

**COMPLETAMENTO E OTTIMIZZAZIONE DELLA  
TORINO-MILANO CON LA VIABILITA' LOCALE MEDIANTE  
INTERCONNESSIONE TRA S.S.32 E S.P.299  
TANGENZIALE DI NOVARA  
LOTTO "0" E LOTTO "1"**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**COD. TO166**

**CUP: F34E06000030001**

**PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI**

IMPRESA: A.T.I.

Mandataria:



Mandante:



Direttore Tecnico A.T.I.  
Ing. A. Ridella

A.T.I. DI PROGETTAZIONE

Mandataria:

**S.T.E. s.r.l.**

Structure and Transport Engineering

Direttore Tecnico  
Ing. E. Moroni

Mandante:

**Dott. Arch. Elisa Lucia ZANETTA**

Ordine Architetti P.P.C. Provincia di Novara e  
Verbano-Curso-Ossola n.1400

Mandante:

**Dott. Ing. Matteo POLETTI**

Ordine degli Ingegneri Provincia di Novara n.2310/A

RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

*Ing. Francesco M. La Camera*

IL GEOLOGO

*Dott. Geol. Maria Bruno*

COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

*Ing. Francesco M. La Camera*

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

*Ing. Marcello Buonamico*

**GEOLOGIA E GEOTECNICA**

**Documentazione indagini geofisiche di progetto esecutivo**

CODICE PROGETTO

PROGETTO

**DPT002 E 1801**

NOME FILE

000\_T00\_GE00\_GE0\_RE05\_B

**000T00GE00GE0RE05**

REVISIONE

SCALA

**B**

-

**D**

**C**

**B**

**A**

REV.

EMISSIONE PER ISTRUTTORIA

PRIMA EMISSIONE

DESCRIZIONE

OTTOBRE 2018

APRILE 2018

DATA

BRUNO

BRUNO

REDATTO

LA CAMERA

LA CAMERA

VERIFICATO

RIDELLA

RIDELLA

APPROVATO

 <p><b>COMPARTIMENTO DELLA VIABILITÀ PER IL PIEMONTE SEZIONE DI NOVARA</b></p>	 <p>CONSORZIO STABILE EDILMACO</p>
	 <p>GIUGLIANO COSTRUZIONI METALLICHE S.r.l.</p>

OGGETTO	
<b>Tangenziale Novara (Lotto 0 e Lotto 1)</b>	
TAVOLA N°	CONTENUTO
	INDAGINI GEOFISICHE

  <p><b>ISPEZIONI E CONSOLIDAMENTI MONTANI</b></p> <p>VIA XX SETTEMBRE N° 73 – 28041 ARONA (NO) TEL. 0322/48396 – FAX 0322/48422 EMAIL: <a href="mailto:SISCOM.SRL@TIN.IT">SISCOM.SRL@TIN.IT</a> - SITO INTERNET: <a href="http://WWW.SISCOMSRL.IT">WWW.SISCOMSRL.IT</a></p>	<p><b>IL RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE:</b></p> <p style="text-align: center;">DOTT. GEOL. CESARE ANTIMI ORDINE GEOLOGI REGIONE LIGURIA N° 106</p>
	<p><b>PROGETTISTA DISEGNATORE :</b></p>

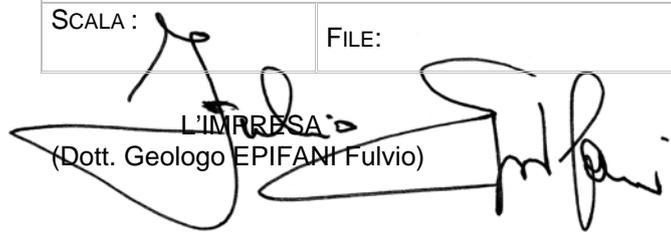
COMMESSA N°: 21045	COMMITTENTE: A.T.I. EDILMACO CONSORZIO STABILE-GIUGLIANO COSTRUZ. METALLICHE S.R.L.
--------------------	---

DESCRIZIONE ELABORATO:

REV.	DATA	REDATTO	APPROVATO	SOFTWARE	RELEASE
0	FEBBRAIO 2018	BLARDONE LUCA	EPIFANI FULVIO		
1					
2					
3					

SCALA :	FILE:	CODICE/TAVOLA N°:
---------	-------	-------------------

L'IMPRESA:  
(Dott. Geologo EPIFANI Fulvio)





## SOMMARIO

1	INTRODUZIONE .....	2
1.1	PREMESSA GENERALE E SCOPO DEL LAVORO .....	2
1.2	INDAGINI ESEGUITE .....	2
2	INDAGINE GEOFISICA CON METODOLOGIA SISMICA IN FORO (CROSS-HOLE) .....	4
2.1	METODOLOGIA SISMICA CROSS-HOLE .....	4
2.2	CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'ATTREZZATURA .....	7
2.3	MODALITÀ OPERATIVE .....	7
3	ELABORAZIONE ED INTERPRETAZIONE DATI .....	9
3.1	PROCEDIMENTO DI ELABORAZIONE .....	9
3.2	PROCEDIMENTO DI POST-ELABORAZIONE – INTERPRETAZIONE DEI DATI .....	10
3.3	RIASSUNTO DEI RISULTATI: PROFILO DI VELOCITA' E PARAMETRI ELASTICI .....	11

### TAVOLE:

- Tav. 1:** *Corografia di inquadramento alla scala 1:10.000 (base topografica fogli 116\_080 e 116\_120 della Carta Tecnica Regione Piemonte);*
- Tav. 2:** *Ubicazioni delle indagini alla scala 1:5.000 (base topografica fogli 116\_080 e 116\_120 della Carta Tecnica Regione Piemonte)*

### APPENDICI:

**Appendice 1:** *Schema tecnico sismografo*

**Appendice 2:** *Documentazione fotografica*

**Appendice 3:** *Acquisizione Cross-Hole – sismogrammi e report tabellari*

**Appendice 4:** *Grafici riassuntivi Vs, Vp-Edin, Gdin-u coeff. Poisson – Elaborazione CH1-CH2*



## 1 INTRODUZIONE

### 1.1 PREMESSA GENERALE E SCOPO DEL LAVORO

La presente indagine geofisica ha per oggetto la caratterizzazione sismica di un'area sita in Novara e Cameri (NO), in località Cascina Argine (Cameri) e Cascina Eletto (Novara) come individuato cartograficamente in Tavola 1, a supporto del progetto di realizzazione della Tangenziale di Novara Lotti 0-1.

