

## **ALLEGATO 7**

### **PROVA SISMICA A METODOLOGIA MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)**



## **PREMESSA**

Lungo il percorso della Flowline sono state eseguite tre (3) prospezioni sismiche con metodologia M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La nuova normativa sismica italiana O.P.C.M. n. 3274/2003 e successive modifiche e integrazioni, la normativa tecnica europea gli Eurocodici EC 7 e EC 8 e le più avanzate normative internazionali attribuiscono la giusta importanza alla caratterizzazione geotecnica sismica del terreno su cui dovranno essere realizzate opere di qualunque natura (edifici residenziali e industriali, opere di sostegno e di stabilizzazione di versanti, rilevati stradali, opere infrastrutturali, argini, dighe e opere idrauliche, gallerie, ponti e opere strutturali di grandi dimensioni, etc..).

La caratterizzazione del terreno dal punto di vista sismico in particolare e dinamico in generale richiede come elemento indispensabile la conoscenza del profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$  degli strati di terreno presenti nel sito, fino alla profondità di almeno 30 m dal piano campagna, secondo quanto richiesto dalle sopraccitate normative. Il profilo delle onde di taglio  $V_s$  nei primi 30 m di profondità risulta necessario per:

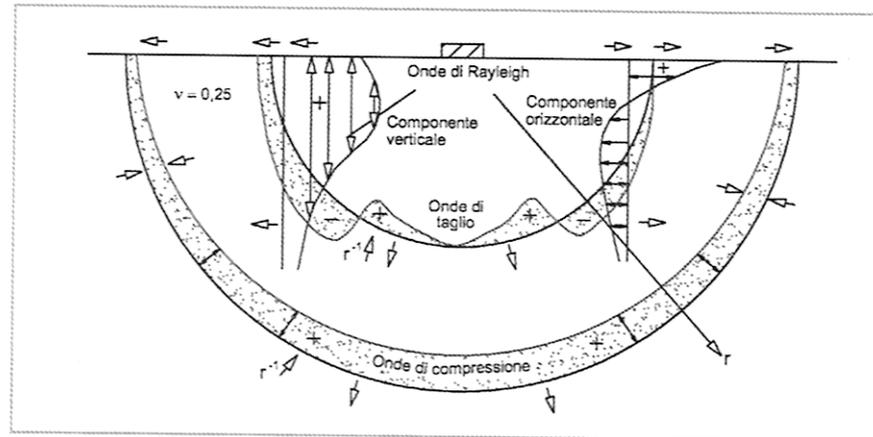
- valutare l'azione sismica di progetto al livello delle fondazioni di qualunque struttura
- valutare il rischio di liquefazione del terreno in sito
- valutare rischi di instabilità dei pendii e/o delle opere di sostegno
- valutare i cedimenti dei rilevati stradali, delle opere di sostegno, delle fondazioni degli edifici
- valutare la trasmissione delle vibrazioni generate dai treni, dalle macchine vibranti, dalle esplosioni in superficie o in sottoterraneo, dal traffico veicolare

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$  nei primi 30 m di profondità è possibile determinare una velocità equivalente  $V_{s30}$  rappresentativa del sito in esame, che consente di classificare il sito come suolo di tipo A, B, C, D, E, secondo la nuova normativa sismica italiana o secondo la normativa europea Eurocodice 8.

---

Nel metodo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) si usano le sole onde di Rayleigh e si trascurano gli effetti dovuti alle onde P e SV, inoltre appare rilevante far notare due aspetti fondamentali: il primo è che le onde Rayleigh trasportano circa i due terzi dell'energia generata dalla sorgente, il secondo è che, allontanandosi dalla sorgente, le onde di Rayleigh subiscono un'attenuazione geometrica inferiore rispetto alle onde P e SV, in quanto si propagano secondo fronti di onda cilindrici, invece le onde P e SV si propagano secondo fronti d'onda sferici.

**Figura 1**  
Onde generate da una sorgente armonica verticale sulla superficie libera di un semispazio omogeneo.  
(da Richart et al., 1970)



Il metodo si suddivide in tre fasi:

- La prima prevede il calcolo della velocità di fase apparente sperimentale;
- La seconda consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica;
- La terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ .

Dopo la determinazione del profilo delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  verticali si procede al calcolo della **velocità equivalente** nei primi 30 metri di profondità, ovvero al calcolo del  $V_{s30}$  con la relativa classificazione del tipo di suolo.

## Tecnica di rilevamento

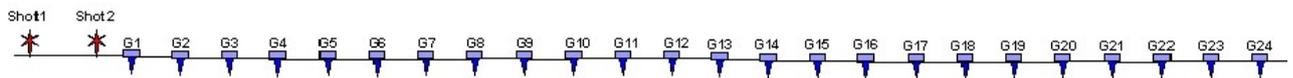
L'indagine si è svolta con l'esecuzione di una prospezione sismica, la geometria degli stendimenti è stata la seguente:

| Stendimento Sismico  | N° Canali | Distanza intergeofonica | Lunghezza base sismica |
|----------------------|-----------|-------------------------|------------------------|
| <i>Prova 1, 2, 3</i> | <i>24</i> | <i>2.5 m</i>            | <i>60m</i>             |

E' stata fissata una distanza intergeofonica di 2.50m. con 24 canali di acquisizione, per una lunghezza complessiva di 60,00m.

