

**INDAGINE GEOFISICA DI SISMICA A RIFRAZIONE
RAPPORTO INTERPRETATIVO**

Dr. Geol. Massimo Compagnoni

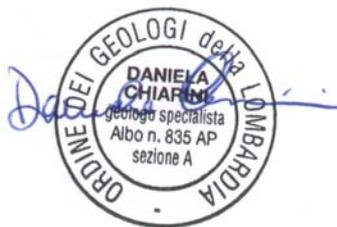
Studio di Geologia Applicata Ambientale e Territoriale

Via G. Randaccio, 21 - 25128 Brescia - tel/fax 0303702821 e-mail info@geo3studio.it

INDAGINE GEOFISICA COMBINATA MASW – RIFRAZIONE

RAPPORTO INTERPRETATIVO

COMUNE DI SIRMIONE (BS)



INDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. Premessa | 2 |
| 2. Indagine e strumentazione utilizzata | 2 |
| 2.1. <i>Strumentazione utilizzata</i> | 2 |
| 2.2. <i>Indagine di sismica a rifrazione: metodologia ed acquisizione</i> | 3 |
| 2.3. <i>Indagine MASW: metodologia ed acquisizione</i> | 5 |
| 3. Interpretazione e risultati | 7 |
| 3.1. <i>Stendimento n. 1 (nei pressi della Darsena degli Oleandri)</i> | 7 |
| 3.1.1. Acquisizione ed analisi onde P | 7 |
| 3.1.2. Acquisizione ed analisi onde superficiali (Onde di Rayleigh) | 9 |
| 3.2. <i>Stendimento n. 2 (nei pressi del centro sportivo - Lugana)</i> | 12 |
| 3.2.1. Acquisizione ed analisi onde P | 12 |
| 3.2.2. Acquisizione ed analisi onde superficiali (Onde di Rayleigh) | 14 |
| 4. Considerazione sui risultati | 17 |

ALLEGATI

1. Ubicazione stendimenti sismici
2. Rumore ambientale lungo gli stendimenti sismici
3. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde P – ST1
4. Alcune acquisizioni masw in termini di spettro fk – ST1
5. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde P – ST2
6. Alcune acquisizioni masw in termini di spettro fk – ST2

Brescia, 20 marzo 2009

1. Premessa

Su incarico e per conto della Dr.^{ssa} L. Ziliani si è eseguita, nell'ambito dell'aggiornamento dello studio geologico a supporto nel nuovo PGT comunale del Comune di Sirmione (BS), un'indagine geofisica sismica in due siti (allegato n. 1), rappresentativi di due diversi scenari geologico-stratigrafici suscettibili di fenomeni di amplificazione sismica locale.

Lo scopo dell'indagine è la caratterizzazione dinamica del sottosuolo nelle prime decine di metri con l'individuazione delle principali unità geofisiche e delle relative proprietà meccaniche elastiche, quali velocità delle onde longitudinali P (V_P), velocità delle onde trasversali S (V_S) e i relativi parametri elastici (E, G, K e ν).

Sulla base dei valori di V_S e del modulo di taglio (G) sarà possibile valutare la rigidezza del suolo e fornire delle prime indicazioni sul comportamento dinamico della parte superficiale del sottosuolo, in applicazione alla normativa nazionale e regionale (D.G.R. 22 dicembre 2005, n. VIII/1566 "Criteri e indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del P.G.T., in attuazione dell'art. 57, comma 1, della l.r. 12/2005" aggiornata con DGR 28 maggio 2008 n. VIII/7374).

2. Indagine e strumentazione utilizzata

Per la ricostruzione del modello geofisico nei due siti scelti è stata eseguita un'indagine di sismica superficiale caratterizzata dalla combinazione del metodo di analisi spettrale delle onde di superficie (Rayleigh) con tecnica MASW e la tecnica di sismica a rifrazione con onde di volume longitudinali P.

2.1. *Strumentazione utilizzata*

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- un sistema di energizzazione per le onde P: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 10 Kg battente verticalmente su piastra circolare in acciaio del diametro di 25 cm posta direttamente sul p.c. per la generazione prevalentemente di onde P e secondariamente di onde SV, in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali;
- un sistema di ricezione: costituito da 24 geofoni verticali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa con frequenza propria di 10 Hz (rifrazione) e 4.5 Hz (masw), ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la

velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali e trasversali prodotte da una specifica sorgente;

- sistema di acquisizione dati: con memoria dinamica a 24 bit composto da 12 dataloggers a 2 canali ciascuno per un totale di 24 canali, cavo sismico telemetrico di 130 m, MOM power con interfaccia USB 1.1 24 V, notebook PC Windows XP con software Panel Acquisition a 24 canali; il sistema è in grado di convertire in digitale e registrare su memoria il segnale proveniente da ciascun canale dal sistema di ricezione; la conversione A/D avviene già dal primo metro di cavo: il sistema permette pertanto di eliminare molte fonti di disturbo dovute al trasferimento del segnale lungo centinaia di metri di cavo sismico ed è inoltre dotato di un sistema di filtraggio in tempo reale, da un hardware complesso, che comporta un anello di regolazione con diversi passaggi di digital signal processing;
- un sistema di trigger: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione.

2.2. Indagine di sismica a rifrazione: metodologia ed acquisizione

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o bi-rifratte (head wave): le onde analizzate sono quelle birifratte, cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza.

I contrasti di proprietà possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche; il modello interpretativo del mezzo investigato è di tipo elastico, omogeneo, continuo ed isotropo, mentre la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde P è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

- Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
- Ricostruzione delle dromocrone in P e scelta del modello di sottosuolo da utilizzare nell'interpretazione;

- Linearizzazione delle dromocrone e calcolo delle velocità di propagazione delle onde elastiche analizzate e dei relativi tempi di intercetta;
- Ricostruzione del modello del sottosuolo con calcolo della profondità di ciascun strato omogeneo, continuo ed isotropo tramite il metodo del tempo di intercetta applicabile a ciascun punto di scoppio (metodo a griglia shot-point); questo metodo è applicabile in situazioni litostratigrafiche approssimabili a modelli stratificati a strati piani orizzontali e/o inclinati.

Per le analisi interpretative è stato utilizzato il software WinSism versione 10 – Seismic Refraction Processing Software (2004) della W-GeoSoft, associato ad altri software autocostruiti.

L'indagine è consistita in uno stendimento singolo di sismica a rifrazione di lunghezza variabile in funzione delle disponibilità logistiche, lungo il quale sono stati disposti alternativamente e collegati in serie 24 geofoni monocomponente verticali del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con distanza intergeofonica variabile in relazione alla lunghezza totale disponibile: il collegamento dei ricevitori avviene attraverso un cavo telemetrico su cui sono disposti 12 gruppi data loggers in grado di convertire il segnale elettrico proveniente dai geofoni in segnale digitale già dal primo metro di cavo: il sistema permette pertanto di eliminare molte fonti di disturbo dovute al trasferimento del segnale lungo centinaia di metri di cavo sismico ed è inoltre dotato di un sistema di filtraggio in tempo reale, da un hardware complesso, che comporta un anello di regolazione con diversi passaggi di digital signal processing.

E' stata adottata un'unica configurazione a 3 shots per l'energizzazione in onde P:

configurazione a 3 shots:

- 2 end-shots esterni allo stendimento di geofoni (S1 e S3)
- 1 centrale tra il 12° e il 13° geofono (S2)

Di seguito si riportano in modo sintetico i parametri configurazionali (spaziali e temporali) dell'acquisizione in onde P:

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI SISMICA A RIFRAZIONE | | |
|--|---------------|---------------|
| Stendimento | ST1 | ST2 |
| Orientazione | W-E (280-100) | E-W (90-270) |
| Dislivello altimetrico tra gli end-shots | 0.0 m | 0.0 m |
| Lunghezza stendimento compresi end-shots | 56.0 m | 56.0 – 71.0 m |
| Lunghezza stendimento ricevitori | 46.0 m | 46.0 – 69.0 m |
| Numero Geofoni | 24 | 24 |
| Distanza intergeofonica | 2.0 m | 2.0 – 3.0 m |
| Numero punti di energizzazione (shots) | 3 | 3 |
| End-shots | 5.0 m | 5.0 – 6.0 m |
| Durata acquisizione | 256 ms | 256 ms |
| Intervallo di campionamento | 0.250 ms | 0.250 ms |
| Numero di campioni per traccia | 1024 | 1024 |
| Massima frequenza campionabile | 2 kHz | 2 kHz |

2.3. *Indagine MASW: metodologia ed acquisizione*

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio V_S , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10Hz e 70-100Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20° , sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

La metodologia utilizzata consiste in tre fasi:

- calcolo della curva di dispersione sperimentale dal campo di moto acquisito nel dominio spazio-tempo lungo lo stendimento, energizzando alternativamente ai due estremi dello stendimento;
- calcolo della curva di dispersione apparente numerica mediante il metodo Roma (2001)
- calcolo della curva di dispersione effettiva numerica mediante il metodo Lai-Rix (1998)
- individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_{SV} , modificando opportunamente lo spessore h , le velocità delle onde di taglio V_{SV} e di compressione V_P (o in alternativa il coefficiente di Poisson ν), la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il

modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la curva di dispersione sperimentale e la curva di dispersione numerica corrispondente al modello di suolo assegnato; l'affidabilità del profilo di velocità V_S trovato durante il processo di inversione è valutata tramite la definizione dell'errore relativo tra le due curve.

L'elaborazione è stata eseguita tramite il software MASW (V. Roma, 2007) associato ad altri software autocostituiti.

