



DR. ANTONELLO DONNINI & DR. FABRIZIO MANTONI
VIA PIANO DI FRASSINETA, 109 - 60041 SASSOFERRATO (AN)
TEL./FAX.: 0732/862077 - CELL.:338/9056200 - 328/2652947
[MAIL/MSN:SERVIZISISMICI@HOTMAIL.IT](mailto:SERVIZISISMICI@HOTMAIL.IT)

**REGIONE MARCHE
PROVINCIA DI PESARO-URBINO
COMUNE DI FANO**

COMMITTENTE: DR. GEOL. LAURA PELONGHINI

**INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW ESEGUITA
IN VIA CARDARELLI NEL COMUNE DI FANO (PU)**



Sassoferrato, 31 maggio 2010



DR. ANTONELLO DONNINI & DR. FABRIZIO MANTONI
VIA PIANO DI FRASSINETA, 109 - 60041 SASSOFERRATO (AN)
TEL./FAX.: 0732/862077 - CELL.:338/9056200 - 328/2652947
MAIL/MSN:SERVIZISISMICI@HOTMAIL.IT

INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW ESEGUITA IN VIA CARDARELLI NEL COMUNE DI FANO (PU)

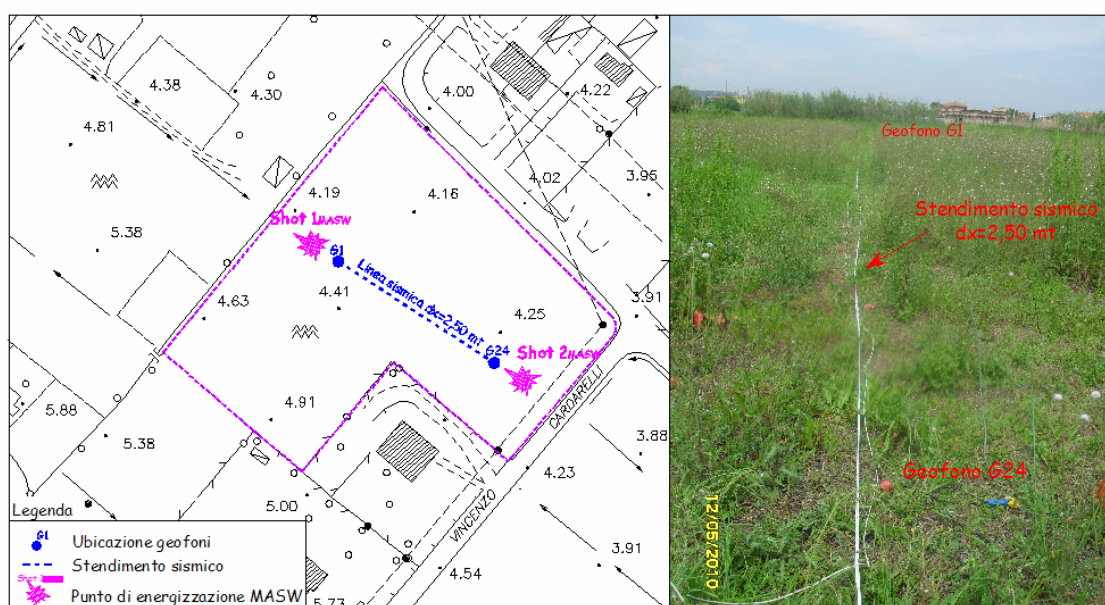
INDICE

| | | |
|----------|---|---------------|
| 1 | PREMESSA | <i>pag. 1</i> |
| 2 | INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW | |
| 2.1 | <i>Analisi multicanale delle onde superficiali</i> | <i>pag. 1</i> |
| 2.2 | <i>Descrizione generale della procedura MASW</i> | <i>pag. 3</i> |
| 2.3 | <i>Strumentazione e metodologia di indagine</i> | <i>pag. 3</i> |
| 3 | RISULTATI E CONCLUSIONI | |
| 3.1 | <i>Classificazione dei terreni di fondazione (Vs30)</i> | <i>pag. 6</i> |

1 PREMESSA

Su incarico ricevuto dal Dr. Geol. Laura Pelonghini è stata eseguita un'indagine geofisica in un'area ricadente in via Cardarelli nel Comune di Fano (PU). L'indagine è consistita nell'esecuzione di n°1 stendimento sismico con metodologia MASW per la determinazione del profilo verticale delle onde di taglio e del valore V_{s30} necessario per la classificazione dei terreni di fondazione dell'intervento in progetto nelle categorie di suolo descritte al paragrafo 3.2.2 delle N.T.C. 2008 "D.M. 14/01/2008".