Gli scoppi sono stati effettuati secondo la seguente disposizione:

- Shot 1, Shot 2, shot 3 e shot 4 esterni al geofono 1;



**Fig. 1 - Geometria dello stendimento**

La strumentazione utilizzata è il sismografo ECHO 12-24 a 24 canali AMBROGEO dalle seguenti caratteristiche tecniche: gestione a microprocessore, intervalli di campionamento 250  $\mu$ s, 500  $\mu$ s, 1 ms, 2 ms; tempo di campionamento da un min. di 0.2 ms ad un max. di 2 ms; lunghezza di acquisizione da un min. di 32 ms ad un max. di 4096 ms; filtri passa basso 250 Hz; notch 50/60 Hz; risoluzione a 24 bit; acquisizione dei dati e codifica dei file in formato Seg-2 elaborati successivamente con il software Easy M.A.S.W. 2008 (Geostru); per la ricezione delle onde sismiche sono stati utilizzati dei geofoni con frequenza propria di 4.5 Hz.

Le energizzazioni sono state eseguite in linea alle estremità dello stendimento, ad una distanza variabile di 2.50 - 5.00 - 7.50 - 10 metri.



Sismografo utilizzato



Foto 1 – Stendimento Prova 1 MASW



Foto 2 – Stendimento Prova 2 MASW

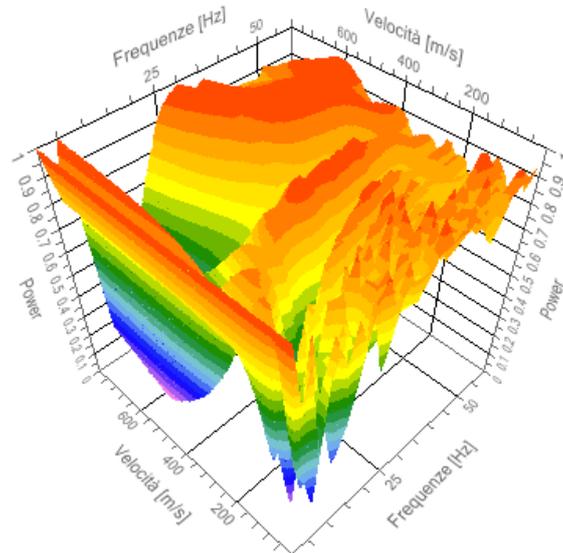


Foto 1 – Stendimento Prova 3 MASW

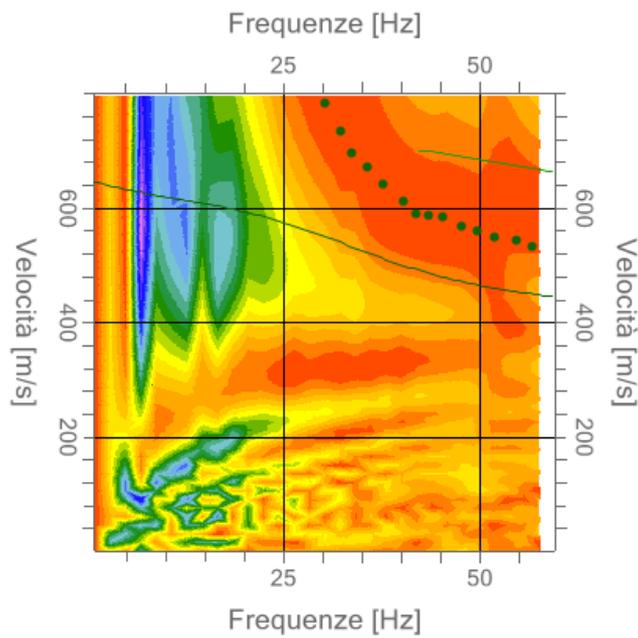
## PROVA 1

## SPETTRO DI VELOCITA' E CURVE DI DISPERSIONE

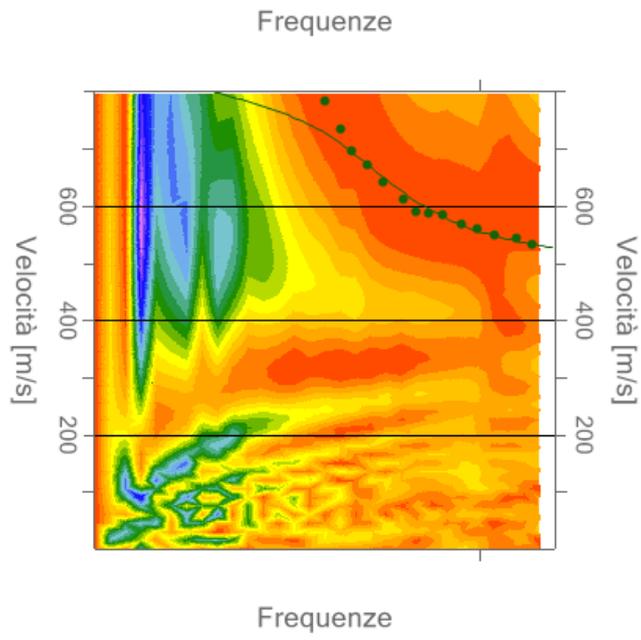
Spettro Velocità di fase - Frequenze



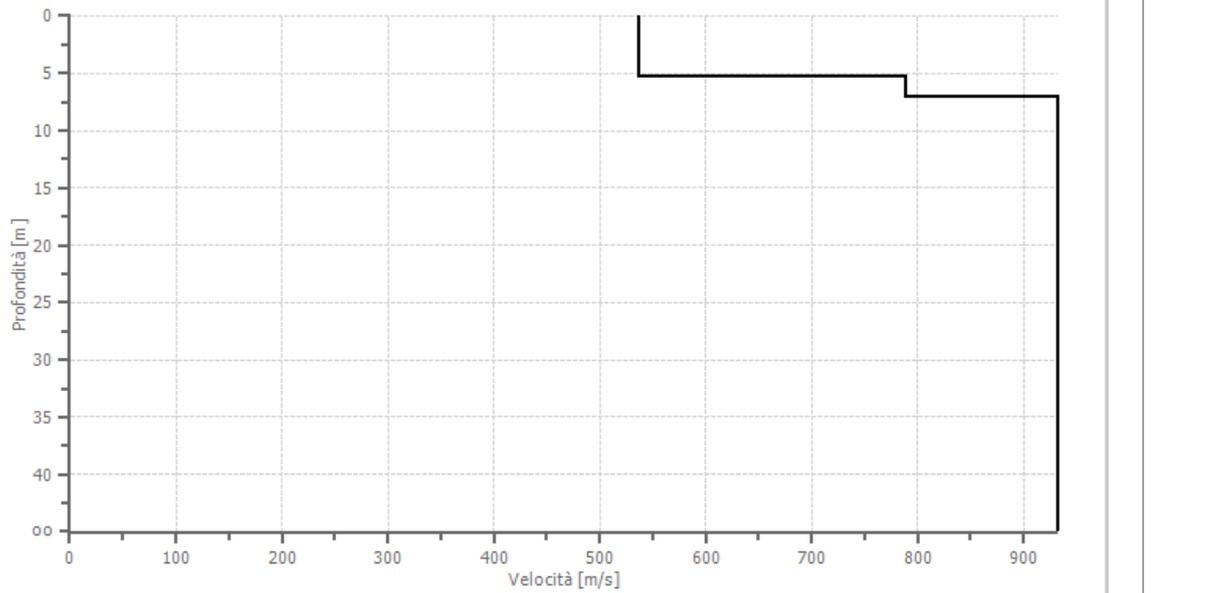
Spettro Velocità di fase - Frequenze



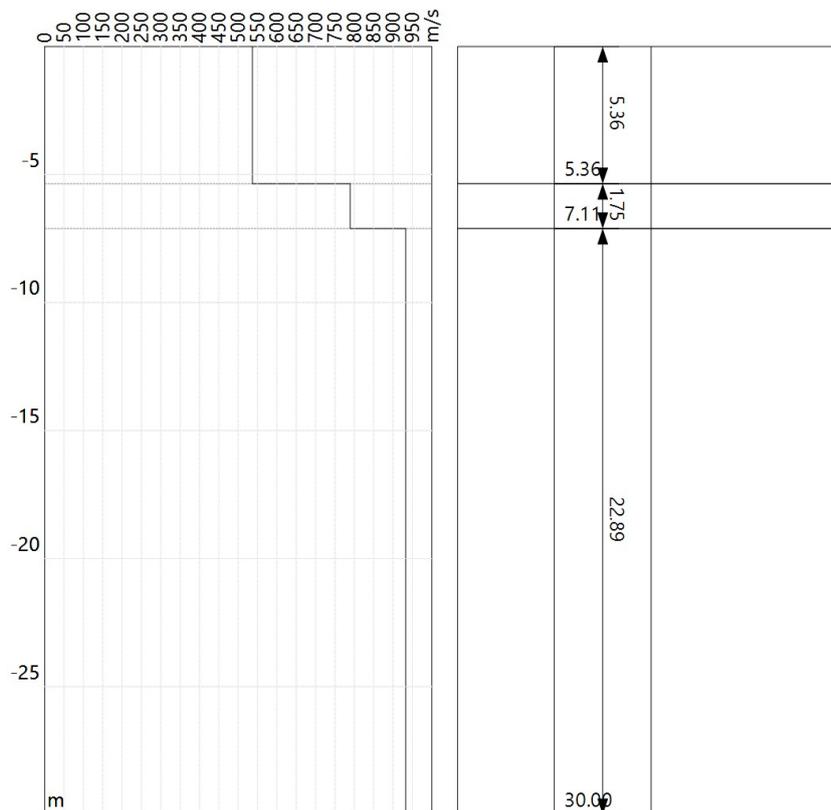
## Inversione



## Profilo di velocità



## SISMOSTRATIGRAFIA



## DATI OTTENUTI DALLA PROVA

| Geotechnical unit | H (m) | Z(m)  | Density Kg/m <sup>3</sup> | Water table | Poisson | Vs (m/s) |
|-------------------|-------|-------|---------------------------|-------------|---------|----------|
| 1                 | 5.36  | -5.36 | 1800.00                   | No          | 0.38    | 536.77   |
| 2                 | 1.75  | -7.11 | 1900.00                   | No          | 0.33    | 789.37   |