L'acquisizione è stata eseguita posizionando i 24 geofoni da 4.5 Hz secondo la seguente configurazione spaziale e temporale:

| PARAMETRI CONFIGURAZIONALI MASW | | |
|--|-----------------|-----------------|
| Stendimento | ST1 | ST2 |
| Orientazione | W-E (280-100) | E-W (90-270) |
| Dislivello altimetrico tra gli end-shots | 0 m | 0 m |
| Lunghezza stendimento ricevitori | 23.0 m – 46.0 m | 46.0 m – 69.0 m |
| Numero Geofoni | 24 | 24 |
| Distanza intergeofonica | 1.0 m – 2.0 m | 2.0 m – 3.0 m |
| Numero punti di energizzazione per estremo | 1 – 1 | 1 – 1 |
| Off-sets sorgenti (da ciascun estremo) | 5.0 m | 5.0 – 6.0 m |
| Durata acquisizione | 4096 ms | 4096 ms |
| Intervallo di campionamento | 2.0 ms | 2.0 ms |
| Numero di campioni per traccia | 2048 | 2048 |
| Massima frequenza campionabile | 250 Hz | 250 Hz |

Per valutare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) sono state eseguite acquisizioni coniugate a diverse distanza dall'array sismico, mentre per valutare la presenza di eventuali fenomeni di *mode splitting o mode jumping*, ovvero di segnale legato a modi superiori dell'onda di Rayleigh (*dominant higher modes*) è stata adottata una duplice configurazione spaziale, assegnando due diverse distanze intergeofoniche, compatibilmente con le disponibilità logistiche del sito. L'elaborazione è stata eseguita in procedura diretta scegliendo un modello numerico 1D di prima elaborazione, basato sui risultati dell'indagine di sismica a rifrazione e calcolandovi, tramite soluzione numerica monodimensionale a strati piani e paralleli (Roma e Rix-Lai), la relativa curva di dispersione; successivamente al modello di prima elaborazione vengono apportate opportune modifiche in termini di spessore e velocità V_S degli strati di cui è composto al fine di minimizzare l'errore tra curva sperimentale e curva numerica.

Il modello finale scelto è da considerarsi indicativo del modello di rigidità del sottosuolo ed utilizzabile in modo opportuno solo per stime sull'ordine di grandezza del parametro V_{S30} e per verifiche di compatibilità con dati e conoscenze disponibili in altri siti limitrofi, nell'ambito di operazioni di estrapolazione di dati territoriali ai fini pianificatori.

3. Interpretazione e risultati

La topografia della superficie dei 2 siti è subpianeggiante sul tratto investigato; il rumore ambientale è risultato poco rilevante; in allegato n. 2 si riportano, per ciascun stendimento, le rappresentazioni relativizzate in autoranging dei rumori ambientali acquisiti dai 24 geofoni prima delle energizzazioni (una linea perfettamente rettilinea corrisponde alla situazione ideale di assenza totale di rumore ambientale e strumentale).

L'indagine utilizza un sistema di riferimento relativo, il cui origine è posto in corrispondenza dell'end shot esterno al 1° geofono.

3.1. Stendimento n. 1 (nei pressi della Darsena degli Oleandri)

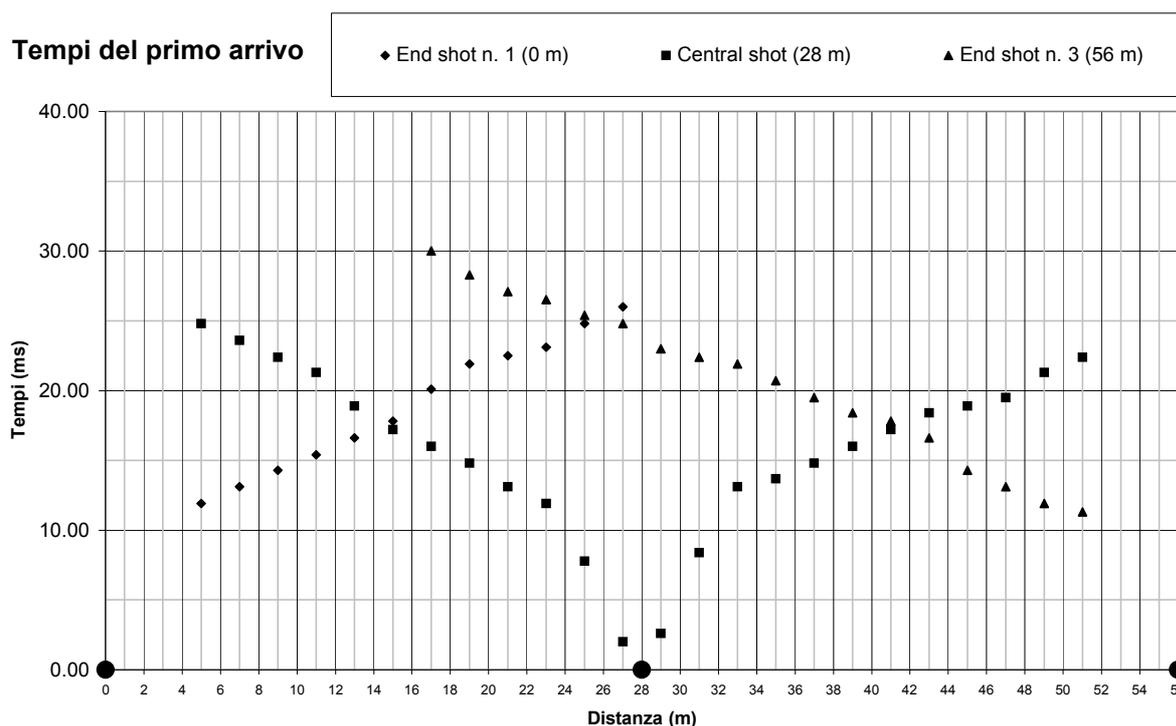
3.1.1. Acquisizione ed analisi onde P

In allegato n. 3 si riporta il sismogramma multishot acquisito, da cui tramite amplificazione ed equalizzazione delle tracce si è estratto il sismogramma elaborato da sottoporre ad eventuali procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto, taglia basso e passa banda.

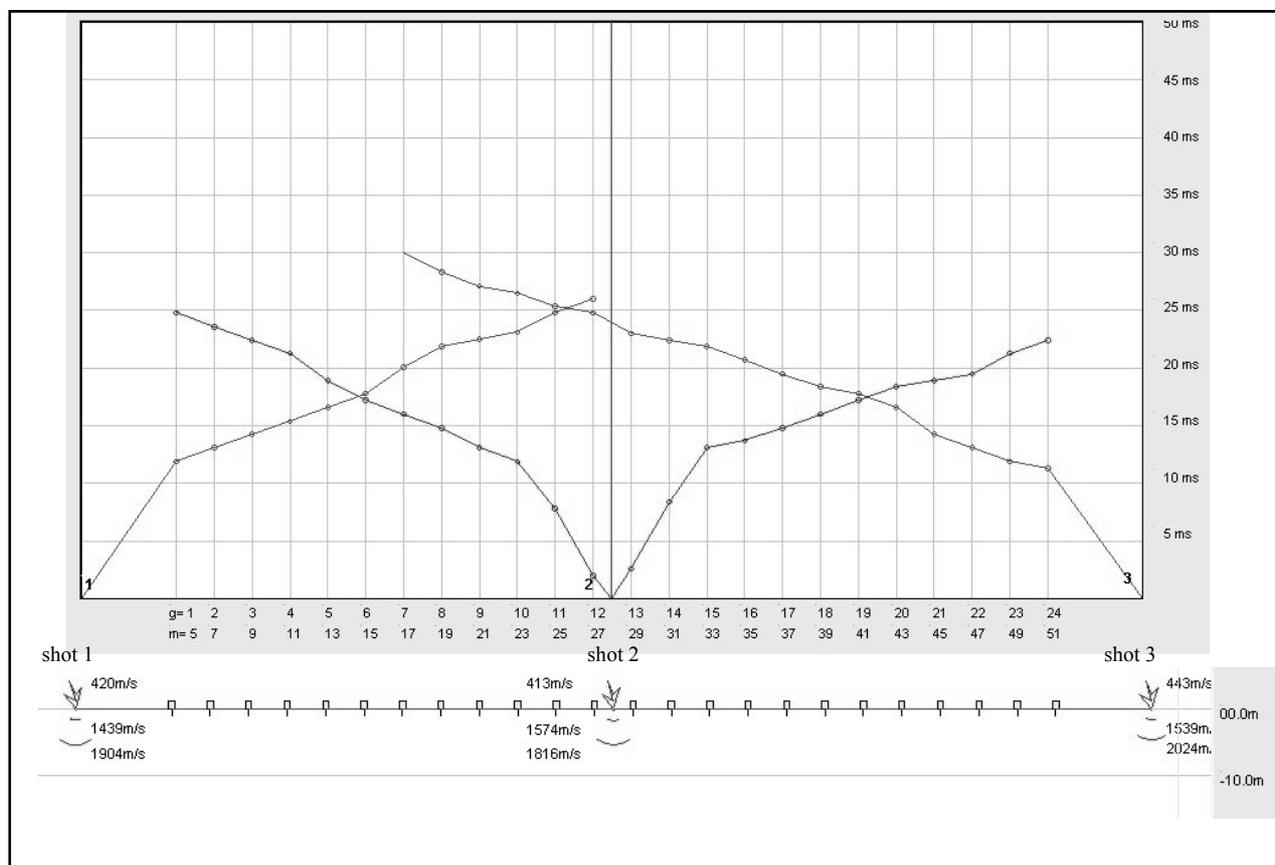
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio, ad esclusione di quelli caratterizzati da un rapporto S/N troppo basso:

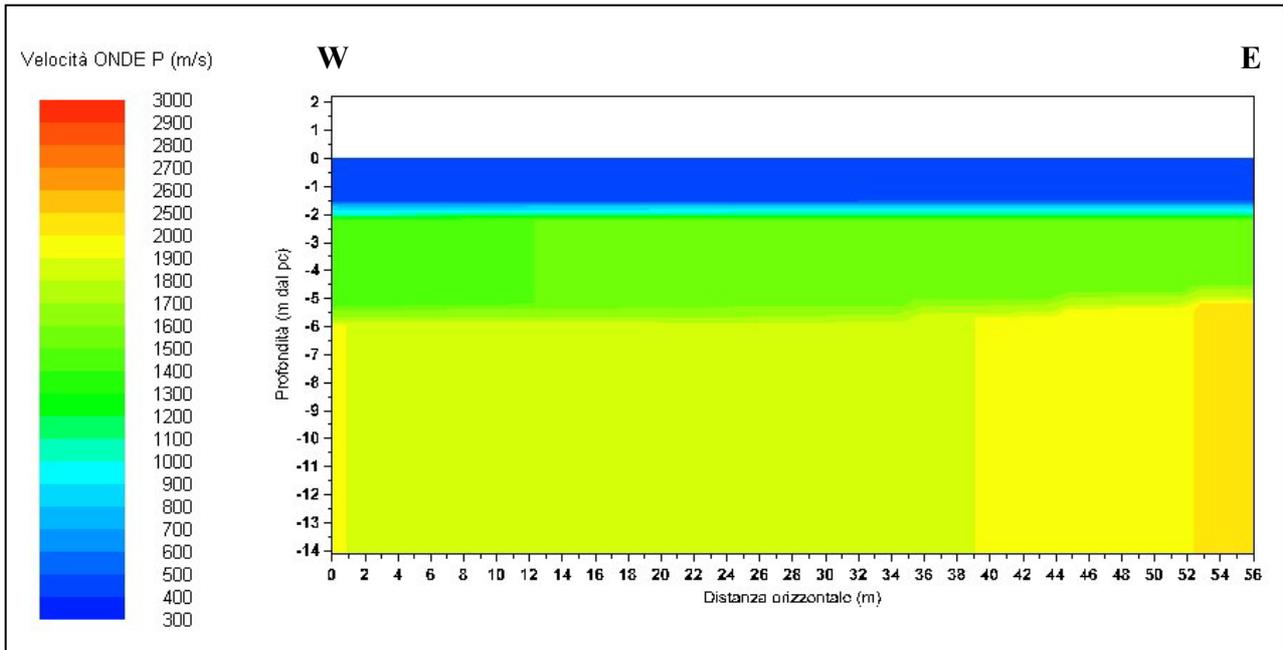
| <i>N° shot</i> | | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---|----------|----------|
| <i>Distanza relativa (m)</i> | | | 0.0 | 28.0 | 56.0 |
| <i>Quota relativa (m)</i> | | | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| <i>Geofono</i> | <i>Distanza relativa (m)</i> | <i>Quota relativa (m)</i> | <i>Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)</i> | | |
| | | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> |
| <i>1</i> | 5 | 0.0 | 11.90 | 24.80 | - |
| <i>2</i> | 7 | 0.0 | 13.10 | 23.60 | - |
| <i>3</i> | 9 | 0.0 | 14.30 | 22.40 | - |
| <i>4</i> | 11 | 0.0 | 15.40 | 21.30 | - |
| <i>5</i> | 13 | 0.0 | 16.60 | 18.90 | - |
| <i>6</i> | 15 | 0.0 | 17.80 | 17.20 | - |
| <i>7</i> | 17 | 0.0 | 20.10 | 16.00 | 30.00 |
| <i>8</i> | 19 | 0.0 | 21.90 | 14.80 | 28.30 |
| <i>9</i> | 21 | 0.0 | 22.50 | 13.10 | 27.10 |
| <i>10</i> | 23 | 0.0 | 23.10 | 11.90 | 26.50 |
| <i>11</i> | 25 | 0.0 | 24.80 | 7.80 | 25.40 |
| <i>12</i> | 27 | 0.0 | 26.00 | 2.00 | 24.80 |
| <i>13</i> | 29 | 0.0 | - | 2.60 | 23.00 |
| <i>14</i> | 31 | 0.0 | - | 8.40 | 22.40 |
| <i>15</i> | 33 | 0.0 | - | 13.10 | 21.90 |
| <i>16</i> | 35 | 0.0 | - | 13.70 | 20.70 |
| <i>17</i> | 37 | 0.0 | - | 14.80 | 19.50 |
| <i>18</i> | 39 | 0.0 | - | 16.00 | 18.40 |
| <i>19</i> | 41 | 0.0 | - | 17.20 | 17.80 |
| <i>20</i> | 43 | 0.0 | - | 18.40 | 16.60 |
| <i>21</i> | 45 | 0.0 | - | 18.90 | 14.30 |
| <i>22</i> | 47 | 0.0 | - | 19.50 | 13.10 |
| <i>23</i> | 49 | 0.0 | - | 21.30 | 11.90 |
| <i>24</i> | 51 | 0.0 | - | 22.40 | 11.30 |

Nel grafico distanza-tempo sono riportati i tempi del primo arrivo da cui si individuano le dromocrone e tramite linearizzazione si individuano i principali rifrattori al di sotto di ciascun shot:



Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo a 3 strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia shot-point):





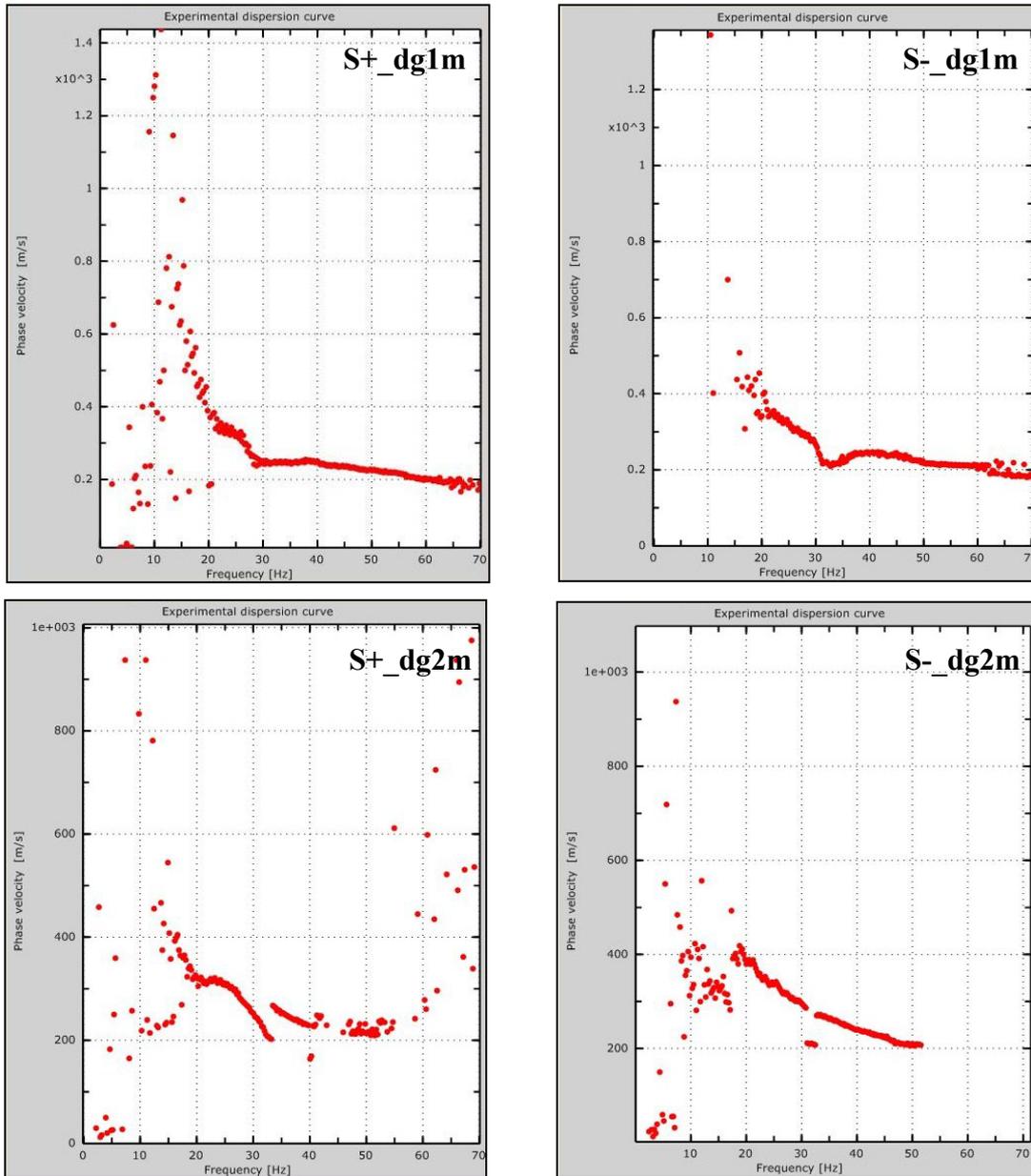
Si evidenziano pertanto 2 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità variabile da 1.5-2.0 m da pc che separa il sismostrato superficiale caratterizzato da valori di V_P compresi tra 390 e 450 m/s da quello sottostante con V_P compresi tra 1430 e 1570 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 4.5 a 5.5 m da pc, che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1800 e 2000 m/s.

