



# REGIONE TOSCANA

## Giunta Regionale

DIREZIONE DIFESA DEL SUOLO E PROTEZIONE CIVILE  
SETTORE GENIO CIVILE VALDARNO SUPERIORE

### DIGA DI LEVANE

### PROGETTO DI SOPRALZO AI FINI DI LAMINAZIONE

### PROGETTO DEFINITIVO

DIRIGENTE RESPONSABILE DEL CONTRATTO

Ing. Gennarino Costabile

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

Ing. Marianna Bigiarini

#### GdL VIA

##### Coordinamento VIA

**ENKI**  
INGEGNERIA

Ing. Andrea Mazzetti  
Ing. Stefano Perilli

##### Componente suolo e sottosuolo

**SINERGIA**  
progettazione e consulenza ambientale srls

Geol. Luca Gardone  
Geol. Emanuele Montini

##### Componente paesaggio

**FRANCHI+ASSOCIATI**

Landscape and urban design

Arch. Gianfranco Franchi  
Arch. Chiara Tesi

##### Componente ambiente

**AMBIENTA**

##### Monitoraggi Ambientali

**erse**  
environment

Dott. Filippo Ferrantini

##### Componente acustica

**Studio Poliedro**  
INGEGNERI ASSOCIATI

Ing. Massimiliano Galletti

##### Componente Flora, Fauna ed Ecosistemi

Biologo Marco Lucchesi

##### Studio Idraulico e idrologico

Settore Genio Civile Valdarno  
Superiore  
Ing. Michele Catella

##### Archeologia

Dott. Hermann Salvadori

CUP PROGETTO

D97B15000170003

OGGETTO ELABORATO

### PUA\_I.10 SONDAGGI GEOGNOSTICI E SISMICA INDAGINI INTEGRATIVE 2023

| redatto | controllato | approvato | scala | emissione/revisione |
|---------|-------------|-----------|-------|---------------------|
| MA      | MA          | MA        | -     | 01                  |
| ----    | ----        | ----      | ----  | ----                |
| ----    | ----        | ----      | ----  | ----                |
| ----    | ----        | ----      | ----  | ----                |

ELABORATO

PUA\_I.10

**IBT Prospezioni Srl**

Località Castiglioni 56      50068 Rufina (FI)

Tel. 055/8397382      Cel. 3485844183

C.F. - Part.IVA 06802820487

**Comune di Montevarchi**  
**Località Levane**  
**Sondaggio a carotaggio continuo**



**Committente:**

.....  
Regione Toscana

**OTTOBRE 2023**

## 1 Premessa

Su incarico della Regione Toscana sono stati realizzati due sondaggi a carotaggio continuo denominati S1 Alto e S2 Basso.

Sono state eseguite cinque prove SPT in avanzamento; i fori sono stati attrezzati con tubo inclinometrico.

I fori hanno una lunghezza di 15 m..

Di seguito sono riportati i risultati dell'indagine svolta.

## 2 Ubicazione dell'area in esame

Il punto di indagine si trova nel comune di Montevarchi (FI) in località Levane all'interno dell'area di pertinenza di della diga ENEL. Le coordinate geografiche WGS84 approssimate dei punti sono:

43.510643, 11.632130

43.510461, 11.632275

La figura seguente riporta uno stralcio di foto aerea con l'ubicazione del punto.



Ubicazione punto di indagine

### **3 Strumentazione utilizzata**

Il sondaggio a carotaggio continuo è stato eseguito con sonda Beretta T41, carotiere semplice diametro 101 mm con avanzamento a secco.

## 4 Sondaggio S1



IMMAGINE DEL SONDAGGIO S1

### 4. Dati riassuntivi del sondaggio eseguito

La profondità raggiunta dal sondaggio è di 15 m dal p.c. Sono state eseguite in avanzamento due prove di permeabilità Lefranc alla profondità rispettivamente di 2.9 e 5.5m

Per la caratterizzazione dei terreni attraversati in fasi avanzamento sono state eseguite due prove SPT:

#### Prove SPT

Spt 1 tra 2,2 e 2,65 m da p.c. – 17/21/23

Spt 2 tra 3,4 e 3,55 m da p.c. – 19/25/28

## Stratigrafia

Da un punto di vista stratigrafico è possibile operare una divisione in livelli. Nel dettaglio la situazione nel punto in esame può essere riassunta come segue:

- 0-2m - Sabbie e sabbie limose addensate di colore marrone nocciola
- 2-4.3m – Alternanze di argilliti e arenarie con arilliti prevalenti colore grigio marrone.
- 4.3-8.0m – Alternanze di argilliti e arenarie/marne in rapporto di 3:1 colore marrone grigio i livelli arenace appaiono fratturati.
- 8-15.0 – Arenarie con rari livelli argillitici RQD 40-70%

## RQD

I valori di RQD sono stati valutati lungo la verticale e riassunti nella seguente tabella:

| Battuta   | RQD (%) |
|-----------|---------|
| 4.3-5     | 10      |
| 6.3-7.2   | 10      |
| 7.7-9     | 60      |
| 9-9.6     | 30      |
| 9.6-10    | 20      |
| 10-11     | 50      |
| 11.9-12.6 | 10      |
| 12.6-14.1 | 50      |
| 14.1-14.8 | 30      |
| 14.8-15   | 30      |



## 5 Sondaggio S2



IMMAGINE DEL SONDAGGIO S1

### 4. Dati riassuntivi del sondaggio eseguito

La profondità raggiunta dal sondaggio è di 15 m dal p.c. Sono state eseguite in avanzamento due prove di permeabilità Lefranc alla profondità rispettivamente di 2.5 e 6.5m. È stato provato il prelievo di campioni indisturbati in fase di avanzamento; questa operazione non ha avuto successo causa il danneggiamento delle fustelle dovuto all'elevata resistenza del terreno nel punto del tentativo del campionamento.

Per la caratterizzazione dei terreni attraversati in fasi avanzamento sono state eseguite tre prove SPT:

#### Prove SPT

Sondaggi a carotaggio - Prove penetrometriche – Indagini Sismiche

---

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| Spt 1 tra 2,0 e 2,45 m da p.c. | – 5/7/8    |
| Spt 2 tra 3,5 e 4.0 m da p.c.  | – 7/9/9    |
| Spt 3 tra 8 e 8,45 m da p.c.   | – 13/17/21 |

## **Stratigrafia**

Da un punto di vista stratigrafico è possibile operare una divisione in livelli. Nel dettaglio la situazione nel punto in esame può essere riassunta come segue:

- 0-1.5m - Detrito con clasti arenacei in matrice argilloso sabbiosa colore grigio marrone
- 1.5-7.3m – Sabbie limoso argillose compatte colore marrone grigio.
- 7.3-11.4m – Argilliti e arenarie con argilliti prevalenti di colore marrone.
- 11.4-15.0 – Argilliti e marne con livelli argillitici talora fogliettati di colore grigio azzurro

## 5. Inerti

Si riporta in inserto :

- documentazione fotografica
- stratigrafia del sondaggio

## Documentazione Fotografica S1



Cassetta 1 – 0-5 m



Cassetta 2 – 5-10 m



Cassetta 3 – 10-15 m

## Documentazione Fotografica S2



Cassetta 1 – 0-5 m



Cassetta 2 – 5-10 m



Cassetta 3 – 10-15 m

Loc. Castiglioni 56 50068 Rufina  
 Numero REA FI - 657392  
 CF - PIVA 06802820487

|                                     |                                 |                                      |                            |  |
|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--|
| Committente<br>Regione Toscana      | Profondità raggiunta<br>-15     | Quota Ass. P.C.                      | Certificato n°<br>021023-1 | Pagina                                 |
| Operatore<br>Alberto Iotti          | Indagine<br>Diga di Levane (AR) | Note1<br>Attrezzato con inclinometro |                            | Inizio/Fine Esecuzione<br>02/10/2023   |
| Responsabile<br>Dott. Alberto Iotti | Sondaggio<br>S1                 | Tipo Carotaggio<br>Continuo          | Tipo Sonda<br>Beretta T41  | Coordinate X Y<br>43.510643, 11.632130 |

| Scala (m) | Litologia | Descrizione   | Quota | Parametri geotecnici | S.P.T. (n° Colpi)    | Pocket Test kg/cmq | Vane Test kg/cmq | Campioni | Metodo Perforazione | Metodo Stabilizzaz. | Cass. Catalog. Falda | Altre prove | Altre prove  |
|-----------|-----------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|----------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------|--------------|
| -1        |           | Sabbie e sabbie limose addensate di colore marrone nocciola   | 2.00  | %C=100               |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |              |
| -2        |           | Alternanze di argilliti e arenarie con argilliti prevalenti colore grigio marrone                                       | 2.30  | %C=100               | 17-21-24<br>-2.20 PC |                    |                  |          |                     |                     |                      | LF1         | ↑ ↓<br>-2.90 |
| -4        |           | Alternanze di argilliti e arenarie/marne in rapporto di 3:1 colore marrone grigio i livelli arenace appaiono fratturati | 3.70  | %C=100               | 19-25-28<br>-3.40 PC |                    |                  |          |                     |                     | 1                    | LF2         | ↑ ↓<br>-5.50 |
| -8        |           | Arenarie con rari livelli argillitici RQD 40-70%  | 7.00  | %C=100               |                      |                    |                  |          |                     |                     | 2                    |             |              |
| -14       |           |   |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     | 3                    |             |              |

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT  
 Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua  
 Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici  
 Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa  
 Carotaggio: Continuo  
 Sonda: Beretta T41

Responsabile

Loc. Castiglioni 56 50068 Rufina  
 Numero REA FI - 657392  
 CF - PIVA 06802820487

|                                     |                                 |                                      |                            |  |
|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--|
| Committente<br>Regione Toscana      | Profondità raggiunta<br>-15     | Quota Ass. P.C.                      | Certificato n°<br>031023-1 | Pagina                                 |
| Operatore<br>Alberto Iotti          | Indagine<br>Diga di Levane (AR) | Note1<br>Attrezzato con inclinometro |                            | Inizio/Fine Esecuzione<br>03/10/2023   |
| Responsabile<br>Dott. Alberto Iotti | Sondaggio<br>S2                 | Tipo Carotaggio<br>Continuo          | Tipo Sonda<br>Beretta T41  | Coordinate X Y<br>43.510461, 11.632275 |

| Scala (m) | Litologia | Descrizione   | Quota | Parametri geotecnici | S.P.T. (n° Colpi)    | Pocket Test kg/cmq | Vane Test kg/cmq | Campioni | Metodo Perforazione | Metodo Stabilizzaz. | Cass. Catalog. Falda | Altre prove | Altre prove |
|-----------|-----------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|----------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------|-------------|
| -1        |           | Detrito con clasti arenacei in matrice argilloso sabbiosa colore grigio marrone       | 1.50  | % C=100              |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -2        |           | sabbie limoso argillose compatte colore marrone grigio                                |       |                      | 5/7/8<br>-2.00 PC    |                    |                  |          |                     |                     |                      | LF1         |             |
| -3        |           |   |       |                      | 7/9/9<br>-3.50 PC    |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -4        |           |   | 5.80  | % C=100              |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -5        |           |   |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     | 1                    | LF2         |             |
| -6        |           |   |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -7        |           |   |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -8        |           | Argilliti e arenarie con argilliti prevalenti di colore marrone                       |       |                      | 13/17/22<br>-8.00 PC |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -9        |           |   | 4.10  | % C=100              |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -10       |           |   |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     | 2                    |             |             |
| -11       |           |   |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -12       |           | Argilliti e marne con livelli argillitici talora fogliettati di colore grigio arrosso |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -13       |           |   | 3.60  | % C=100              |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
| -14       |           |   |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     |                      |             |             |
|           |           |   |       |                      |                      |                    |                  |          |                     |                     | 3                    |             |             |