| 4                 | ∞     | ∞     | 2000.00                   | No          | 0.24    | 932.61   |

| K (g/cm <sup>3</sup> *m/s) | GO (MPa) | Ed (MPa) | MO (MPa) | Ey (MPa) |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 0.97                       | 36.72    | 518.62   | 1815.16  | 1123.67  |
| 1.50                       | 91.04    | 1183.90  | 4143.65  | 2565.12  |
| 1.87                       | 106.09   | 1739.51  | 6088.27  | 3768.93  |

K: Rigidità Sismica; GO: Modulo di deformazione al taglio; MO: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young;

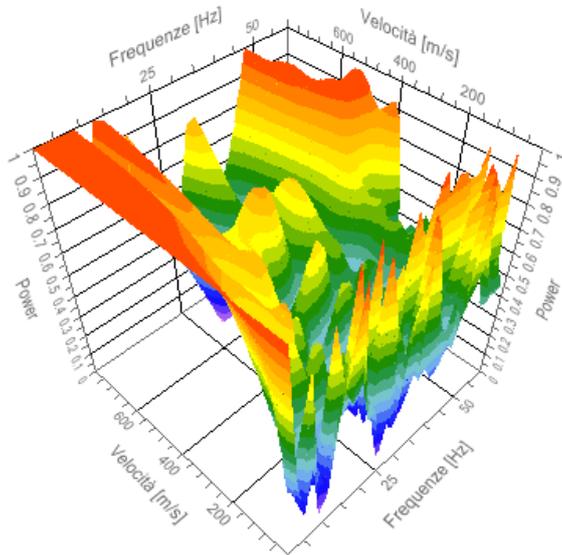
| $VS_{30}$ (m/s) <sup>i</sup> | $VS_{eq}$ (m/s) (NTC 2018) | Categoria di suolo <sup>ii</sup> |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| <b>816.48</b>                | <b>582.66</b>              | <b>B</b>                         |

Nelle NTC 2018 si parla Vs Equivalente ( $VS_{eq}$ ) nel caso in cui il bedrock ( $VS \geq 800$ m/s) si trova ad una profondità minore di 30,00 metri rispetto al p.c..