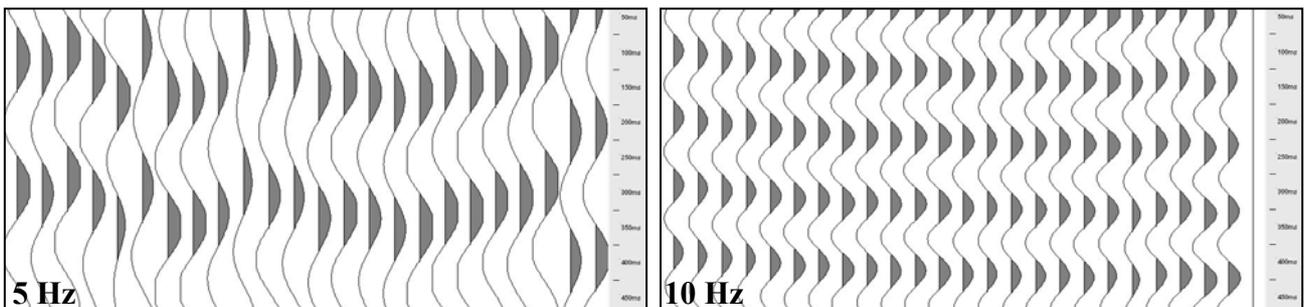
3.1.2. Acquisizione ed analisi onde superficiali (Onde di Rayleigh)

Durante la fase di acquisizione, lungo i due array sismici predisposti con interdistanza geofonica di 1 m e di 2 m (dg1m e dg2m), sono stati eseguiti ripetuti shots coniugati (S+ e S-) posti alla distanza di 5 m dal geofono più esterno, al fine di valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di eccessive variazioni laterali e fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

Le diverse acquisizioni hanno mostrato una buona stabilità in termini energetici (spettri fk riportati in allegato n. 4) e quindi in termini di curva di dispersione sperimentale apparente: esse mostrano un leggero andamento normal-dispersivo nel tratto tra i 30 e i 70 Hz, mentre a basse frequenze (tra i 20 e i 30 Hz) il gradiente aumenta bruscamente; inoltre per la configurazione con distanza intergeofonica di 2.0 m l'andamento della curva di dispersione appare controllato, per frequenze tra i 30 e i 70 Hz, dall'influenza dei modi superiori dell'onda di Rayleigh.



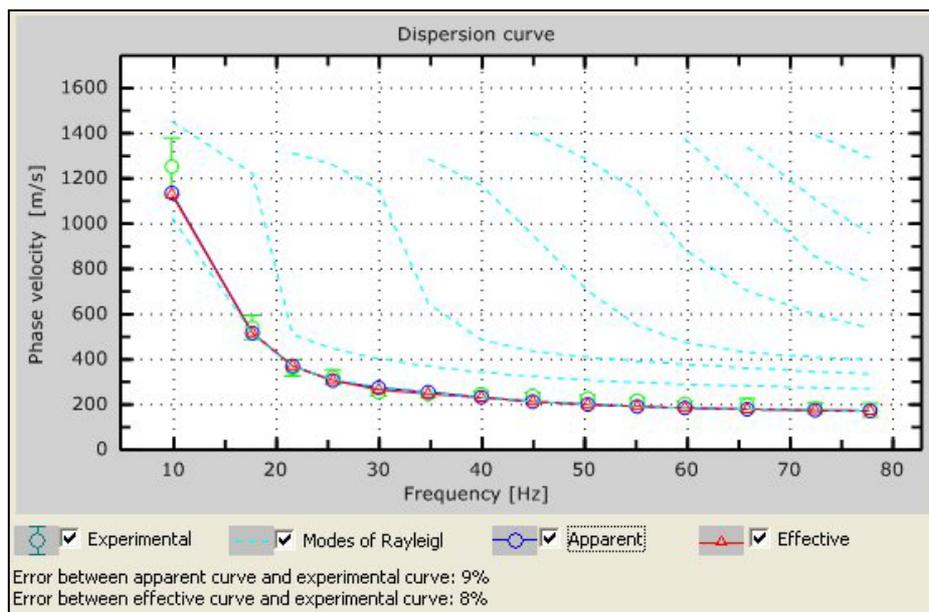
L'acquisizione S+_dg1m è stata scelta per l'elaborazione in quanto presenta una migliore definizione della curva di dispersione per una banda di frequenza più ampia: si è proceduto pertanto alla valutazione di coerenza del segnale su ciascun ricevitore per determinare la minima frequenza affidabile (10 Hz), a cui è legata la massima profondità di indagine.



L'elaborazione è stata eseguita in procedura diretta calcolando, per il modello numerico 1D scelto sulla base dei dati di sismica a rifrazione, la relativa curva di dispersione numerica; successivamente dal modello di prima elaborazione è stata scelta la soluzione che minimizza l'errore tra curva sperimentale e curva numerica e che tiene conto del contributo dei modi superiori di Rayleigh.

Il modello individuato fornisce valori del parametro V_{S30} di 606 m/s e risulta coerente con i dati di sismica a rifrazione in onde P, ponendo il bedrock sismico ad una profondità di circa 14.0 m, ovvero inferiore a 20 m con valori di V_{SH} prossimi a 360 m/s (pari a 358-361 m/s): il sito è pertanto appartenente alla **categoria di sottosuolo E** ai sensi del DM 14-01-2008.

Di seguito si riporta l'andamento della curva di dispersione numerica multimodale calcolata per il modello di sottosuolo scelto: le curve numeriche calcolate sono rappresentate dalla linea rossa (metodo Lai-Rix, 1998), dalla linea blu (metodo Roma, 2001) e dalle linee tratteggiate azzurre (per i modi superiori), mentre con i cerchietti verdi è indicato l'andamento generale della curva di dispersione sperimentale acquisita.



Il profilo di rigidezza medio così individuato è riportato nella seguente tabella:

| Profilo medio V_S – ST1 | | | | | | |
|--|--------------|-----------------------------|-------------|-------|-------------|---|
| Unità | Spessore (m) | ρ (g/cm ³) | V_S (m/s) | ν | V_P (m/s) | Fonte del dato |
| U1 | 1.0 | 1.7 | 180 | 0.40 | 440 | Dai risultati dell'indagine di sismica a rifrazione |
| | 1.0 | 1.8 | 200 | 0.36 | 430 | |
| U2 | 3.0 | 1.9 | 300 | 0.48 | 1530 | |
| U3 | 5.0 | 2.0 | 400 | 0.48 | 2040 | |
| U4 | 4.0 | 2.1 | 700 | 0.43 | 2000 | Dai risultati dell'indagine masw |
| U5 | ∞ | 2.6 | 1500 | 0.43 | 4280 | |
| $V_{SH} = 361 \text{ m/s} - V_{S30} = 607 \text{ m/s}$ | | | | | | |

3.2. Stendimento n. 2 (nei pressi del centro sportivo - Lugana)

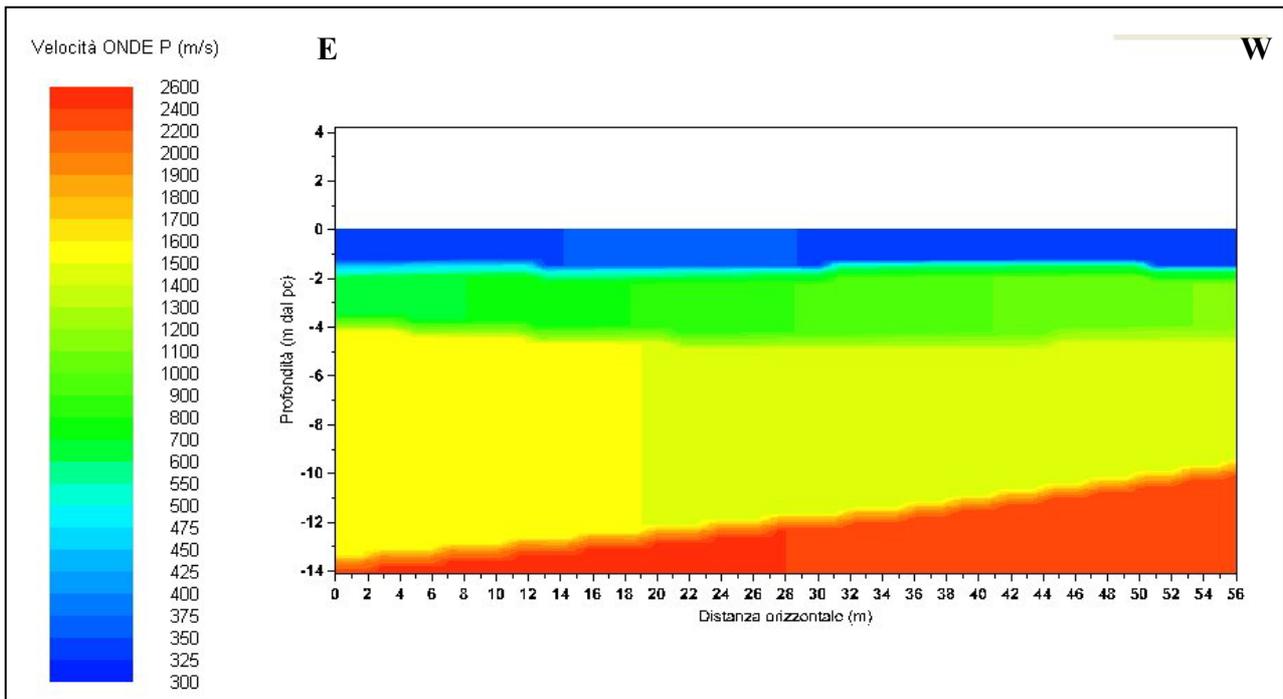
3.2.1. Acquisizione ed analisi onde P

In allegato n. 5 si riporta il sismogramma multishot acquisito con distanza intergeofonica di 2.0 m, da cui tramite amplificazione ed equalizzazione delle tracce si è estratto il sismogramma elaborato da sottoporre ad eventuali procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto, taglia basso e passa banda. Successivamente mediante procedura di picking sono stati individuati i tempi di primo arrivo per ciascun shot e per ciascun ricevitore.

Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio, ad esclusione di quelli caratterizzati da un rapporto S/N troppo basso:

| <i>N° shot</i> | | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---|----------|----------|
| <i>Distanza relativa (m)</i> | | | 0.0 | 28.0 | 56.0 |
| <i>Quota relativa (m)</i> | | | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| <i>Geofono</i> | <i>Distanza relativa (m)</i> | <i>Quota relativa (m)</i> | <i>Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)</i> | | |
| | | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> |
| <i>1</i> | 5 | 0.0 | 14.80 | 30.00 | - |
| <i>2</i> | 7 | 0.0 | 18.89 | 28.89 | - |
| <i>3</i> | 9 | 0.0 | 21.29 | 27.10 | - |
| <i>4</i> | 11 | 0.0 | 22.39 | 25.89 | - |
| <i>5</i> | 13 | 0.0 | 24.20 | 23.60 | - |
| <i>6</i> | 15 | 0.0 | 24.79 | 21.29 | - |
| <i>7</i> | 17 | 0.0 | 25.89 | 20.10 | - |
| <i>8</i> | 19 | 0.0 | 27.10 | 18.39 | 35.90 |
| <i>9</i> | 21 | 0.0 | 28.29 | 16.00 | 34.70 |
| <i>10</i> | 23 | 0.0 | 29.39 | 14.30 | 34.09 |
| <i>11</i> | 25 | 0.0 | 30.60 | 7.80 | - |
| <i>12</i> | 27 | 0.0 | 31.79 | 2.00 | 32.90 |
| <i>13</i> | 29 | 0.0 | - | 2.00 | 31.79 |
| <i>14</i> | 31 | 0.0 | 34.70 | 8.39 | 30.60 |
| <i>15</i> | 33 | 0.0 | 35.90 | 13.69 | 28.89 |
| <i>16</i> | 35 | 0.0 | 37.00 | 16.00 | 27.70 |
| <i>17</i> | 37 | 0.0 | 38.79 | 18.89 | 25.89 |
| <i>18</i> | 39 | 0.0 | 40.00 | 21.29 | 24.79 |
| <i>19</i> | 41 | 0.0 | 41.70 | 22.39 | 23.60 |
| <i>20</i> | 43 | 0.0 | 42.90 | 24.20 | 21.89 |
| <i>21</i> | 45 | 0.0 | 44.00 | 25.39 | 20.10 |
| <i>22</i> | 47 | 0.0 | 44.59 | 26.50 | 17.79 |
| <i>23</i> | 49 | 0.0 | 45.20 | 27.70 | 16.60 |
| <i>24</i> | 51 | 0.0 | 46.40 | 29.39 | 14.80 |

Nel grafico distanza-tempo sono riportati i tempi del primo arrivo da cui si individuano le dromocrone e tramite linearizzazione si individuano i principali rifrattori al di sotto di ciascun shot:



Si evidenziano pertanto 3 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità variabile da 1.0-2.0 m da pc che separa il sismostrato superficiale caratterizzato da valori di V_P compresi tra 330 e 370 m/s da quello sottostante con V_P compresi tra 600 e 1100 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 3.5 a 4.5 m da pc, che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1450 e 1580 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 10.0 a 14.0 m da pc, che separa il terzo sismostrato dal quarto sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 2350 e 2450 m/s.

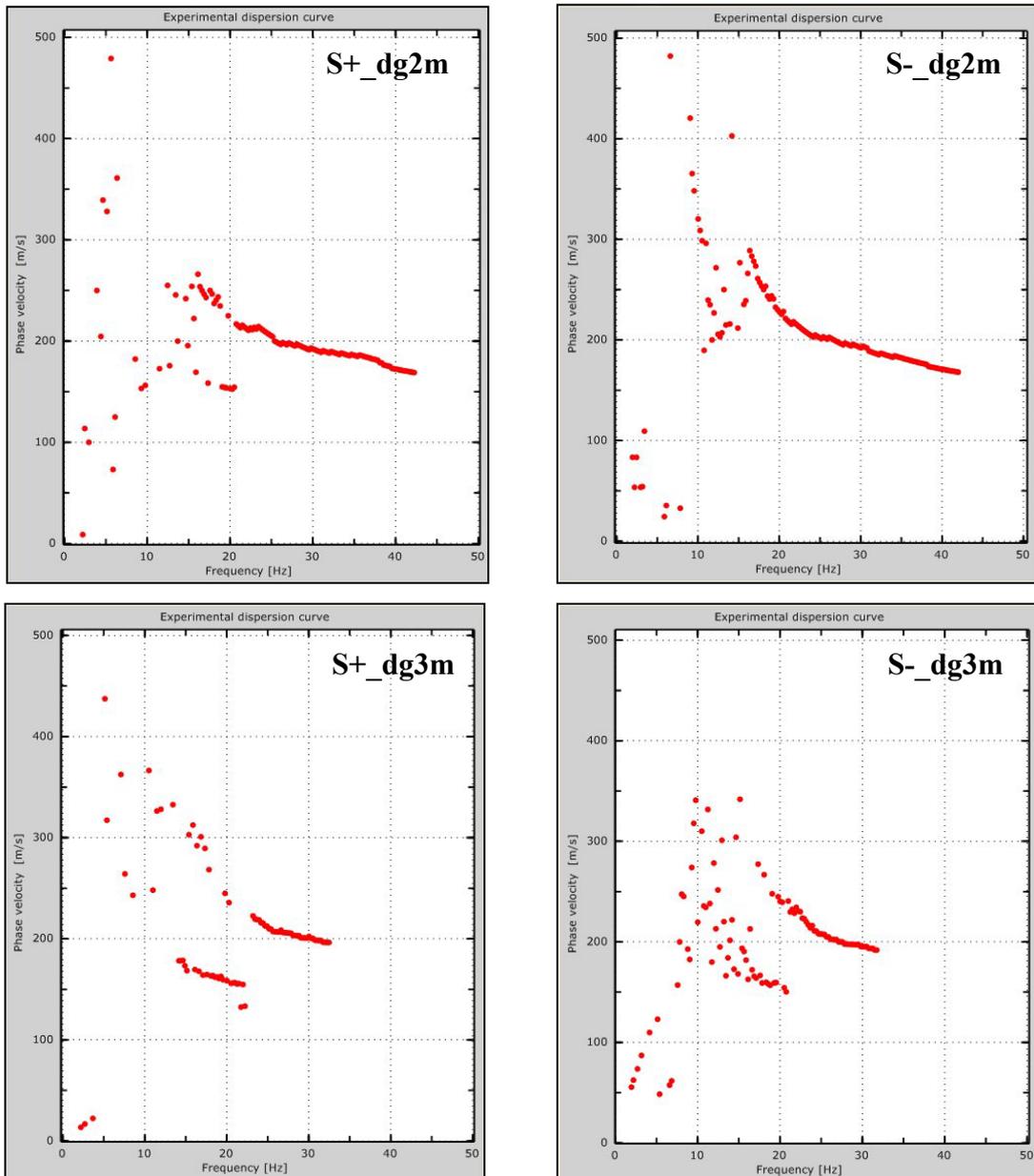
Le acquisizioni eseguite con distanza intergeofonica di 3.0 m confermano quanto ottenuto dalle acquisizioni con distanza intergeofonica di 2.0 m.

3.2.2. Acquisizione ed analisi onde superficiali (Onde di Rayleigh)

Durante la fase di acquisizione, lungo i due array sismici predisposti con interdistanza geofonica di 2 m e di 3 m (dg2m e dg3m), sono stati eseguiti ripetuti shots coniugati (S+ e S-) posti alla distanza rispettivamente di 5 m e di 6 m dal geofono più esterno, al fine di valutare la stabilità della curva di dispersione sperimentale apparente, necessaria per verificare l'assenza di eccessive variazioni laterali e fondamentale prima di eseguire la fase di inversione 1D.

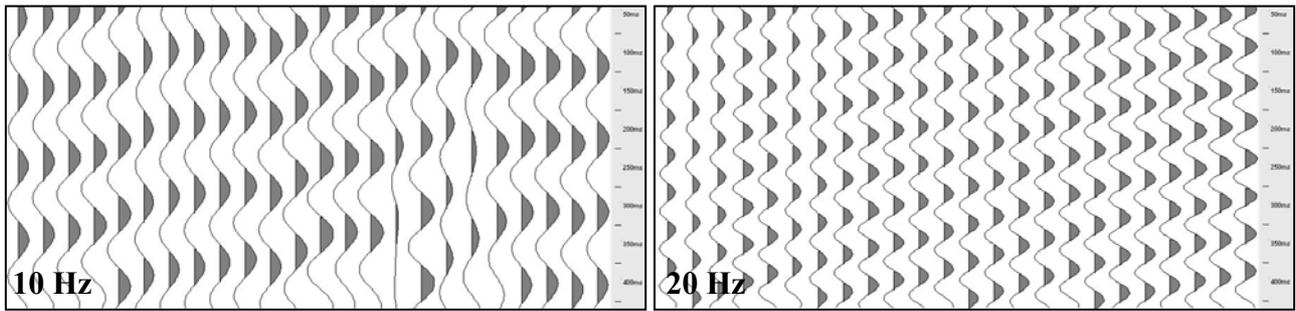
Le diverse acquisizioni hanno mostrato una buona stabilità in termini energetici (spettri f_k riportati in allegato n. 6) e quindi in termini di curva di dispersione sperimentale apparente: esse mostrano, per quasi tutta la banda di frequenza in cui il segnale è coerente, una netta dominanza dei modi superiori dell'onda di Rayleigh, resa evidente dalle acquisizioni con distanza intergeofonica di 3 m,

le quali mostrano con maggior definizione il contributo energetico del modo fondamentale nella banda di frequenza compresa tra 10 e 20 Hz.



