Modello sismostratigrafico 2D delle V_S ottenuto dall'indagine Sismica MASW n. 5.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

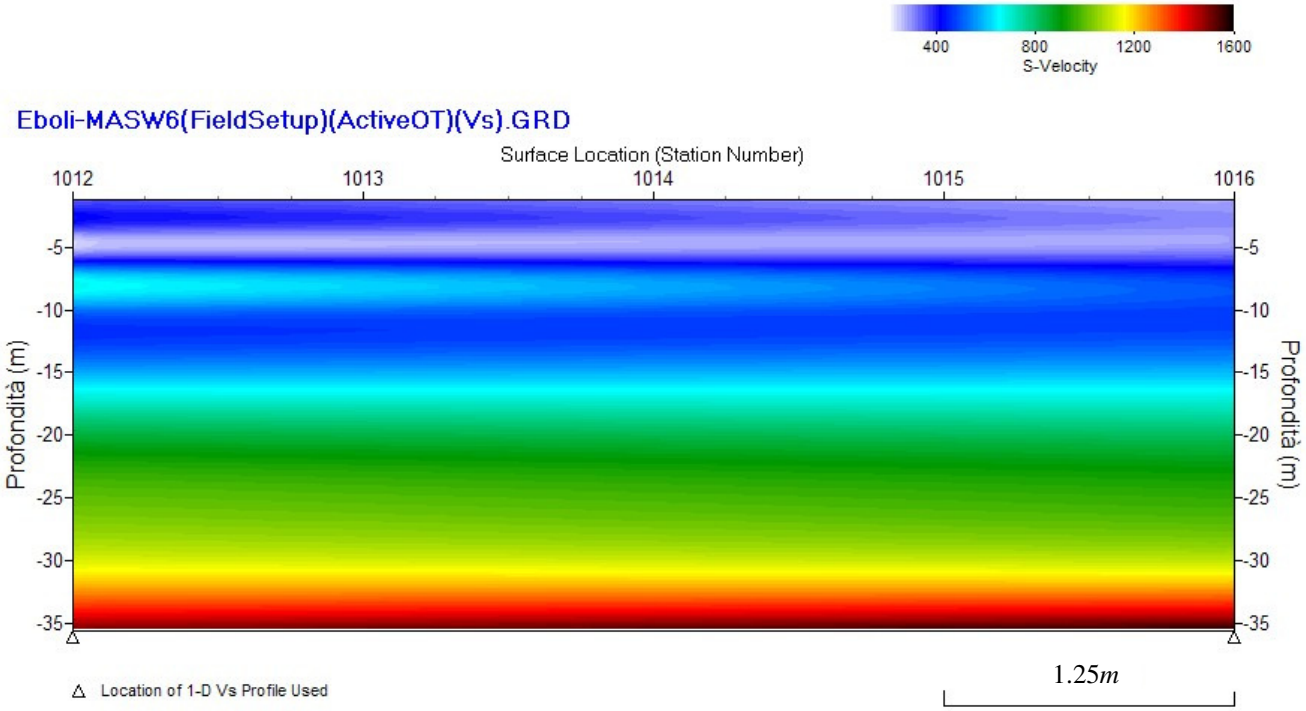

Fig. 20 – Modello sismostratigrafico 2D delle V_S ottenuto dall’indagine Sismica MASW n. 6.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

6. INTERPRETAZIONE ED ANALISI DEI DATI

Le indagini sismiche MASW, considerando la sismostratigrafia fino alla profondità di 30,00*m* dal piano campagna, hanno fornito risultati che collocano i terreni oggetto d'indagine nelle categorie **B** e **C** del D.M. 14 gennaio 2008 (Tab. 1; Tab. 2). Queste categoria sono state ricavate, come da normativa, dalla relazione:

$$V_{S30} = \frac{30m}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i-esimo per un totale di N strati presenti in 30 metri.

Categoria di suolo di fondazione B = *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti* con spessori superiori a 30*m*, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 360*m/s* e 800*m/s* (ovvero $N_{SPT.30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $cu_{30} > 250kPa$ nei terreni a grana fina).

Categoria di suolo di fondazione C = *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30*m*, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 180*m/s* e 360*m/s* (ovvero $15 < NSPT_{30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu_{30} < 250kPa$ nei terreni a grana fina).