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato , Rs-Rimaneggiato da SPT  
 Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua  
 Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici  
 Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa  
 Carotaggio: Continuo  
 Sonda: Beretta T41

Responsabile

Loc. Castiglioni 56 - 50068 Rufina (FI)  
 CF- PI 06802820487  
 Numero REA FI - 657392  
 e mail albertoiotti.ai@gmail.com

## PROVA DI PERMEABILITÀ LEFRANC - PROVA PER IMMISSIONE A CARICO VARIABILE

COMMITTENTE: **Regione Toscana**

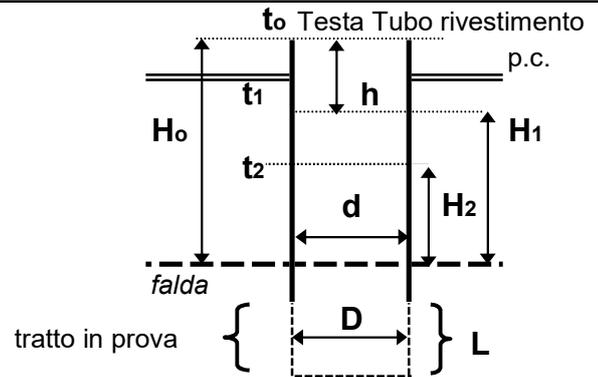
CANTIERE: **Levane**

SONDAGGIO n°: **S1 alto**

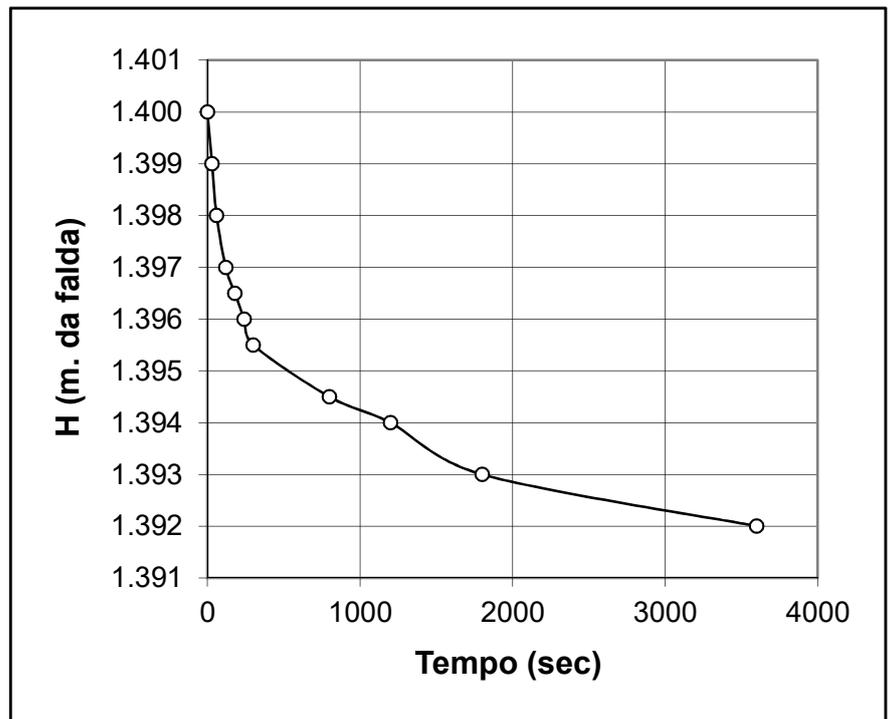
PROVA n°: **1**

DATA: **02/10/23**

|                           |              |              |   |      |
|---------------------------|--------------|--------------|---|------|
| TRATTO IN PROVA           | m da p.c. da | 2.90         | a | 3.40 |
| TEMPO DI PROVA            | minuti       | <b>60.00</b> |   |      |
| PROFONDITÀ FONDO FORO     | m da p.c.    | <b>-3.40</b> |   |      |
| PROFONDITÀ RIVESTIMENTC   | m da p.c.    | <b>-2.90</b> |   |      |
| ALTEZZA T.T. RIVESTIMENTO | m da p.c.    | <b>0.40</b>  |   |      |
| LIVELLO DELLA FALDA       | m da p.c.    | <b>-1.00</b> |   |      |
| LUNGHEZZA TASCA           | L m          | <b>0.50</b>  |   |      |
| DIAMETRO TASCA            | D m          | <b>0.101</b> |   |      |
| DIAMETRO RIVESTIMENTO     | d m          | <b>0.101</b> |   |      |



| t (sec) | Livello da T.T. (m) | h m da p.c. | H m   | K m/sec  |
|---------|---------------------|-------------|-------|----------|
| 0       | 0.000               | 0.400       | 1.400 |          |
| 30      | -0.001              | 0.399       | 1.399 | 3.50E-08 |
| 60      | -0.002              | 0.398       | 1.398 | 3.50E-08 |
| 120     | -0.003              | 0.397       | 1.397 | 1.75E-08 |
| 180     | -0.004              | 0.397       | 1.397 | 8.76E-09 |
| 240     | -0.004              | 0.396       | 1.396 | 8.76E-09 |
| 300     | -0.005              | 0.396       | 1.396 | 8.77E-09 |
| 800     | -0.006              | 0.395       | 1.395 | 2.10E-09 |
| 1200    | -0.006              | 0.394       | 1.394 | 1.32E-09 |
| 1800    | -0.007              | 0.393       | 1.393 | 1.76E-09 |
| 3600    | -0.008              | 0.392       | 1.392 | 5.86E-10 |



**K = 1.20E-08 m/sec**  
 media sull'intero intervallo

**K = 1.44E-09 m/sec**  
 media sul tratto ad abbassamento uniforme

LITOLOGIA TRATTO IN PROVA: **argilliti**

Loc. Castiglioni 56 - 50068 Rufina (FI)  
 CF- PI 06802820487  
 Numero REA FI - 657392  
 e mail albertoiotti.ai@gmail.com

## PROVA DI PERMEABILITÀ LEFRANC - PROVA PER IMMISSIONE A CARICO VARIABILE

COMMITTENTE: **Regione Toscana**

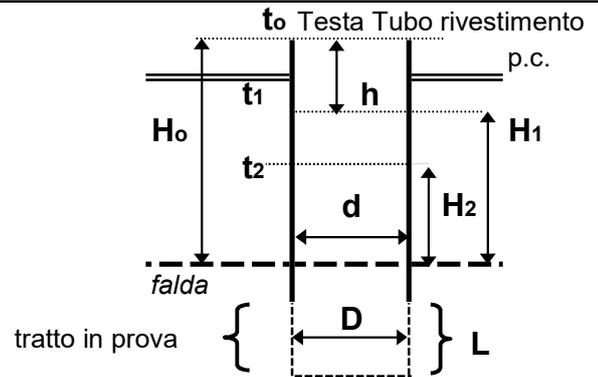
CANTIERE: **Levane**

SONDAGGIO n°: **S1 Alto**

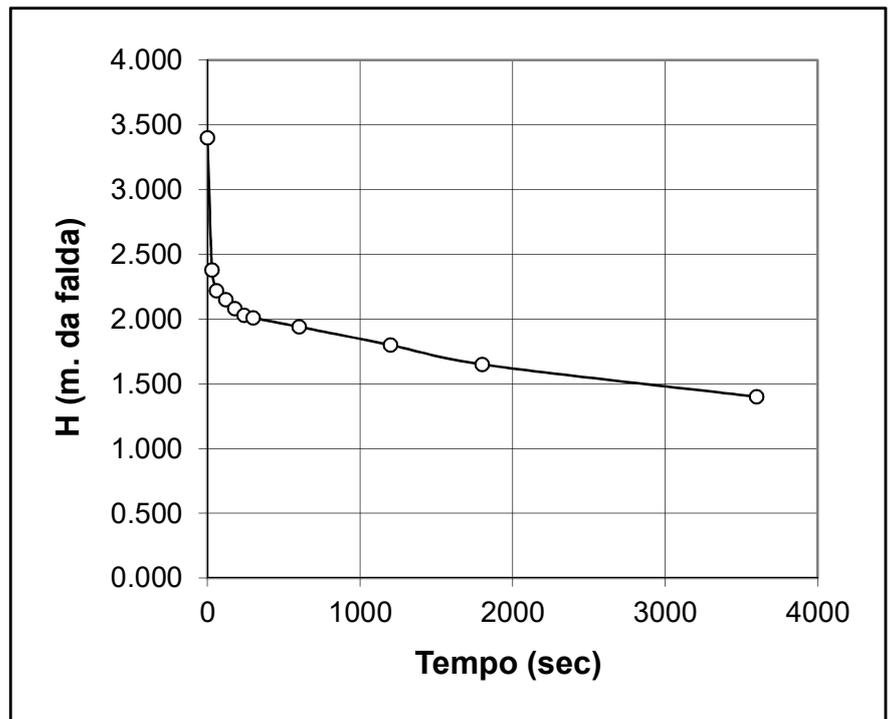
PROVA n°: **2**

DATA: **03/10/23**

|                           |              |              |   |      |
|---------------------------|--------------|--------------|---|------|
| TRATTO IN PROVA           | m da p.c. da | 5.50         | a | 6.00 |
| TEMPO DI PROVA            | minuti       | <b>60.00</b> |   |      |
| PROFONDITÀ FONDO FORO     | m da p.c.    | <b>-6.00</b> |   |      |
| PROFONDITÀ RIVESTIMENTC   | m da p.c.    | <b>-5.50</b> |   |      |
| ALTEZZA T.T. RIVESTIMENTO | m da p.c.    | <b>0.40</b>  |   |      |
| LIVELLO DELLA FALDA       | m da p.c.    | <b>-3.00</b> |   |      |
| LUNGHEZZA TASCA           | L m          | <b>0.50</b>  |   |      |
| DIAMETRO TASCA            | D m          | <b>0.101</b> |   |      |
| DIAMETRO RIVESTIMENTO     | d m          | <b>0.101</b> |   |      |



| t (sec) | Livello da T.T. (m) | h m da p.c. | H m   | K m/sec  |
|---------|---------------------|-------------|-------|----------|
| 0       | 0.000               | 0.400       | 3.400 |          |
| 30      | -1.020              | -0.620      | 2.380 | 1.75E-05 |
| 60      | -1.18               | -0.780      | 2.220 | 3.41E-06 |
| 120     | -1.250              | -0.850      | 2.150 | 7.84E-07 |
| 180     | -1.320              | -0.920      | 2.080 | 8.10E-07 |
| 240     | -1.370              | -0.970      | 2.030 | 5.95E-07 |
| 300     | -1.390              | -0.990      | 2.010 | 2.42E-07 |
| 600     | -1.460              | -1.060      | 1.940 | 1.73E-07 |
| 1200    | -1.600              | -1.200      | 1.800 | 1.83E-07 |
| 1800    | -1.750              | -1.350      | 1.650 | 2.13E-07 |
| 3600    | -2.000              | -1.600      | 1.400 | 1.34E-07 |