Ubicazione stendimento sismico



2 INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW

2.1 Analisi multicanale delle onde superficiali

Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali. Le onde di Rayleigh sono generate dall'iterazione tra le onde di pressione e le onde di taglio verticali ogni qualvolta esiste una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo. Alla superficie libera hanno un moto ellittico retrogrado (antiorario) che si inverte ad una profondità di $\lambda/2\pi$. In un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo, la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh è indipendente dalla frequenza e il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente sino ad estinguersi ad una profondità pari circa ad una lunghezza d'onda. Ciò vuol dire che la profondità raggiunta dipende dalla lunghezza d'onda, e che, a diverse lunghezze d'onda corrispondende la stessa velocità di fase. In un mezzo

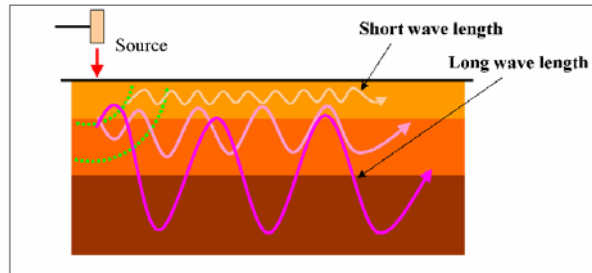


verticalmente eterogeneo, costituito cioè da strati aventi proprietà meccaniche differenti, le onde superficiali presentano un comportamento dispersivo, ossia a frequenza diverse corrispondono diverse velocità di fase. Ciò vuol dire che lunghezze d'onda diverse interessano strati differenti ai quali sono associate proprietà meccaniche diverse: ogni lunghezza d'onda si propaga ad una velocità di fase che dipende dalle caratteristiche dello strato interessato dalla propagazione.

Per ottenere un profilo V_s bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. I dati acquisiti vengono sottoposti ad una fase di *processing* che consente di stimare la curva di dispersione caratteristica del sito in oggetto, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza. Esistono diverse tecniche per estrarre dai sismogrammi acquisiti le caratteristiche dispersive del sito. La metodologia più diffusa è l'analisi spettrale nel dominio $f-k$ (frequenza-numero d'onda). I dati sismici registrati vengono sottoposti ad una doppia trasformata di Fourier che consente di passare dal dominio $x-t$ (spazio-tempo) al dominio $f-k$. Lo spettro $f-k$ del segnale consente di ottenere una curva di dispersione per le onde di Rayleigh, nell'ipotesi che nell'intervallo di frequenze analizzato le onde che si propagano con il maggior contenuto di energia siano proprio le onde di Rayleigh e che le caratteristiche del sito siano tali da consentire la propagazione delle onde superficiali e un comportamento dispersivo delle stesse. La velocità delle onde di Rayleigh è infatti associata ai massimi dello spettro $f-k$; si può così ottenere una curva di dispersione individuando ad ogni frequenza un picco spettrale al quale è associato un numero d'onda k e quindi una velocità delle onde di Rayleigh V_r determinabile in base alla teoria delle onde dalla relazione:

$$V_r(f) = 2\pi f/k$$

Riportando le coppie di valori V_r-f in un grafico si ottiene la curva di dispersione utilizzabile nella successiva fase di inversione. La fase di inversione deve essere preceduta da una parametrizzazione del sottosuolo, che viene di norma schematizzato come un mezzo visco - elastico a strati piano paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati. Il processo di inversione è iterativo: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, il problema diretto viene risolto diverse volte variando i parametri che definiscono il modello. Il processo termina quando viene individuato quel set di parametri di modello che minimizza la differenza tra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione sintetica). Il processo di inversione si basa su algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati che consentono di automatizzare la procedura.