Categoria topografica T1 = Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15°$.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

Categoria	Descrizione
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	*Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m,* posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Tab. 1 – Categorie Suoli di fondazione (D.M. 14 gennaio 2008)

Prospezione sismica	***V_{S30} (m/s)***	***Categoria Suoli di Fondazione (D.M. 14 gennaio 2008)***	***Categoria Topografica (D.M. 14 gennaio 2008)***
MASW1	***[350 - 358]***	***C***	***T1***
MASW2	***[374 - 417]***	***B***	***T1***
MASW3	***[466 – 484]***	***B***	***T1***
MASW4	***[423 - 442]***	***B***	***T1***
MASW5	***[442 -467]***	***B***	***T1***
MASW6	***[544 - 581]***	***B***	***T1***

Tab. 2 – Categorie Suolo di fondazione e topografica relative alle prospezioni sismiche MASW effettuate.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

7. RISPOSTA SISMICA LOCALE

È noto da tempo che i danni che si manifestano durante un terremoto possono avere dimensioni molto diverse in località tra loro vicine a causa di una differente risposta sismica locale; ad esempio, per lo stesso sisma registrato da strumenti identici e a breve distanza reciproca, uno posto su di una coltre alluvionale di 200*m* di spessore, l'altro su rocce cristalline, fu rilevato un rapporto di ampiezza pari a 5 corrispondente a circa 2 unità della scala sismica delle intensità (Carrara et al., 1992). D'altra parte, lo stesso concetto di magnitudo tiene conto di ciò, legando la sua valutazione all'ampiezza del moto del suolo normalizzata sia mediante una funzione di attenuazione con la distanza, sia mediante un coefficiente di stazione e quest'ultimo è legato, appunto, alla diversa risposta dei siti di registrazione ad uno stesso evento sismico.

Questo fenomeno fu notato per la prima volta un secolo fa quando, durante il tristemente noto terremoto di S. Francisco del 1906, edifici praticamente identici per forma, dimensioni e materiali impiegati, subirono danni sensibilmente diversi (alcuni edifici subirono crolli totali mentre altri subirono danni praticamente trascurabili).

È ormai assodato che le caratteristiche con cui si presenta un sisma in un dato sito sono fortemente dipendenti oltre che dalle caratteristiche della sorgente, dalle modalità di emissione dell'energia e dalla distanza ipocentrale, soprattutto da fattori di risposta locale che modificano la composizione spettrale del sisma.

In sostanza la risposta sismica locale è l'azione di filtro e d'amplificatore esercitata localmente dagli strati più superficiali del terreno sovrapposti ad un basamento roccioso; essa è l'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo a una formazione rocciosa di base (substrato o bedrock), subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti (deposito di copertura) fino alla superficie.

Per una corretta valutazione della risposta sismica locale è quindi indispensabile calcolare gli spettri di risposta elastici delle componenti orizzontale e verticale delle azioni sismiche di progetto.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

La valutazione della risposta sismica locale è stata effettuata secondo i dettami del recente D.M. del 14 gennaio 2008, tramite l'utilizzo del software sperimentale SPETTRI NTC 1.0.3 sviluppato a cura del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ed utilizzando le risultanze delle prospezioni sismiche precedentemente descritte.

Gli spettri di risposta elastici ottenuti sono rappresentativi delle componenti (orizzontale e verticale) delle azioni sismiche di progetto per le tipologie di sito (categorie di suoli **B** e **C –** categoria topografica **T1**) individuate nelle aree oggetto di indagine (vedi par. 7).

La definizione degli spettri di risposta ottenuti sono relativi allo Stato Limite di Esercizio (SLD – Stato Limite di Danno) e allo Stato Limite Ultimo (SLV – Stato Limite di Salvaguardia della Vita).

In un primo stadio è stata individuata la pericolosità del sito sulla base dei risultati del progetto S1 dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia).

In un secondo momento sono stati calcolati gli spettri di risposta elastici relativi all'azione di progetto di riferimento (SLD e SLV).

Gli spettri di risposta così ottenuti sono riportati in allegato (Allegato 2) alla presente relazione illustrativa.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

8. CONCLUSIONI

Il territorio comunale di Eboli (SA) a seguito della riclassificazione sismica del 2002 effettuata dalla Regione Campania, è stato classificato in II categoria – S = 9 - a_g = 0.25g (Fig. 21).