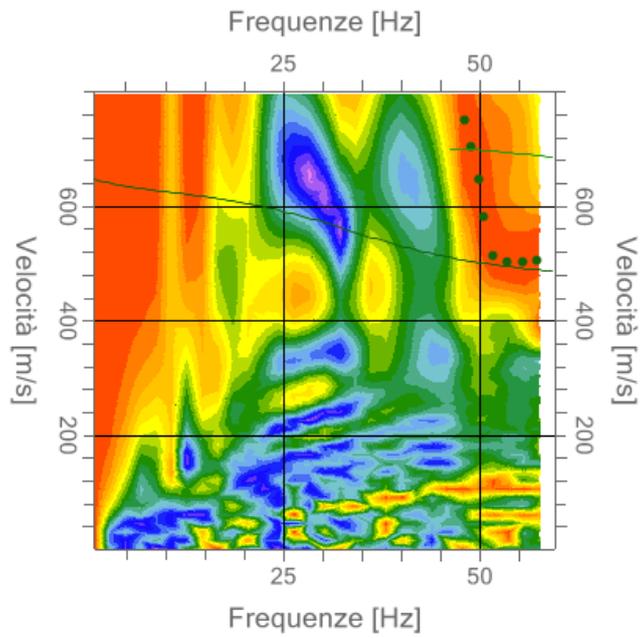
PROVA 2

SPETTRO DI VELOCITA' E CURVE DI DISPERSIONE

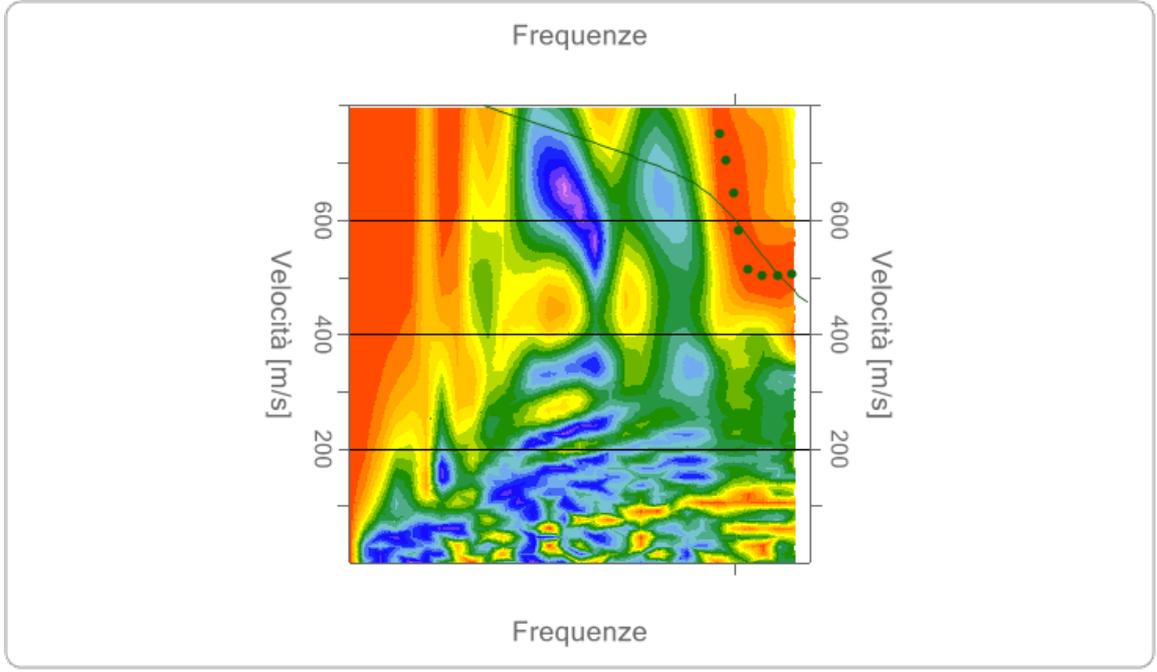
Spettro Velocità di fase - Frequenze



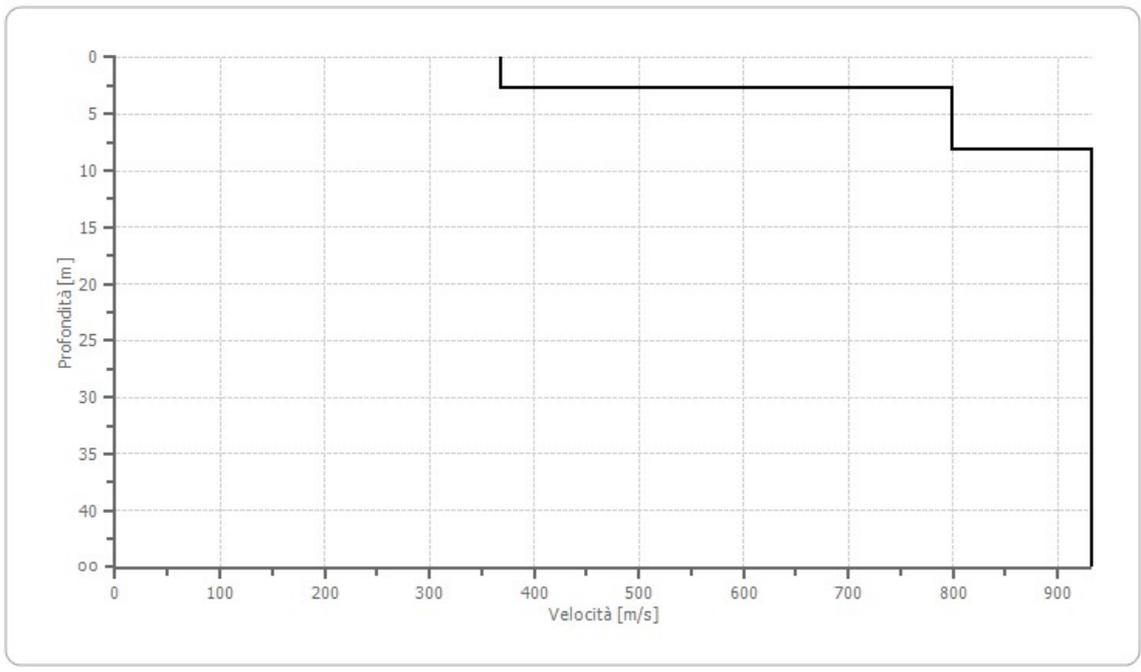
Spettro Velocità di fase - Frequenze



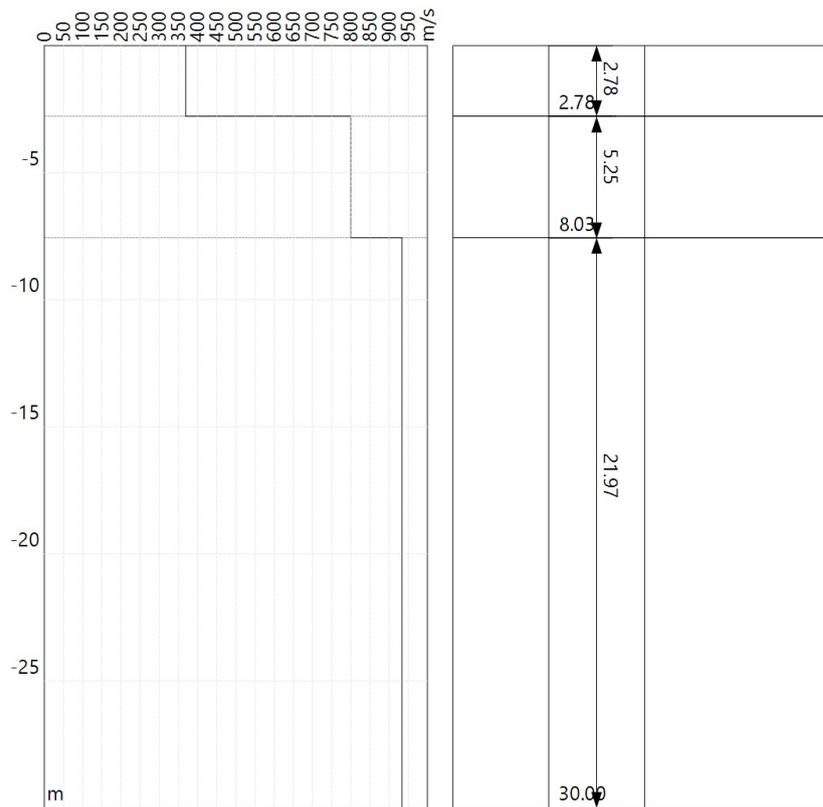
Inversione



Profilo di velocità



## SISMOSTRATIGRAFIA



### DATI OTTENUTI DALLA PROVA

| Geotechnical unit | H (m) | Z(m)  | Density Kg/m <sup>3</sup> | Water table | Poisson | Vs (m/s) |
|-------------------|-------|-------|---------------------------|-------------|---------|----------|
| 1                 | 2.78  | -2.78 | 1800.00                   | No          | 0.38    | 368.89   |
| 2                 | 5.25  | -8.03 | 1900.00                   | No          | 0.33    | 800.00   |
| 4                 | ∞     | ∞     | 2000.00                   | No          | 0.24    | 933.33   |