La presente relazione sarà così articolata:

- cenni sulle modalità di indagine geofisica;
- modalità di acquisizione, elaborazione ed interpretazione Cross-Hole;
- interpretazione e risultati delle indagini geofisiche per la definizione delle velocità  $V_p$ ,  $V_s$  e dei principali parametri elastici dinamici;
- considerazioni conclusive.

Le attività di indagine sono state sviluppate secondo gli standard operativi per le prove sismiche in foro "ASTM D4428/D4428M – 14: Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing".

### 1.2 INDAGINI ESEGUITE

La campagna di indagini geofisiche in foro, come riportato nella seguente tavola 2 (estratto planimetria fornita dalla committenza), si è sviluppata nella giornata del 15/02/2018 ed ha riguardato l'esecuzione delle seguenti attività:

<b>Sigla</b>	<b>Foro di energizzazione (profondità max -m)</b>	<b>Foro di acquisizione (profondità max -m)</b>
CH1	S3 (30.2)	S3-2 (30.3)
CH2	S7 (30.4)	S7-2 (30.6)

Le profondità massime raggiunte hanno coinciso con la profondità del sondaggio geognostico e del tubo di rivestimento in PVC atossico.

A tale riguardo la logistica del cantiere, le modalità di completamento dei fori di sondaggio ed il contesto in cui sono stati realizzati hanno consentito la programmazione e realizzazione delle indagini in foro in condizioni adeguate.

In particolare, relativamente agli aspetti logistici ed al contesto territoriale, l'area di indagine è ubicata in una porzione compresa tra due elementi di disturbo, anche se lontani nel caso dei sondaggi S3, per la qualità dell'acquisizione geofisica quali le linee ferroviarie Novara-Oleggio e Novara-Borgomanero; ciò si traduce nella produzione di debole rumore ambientale che è stato corretto con successive operazioni di filtraggio alle basse e alte frequenze.



SISCOM s.r.l. - RIFERIMENTI E CONSULENZE INFORMATICA  
Via XI Settembre, 79 - ARONA (NO)

Per quanto riguarda invece le modalità di completamento dei fori oggetto di energizzazione ed acquisizione, si presentavano costituiti da tubi piezometrici in PVC atossico di diametro esterno 88.0 mm ed interno 80.0 mm che risultano i più adatti per l'esecuzione di indagini sismiche in foro; preventivamente alla posa della strumentazione è stato verificata la continuità e verticalità del foro attraverso apposito peso guida di diametro opportuno che ha dimostrato la buona qualità dei fori oggetto di indagine.



## **2 INDAGINE GEOFISICA CON METODOLOGIA SISMICA IN FORO (CROSS-HOLE)**

Con la metodologia sismica in foro è in genere possibile ottenere misurazioni più precise delle velocità sismiche dei terreni, sfruttando la presenza dei fori di sondaggio e la possibilità di posizionare i sensori sismici all'interno degli stessi ad intervalli regolari corrispondenti alla profondità di energizzazione.

Lo scopo della prova in foro (Down-Hole e/o Cross-Hole) consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde P) e di taglio (onde S), calcolando il tempo ad esse necessario per percorrere una distanza nota tra il foro di energizzazione e quello di ricezione. La tipologia di prova e la metodologia di calcolo suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo.

L'ubicazione delle indagini è riportata in Tavola 2, estratto della carta tecnica regionale del Piemonte.

### **2.1 METODOLOGIA SISMICA CROSS-HOLE**

Le prove sismiche Cross-Hole prevedono la misura delle velocità delle onde sismiche fra due fori di sondaggio ove si energizzi uno dei due ad una certa quota e si misuri nell'altro ad un'altra quota (in genere la più prossima possibile), attraverso un geofono triassiale adeguatamente ancorato alle pareti del foro. Per l'applicazione della metodologia Cross-Hole devono quindi essere disponibili due fori di sondaggio rivestiti e ben cementati di cui sia nota la reciproca distanza a tutte le quote di misura. Nel caso di fori di maggiore profondità e minore distanza reciproca è possibile effettuare misure di verticalità attraverso sonda clinometrica per successive correzioni di distanze tra i fori.

Le onde elastiche sono state generate per mezzo di un'attrezzatura meccanica che permette la caduta di una massa battente di circa 5 kg per un tratto predefinito in corrispondenza delle diverse profondità d'indagine nel foro di energizzazione; la massa battente viene ancorata alle pareti del foro con un'attrezzatura di tipo pneumatico, comandata idraulicamente dalla superficie attraverso apposito compressore elettrico. Le energizzazioni sono state effettuate a partire dalle maggiori profondità per risalire poi verso la superficie, per evitare l'intrappolamento del sistema di energizzazione a seguito di possibili ostacoli (manicotti, inclinazioni, rivetti della tubazione inclinometrica). Gli impulsi sono stati rilevati da un geofono tridimensionale posizionato alla medesima quota nel foro di indagine rispettivamente utilizzato, ancorato. A passo di un 1.0 m sono state effettuate le energizzazioni e le registrazioni dei segnali generati per ricavare le velocità di propagazione media in senso orizzontale delle onde compressive e delle onde

trasversali. L'impulso di trigger (tempo 0) è stato ottenuto dall'apertura di un circuito collegato alla struttura di sostegno della massa battente. La battuta, provocando l'apertura del circuito, dà inizio al campionamento dell'onda sismica. Questo sistema, anche se impegnativo, garantisce un preciso istante "0" e, di conseguenza, la qualità generale dell'acquisizione.