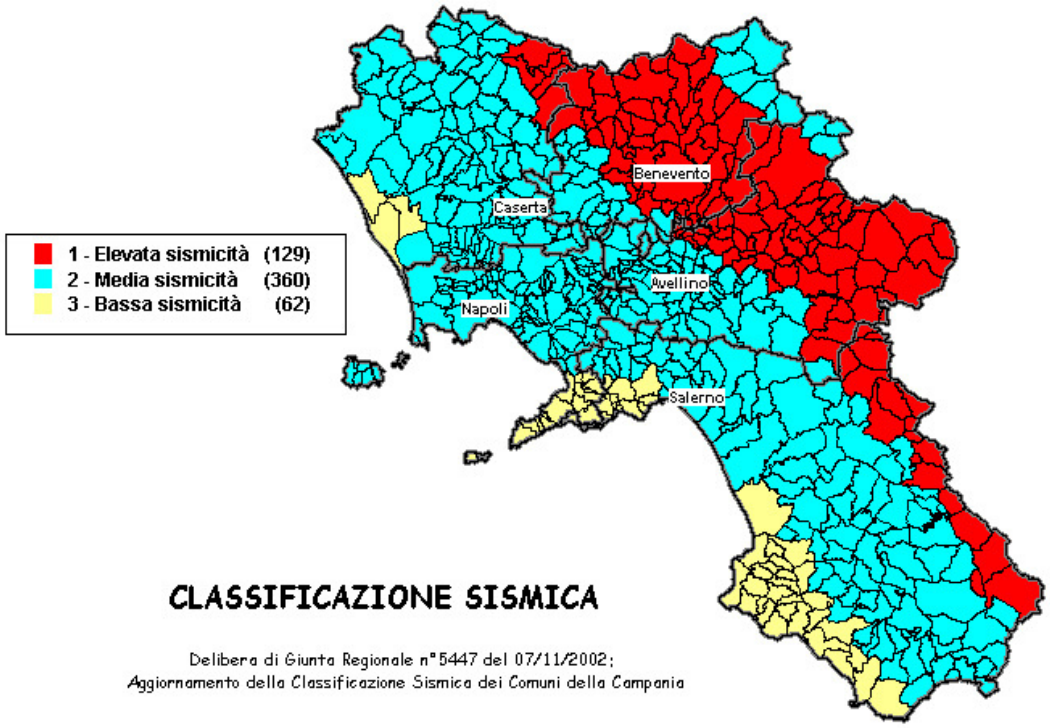

Fig. 21 – Classificazione sismica del 2002 dei comuni della regione Campania. Zona 1, valore di a_g=0.35g; Zona 2, valore di a_g=0.25g; Zona 3, valore di a_g=0.15g.

Inoltre, la Mappa del territorio nazionale per la pericolosità sismica (Fig. 22), disponibile on-line sul sito dell'INGV di Milano, redatta secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008), indica che il territorio comunale di Eboli (SA) rientra nelle celle contraddistinta da valori di a_g di riferimento compresi tra 0.075 e 0.125 (Punti della griglia riferiti a: parametro dello scuotimento a_g; probabilità in 50 anni 10%; Percentile 50).