| K (g/cm <sup>3</sup> *m/s) | GO (MPa) | Ed (MPa) | MO (MPa) | Ey (MPa) |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 0.66                       | 244.94   | 857.31   | 530.71   | 636.86   |
| 1.52                       | 1216.00  | 4256.00  | 2634.67  | 3161.60  |
| 1.87                       | 1742.22  | 6097.78  | 3774.82  | 4529.78  |

K: Rigidità Sismica; GO: Modulo di deformazione al taglio; MO: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young;

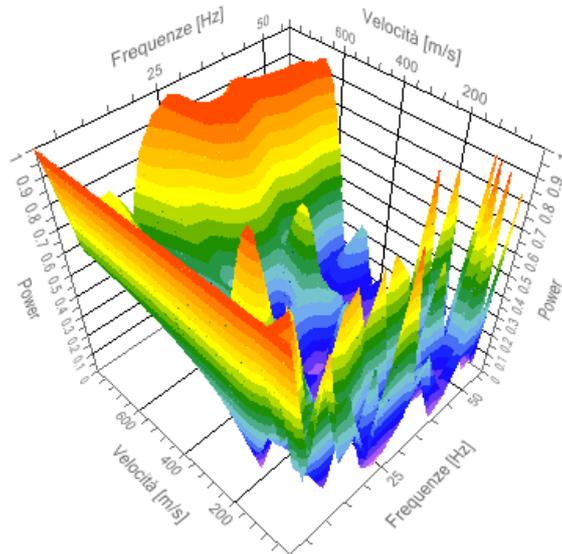
| <i>VS<sub>30</sub></i> (m/s) | <i>VS<sub>eq</sub></i> (m/s) (NTC 2018) | Categoria di suolo |
|------------------------------|---|--------------------|
| <b>812.51</b>                | <b>368.89</b>                           | <b>B</b>           |

Nelle NTC 2018 si parla Vs Equivalente (Vs,eq) nel caso in cui il bedrock (Vs ≥ 800m/s) si trova ad una profondità minore di 30,00 metri rispetto al p.c..