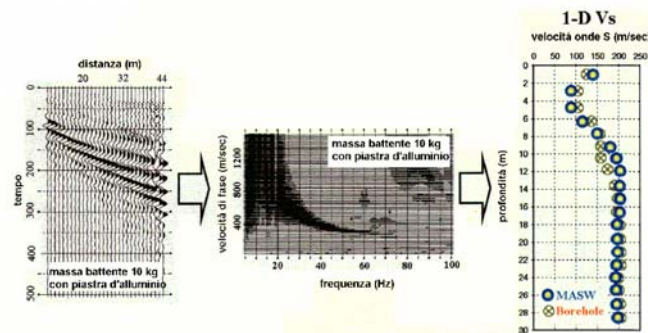


L'illustrazione mostra le proprietà di dispersione delle onde di superficie. Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte) hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S (V_s) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

2.2 Descrizione generale della procedura MASW

La procedura MASW comprende tre passi successivi:

- 1 acquisizione delle onde superficiali (ground roll);
- 2 estrazione della curva di dispersione caratteristica del sito (grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza);
- 3 inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s (profilo 1-D) che descrive la variazione di V_s con la profondità.



2.3 Strumentazione e metodologia di indagine

La prospezione sismica oggetto del presente lavoro è stata eseguita utilizzando un Sismografo multicanale a trasmissione digitale della Sara Electronic Instruments dotato di memoria indipendente per ogni canale in grado di memorizzazione oltre 30.000 campioni. Gli intervalli di campionamento sono programmabili da 5 a 0.05 millisecondi, corrispondenti a frequenze di campionamento da 200 a 20000 Hz. La durata del



campionamento è selezionabile fra 0.1 e 60 secondi. Elevata dinamica (96dB al convertitore, 155dB totale). Impedenza d'ingresso: >100k Ω .. La trasmissione digitale dei dati consente un'elevata silenziosità e immunità ai rumori.

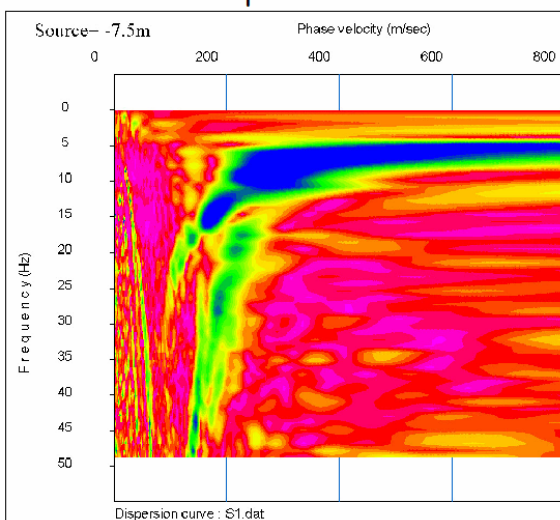
Per la presente indagine si è adottata una frequenza di campionamento pari a 2000 Hz e una durata del campionamento di 2 secondi. Per l'acquisizione delle onde di superficie i sensori sono costituiti da una catena di 24 geofoni verticali *Geo-space GS-11D* da 4.5Hz 4000 ohms equispaziati con interdistanza geofonica di 2,50 mt. Questi sono dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche prodotte da una specifica sorgente.

I fondamenti teorici della metodologia MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali; pertanto una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 15°-20° sia della topografia che delle diverse discontinuità elastiche. Per valutare la validità di monodimensionalità (strati piano paralleli) e la stabilità della curva di dispersione caratteristica del sito, durante la fase di acquisizione si sono eseguiti shots coniugati posti alle estremità opposte dello stendimento.

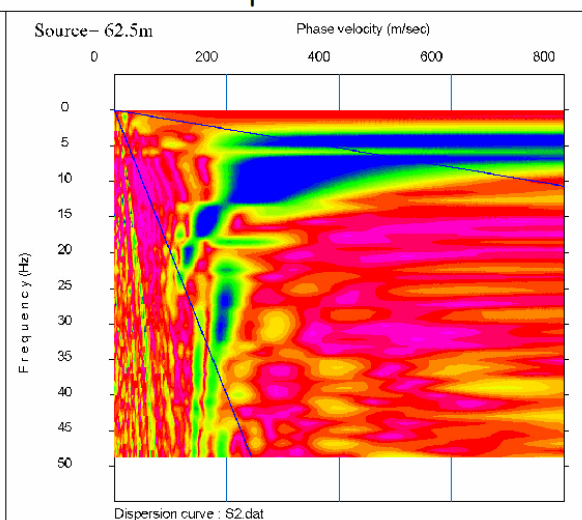
La base sismica con metodologia MASW è stata eseguita con due punti di scoppio coniugati secondo lo schema di seguito riportato:



Curva dispersione Shot 1



Curva dispersione Shot 2



Le curve di dispersione ottenute, riportate nella figura precedente, risultano fra loro simili confermando quindi l'applicabilità della metodologia MASW; il processo di inversione è stato eseguito sulla curva di dispersione ottenuta dallo Shot 1, posto ad una



distanza di 7,50 mt dal geofono G1, meglio definita nell'intervallo di frequenze utilizzato e caratterizzata dal miglior rapporto segnale/rumore e dal minore errore sul fitting con la curva di dispersione sperimentale apparente.