**K = 2.40E-06 m/sec**  
 media sull'intero intervallo

**K = 1.76E-07 m/sec**  
 media sul tratto ad abbassamento uniforme

LITOLOGIA TRATTO IN PROVA: **Argilliti e marne**

Loc. Castiglioni 56 - 50068 Rufina (FI)  
 CF- PI 06802820487  
 Numero REA FI - 657392  
 e mail albertoiotti.ai@gmail.com

## PROVA DI PERMEABILITÀ LEFRANC - PROVA PER IMMISSIONE A CARICO VARIABILE

COMMITTENTE: **Regione Toscana**

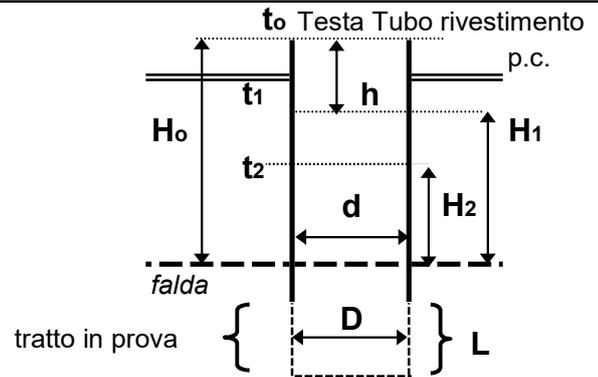
CANTIERE: **Levane**

SONDAGGIO n°: **S2 Basso**

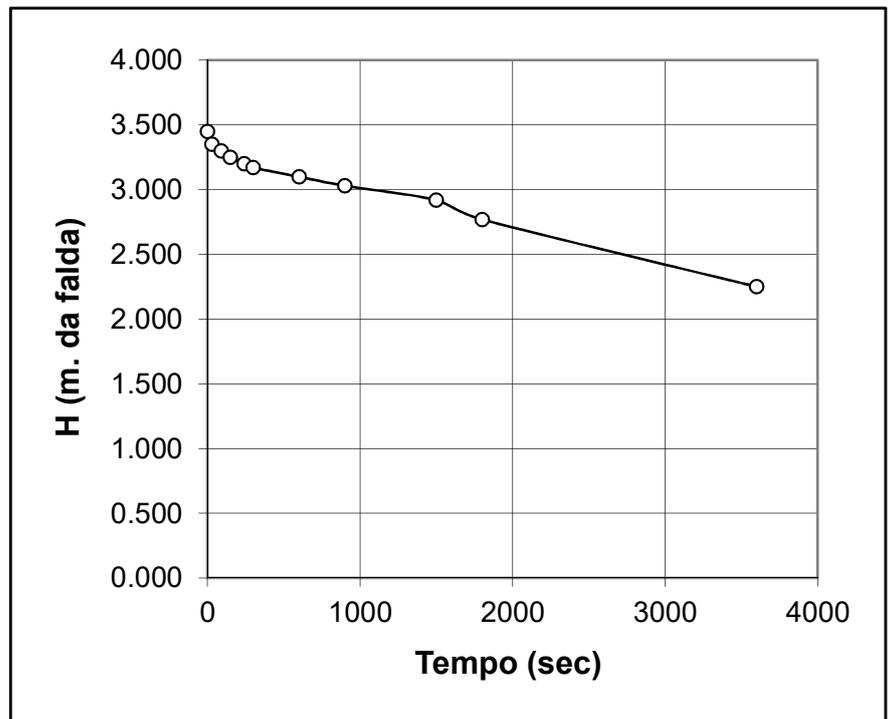
PROVA n°: **1**

DATA: **03/02/23**

|                           |              |              |   |      |
|---------------------------|--------------|--------------|---|------|
| TRATTO IN PROVA           | m da p.c. da | 2.50         | a | 3.00 |
| TEMPO DI PROVA            | minuti       | <b>60.00</b> |   |      |
| PROFONDITÀ FONDO FORO     | m da p.c.    | <b>-3.00</b> |   |      |
| PROFONDITÀ RIVESTIMENTC   | m da p.c.    | <b>-2.50</b> |   |      |
| ALTEZZA T.T. RIVESTIMENTO | m da p.c.    | <b>0.00</b>  |   |      |
| LIVELLO DELLA FALDA       | m da p.c.    | <b>-3.45</b> |   |      |
| LUNGHEZZA TASCA           | L m          | <b>0.50</b>  |   |      |
| DIAMETRO TASCA            | D m          | <b>0.101</b> |   |      |
| DIAMETRO RIVESTIMENTO     | d m          | <b>0.101</b> |   |      |



| t (sec) | Livello da T.T. (m) | h m da p.c. | H m   | K m/sec  |
|---------|---------------------|-------------|-------|----------|
| 0       | 0.000               | 0.000       | 3.450 |          |
| 30      | -0.100              | -0.100      | 3.350 | 1.44E-06 |
| 90      | -0.15               | -0.150      | 3.300 | 3.68E-07 |
| 150     | -0.200              | -0.200      | 3.250 | 3.74E-07 |
| 240     | -0.250              | -0.250      | 3.200 | 2.53E-07 |
| 300     | -0.280              | -0.280      | 3.170 | 2.30E-07 |
| 600     | -0.350              | -0.350      | 3.100 | 1.09E-07 |
| 900     | -0.420              | -0.420      | 3.030 | 1.12E-07 |
| 1500    | -0.530              | -0.530      | 2.920 | 9.05E-08 |
| 1800    | -0.680              | -0.680      | 2.770 | 2.58E-07 |
| 3600    | -1.200              | -1.200      | 2.250 | 1.70E-07 |



**K = 3.40E-07 m/sec**  
 media sull'intero intervallo

**K = 2.14E-07 m/sec**  
 media sul tratto ad abbassamento uniforme

LITOLOGIA TRATTO IN PROVA: **Ghiaia e sabbia addensate**

Loc. Castiglioni 56 - 50068 Rufina (FI)  
 CF- PI 06802820487  
 Numero REA FI - 657392  
 e mail albertoiotti.ai@gmail.com

## PROVA DI PERMEABILITÀ LEFRANC - PROVA PER IMMISSIONE A CARICO VARIABILE

COMMITTENTE: **Regione Toscana**

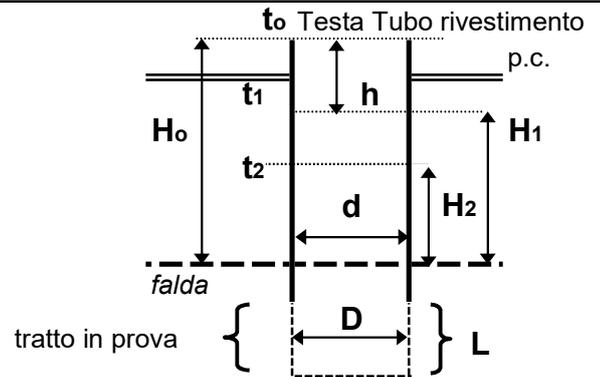
CANTIERE: **Levane**

SONDAGGIO n°: **S2 Basso**

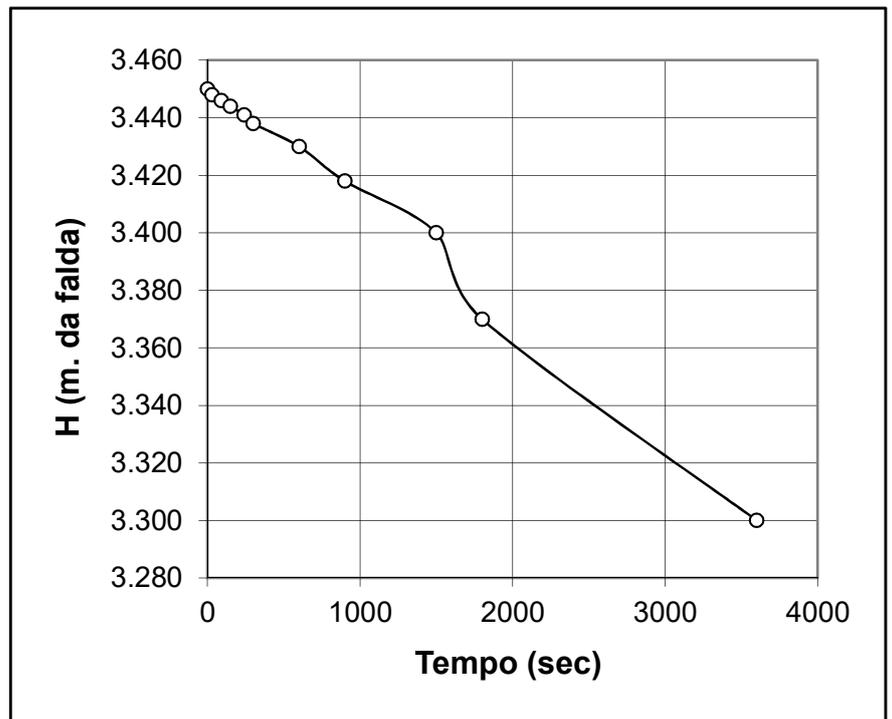
PROVA n°: **2**

DATA: **03/10/23**

|                           |              |              |   |      |
|---------------------------|--------------|--------------|---|------|
| TRATTO IN PROVA           | m da p.c. da | 6.50         | a | 7.00 |
| TEMPO DI PROVA            | minuti       | <b>60.00</b> |   |      |
| PROFONDITÀ FONDO FORO     | m da p.c.    | <b>-7.00</b> |   |      |
| PROFONDITÀ RIVESTIMENTC   | m da p.c.    | <b>-6.50</b> |   |      |
| ALTEZZA T.T. RIVESTIMENTO | m da p.c.    | <b>0.00</b>  |   |      |
| LIVELLO DELLA FALDA       | m da p.c.    | <b>-3.45</b> |   |      |
| LUNGHEZZA TASCA           | L m          | <b>0.50</b>  |   |      |
| DIAMETRO TASCA            | D m          | <b>0.101</b> |   |      |
| DIAMETRO RIVESTIMENTO     | d m          | <b>0.101</b> |   |      |



| t (sec) | Livello da T.T. (m) | h m da p.c. | H m   | K m/sec  |
|---------|---------------------|-------------|-------|----------|
| 0       | 0.000               | 0.000       | 3.450 |          |
| 30      | -0.002              | -0.002      | 3.448 | 2.84E-08 |
| 90      | -0.004              | -0.004      | 3.446 | 1.42E-08 |
| 150     | -0.006              | -0.006      | 3.444 | 1.42E-08 |
| 240     | -0.009              | -0.009      | 3.441 | 1.42E-08 |
| 300     | -0.012              | -0.012      | 3.438 | 2.13E-08 |
| 600     | -0.020              | -0.020      | 3.430 | 1.14E-08 |
| 900     | -0.032              | -0.032      | 3.418 | 1.72E-08 |
| 1500    | -0.050              | -0.050      | 3.400 | 1.29E-08 |
| 1800    | -0.080              | -0.080      | 3.370 | 4.34E-08 |
| 3600    | -0.150              | -0.150      | 3.300 | 1.71E-08 |



**K = 1.94E-08 m/sec**  
 media sull'intero intervallo

**K = 3.02E-08 m/sec**  
 media sul tratto ad abbassamento uniforme

LITOLOGIA TRATTO IN PROVA: **Sabbie limose**

**IBT Prospezioni Srl**

C.F. P.IVA 06802820487

Località Castiglioni 56 Rufina Firenze

Cel 3485844183 e-mail albertoiotti.ai@gmail.com

**Comune di Montevarchi (AR)**

**Località levane**

**Sismica a rifrazione – Indagine MASW - Misura HVSR**



**Committente:**

.....  
**Regione Toscana**

**FIRENZE, OTTOBRE 2023**

## 1.1 Premessa

Su incarico della Regione Toscana è stata condotta una campagna di indagini sismiche a rifrazione per individuare l'andamento dei principali rifrattori. Sono stati eseguiti due stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e SH, un'analisi tipo MASW per la valutazione della categoria di suolo ai sensi delle NTC 2018. Sono state inoltre eseguite due misure HVSR per valutare la presenza di picchi di risonanza legati al contrasto di impedenza sismica.