L'acquisizione S+_dg3m è stata scelta per l'elaborazione in quanto presenta una migliore definizione della curva di dispersione per il modo fondamentale dell'onda di Rayleigh: essa è stata poi completata, per il tratto prossimo alla frequenza di 10 Hz, dall'acquisizione S-_dg2m.

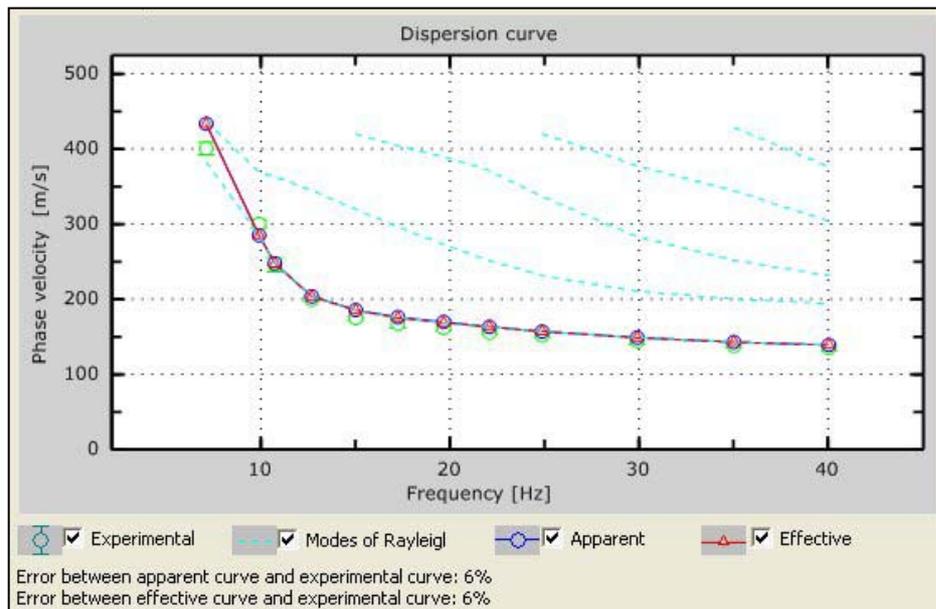
Per determinare la minima frequenza affidabile (10-20 Hz), a cui è legata la massima profondità di indagine, si è proceduto alla valutazione di coerenza del segnale su ciascun ricevitore scegliendo l'acquisizione S+_dg3m, per la banda di frequenze superiori a 15 Hz, e l'acquisizione S-_dg2m, per la banda di frequenza compresa tra i 10 e i 15 Hz.



L'elaborazione è stata eseguita in procedura diretta calcolando, per il modello numerico 1D scelto sulla base dei dati di sismica a rifrazione, la relativa curva di dispersione numerica; successivamente dal modello di prima elaborazione è stata scelta la soluzione che minimizza l'errore tra curva sperimentale e curva numerica e che tiene conto del contributo dei modi superiori di Rayleigh.

Il modello individuato fornisce valori del parametro V_{S30} di 301 m/s e risulta coerente con i dati di sismica a rifrazione in onde P, ponendo il bedrock sismico ad una profondità superiore a 30 m: il sito è pertanto appartenente alla **categoria di sottosuolo C** ai sensi del DM 14-01-2008.

Di seguito si riporta l'andamento della curva di dispersione numerica multimodale calcolata per il modello di sottosuolo scelto: le curve numeriche calcolate sono rappresentate dalla linea rossa (metodo Lai-Rix, 1998), dalla linea blu (metodo Roma, 2001) e dalle linee tratteggiate azzurre (per i modi superiori), mentre con i cerchietti verdi è indicato l'andamento generale della curva di dispersione sperimentale acquisita.



Il profilo di rigidezza medio così individuato è riportato nella seguente tabella:

| Profilo medio V_s – ST2 | | | | | | |
|---|--------------|-----------------------------|-------------|-------|-------------|---|
| Unità | Spessore (m) | ρ (g/cm ³) | V_s (m/s) | ν | V_p (m/s) | Fonte del dato |
| U1 | 2.0 | 1.8 | 140 | 0.40 | 340 | Dai risultati dell'indagine di sismica a rifrazione |
| U2 | 2.0 | 1.9 | 180 | 0.47 | 760 | |
| U3 | 5.0 | 2.0 | 200 | 0.49 | 1430 | |
| U4 | 4.0 | 2.0 | 380 | 0.47 | 1600 | |
| U5 | ∞ | 2.1 | 440 | 0.48 | 2250 | |
| $V_{S30} = 301$ m/s | | | | | | |

4. Considerazione sui risultati

I modelli finali scelti sono da considerarsi indicativi del reale modello di rigidità del sottosuolo e sono utilizzabili, in modo opportuno, solo per stime sull'ordine di grandezza del parametro V_{S30} e per verifiche di compatibilità con dati e conoscenze disponibili in altri siti limitrofi, nell'ambito di operazioni di estrapolazione di dati territoriali ai fini pianificatori.

L'indeterminatezza sismostratigrafica, che caratterizza inevitabilmente il risultato proveniente da indagini basate sull'analisi spettrale delle onde di Rayleigh, potrebbe essere risolta o comunque notevolmente ridotta mediante integrazione dei dati acquisiti con dati provenienti da sismica a rifrazione in onde SH.