Per ciascun punto di scoppio si sono eseguite più energizzazioni con le tracce che sono state poi sommate al fine di evidenziare il segnale sismico (stack) rispetto ai rumori ambientali presenti.

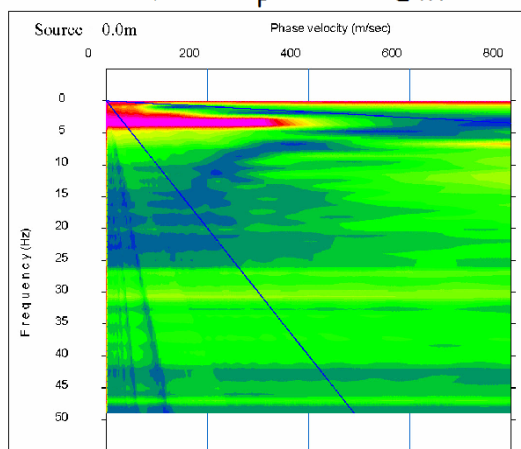
La generazione della perturbazione sismica è avvenuta mediante mazza battente del peso di 8 Kg su piastra metallica. L'istante di tempo zero (segnale di inizio registrazione) viene inviato allo strumento da un sensore di contatto posto all'estremità della mazza usata per energizzare. La morfologia del sito risulta completamente pianeggiante.

Punti di energizzazione MASW



Sulla stessa stesa geofonica è stata eseguita un'indagine con metodologia ReMi basata sull'analisi dei microtremori, che ha confermato i risultati della metodologia MASW, come si vede dal confronto degli spettri ottenuti. I dati sono stati registrati con la strumentazione precedentemente indicata effettuando n°10 registrazioni ad intervalli irregolari nell'arco di $\frac{1}{2}$ ora con un lunghezza di ciascuna acquisizione di 30 sec.

Curva di dispersione RE.MI





3 RISULTATI E CONCLUSIONI

3.1 Classificazione dei terreni di fondazione (Vs30)

L'esecuzione dell'indagine sismica con metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) consente di classificare i terreni di fondazione degli interventi in progetto nelle categorie di suolo descritte al paragrafo 3.2.2 delle N.T.C. 2008 "D.D.L. 14/01/2008".

La metodologia MASW presenta rispetto ad altre tecniche sismiche il vantaggio di non essere limitata dalla presenza di inversioni di velocità, consentendo pertanto l'individuazione di strati soffici compresi tra strati più rigidi o di strati più rigidi compresi tra strati più soffici. Il metodo MASW consente quindi di individuare il profilo di velocità Vs anche in presenza di contrasti di rigidità tra gli strati del suolo. Tale prova fornisce un profilo di velocità Vs monodimensionale. La velocità di propagazione delle onde di taglio dipende dalle proprietà elastiche dei mezzi attraversati e il parametro geofisico Vs30 è quello che meglio rappresenta la condizione geotecnica media dei materiali geologici del sottosuolo dei primi 30 metri. Infatti la velocità di propagazione delle onde trasversali dipende dalle proprietà elastiche del mezzo attraversato, come si evince dalla seguente relazione:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\gamma}}$$

dove γ rappresenta la densità del corpo e μ il modulo di rigidità o modulo di taglio che indica la resistenza di un corpo alle variazioni di forma. Le proprietà elastiche del mezzo sono a loro volta influenzate da numerosi fattori quali la compattezza o il grado di litificazione, la porosità, la tessitura, il grado alterazione e/o fratturazione, la composizione mineralogica, il contenuto di fluidi, la profondità, ecc.