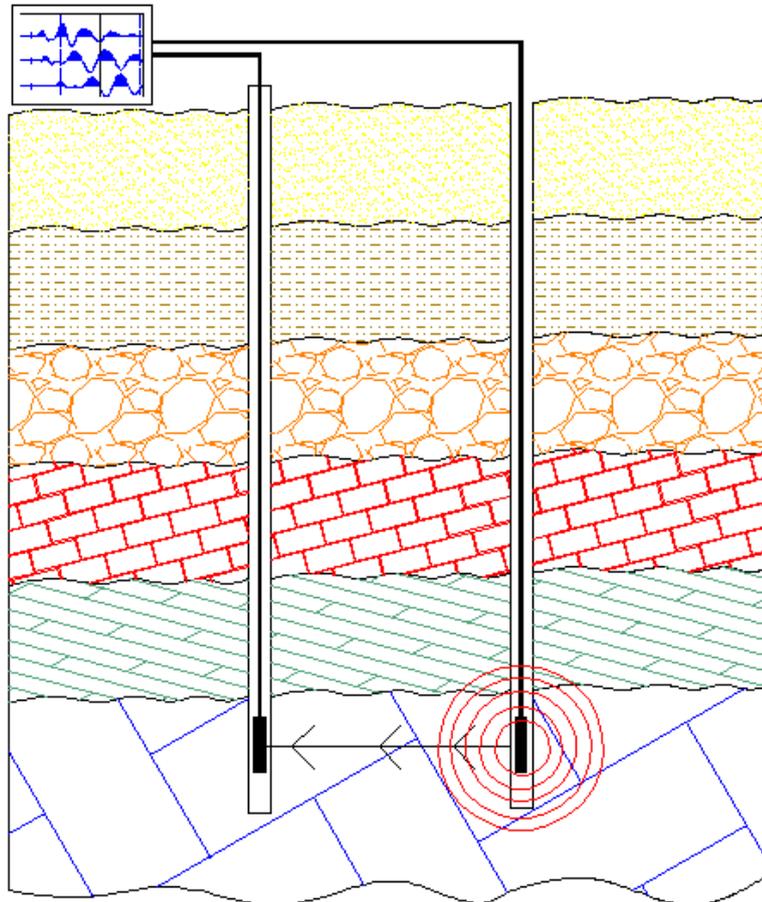


Figura 1: Schema di acquisizione sismica Cross-Hole

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si compone delle seguenti parti:

- sistema di energizzazione;
- sistema di ricezione;
- trigger;
- sistema di acquisizione dati.

Il sistema di energizzazione a massa battente, come precedentemente descritto, è in grado di generare onde elastiche con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione P e di taglio S. Il sistema sorgente utilizzato è costituito da una massa battente strutturata e funzionante come un sistema pistone-cilindro; la struttura di ancoraggio al foro (cilindro) contiene due sistemi pneumatici che si espandono in



SISCOM s.r.l. - RIFERIMENTI E CONSULENZE INFORMATICA  
Via XI Settembre, 79 - AROSA (NO)

pressione fino alle pareti del foro e due guide entro cui è libera di scorrere la massa battente (corsa massima 30 cm). Una volta ancorata la struttura, la massa battente viene attivata manualmente tramite un cavetto d'acciaio da piano campagna. L'energizzatore a massa battente è in grado di ancorarsi alla profondità desiderata tramite un sistema di ancoraggio pneumatico, comandato idraulicamente dalla superficie attraverso apposito compressore elettrico, disposto longitudinalmente all'asse del foro; il sistema di ancoraggio è inoltre in grado di garantire la perfetta coassialità tra il foro e lo strumento di energizzazione.

Il sistema di ricezione è costituito da tre componenti (geofono-idrofono triassiale), ciascuno dei quali è costituito da un trasduttore di velocità orientato secondo gli assi di una terna cartesiana ortogonale aventi in comune l'origine e l'asse delle ordinate e ruotate rispetto all'origine di 45°. I trasduttori di velocità sono collocati all'interno di un unico contenitore impermeabile sino a 10 Bar di pressione. Anche il sistema di ricezione è dotato di un sistema di ancoraggio misto pneumatico/meccanico per garantire un buon accoppiamento in foro tra i ricevitori e le pareti di rivestimento disposto longitudinalmente all'asse del foro; il sistema di ancoraggio è inoltre in grado di garantire la perfetta coassialità tra il foro e lo strumento di energizzazione.

Il sistema di trigger è di tipo elettrico collegato al sistema di ricezione a massa battente e da un geofono verticale ad esso solidale. La forma d'onda viene registrata sul quarto canale di registrazione del sismografo. Il trigger è costituito da un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la sorgente energizzante viene attivata, consentendo di produrre un impulso che viene inviato ad un sensore collegato al sismografo; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica.

Il sistema di acquisizione dati è costituito da un sismografo a 24 bit tipo EEGBR24 di tipo multicanale in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica minima a 24 bit. Esso è collegato a ciascuno dei geofoni in foro ed al geofono di trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger. I dati vengono trasferiti su PC per le ulteriori fasi di interpretazione.

La procedura di elaborazione dei dati prevede:

- immissione dei files dei dati alle varie profondità
- scomposizione per rotazione del piano di oscillazione dell'onda compressiva a partire dai segnali dei due geofoni orizzontali. Al termine dell'operazione si dispone di un segnale relativo alla componente prevalentemente compressiva e uno relativo a quella prevalentemente trasversale



- composizione per rotazione della componente trasversale appena ottenuta, col segnale relativo al geofono verticale a cercare la componente trasversale complessiva del segnale
- definizione dei tempi di arrivo per le onde longitudinali e trasversali
- compilazione delle tabelle.

La misura della velocità delle onde trasversali S è meno semplice di quella relativa alle longitudinali P e presenta maggiori ambiguità. Questo fatto è da imputare all'arrivo successivo al geofono rispetto alle onde longitudinali e quindi alla sovrapposizione in un fenomeno di interferenza. E' inoltre opportuno ricordare che, nel caso di completa saturazione dei materiali attraversati dai treni d'onda la velocità di propagazione delle onde P risulta influenzata dalla velocità caratteristica dell'acqua; ne consegue che il calcolo dei parametri elastici dinamici risulta più difficoltoso.

## 2.2 CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'ATTREZZATURA

Il sistema di acquisizione utilizzato per la prova cross-hole è costituito dallo strumento EEGBR24 a 24 canali e ad elevata dinamica di segnale, alimentato con batterie esterne da 12 Volt, guidato da una unità di controllo interna su piattaforma Windows (PC interno) su cui è installato il software che gestisce autonomamente il testing dei collegamenti e delle interfacce e l'acquisizione (Controller).

L'attrezzatura da foro è costituita da un geofono triassiale dotato di un sistema di ancoraggio pneumatico alle pareti del foro comandato attraverso un compressore in superficie; la sorgente di onde sismiche in foro utilizzata è costituita da una massa battente del peso di 5 Kg munita di trasduttore inerziale fungente da trigger, anch'essa dotata di un sistema di ancoraggio pneumatico alle pareti del foro comandato attraverso un compressore elettrico in superficie.