Le indagini sismiche costituiscono un metodo indiretto per la stima di parametri meccanici e geometrici del sottosuolo, le valutazioni conseguenti possono dare un'idea di queste quantità ma non costituiscono una misura certa di questi valori.

Di seguito sono riportati i risultati delle indagini eseguite.

### 1.1.1 Ubicazione dell'area in esame

La figura 1 Riporta l'ubicazione del punto di misura L'area si trova nel Comune di Montevarchi località Levane nell'area di pertinenza della centrale idroelettrica ENEL

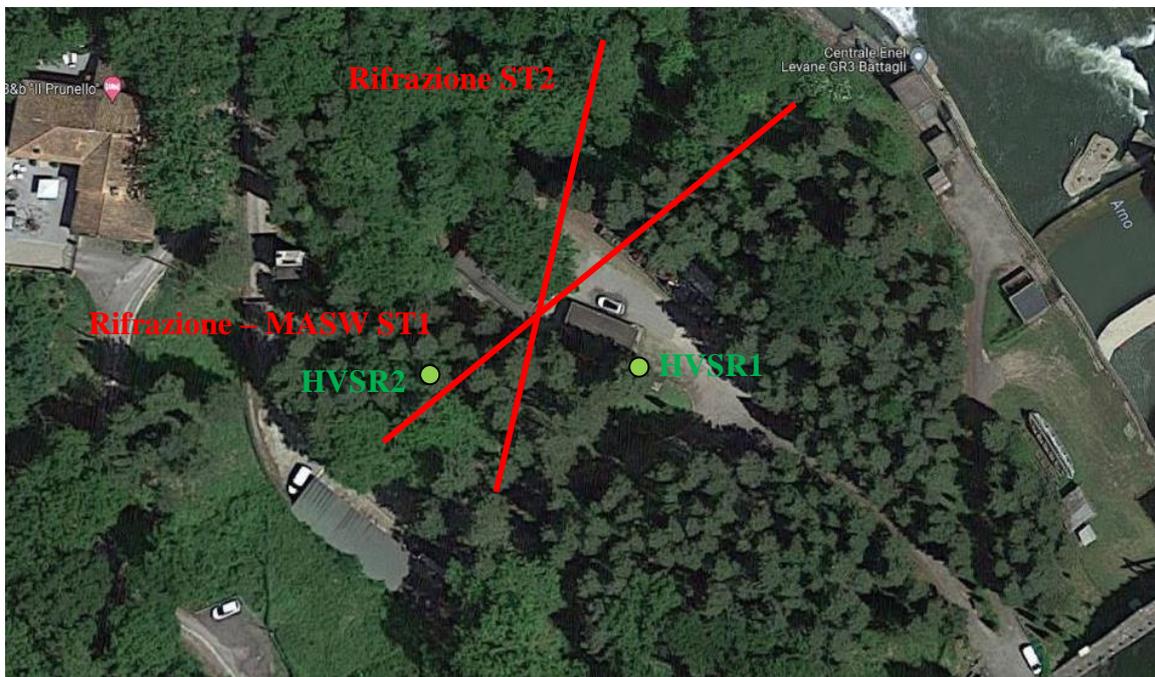


Figura 1 – Ubicazione delle indagini eseguite

## 2 Sismica a rifrazione

Le onde elastiche provocate da una vibrazione si trasmettono nel suolo con velocità differenti per ogni litotipo. Nella prospezione sismica a rifrazione, si sfrutta la diversa velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P) e o trasversali (onde S), Le prime sono più veloci fra le diverse onde elastiche entrambe possono essere utilizzate per determinare spessori e andamento dei livelli presenti.

La prospezione consiste nel generare un'onda sismica di compressione o trasversale nel terreno attraverso una determinata sorgente di energia (colpo di mazza, maglio o esplosivo etc.) e nel misurare il tempo impiegato da questa a compiere il percorso nel sottosuolo dal punto di energizzazione fino agli apparecchi di ricezione (*geofoni*) seguendo le leggi di rifrazione dell'ottica (*Legge di Snell*). La rifrazione si verifica in corrispondenza delle superfici di separazione tra due strati sovrapposti di densità (o meglio di modulo elastico) crescente.

L'apparecchiatura necessaria per le prospezioni è costituita da una serie di ricevitori (*geofoni*) diversi per tipologia a seconda che si vogliano misurare le onde P o S che vengono spaziate lungo un determinato allineamento (stendimento) e da un cronografo che registra l'istante di inizio della perturbazione elastica ed i tempi di primo arrivo delle onde a ciascun geofono. Così, osservando i primi arrivi su punti posti a distanze diverse dalla sorgente energizzante, è possibile costruire una curva tempo-distanza (*dromocrona*) rappresentante la variazione del minimo percorso in funzione del tempo. Attraverso metodi analitici si ricavano quindi le velocità delle onde elastiche longitudinali ( $V_p$  e/o  $V_s$ ) dei mezzi attraversati ed il loro spessore.

La velocità di propagazione delle onde elastiche nel suolo presenta ampie variazioni; per lo stesso tipo di roccia essa diminuisce col grado di alterazione, di fessurazione e/o di *ismo* strati; aumenta per contro con la profondità e l'età geologica. Sensibili differenze si possono avere, in rocce stratificate, tra le velocità rilevate lungo i piani di strato e quelle rilevate perpendicolarmente a questi. La velocità delle onde compressionali (onde P), diversamente da quelle trasversali (onde S) che non si trasmettono nell'acqua, è fortemente influenzata dalla presenza della falda acquifera e dal grado di saturazione.

Questo comporta che anche litotipi differenti possano avere uguali velocità delle onde sismiche compressionali (ad esempio roccia fortemente fratturata e materiale detritico saturo con velocità  $V_p$  dell'ordine di 1400÷1700 m/sec), per cui non necessariamente l'interpretazione *ismo* stratigrafica corrisponderà con la reale situazione geologico-stratigrafica.

Il metodo sismico a rifrazione è soggetto inoltre alle seguenti limitazioni:

- un livello può essere evidenziato soltanto se la velocità di trasmissione delle onde longitudinali in esso risulta superiore a quella dei livelli soprastanti (effetto della inversione di velocità);
- un livello di spessore limitato rispetto al passo dei geofoni e alla sua profondità può non risultare rilevabile;
- un livello di velocità intermedia compreso tra uno strato sovrastante a velocità minore ed uno sottostante a velocità sensibilmente maggiore può non risultare rilevabile perché mascherato dagli “arrivi” dallo strato sottostante (effetto dello strato nascosto e “zona oscura”);
- aumentando la spaziatura tra i geofoni aumenta la profondità di investigazione, ma può ovviamente ridursi la precisione nella determinazione della profondità dei limiti di passaggio tra i diversi livelli individuati. In presenza di successioni di livelli con velocità (crescenti) di poco differenti tra loro, orizzonti a velocità intermedia con potenza sino anche ad 1/3 del passo adottato possono non essere evidenziati. Il limite tra due orizzonti può quindi in realtà passare “attraverso” un terzo intermedio non evidenziabile;
- analogamente, incrementi gradualmente di velocità con la profondità danno origine a dromocroni che consentono più schemi interpretativi. Il possibile errore può essere più contenuto potendo disporre di sondaggi di taratura e “cercando” sulle dromocroni delle basi sismiche i livelli che abbiano velocità il più possibile simili a quelle ottenute con le tarature.

Per contro i moderni metodi di elaborazione del dato sismico, come il *Generalized Reciprocal Method* (GRM: PALMER, 2001), consentono di ricostruire la morfologia sepolta di più rifrattori sovrapposti, variamente “accidentati” e con velocità variabili lungo il profilo, anche in presenza di morfologie di superficie non piane: la buona precisione raggiungibile, specie se si dispone di sondaggi di taratura, consente talora di elevare la prospezione sismica da semplice valutazione qualitativa a valido supporto quantitativo dell’indagine geognostica. In particolare nel caso in esame viene proposta una interpretazione di tipo tomografico ottenuta mediante l’impiego del software RAY-FRACT.

## **2.1 Sistema di acquisizione**

L’acquisizione dei dati in campagna è stata eseguita utilizzando un sistema composto dalle seguenti parti:

- sismografo: Daq Link III, 24 canali, 24 bit

- sorgente energizzante: cannone e/o mazza 20kg
- trigger: innesco a molla
- apparecchiatura di ricezione: 24 geofoni orizzontali con frequenza propria di 4.5 e 10 Hz.

## 2.2 I risultati nell'area in esame

Le caratteristiche della geometria dello stendimento sono riassunte in Tabella 1.

| Stendimento | Lunghezza | N° Shot | Onde        | N° geofoni |
|-------------|-----------|---------|-------------|------------|
| St1 SW-NE   | 100       | 5       | P-SH - MASW | 24         |
| SSW-NNE     | 100       | 5       | P-SH        | 24         |

Tabella 1 - Geometria dello stendimento.

L'indagine sismica ha permesso di valutare la presenza di diversi orizzonti rifrattori e l'elaborazione tomografica ha permesso di valutare la presenza di variazioni di velocità di propagazione delle onde S all'interno di uno stesso orizzonte.

### 2.2.1 Stendimento St1 onde P

Questo stendimento si allunga lungo l'area con orientazione circa SW-NE. La Figura 2 riporta le dromocroni relative ai primi arrivi per questo stendimento.

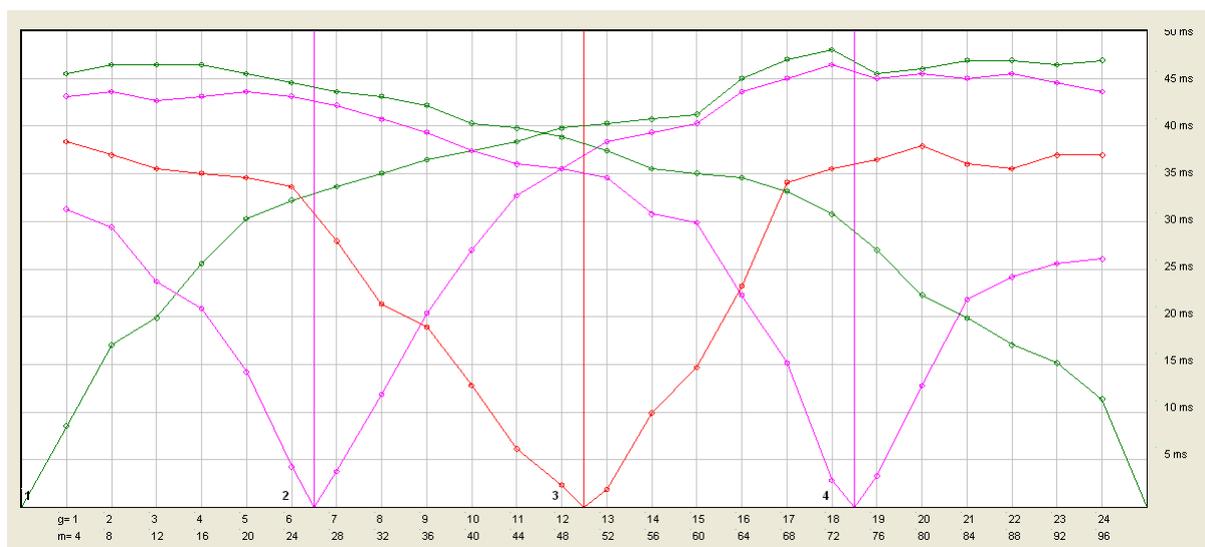


Figura 2 - Dromocroni stendimento St1 onde p.