Con Vs30 si definisce la velocità media di propagazione nei primi 30 metri di profondità delle onde di taglio, il cui calcolo viene effettuato utilizzando la seguente espressione:

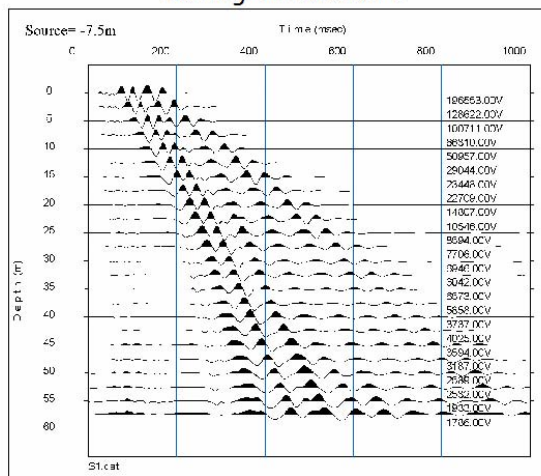
$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}}$$

Dove h_i e V_i indicano lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 metri superiori.

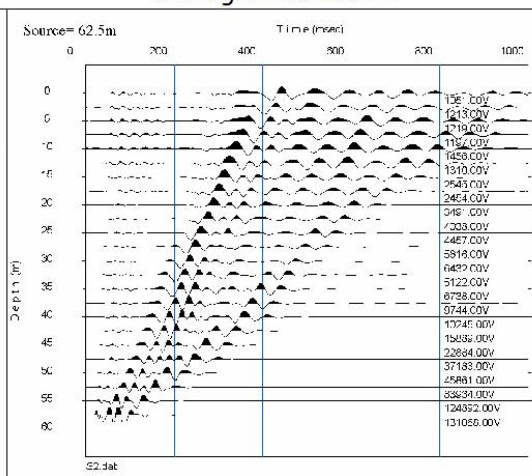
Le diverse fasi di acquisizione ed interpretazione dei dati sismici hanno portato alla creazione dei seguenti elaborati:



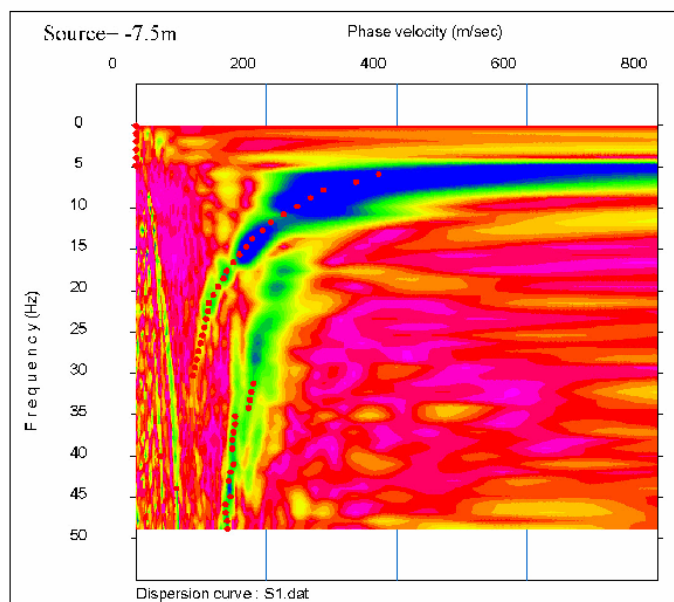
Sismogramma Shot 1



Sismogramma Shot 2

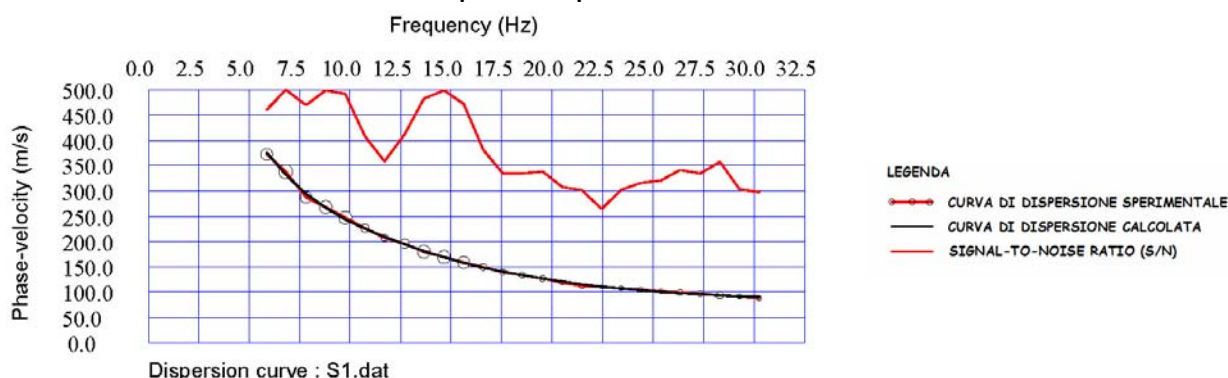


Spettro di velocità e curva di dispersione misurata - Shot 1





Curva di dispersione sperimentale e calcolata - Shot 1



Il profilo verticale delle onde di taglio e il valore V_{s30} necessario per la classificazione dei terreni di fondazione dell'area di interesse nelle categorie di suolo descritte al paragrafo 3.2.2 delle N.T.C. 2008 sono riassunti nella tabella di seguito riportata.

| Profondità (mt) | h_i (mt) | V_i (m/s) | h_i/V_i | V_{s30} (m/s) |
|-----------------|------------|-------------|-----------|---|
| 0.00 ÷ 1.07 | 1,07 | 79 | 0,0135 | $V_{s30} = 294$ m/s Categoria di sottosuolo "C" |
| 1.07 ÷ 2.31 | 1,24 | 120 | 0,0103 | |
| 2.31 ÷ 3.71 | 1,40 | 177 | 0,0079 | |
| 3.71 ÷ 5.27 | 1,57 | 210 | 0,0075 | |
| 5.27 ÷ 7.01 | 1,73 | 251 | 0,0069 | |
| 7.01 ÷ 8.90 | 1,90 | 328 | 0,0058 | |
| 8.90 ÷ 10.96 | 2,06 | 354 | 0,0058 | |
| 10.96 ÷ 13.19 | 2,23 | 348 | 0,0064 | |
| 13.19 ÷ 15.58 | 2,39 | 349 | 0,0068 | |
| 15.58 ÷ 18.13 | 2,55 | 413 | 0,0062 | |
| 18.13 ÷ 20.85 | 2,72 | 450 | 0,0060 | |
| 20.85 ÷ 23.74 | 2,88 | 480 | 0,0060 | |
| 23.74 ÷ 26.79 | 3,05 | 484 | 0,0063 | |
| 26.79 ÷ 30.00 | 3,21 | 503 | 0,0064 | |

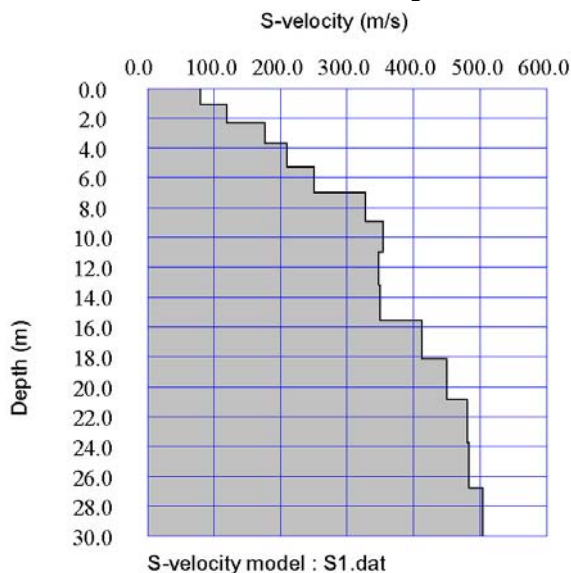
$$\Sigma h_i/V_i = 0,1019$$

Alla luce di quanto precedentemente esposto, i terreni di fondazione del sito oggetto di indagine risultano attribuibili alla categoria di sottosuolo C, come si evince dalla tabella 3.2.II delle N.T.C. 2008.

| | |
|----------|---|
| C | <i>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).</i> |
|----------|---|



Profilo verticale delle onde di taglio - Shot 1



Dal profilo verticale monodimensionale delle Vs sopra riportato si evince un progressivo aumento della velocità di propagazione delle onde di taglio sino alla profondità di 7,00 mt circa dal p.c., oltre la quale il valore di Vs diviene pressoché costante sino a 16,00 mt circa dal p.c.; oltre quest'ultima profondità la velocità delle onde di taglio riprende a crescere gradualmente sino alle profondità indagate.

Sassoferrato, 31 maggio 2010

I Responsabili della prova