Dr. Geol. Daniela Chiarini



Dr. Geol. Massimo Compagnoni



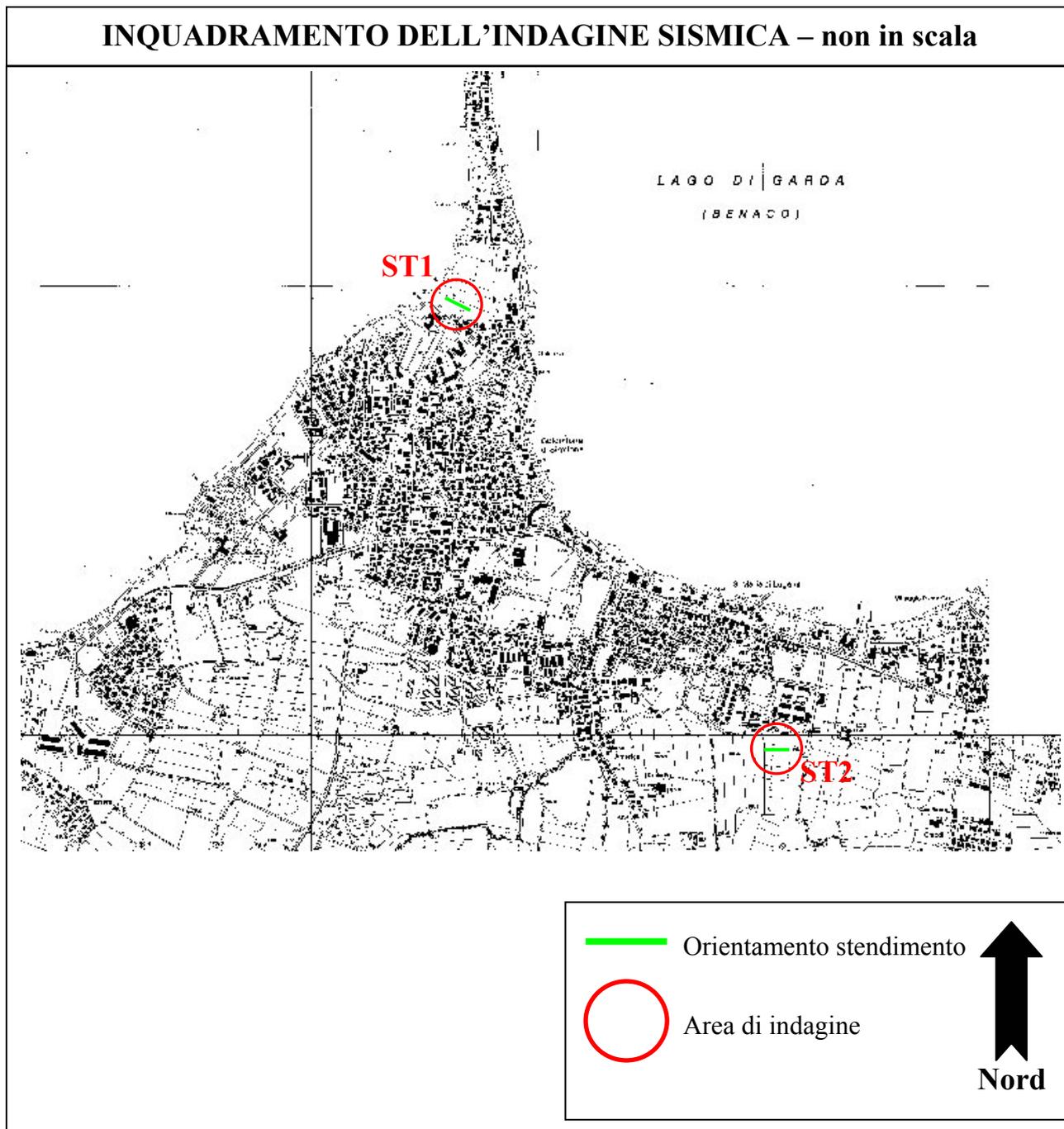
Dr. Geol. Alberto Peruzzini



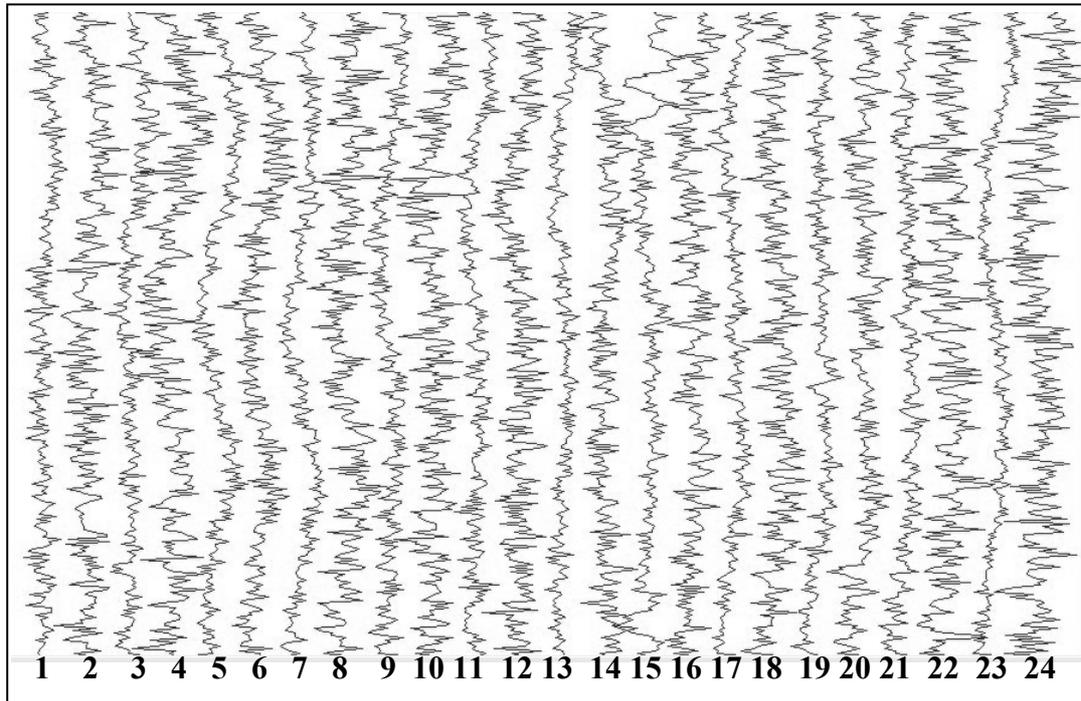
ALLEGATI

1. Ubicazione stendimenti sismici
2. Rumore ambientale lungo gli stendimenti sismici
3. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde P – ST1
4. Alcune acquisizioni masw in termini di spettro fk – ST1
5. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde P – ST2
6. Alcune acquisizioni masw in termini di spettro fk – ST2

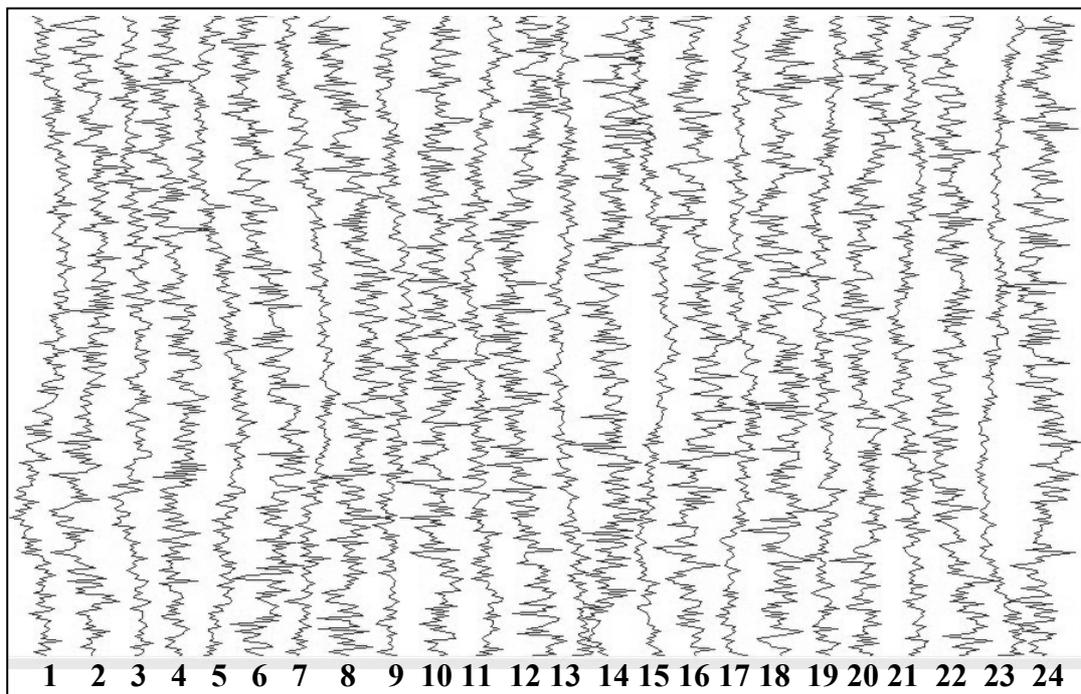
ALLEGATO n. 1 – Ubicazione stendimenti sismici



ALLEGATO n. 2 – Rumore ambientale lungo gli stendimenti sismici

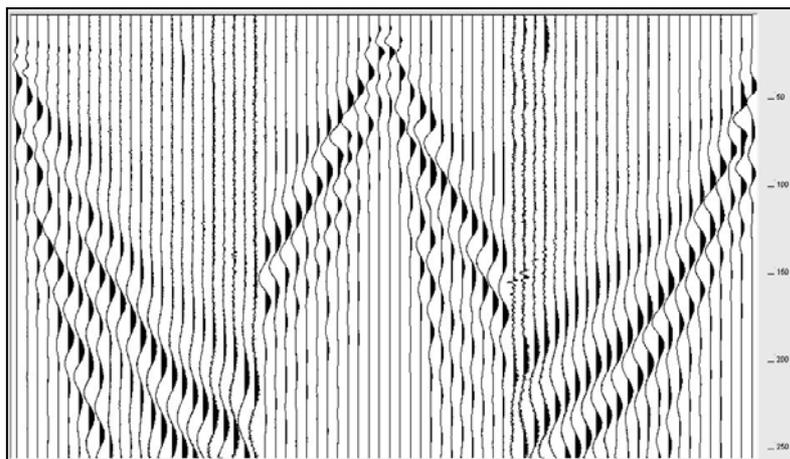


ST1

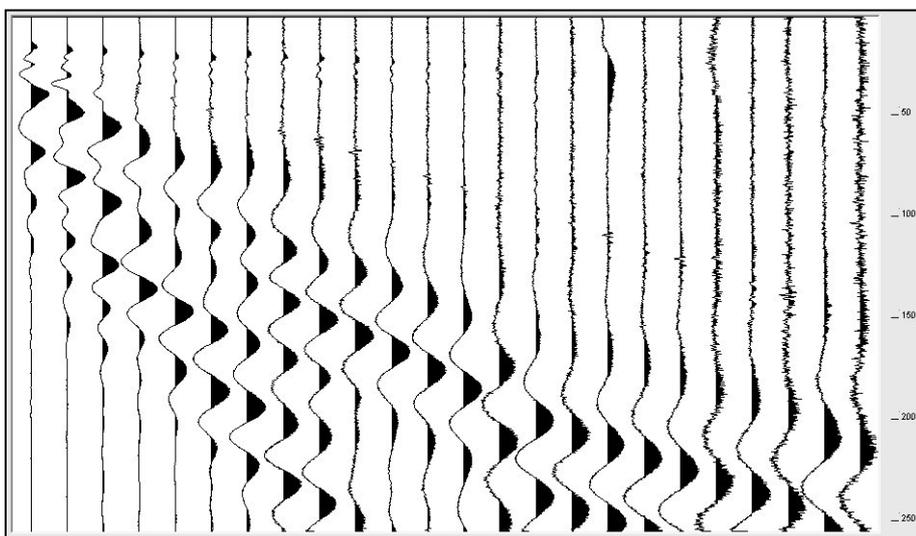


ST2

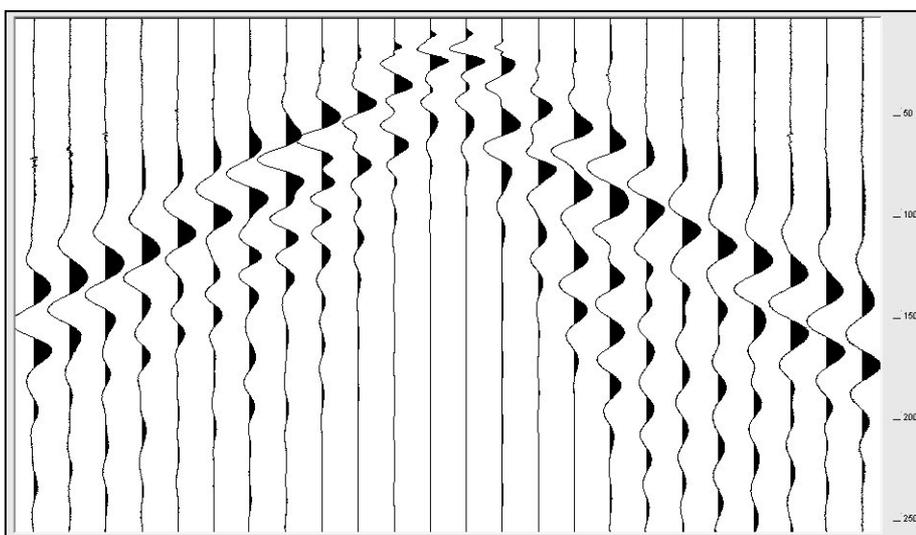
ALLEGATO n. 3 – Alcuni sismogrammi ONDE P – ST1