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

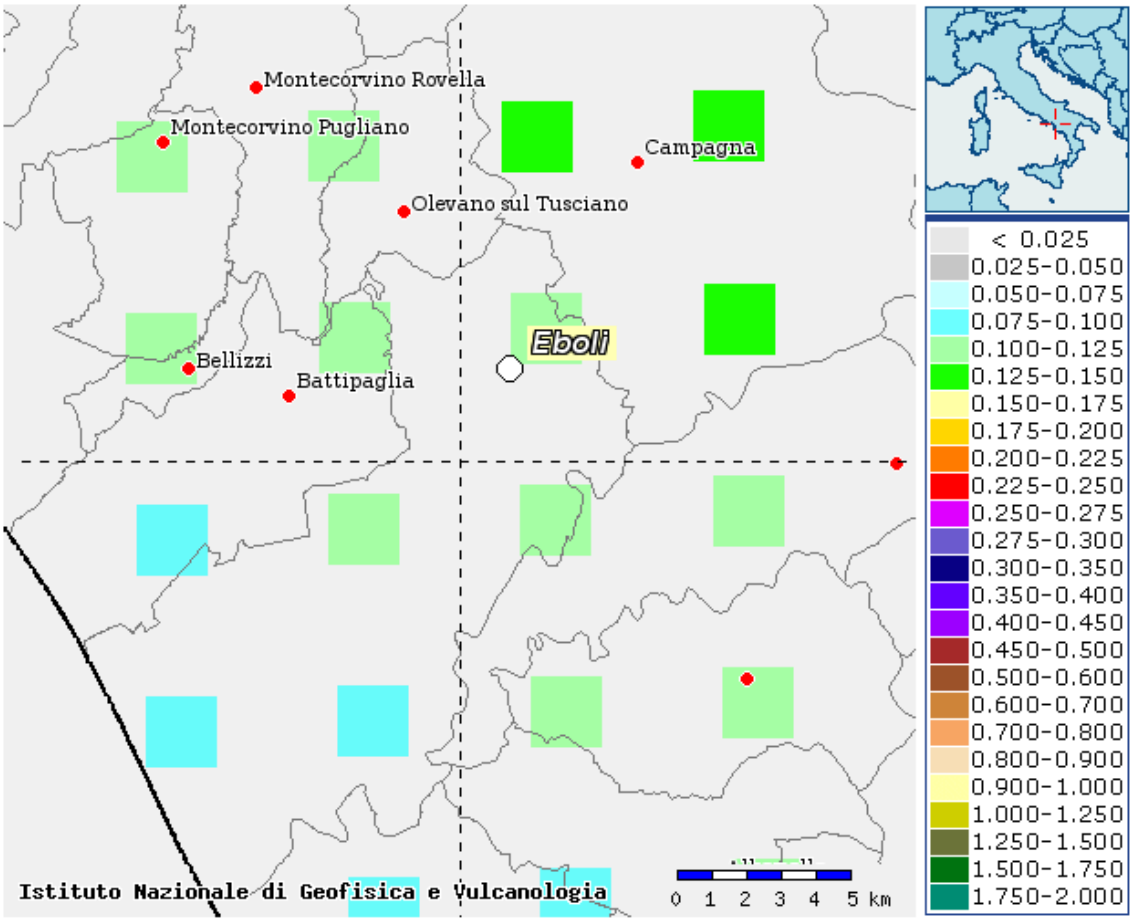

Fig. 26 – Mappa di pericolosità sismica redatta a cura dell'INGV di Milano secondo le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) - Punti della griglia riferiti a: parametro dello scuotimento a_g; probabilità in 50 anni 10%; Percentile 50.

Le indagini sismiche MASW effettuate hanno fornito risultati che collocano i terreni oggetto d'indagine nelle categorie **B** e **C** del D.M. 14 gennaio 2008 (Tab. 2).

Nelle aree oggetto d'indagine il calcolo della componente orizzontale degli spettri di risposta elastici ha fornito valori di a_g, relativamente allo stato limite SLV (Stato Limite di salvaguardia della Vita), pari a:

Prospezione sismica	***a_g***
MASW1	***[0.446]***
MASW2	***[0.357]***
MASW3	***[0.357]***
MASW4	***[0.357]***
MASW5	***[0.357]***
MASW6	***[0.357]***

Tab. 3 – Valori di a_g relativamente allo stato limite SLV – componente orizzontale dello spettro di risposta elastico.

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

Dall'analisi delle prospezioni sismiche effettuate emerge che:

- La sezione sismostratigrafica 2D ottenuta dalla prospezione sismica MASW n. 1 (Fig. 15) è caratterizzata da 3 sismostrati ben definiti. Un primo sismostrato è caratterizzato da V_S mediamente pari a 250*m/s* fino alla profondità di circa 11*m* dal p.c.. Dalla sezione sismostratigrafica si rileva, al di sotto di 11*m* di profondità, un secondo sismostrato con uno spessore di circa 4*m* avente velocità delle onde di taglio V_S pari a tra i 400*m/s*. La sezione termina con velocità sismiche V_S crescenti, comprese tra 500*m/s* e 680*m/s*, da 15*m* fino alla massima profondità d'interesse (33*m* dal p.c.).
- Il modello sismostratigrafico 2D relativo all'indagine sismica MASW n. 2 (Fig. 16), evidenzia 4 sismostrati ben definiti. Il primo sismostrato risulta caratterizzato da V_S pari a 320*m/s* fino alla profondità di circa 3.5*m*. Dal modello sismostratigrafico si rileva, al di sotto di 3.5*m* di profondità, un secondo sismostrato, profondo fino a 8*m* avente velocità delle onde di taglio V_S pari a 180*m/s* (inversione di velocità), non rilevabile con le metodologie classiche di sismica a rifrazione di superficie. Tra 8*m* e 25*m* di profondità dal p.c., si rilevano velocità sismiche crescenti con la profondità (V_S comprese tra 400*m/s* e 680*m/s).* Il quarto ed ultimo sismostrato si individua a partire da 25*m* dal p.c. fino alla massima profondità raggiunta (32*m*), e presenta valori di velocità delle onde *S* pari a circa 1000*m/s*.
- Il modello 2D ricavato dalla prospezione sismica MASW n. 3 (Fig. 17) permette di individuare n. 3 sismostrati ben definiti; il primo sismostrato, molto superficiale, è caratterizzato da V_S pari a 200*m/s* fino alla profondità di circa 3*m* dal p.c.. Al letto si individua un secondo strato con velocità delle onde di taglio comprese tra 300 e 500*m/s*. Lo strato presenta uno spessore di circa 11*m*. Il terzo sismostrato, individuato a partire da 14*m* di profondità dal p.c., presenta valori di velocità crescenti con la profondità (V_S comprese tra 750 e 1000*m/s)* fino alla profondità di 32.5*m*.
- La prospezione MASW n. 4 restituisce una sezione sismostratigrafica

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it

(Fig. 18) in cui è possibile individuare n. 4 sismostrati. Il primo, superficiale, risulta caratterizzato da V_S pari a 180*m/s* fino alla profondità di circa 2.5*m*. Il secondo sismostrato presenta spessori variabili, compresi tra 3.5*m* (seconda acquisizione) e 6.5*m* (prima acquisizione), con valori di V_S compresi tra 200*m/s* e 600*m/s*. Al letto si individua il terzo sismostrato caratterizzato da una netta inversione di velocità, con V_S comprese tra 170*m/s* e 500*m/s*. Quest'ultimo risulta inclinato, e si ritrova tra 6.5*m* e 13*m* di profondità dal p.c. Il quarto sismostrato si ritrova a partire dai 13*m* fino ai 30*m* dal p.c., con valori di V_S mediamente pari a 800*m/s*.

- La sezione sismostratigrafica ottenuta dalla prospezione sismica MASW n. 5 (Fig. 19) risulta caratterizzata, nei primi 7*m* di profondità, da una successione di 4 sismostrati con spessori compresi tra 1.20*m* e 1.80*m*, e con velocità delle onde di taglio estremamente variabili e comprese tra 200*m/s* e 600*m/s*. Al letto si individua un quinto sismostrato, con spessore pari a 6*m*, e con V_S pari a 380*m/s*. Il sesto sismostrato, compreso tra 10*m* e 30*m* di profondità dal p.c. risulta caratterizzato da valori di velocità delle onde di taglio crescenti con la profondità (V_S comprese tra 820*m/s* e 880*m/s*).
- La prospezione MASW n. 6 restituisce una sezione sismostratigrafica (Fig. 20) in cui è possibile individuare n. 3 sismostrati. Il primo risulta caratterizzato da V_S mediamente pari a 300*m/s* fino alla profondità di circa 4*m*. A partire da circa 4*m* e fino a 18*m* di profondità dal p.c. si rileva un secondo sismostrato caratterizzato da valori di V_S crescenti con la profondità e compresi tra 520*m/s* e 750*m/s*. Il terzo sismostrato si ritrova a partire da 18*m* dal p.c. e fino alla profondità di 31*m* ed è caratterizzato da valori delle velocità delle onde di taglio V_S pari a 1050*m/s*.

Tanto dovevansi per l'incarico ricevuto.

Pompei, novembre 2008

I tecnici

Dott. Geol. Francesco Cuccurullo Dott. Geol. Marco Catalano

Dott. Geologo Francesco Cuccurullo – Dott. Geologo Marco Catalano
Via Aldo Moro 5, 80045 Pompei (Na) - tel. 081 / 863.15.05 - cell. 349.60.64.239
P. IVA 04592771218 - mail to: cuccur@libero.it