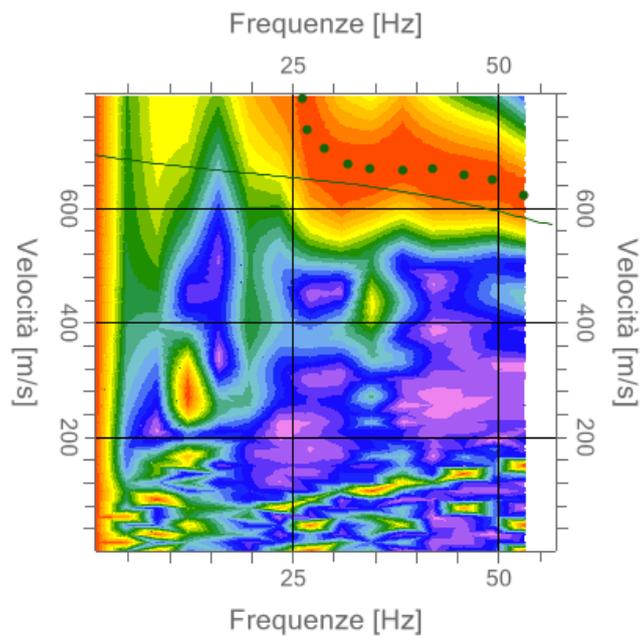
## PROVA 3

## SPETTRO DI VELOCITA' E CURVE DI DISPERSIONE

Spettro Velocità di fase - Frequenze

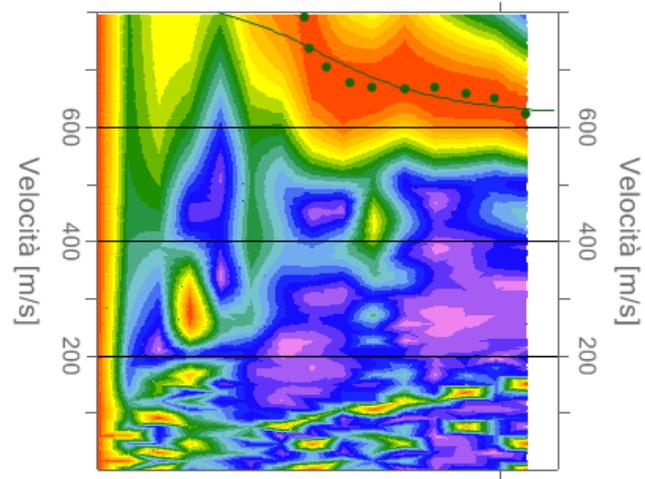


Spettro Velocità di fase - Frequenze



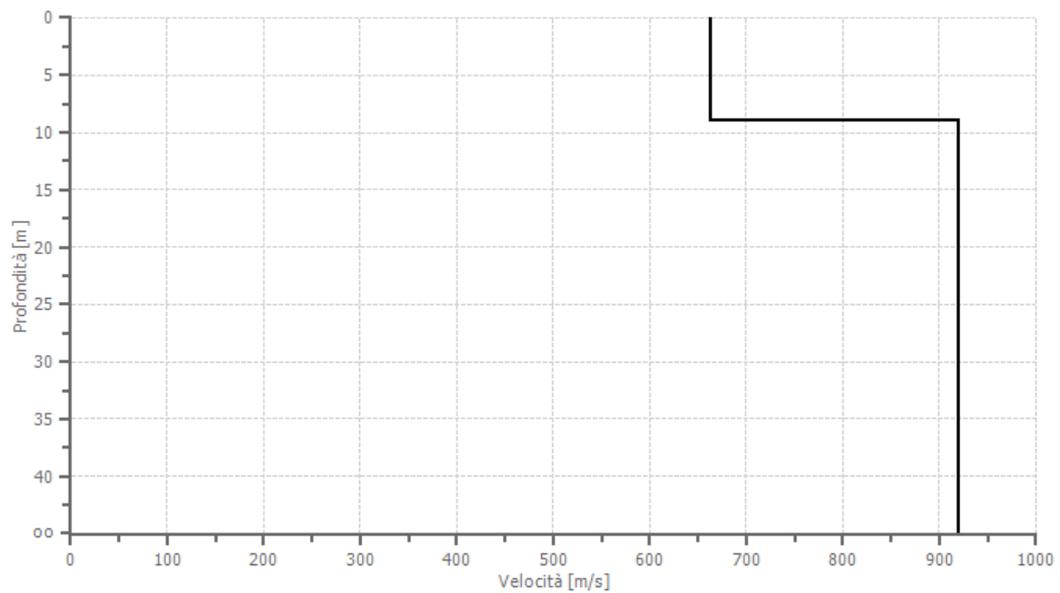
## Inversione

Frequenze

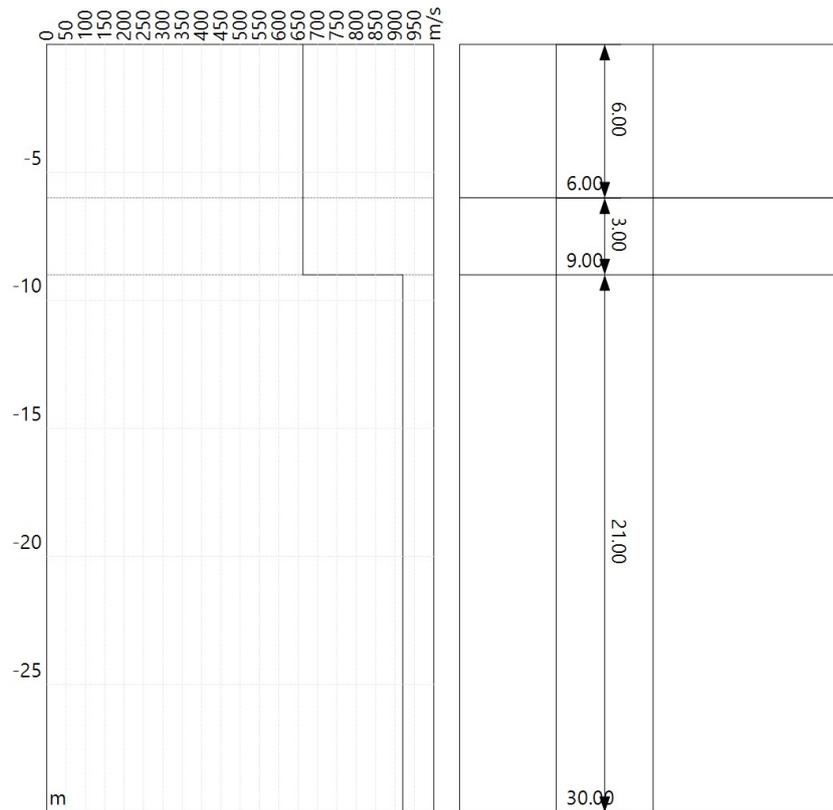


Frequenze

## Profilo di velocità



## SISMOSTRATIGRAFIA



### DATI OTTENUTI DALLA PROVA

| Geotechnical unit | H (m) | Z(m)  | Density Kg/m <sup>3</sup> | Water table | Poisson | Vs (m/s) |
|-------------------|-------|-------|---------------------------|-------------|---------|----------|
| 1                 | 6.00  | -6.00 | 1800.00                   | No          | 0.38    | 661.98   |
| 2                 | 3.00  | -9.00 | 1900.00                   | No          | 0.33    | 662.05   |
| 4                 | ∞     | ∞     | 2000.00                   | No          | 0.24    | 920.17   |

| K (g/cm <sup>3</sup> *m/s) | G0 (MPa) | Ed (MPa) | M0 (MPa) | Ey (MPa) |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 0.66                       | 788.80   | 2760.79  | 1709.06  | 2050.87  |
| 1.52                       | 832.79   | 2914.76  | 1804.37  | 2165.25  |
| 1.87                       | 1693.44  | 5927.03  | 3669.12  | 4402.94  |

K: Rigidità Sismica; G0: Modulo di deformazione al taglio; M0: Modulo di compressibilità volumetrica; Ey: Modulo di Young;

| <i>VS<sub>30</sub></i> (m/s) | <i>VS<sub>eq</sub></i> (m/s) (NTC 2018) | <i>Categoria di suolo</i> |
|------------------------------|---|---------------------------|
| <b>823.82</b>                | <b>662.05</b>                           | <b>B</b>                  |