Sismogramma multishots acquisito

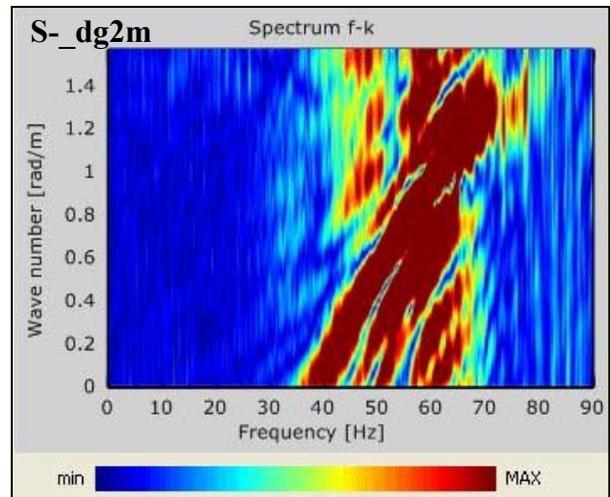
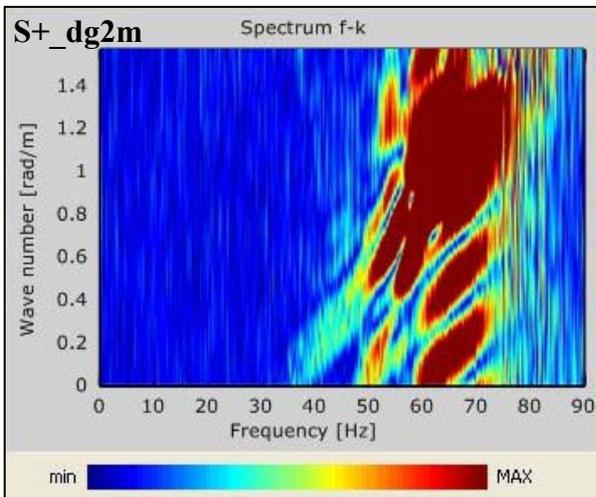
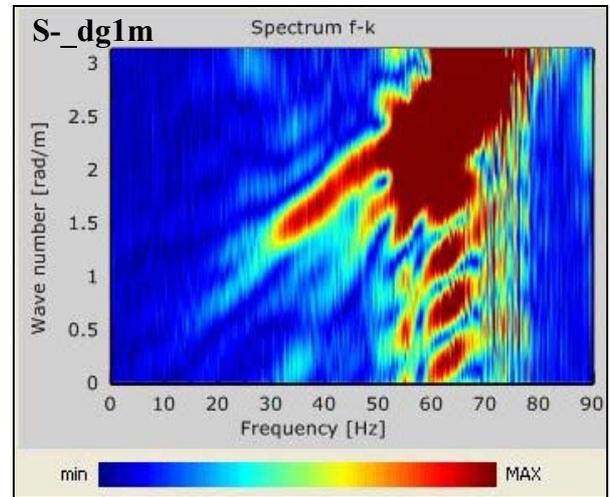
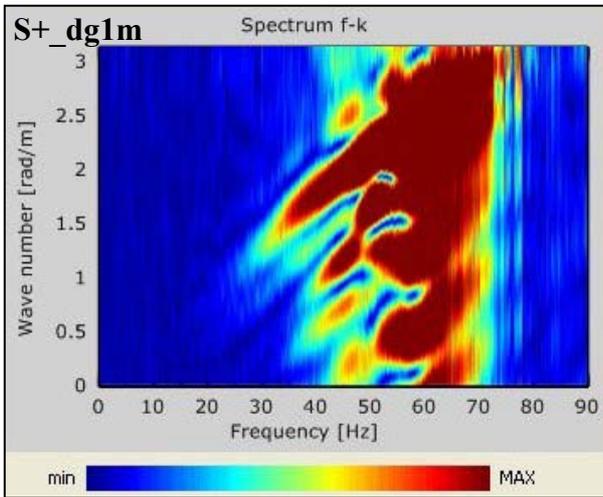


Sismogramma shot S1

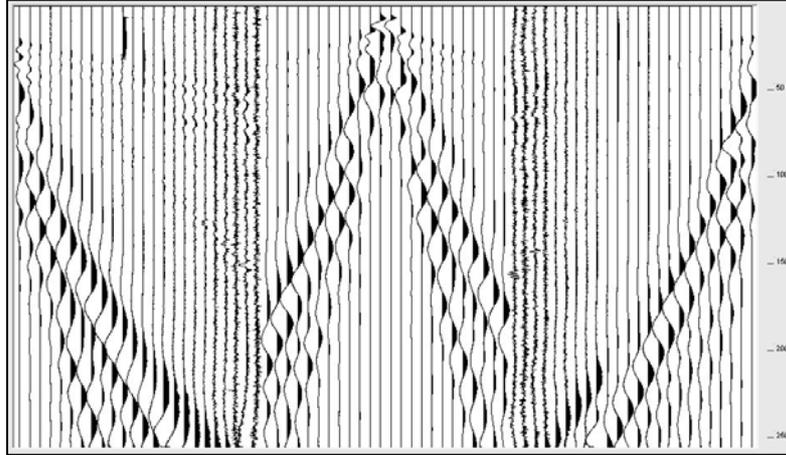


Sismogramma shot S2

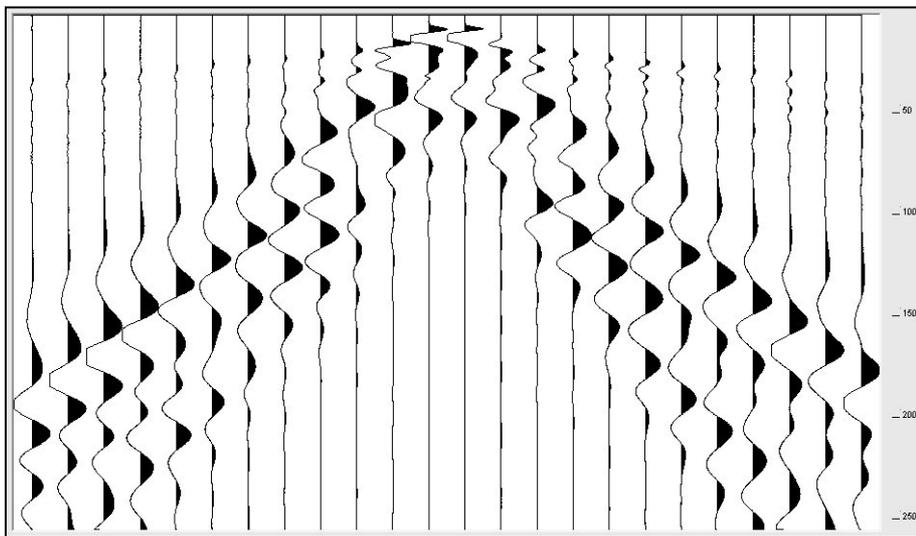
ALLEGATO n. 4 – Alcune acquisizioni masw in termini di spettro fk
Stendimento ST1



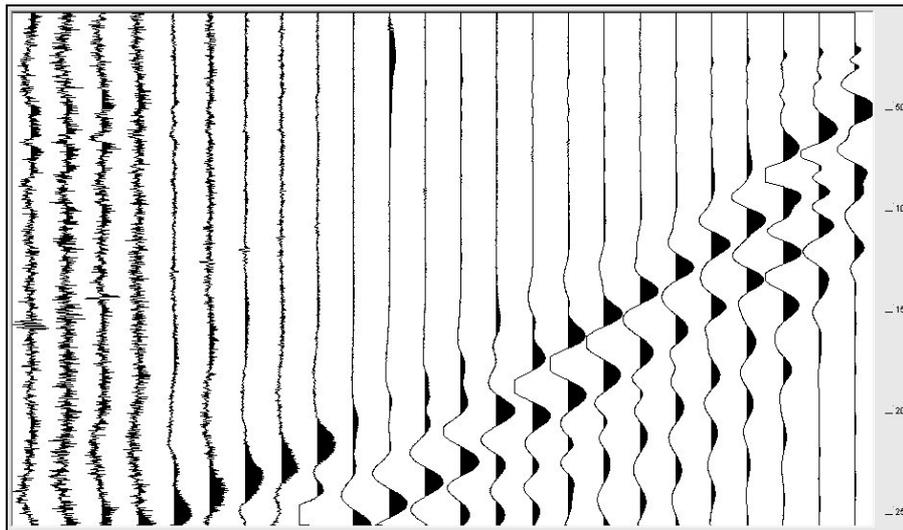
ALLEGATO n. 5 – Alcuni sismogrammi ONDE P – ST2



Sismogramma multishots acquisito



Sismogramma shot S2



Sismogramma shot S3

**ALLEGATO n. 6 – Alcune acquisizioni masw in termini di spettro fk
Stendimento ST2**