I fori in cui sono state effettuate l'acquisizione, così come l'energizzazione, sono rappresentati da sondaggi geognostici preventivamente eseguiti e successivamente rivestiti per l'esecuzione del cross-hole con una tubazione in PVC atossico a sezione circolare per piezometri, di diametro esterno 88.0 mm/interno 80.0 mm, con lunghezza minima degli spezzoni di tubo pari a 3 metri, con tappi di testa e fondo foro. La lunghezza complessiva dei fori è variabile a seconda del sondaggio geognostico utilizzato per l'acquisizione.

## 2.3 MODALITÀ OPERATIVE

La prova è stata sviluppata secondo le seguenti fasi:

- verifica preventivamente alla discesa della strumentazione della continuità e verticalità del foro attraverso apposito peso guida;



- posizionamento del geofono-idrofono triassiale e della massa battente alla profondità d'interesse ed ancoraggio pneumatico degli stessi alle pareti del foro (prima profondità indagata -30.0 m da bocca foro);
- attivazione del controllo di pre-triggering (apertura del sistema staccando la massa dalla base della struttura di ancoraggio per la determinazione dell'inizio del segnale sismico);
- energizzazione per battitura lungo la direzione - Z ed acquisizione degli impulsi sismici;
- energizzazione per battitura lungo la direzione + Z ed acquisizione degli impulsi sismici;
- sblocco del dispositivo pneumatico di ancoraggio del geofono-idrofono triassiale e della massa battente e risalita degli stessi alla successiva profondità d'investigazione (acquisizioni ogni 1.0 m in risalita da fondo foro);
- ripetizione della procedura di energizzazione ed acquisizione fino a fondo/bocca foro (-1.0 m da p.c.).

Con la precedente modalità operativa i fori oggetto d'indagine sono stati acquisiti fino a profondità che permettessero l'avanzamento ed il recupero dei geofoni triassiali in condizioni di sicurezza, a seguito della verifica preventiva attraverso peso guida.



### 3 ELABORAZIONE ED INTERPRETAZIONE DATI

L'elaborazione dei dati acquisiti Cross-Hole prevede che le energizzazioni eseguite avanzando in profondità vengano raccolte a ricostruire un unico elaborato, identico a quello che sarebbe stato ricevuto da una catena di tanti geofoni quante sono le posizioni di misura nei fori d'indagine.

#### 3.1 PROCEDIMENTO DI ELABORAZIONE

Il procedimento di elaborazione è stato sviluppato secondo il seguente "processing flow":

- calcolo delle distanze fra i diversi punti di energizzazione e di ricezione, quote piano campagna/quote punti;
- display sismogrammi;
- applicazione filtri in frequenza per riduzione rumori di fondo (fast fourier transform (F.F.T.), etc.);
- lettura first break;
- processing dati in velocità lineare;
- analisi qualitative;
- suddivisione in orizzonti omogenei dal punto di vista delle velocità sismiche  $V_p$  e  $V_s$ ;
- valutazione empirica dei parametri elastici dinamici relativi a ciascuna acquisizione utilizzando correlazioni ben note in letteratura.

La prima fase di elaborazione (preprocessing) ha riguardato la traduzione delle tracce sismiche registrate al sismografo di acquisizione (formato originale .bin) in un formato compatibile con i maggiori programmi di elaborazione, generalmente denominato SEG2 (formato convertito .sg2)

Le tracce sismiche in formato SEG2 sono state quindi processate ed analizzate attraverso il programma SEISIMAGER Pickwin della OYO Corp.

Una volta applicati appositi filtri digitali in frequenza (generalmente un Low cut 1-2 Hz ed un High cut 500-1000 Hz) per la riduzione del rumore di fondo e l'esaltazione dei segnali utili si è proceduto all'analisi dei first break (primi arrivi) delle onde di compressione  $V_p$  e taglio  $V_s$  con metodo misto automatico e soggettivo.

Per la valutazione delle onde di compressione (P) si fa riferimento al primo arrivo significativo dell'onda di compressione sul geofono verticale, mentre per le onde di taglio (S), essendo presenti due serie di misure per ogni quota a polarità invertita (n. 2 geofoni orizzontali orientati a 90°) si opera con la visualizzazione contemporanea dei segnali e con la valutazione dei first break relativi alle onde trasversali.

L'ultima fase riguarda la trasposizione dei tempi di arrivo in appositi fogli di calcolo, disponibili per la fase di post-processing, e l'eventuale stampa finale delle tracce



sismiche relative alle onde di compressione e taglio per consentire l'analisi visiva tra più set di dati relativi alla medesima verticale d'indagine.

### 3.2 PROCEDIMENTO DI POST-ELABORAZIONE – INTERPRETAZIONE DEI DATI

La seconda fase di analisi dei Cross-Hole eseguiti riguarda l'attività di post-elaborazione dei tempi di arrivo e la loro interpretazione in termini di profili di velocità ( $V_s$  e  $V_p$ ) e di valutazione empirica dei parametri elastici dinamici dei terreni nella sezione compresa tra l'energizzazione (in foro nel caso del Cross-Hole) e quello di ricezione.

Una volta determinate sia le velocità delle onde di compressione sia le velocità delle onde di taglio è possibile ricavare vari parametri dinamici, tra i quali i maggiormente significativi ai fini della progettazione geotecnica sono i seguenti:

- Coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), adimensionale
- Peso di volume ( $\gamma_{din}$ ) in  $t/m^3$
- Modulo di Elasticità dinamico ( $E_{din}$ ) in  $Kg/cm^2$
- Modulo di Taglio dinamico ( $G_{din}$ ) in  $Kg/cm^2$

Le formule utilizzate per il calcolo dei parametri elastici si basano essenzialmente sulle proprietà sismiche dei terreni ( $V_p$  e  $V_s$ ): i parametri elastici calcolati non sono pertanto sempre confrontabili con quelli ottenuti staticamente da prove in situ e di laboratorio. I moduli dinamici così calcolati risultano comunque sempre più elevati di quelli statici forniti da prove di carico in situ in quanto gli impulsi sismici sono di breve durata e le sollecitazioni ad essi associate sono relativamente modeste e rientrano nel campo delle deformazioni istantanee.