È possibile riconoscere tre orizzonti un primo orizzonte con velocità di propagazione delle onde p fino a 600-1000 m/s con spessore massimo variabile da 4 a 7 m interpretabile come depositi copertura detrito; un secondo orizzonte con velocità delle onde p fino a 1500 m/s con spessore massimo investigato di circa 3-5 m, interpretato come sedimenti maggiormente addensati substrato alterato, al di sotto si hanno velocità maggiori legate ad un rifratore interpretabile come un livello a maggiore consistenza (substrato).

La Figura 3 riporta l'interpretazione e tomografica per lo stendimento 1

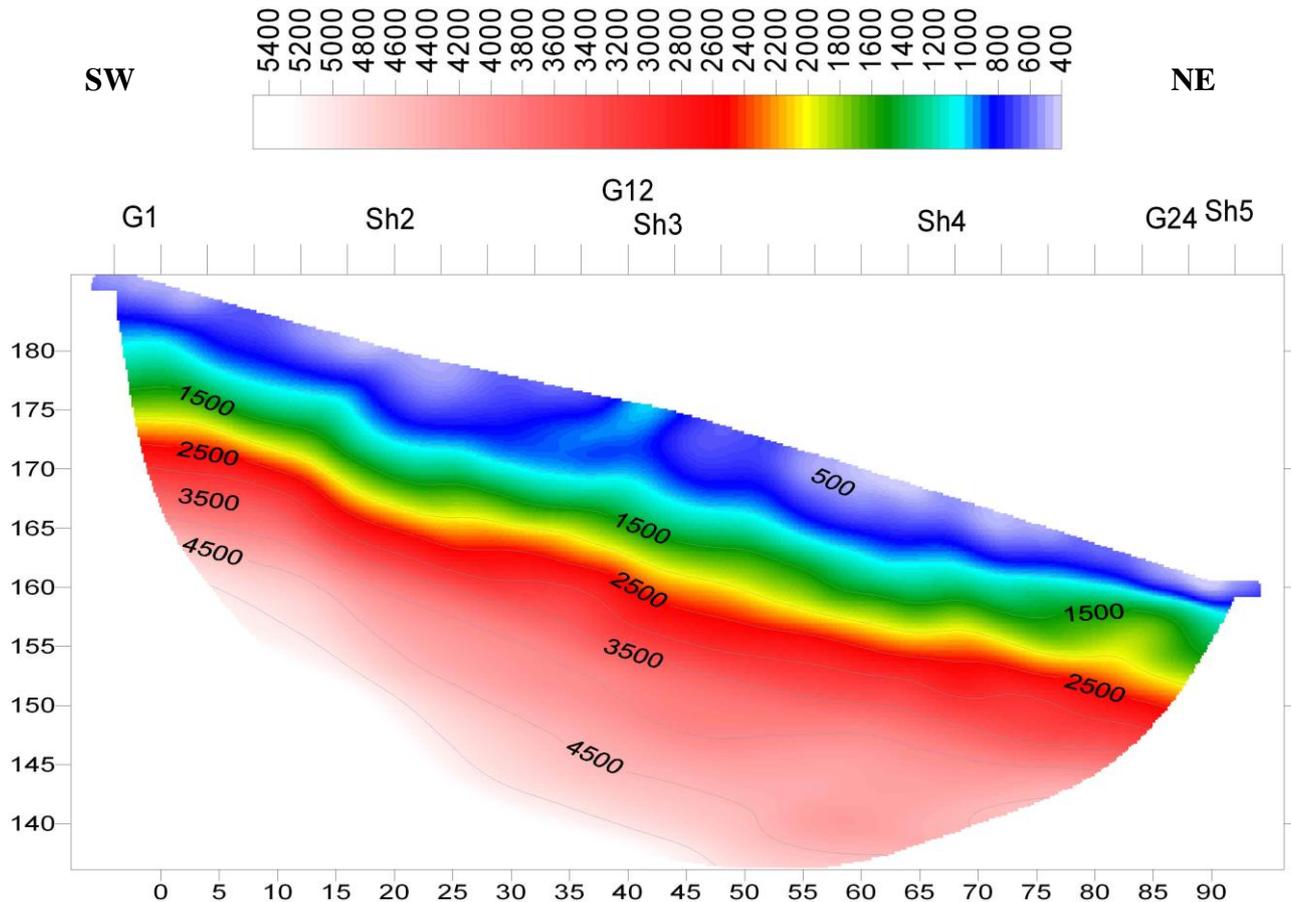


Figura 3 - Tomografia stendimento 1 onde p (distanze e profondità in m).

### 2.2.2 Stendimento St1 onde Sh

Questo stendimento si allunga lungo l'area con orientazione circa SW-NE. La Figura 4 riporta le dromocrone relative ai primi arrivi per questo stendimento.

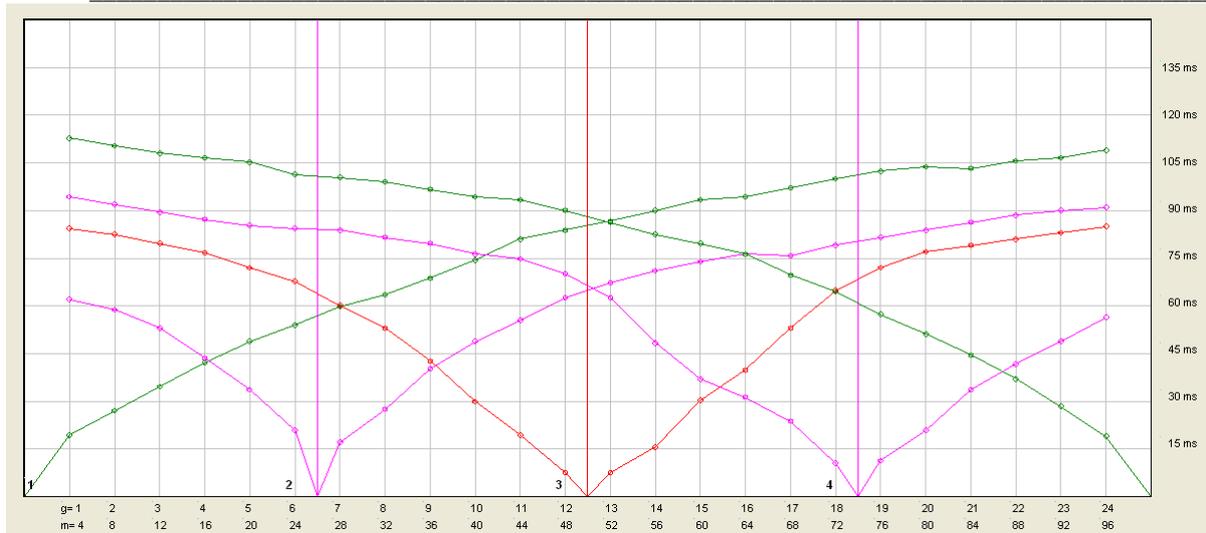


Figura 4 - Dromocrone stendimento St1 onde sh.

È possibile riconoscere tre orizzonti un primo orizzonte con velocità di propagazione delle onde sh fino a 500 m/s con spessore massimo variabile da 4 a 5 m interpretabile come depositi copertura detrito; un secondo orizzonte con velocità delle onde p fino a 800 m/s con spessore massimo investigato di circa 3-5 m, interpretato come sedimenti maggiormente addensati substrato alterato, al di sotto si hanno velocità maggiori legate ad un rifratore interpretabile come un livello a maggiore consistenza (substrato).

La Figura 5 riporta l'interpretazione e tomografica per lo stendimento 1

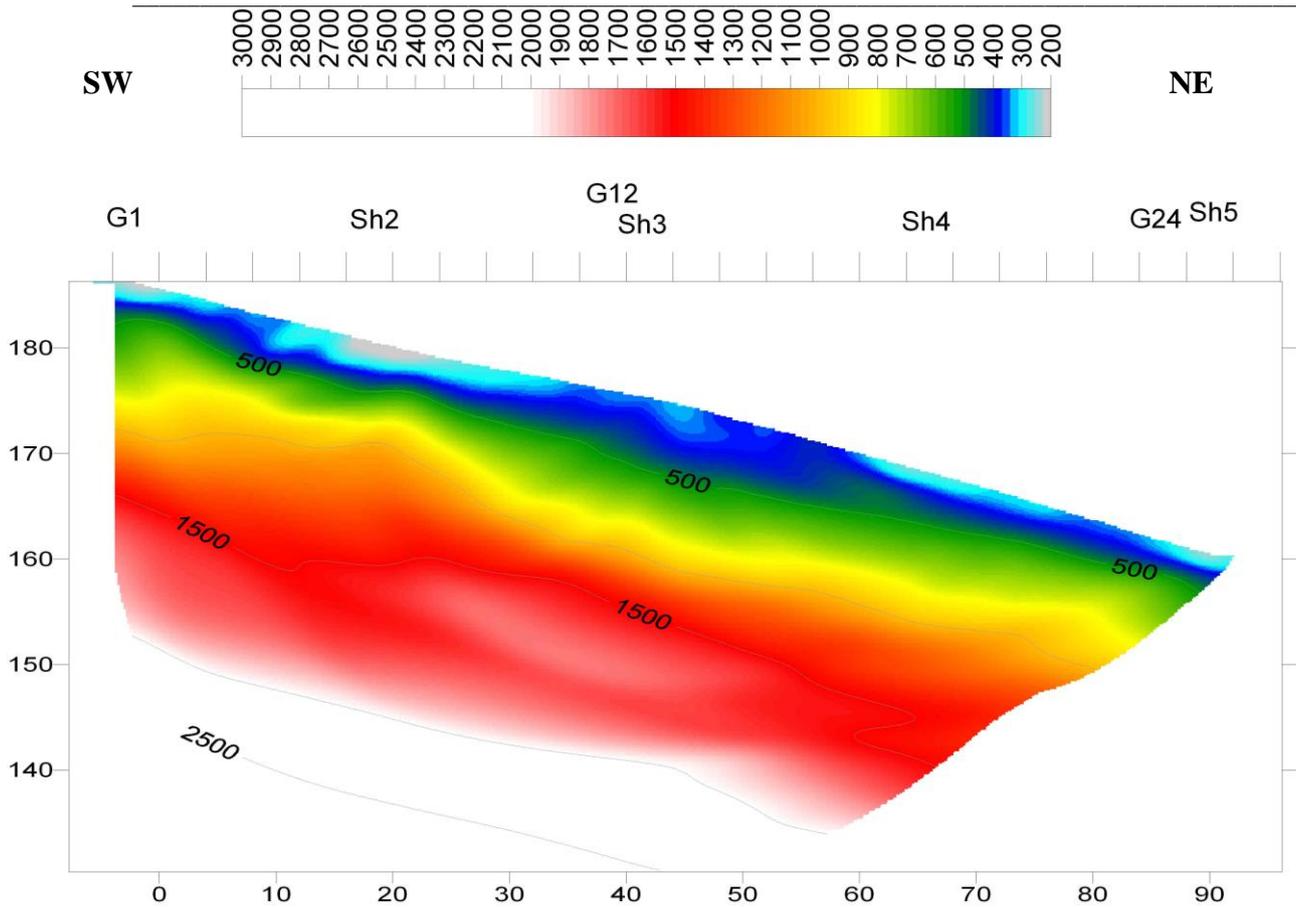


Figura 5 - Tomografia stendimento 1 onde pSH (distanze e profondità in m).