Nelle NTC 2018 si parla Vs Equivalente (Vs,eq) nel caso in cui il bedrock (Vs ≥ 800m/s) si trova ad una profondità minore di 30,00 metri rispetto al p.c..

---

<sup>i</sup> La classificazione del terreno è di pertinenza del tecnico professionista che ne deve valutare la tipologia sulla base della normativa e del profilo verticale Vs.

<sup>ii</sup> Dalla normativa (modifiche del D.M. 14/09/2005 Norme Tecniche per le Costruzioni, emanate con D.M. Infrastrutture del 14/01/2008, pubblicato su Gazzetta Ufficiale Supplemento ordinario n° 29 del 04/02/2008):

A - Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi, caratterizzati da valori di VS30 superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo di 3 m.

**B - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori del VS30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu30 > 250 kPa nei terreni a grana fina).**

C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m caratterizzati da graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori del VS30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero 15 < NSPT30 < 50 nei terreni a grana grossa e 70 < cu30 < 250 kPa nei terreni a grana fina).

D - Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m caratterizzati da graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori del VS30 inferiori a 180 m/s (ovvero NSPT30 < 15 nei terreni a grana grossa e cu30 < 70 kPa nei terreni a grana fina).

E - Terreni dei sottosuoli dei tipi C o D per spessori non superiori a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con VS > 800 m/s).

**Valsinni, Maggio 2024**

**IL TECNICO**

Dott. Geol. Pasquale Truncellito