Il Peso di volume del terreno indagato, in assenza di dati ricavati da indagini di laboratorio geotecnico, è stato stimato in modo empirico attraverso correlazioni con le  $V_p$ . Il Coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), noto come la costante che lega le deformazioni in un corpo, è definito come il rapporto tra la deformazione trasversale e quella longitudinale. Tale modulo varia da 0 a 0.5 con valore medio di 0.25 per molte rocce: i valori tendono a 0.05 per materiali estremamente duri ed a 0.45 per i materiali incoerenti. Per i fluidi (acqua) il modulo assume il valore limite di 0.5 (caratteristico di materiali che si deformano senza cambiamenti di volume) mentre valori di poco inferiori (0.47 - 0.49) sono tipici di argille o materiali fini molto saturi; valori inferiori sono indicativi di materiali passanti gradualmente da poco consolidati a sovraconsolidati. Per le rocce si presentano variazioni molto ampie collegate al grado di fratturazione, alla direzione e persistenza delle discontinuità, alla presenza di cavità, alla continuità delle litologie: generalmente è compreso tra 0.46 e 0.20.

In funzione di  $V_p$  e di  $V_s$  il parametro è definito dalla seguente relazione:



$$\nu = \frac{Vp^2 - 2 \cdot Vs^2}{2 \cdot (Vp^2 - Vs^2)}$$

Il Modulo di Elasticità dinamico, definito come rapporto tra sollecitazione e conseguente deformazione longitudinale, rappresenta il modulo elastico (o di Young) del materiale. È importante sottolineare che in campo dinamico si parla di modulo elastico dinamico (e non statico), ricavandosi tale modulo da prove dinamiche (o sismiche). Il rapporto tra la sollecitazione ortogonale (trasversale o di taglio) e la deformazione definisce il modulo di elasticità tangenziale (o di Taglio dinamico) G, descritto successivamente. Il Modulo di Elasticità dinamico è stato calcolato con la seguente espressione:

$$E_{din} = \rho_{din} \cdot \delta_{din} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

dove  $\rho_{din}$  rappresenta un indice di densità del mezzo, funzione del peso di volume e dell'accelerazione di gravità (g).

Similmente il Modulo di Taglio dinamico è definito attraverso l'espressione:

$$G_{din} = \delta_{din} \cdot Vs^2$$

### 3.3 RIASSUNTO DEI RISULTATI: PROFILO DI VELOCITÀ E PARAMETRI ELASTICI

I risultati dell'elaborazione ed interpretazione delle prove Cross-hole sotto forma di profilo di velocità sono riportati nelle seguenti Figura 2 e Figura 3 (Sismogrammi e velocità delle onde Vp e Vs- Cross Hole 1/Cross Hole 2).

In Appendice 1 sono invece riportati i risultati tabellari.

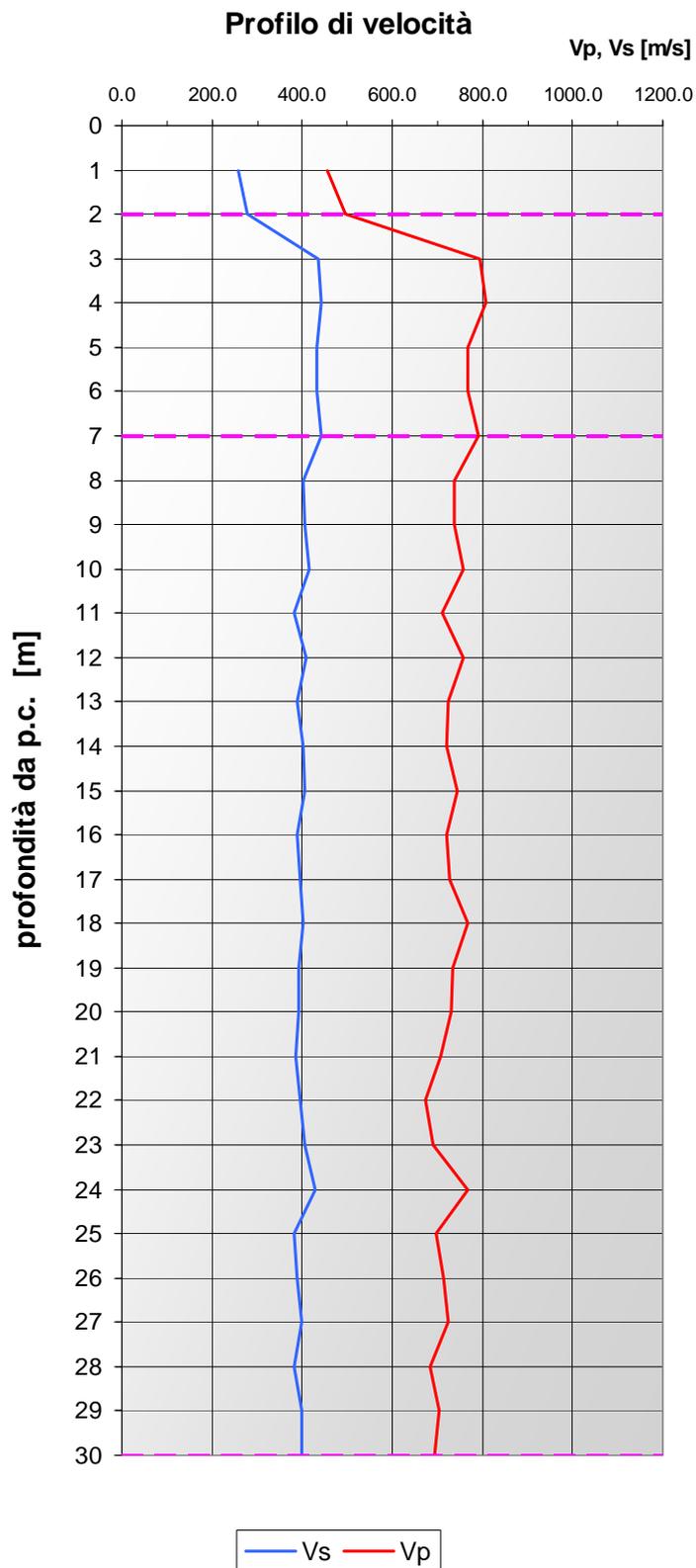


Figura 2: Cross-Hole CH1 – Cameri-Novara (NO)