### 2.2.3 Stendimento St2 onde P

Questo stendimento si allunga lungo l'area con orientazione circa SSW-NNE. La Figura 6 riporta le dromocrone relative ai primi arrivi per questo stendimento.

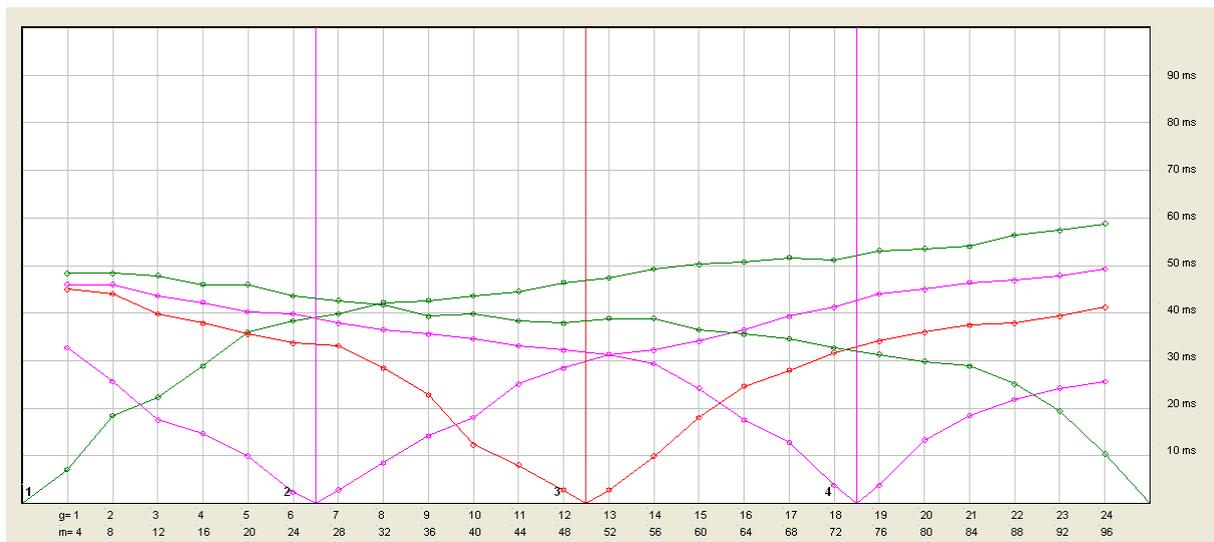


Figura 6 - Dromocrone stendimento St2 onde p.

È possibile riconoscere tre orizzonti un primo orizzonte con velocità di propagazione delle onde p fino a 600-1000 m/s con spessore massimo variabile da 4 a 6 m interpretabile come depositi copertura detrito; un secondo orizzonte con velocità delle onde p fino a 1500 m/s con spessore massimo investigato di circa 3-4 m, interpretato come sedimenti maggiormente addensati substrato alterato, al di sotto si hanno velocità maggiori legate ad un rifratore interpretabile come un livello a maggiore consistenza (substrato).

La Figura 7 riporta l'interpretazione e tomografica per lo stendimento 1

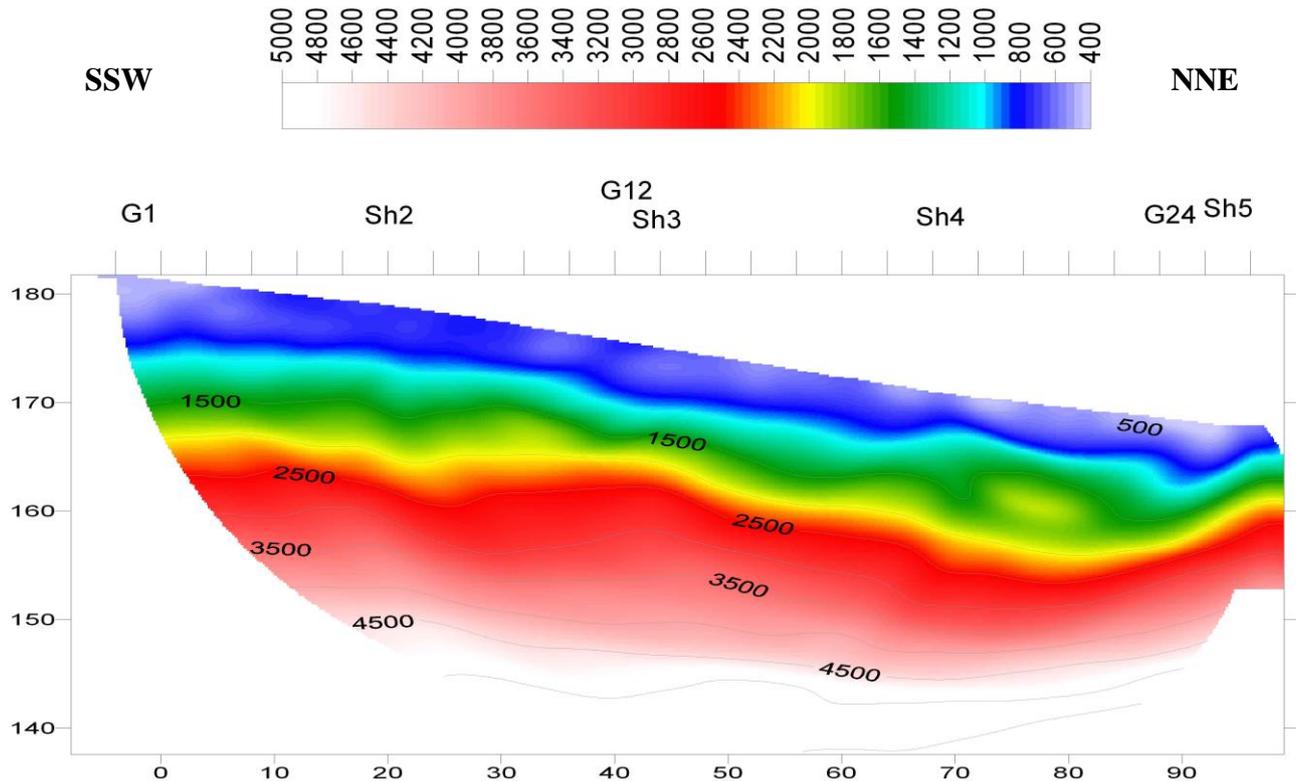


Figura 7 - Tomografia stendimento 2 onde p (distanze e profondità in m).

## 2.2.4 Stendimento St2 onde Sh

Questo stendimento si allunga lungo l'area con orientazione circa SSW-NNE. La Figura 8 riporta le dromocrone relative ai primi arrivi per questo stendimento.

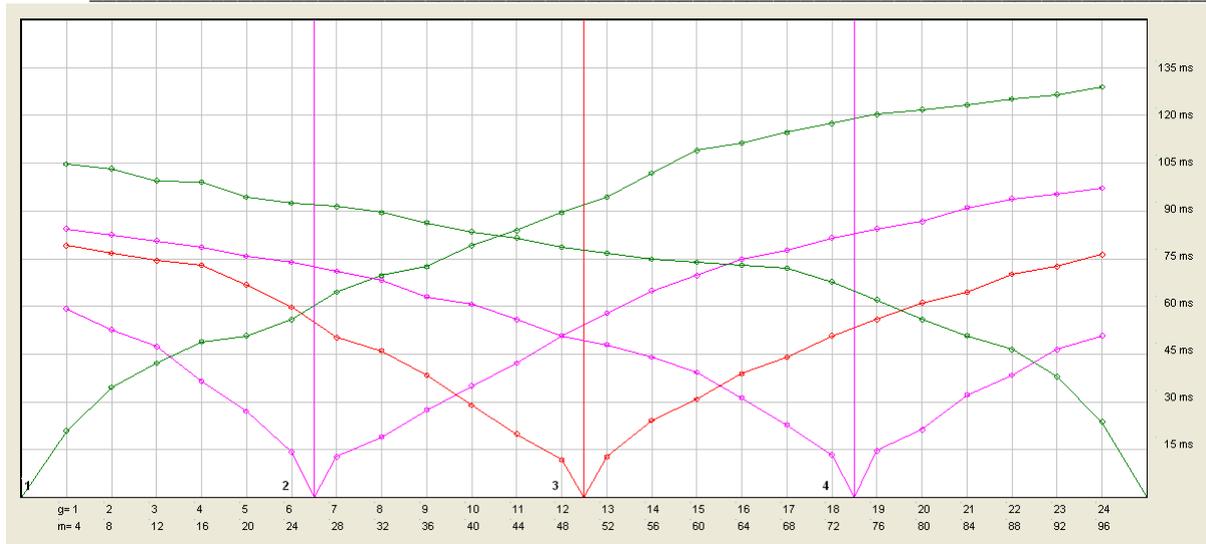


Figura 8 - Dromocrone stendimento St2 onde sh.

È possibile riconoscere tre orizzonti un primo orizzonte con velocità di propagazione delle onde sh fino a 500 m/s con spessore massimo variabile da 3 a 4 m interpretabile come depositi copertura detrito; un secondo orizzonte con velocità delle onde p fino a 800 m/s con spessore massimo investigato di circa 3-8 m, interpretato come sedimenti maggiormente addensati substrato alterato, al di sotto si hanno velocità maggiori legate ad un rifratore interpretabile come un livello a maggiore consistenza (substrato).