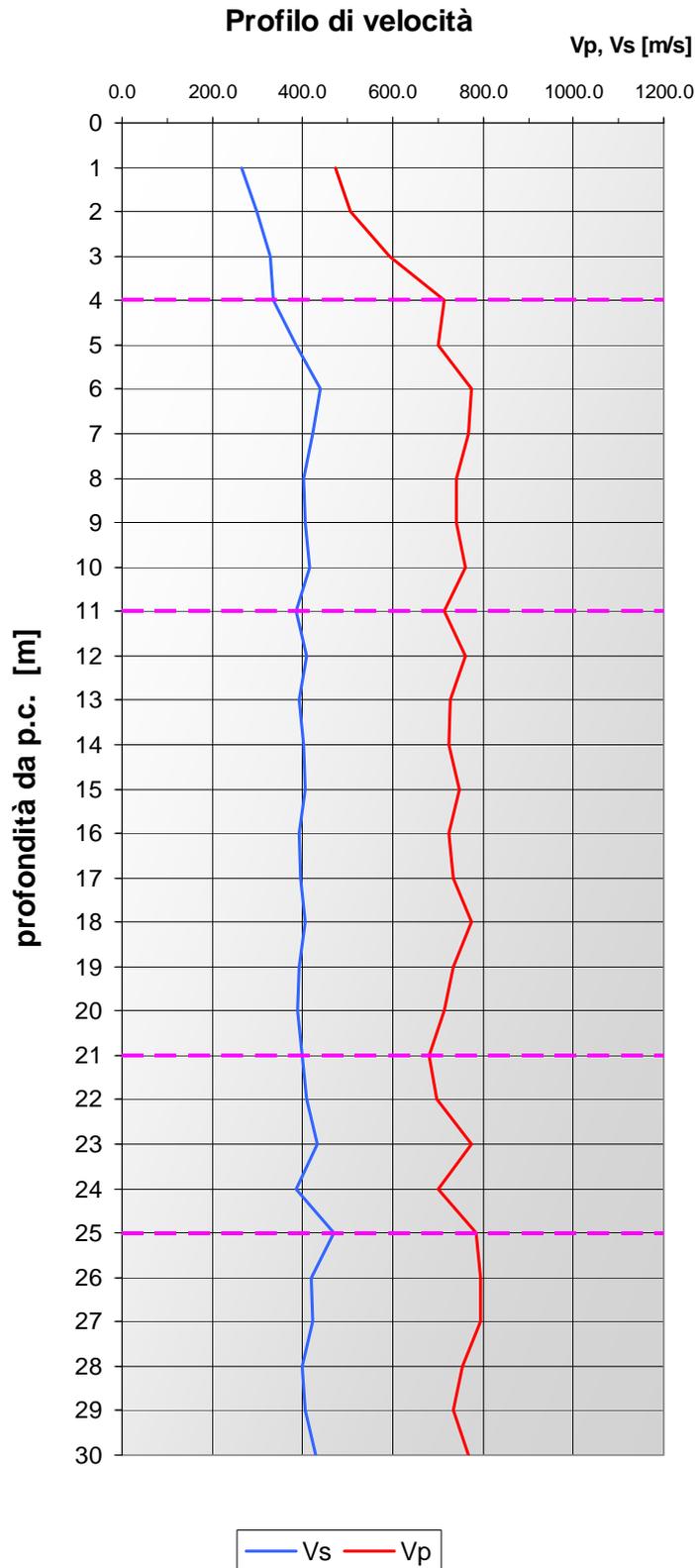


Figura 3: Cross-Hole CH2 - Cameri-Novara (NO)

Ad una prima analisi, la restituzione della procedura d'interpretazione permette di individuare una situazione ben delineata caratterizzata da litologie molto omogenee nel



caso del Ch1 e piuttosto omogenee nel caso del Ch2 lungo tutto il foro di sondaggio fino alla profondità di 30 m da p.c.

In particolare, è possibile evidenziare una situazione sismostratigrafica così schematizzabile e suddivisa per i due Cross-hole:

#### CH1 – SONDAGGI S3/S3-1

- Da p.c. a circa 2 m di profondità: orizzonte eterogeneo contraddistinto da Vs medie di circa 268 m/s e Vp medie di circa 475 m/s;
- Da circa 2 m a circa 7-8 m di profondità: orizzonte eterogeneo contraddistinto da Vs medie di circa 437 m/s e Vp medie di circa 785 m/s;
- Da circa 7-8 m e fino a fondo foro (-30 m): orizzonte omogeneo contraddistinto da Vs medie di circa 397 m/s e Vp medie di circa 723 m/s.

#### CH2 – SONDAGGI S7/S7-1

- Da p.c. a circa 3-4 m di profondità: orizzonte eterogeneo contraddistinto da Vs medie di circa 306 m/s e Vp medie di circa 571 m/s;
- Da circa 3-4 m a circa 11 m di profondità: orizzonte eterogeneo contraddistinto da Vs medie di circa 408 m/s e Vp medie di circa 743 m/s;
- Da circa 11 m a circa 21-22 m di profondità: orizzonte eterogeneo contraddistinto da Vs medie di circa 397 m/s e Vp medie di circa 732 m/s;
- Da circa 21-22 m e fino a fondo foro (-30 m): orizzonte omogeneo contraddistinto da Vs medie di circa 418 m/s e Vp medie di circa 756 m/s.

Una volta ottenuti i profili di velocità è stato quindi possibile elaborare il calcolo dei parametri elastici principali secondo le espressioni precedentemente descritte. Le seguenti Figura 4 e Figura 5 riportano i valori calcolati del Coefficiente di Poisson, del Modulo Elastico dinamico E e del Modulo di Taglio G rispettivamente per il Cross Hole CH1 ed il Cross Hole CH2.

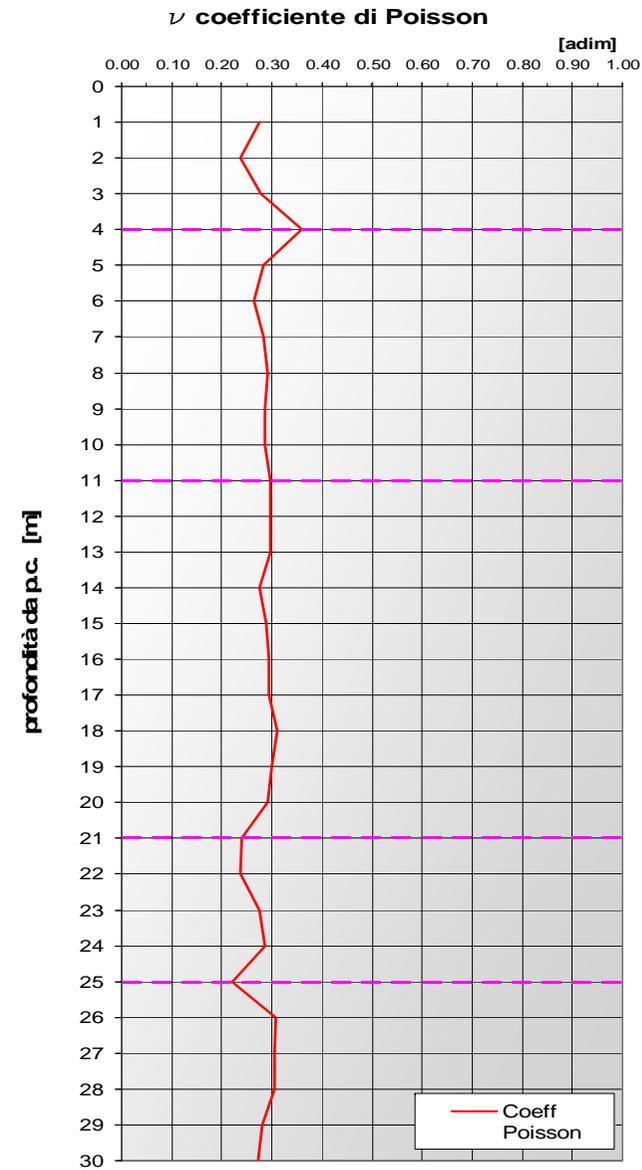
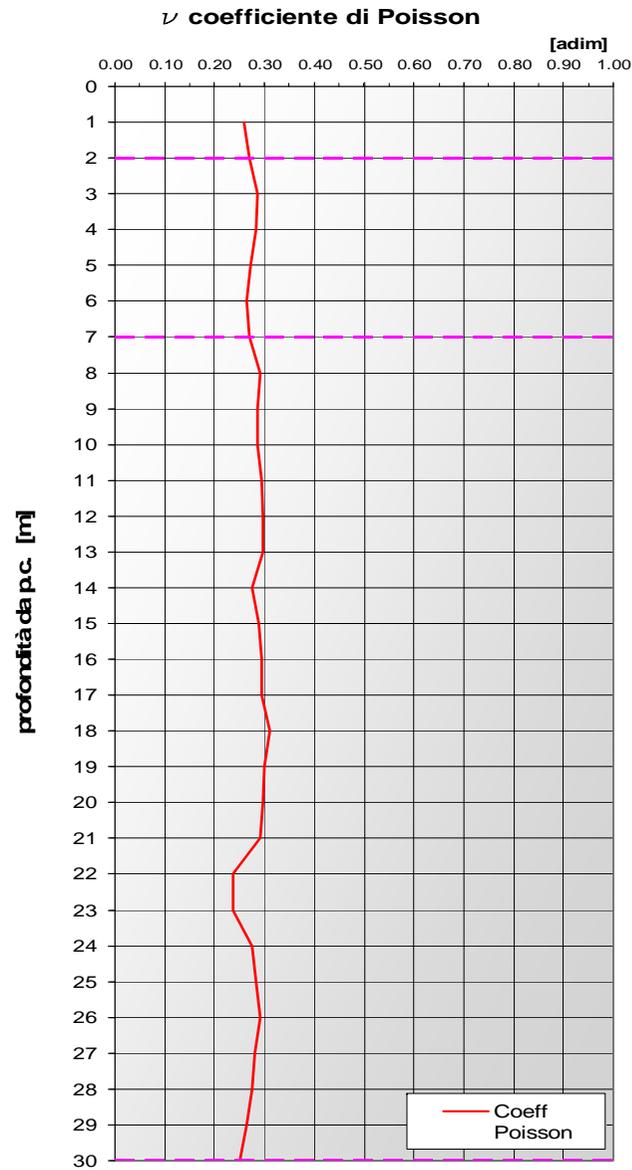