La Figura 9 riporta l'interpretazione e tomografica per lo stendimento 1

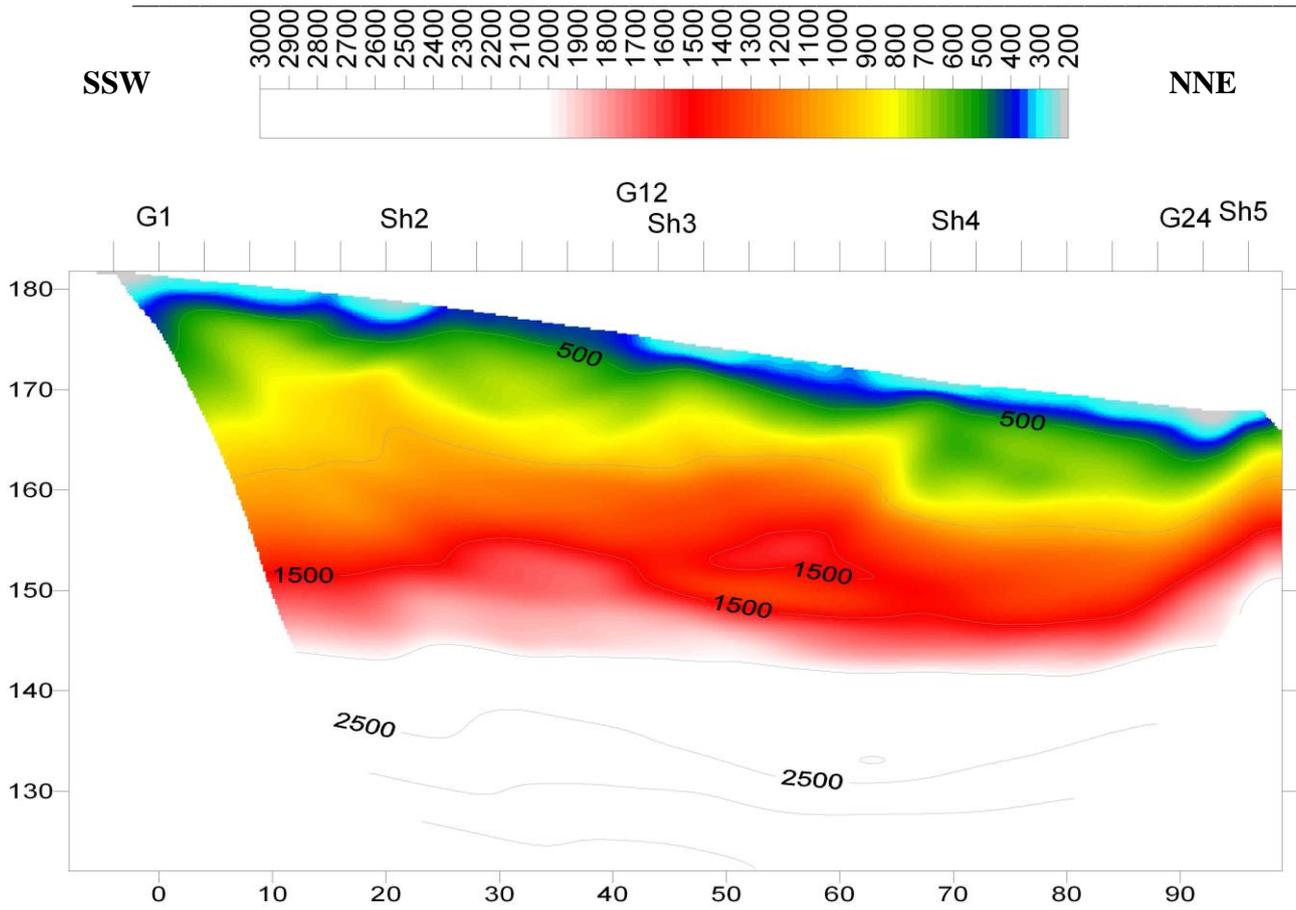


Figura 9 - Tomografia stendimento 2 onde sh (distanze e profondità in m).

### 3 Indagine MASW

Sulla linea degli stendimenti si è proceduto ad una acquisizione dei dati da sottoporre ad una elaborazione MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) per la valutazione dell'andamento della velocità delle onde di taglio nei primi 30 m Vs30.

#### 3.1 Indagine MASW

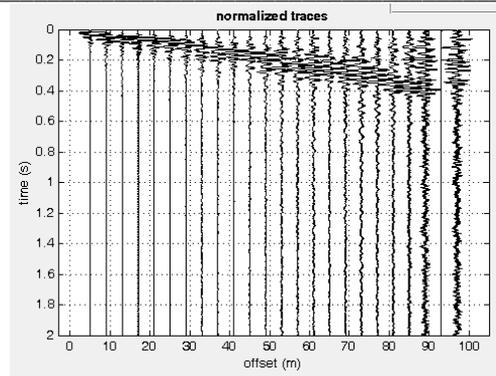
È stato eseguito uno stendimento per l'acquisizione dei dati da sottoporre ad una elaborazione MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) per la valutazione dell'andamento della velocità delle onde di taglio nei primi 30 m Vs30 su entrambe le linee sismiche. È stato impiegato il metodo *attivo* che consente in genere di ottenere una velocità di fase (quindi una curva di dispersione) sperimentale apparente nell'intervallo di frequenza compreso tra 5 e 70 Hz che da quindi informazioni sulla fascia più superficiale di terreno.

Le fasi del procedimento applicato prevedono:

- calcolo della velocità di fase e ricostruzione della curva di dispersione
- calcolo della velocità di fase apparente numerica
- individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali vs per interazione e confronto con i dati sperimentali fino ad una sovrapposizione ottimale
- calcolo della velocità equivalente nei primi 30 m di profondità
- Riconoscimento della categoria sismica del suolo secondo la normativa sismica OPCM 3274 e le NTC 2008.

##### 3.1.1 Acquisizione dei dati

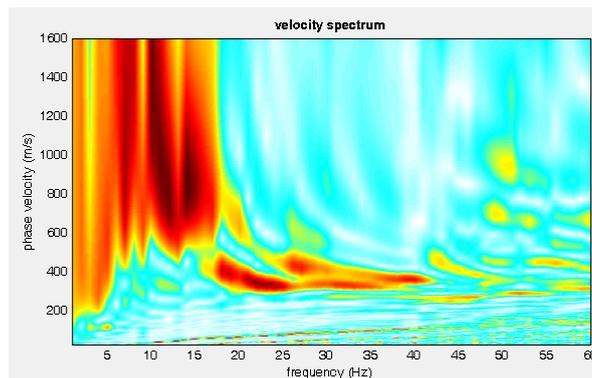
I dati sono stati acquisiti con un sismografo Daq LinkIII 24 bit 24 canali lungo una linea sismica con interasse geofonico pari a 2 m intervallo di campionamento di 2 ms e finestra di campionamento pari a 2 s. La Figura 10 riporta le tracce registrate dei dati acquisiti.



*Figura 10 - Tracce dei dati acquisiti*

### 3.1.2 Ricostruzione della curva di dispersione

A partire dalla rappresentazione delle velocità verticali dell'intero campo di moto nel dominio frequenza numero d'onda (Figura 11) viene estratta la curva di dispersione apparente sperimentale nell'intervallo di frequenza compreso tra 2 e 70 Hz che come detto caratterizza gli strati più superficiali (30 m).



*Figura 11 - Spettro delle velocità dell'intero campo di moto*

### 3.1.3 Confronto tra la curva sperimentale e quelle calcolata

Una volta ricostruita e discretizzata la curva di dispersione sperimentale ne viene generata una calcolata e sovrapposta a quella sperimentale modificando la curva calcolata fino ad avere una buona sovrapposizione con quella sperimentale (Figura 12).

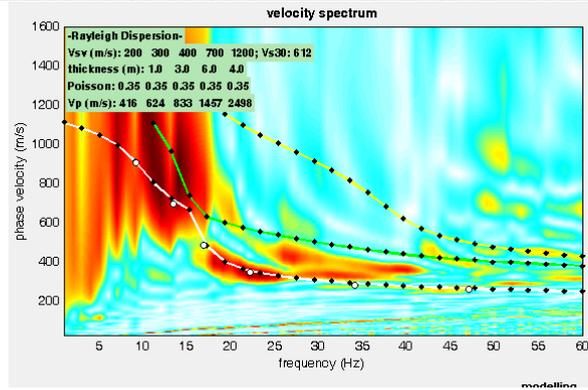


Figura 12 - Confronto tra la curva sperimentale e quella calcolata

È a questo punto possibile passare a definire un profilo di velocità del substrato sul quale calcolare la Vs 30 (Figura 13).

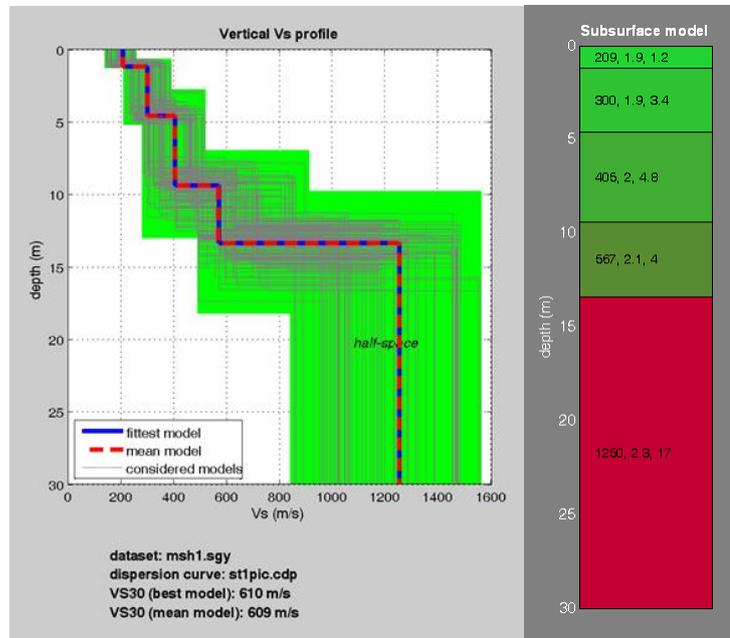


Figura 13 – Andamento della velocità Vs con la profondità

## 4 Misure HVSR – picchi di risonanza

### 4.1 Misura HVSR

Il rumore sismico ambientale è conosciuto anche con il termine microtremore, dato che si manifesta con oscillazioni di piccola ampiezza (1~10  $\mu\text{m}$ ) e nettamente inferiori rispetto a quelle presenti nel campo prossimo all'epicentro di un terremoto. È costituito in piccola parte da onde di volume (P o S) e per lo più da onde superficiali (in particolare onde di Rayleigh) prodotte da interferenza delle prime e con velocità prossime alle onde S. La sua permanente presenza sull'intera superficie terrestre è dovuta a fenomeni atmosferici, ad attività antropica, ad attività dinamica terrestre.

L'acquisizione dei microtremori viene effettuata con strumenti a metodologia passiva, in quanto agiscono direttamente come sorgente di eccitazione e non richiedono pertanto l'utilizzo di battute o esplosioni classiche della sismica attiva.

La tecnica maggiormente sfruttata per lo studio dei microtremori è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale e conosciuta come HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). È opinione accettata in letteratura che le singole componenti del rumore ambientale possono presentare ampie variazioni in funzione dei disturbi naturali ed antropici, mentre il rapporto delle componenti orizzontali e della componente verticale tende a rimanere costante conservando così il picco della frequenza di risonanza fondamentale. Le registrazioni dei microtremori sono un supporto per ricavare indicazioni in merito alle variazioni litostratigrafiche e per la determinazione della velocità delle onde di taglio, in considerazione di ciò sono utilizzate anche per il calcolo del parametro  $V_e$  (NTC 2018).

La figura 10 riporta un'immagine relativa ai dati registrati per le tre componenti di misura nei due punti di indagine.

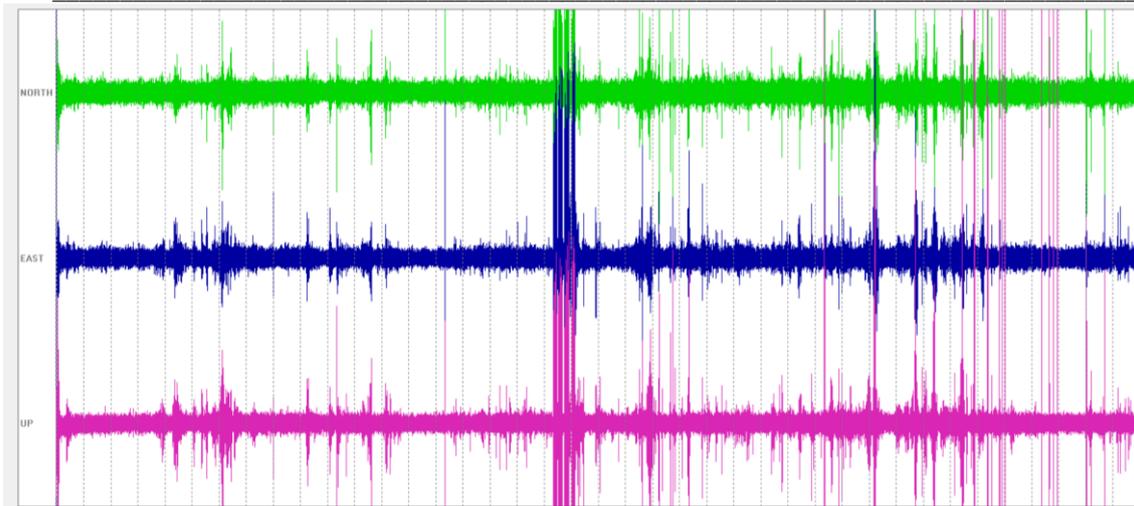


Fig. 10 - Andamento delle registrazioni delle tre componenti di microtremore nei punti di misura

Da segnale misurato è possibile per ogni componente ottenere lo spettro di risposta frequenza contro velocità su frequenza sintetizzato per le tre componenti nella figura 11

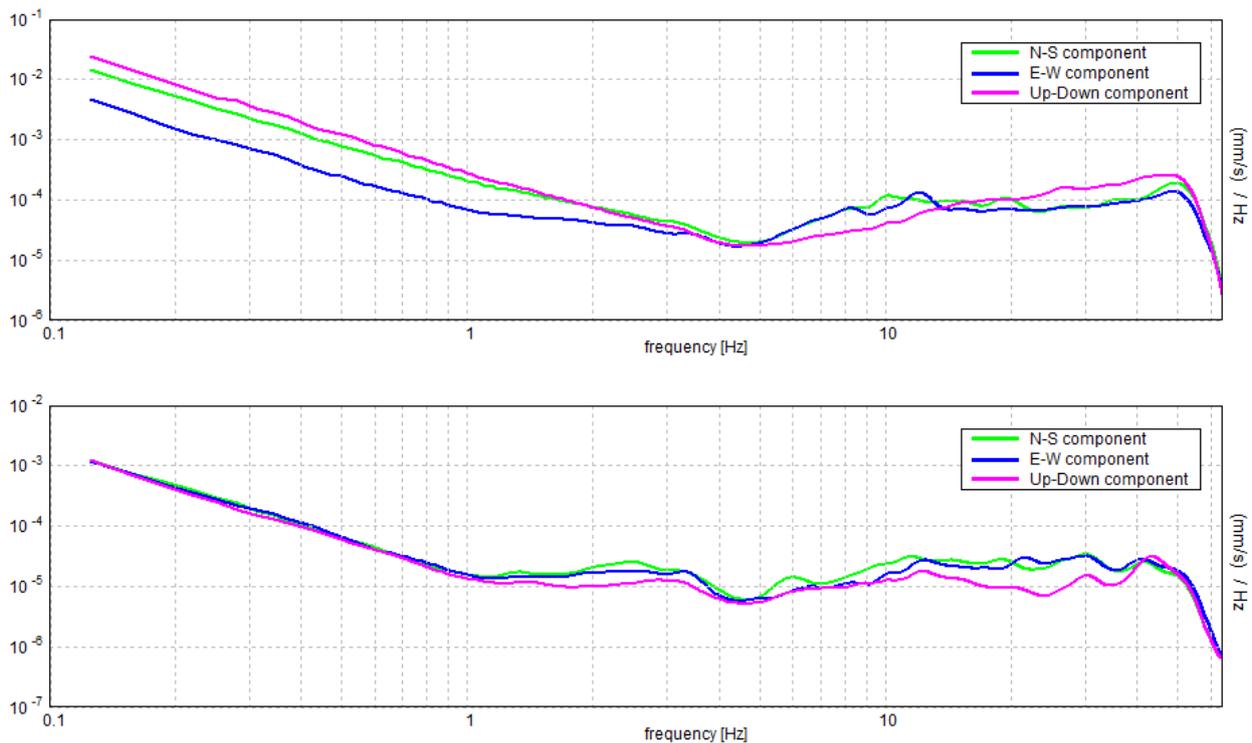


Fig. 11 - Andamento degli spettri  $f-v/f$  nelle tre componenti nei punti di misura

Dall'analisi degli spettri è possibile ottenere per le varie frequenze il rapporto H/V che indica la presenza di fenomeni di risonanza (figura 11). L'analisi del rapporto deve considerare la

direzionalità del picco. Un picco strutturale e non influenzato ad esempio da una sorgente esterna si mostrerà costante nelle diverse direzioni. La figura 12 mostra il valore del rapporto H/V in un diagramma Azimuth-Frequenza. La presenza di un picco costante nelle varie direzioni si manifesta con una linea orizzontale continua, una fascia stretta indica una frequenza precisa di risonanza, una fascia di colore più alta indica una dispersione nel valore della frequenza.

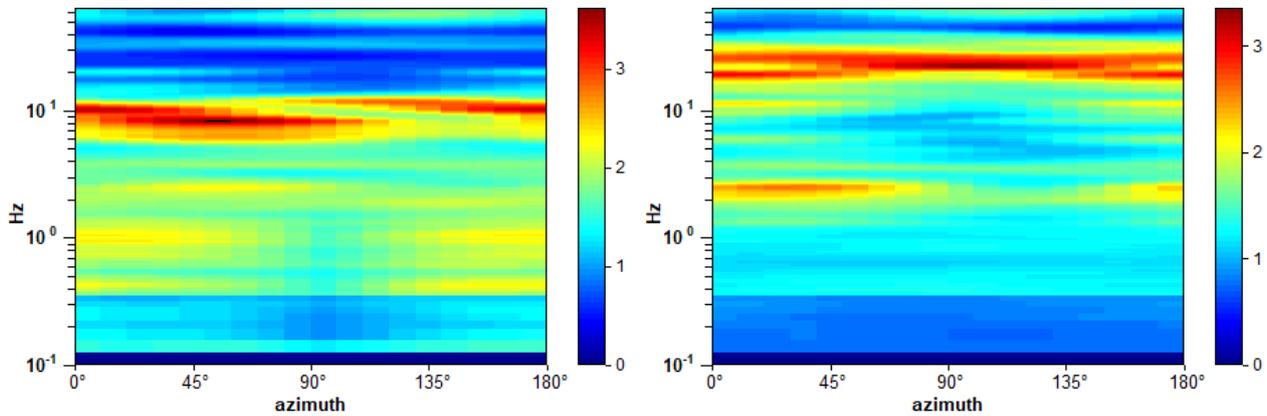


Fig. 12 - Andamento del rapporto H/V in un diagramma Azimuth – Frequenza misure nei punti di esame

La figura 13 riporta l'andamento del rapporto H/V in funzione della Frequenza.

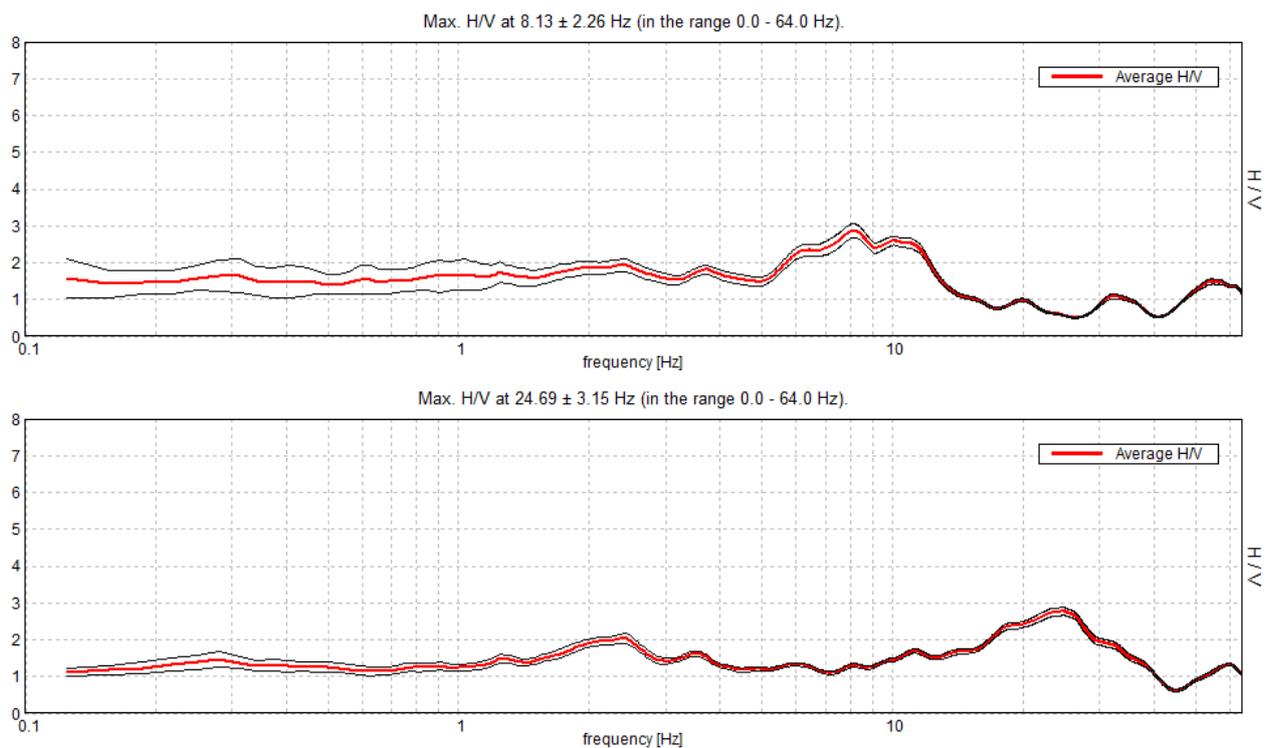


Fig. 13 – Andamento del rapporto H/V alle varie frequenze nei punti di misura.

Nelle curve Frequenza-Ampiezza nella misura sono presenti picchi non ben definiti con le frequenze e ampiezze riassunte nella tabella 2.

| HVSRI   | Misura 1          |          | Misura 2          |          |
|---------|-------------------|----------|-------------------|----------|
|         | Frequenza<br>(HZ) | Ampiezza | Frequenza<br>(HZ) | Ampiezza |
| Picco 1 | 10                | 2.5      | 25                | 2.9      |

Tabella 2 – picchi caratteristici

#### 4.1.1 Riconoscimento della $V_e$ (NTC 2018) e del profilo di appartenenza

In base a quanto definito nelle NTC 2018 la categoria di suolo deve essere definita in funzione della velocità equivalente calcolata secondo l'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad [3.2.1]$$

con:

$h_i$  spessore dell' $i$ -esimo strato;

$V_{s,i}$  velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato;

$N$  numero di strati;

$H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

La tabella 3 riporta le categorie di suolo come definite nelle NTC 2018.

| Categoria | Caratteristiche della stratigrafia   |
|-----------|--|
| A         | Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti 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, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.  |
| C         | Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.   |
| D         | Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s. |
| E         | Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.  |

Tabella 3 - Categorie di suolo NTC 2018

La velocità  $V_e$  per il terreno in esame è pari a 372, il terreno ricade in categoria sismica B.

Firenze ottobre '23

Dott. Alberto Iotti

N° 1438 Ordine dei Geologi della Regione Toscana