Figura 4: Report valori calcolati del Coefficiente di Poisson

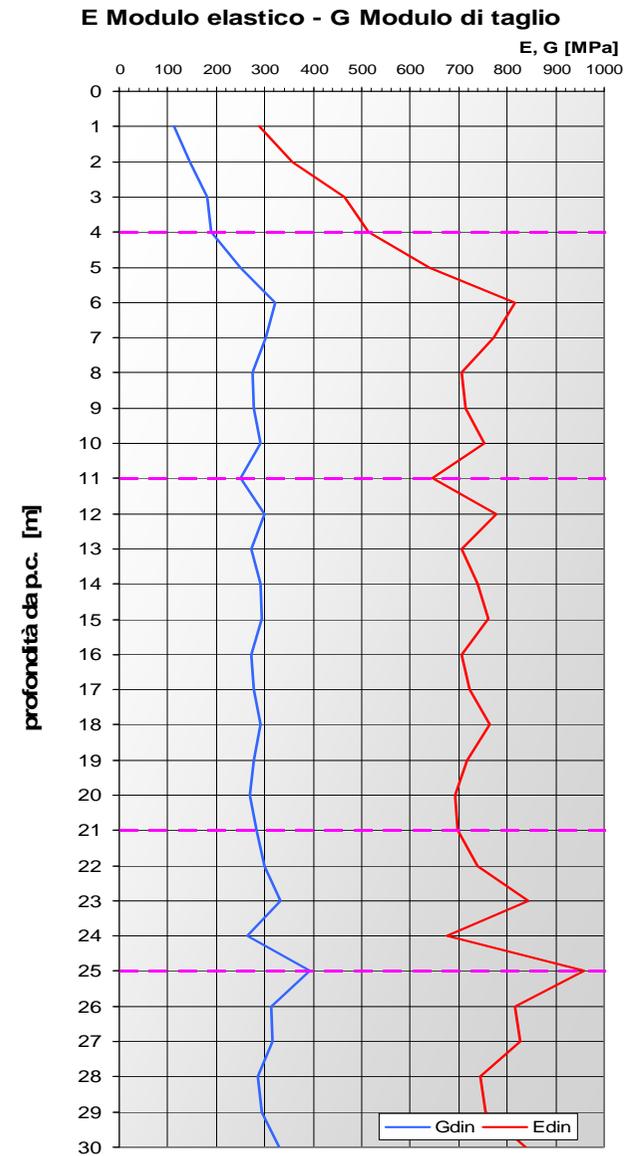
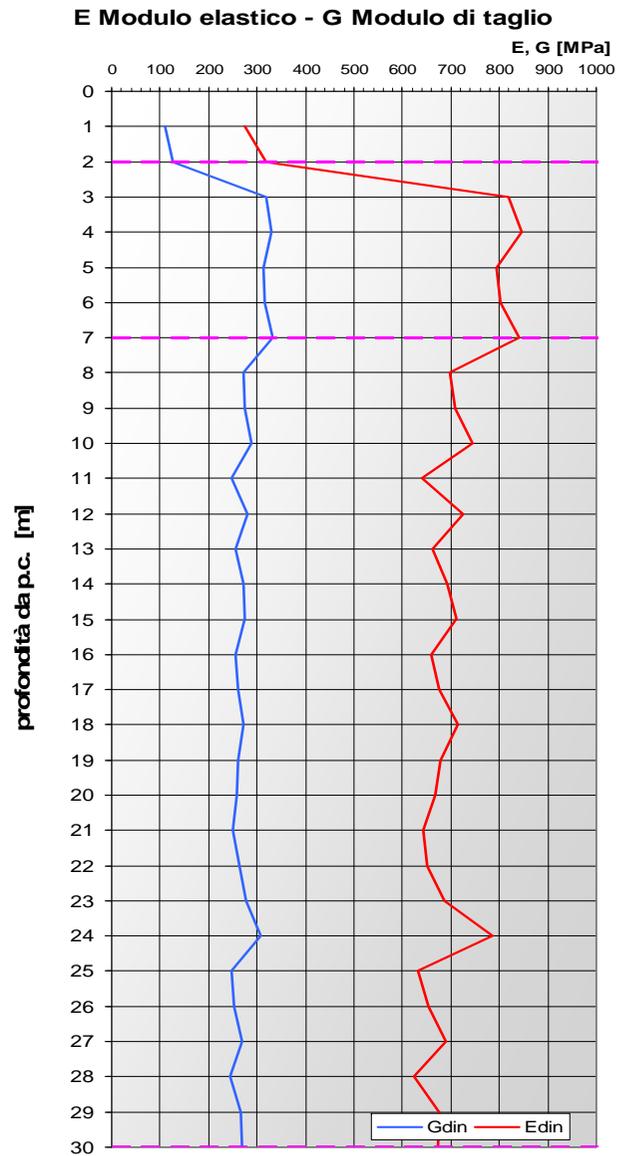


Figura 5: Report valori calcolati del Modulo Elastico dinamico E e del Modulo di Taglio G

## **Appendice 1**

### **SCHEMA TECNICO SISMOGRAFO**

# Sismografo 24ch

## Sismografo



Questo è il nostro sismografo a 24 canali. E' stato creato appositamente per operare nel nostro sistema e quindi è stato pensato per essere affidabile, semplice, e di qualità elevata.

<b>Canali:</b>	24
<b>Canale aggiuntivo:</b>	segnale di starter non filtrato
<b>Risoluzione:</b>	16 bit
<b>Dinamica :</b>	equiv. 22 bit su 24 canali camp 0.1 ms/canale con sovracampionamento equiv. 24 bit su 12 canali camp 0.1 ms/canale con sovracampionamento
<b>Pretrigger:</b>	automatico
<b>Rumore:</b>	paria a 1 lsb con ingressi canali in corto
<b>Trasmissione dati:</b>	PEN-DRIVE USB
<b>Trigger:</b>	segnale, apertura e chiusura
<b>Filtri analogici:</b>	antialias 4° ordine
<b>Alimentazione:</b>	12 V - 3A

### Geofoni da foro

#### Energizzatore da foro per onde "S"

Da usarsi in fori con diametro 3" per generare le onde S necessarie per le prove Cross-Hole.



Da utilizzarsi per le prove Down-Hole e Cross-Hole.

Si ancorano internamente al foro utilizzando l'aria compressa prodotta da un piccolo compressore portatile.





Foto n.4: Cross Hole 2, compressore ed energizzatore pronto ad essere calato per la battuta



Foto n.5: Cross Hole 2 - energizzazione in foro



Foto n.6: Cross Hole 2, particolare dell'unità di acquisizione

## **Appendice 3**

# **ACQUISIZIONI CROSS-HOLE SISMOGRAMMI E REPORT TABELLARI**

## **Appendice 2**

# **DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**



Foto n.1: Cross Hole 1, compressore ed energizzatore pronto ad essere calato per la battuta



Foto n.2: Cross Hole 1 - sistema di ricezione, unità di acquisizione e compressori per il sistema di ancoraggio pneumatico del geofono triassiale

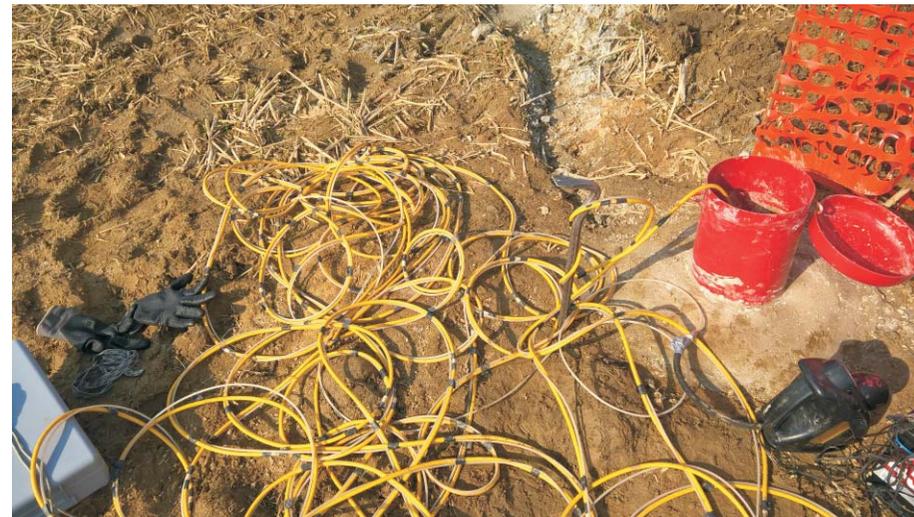
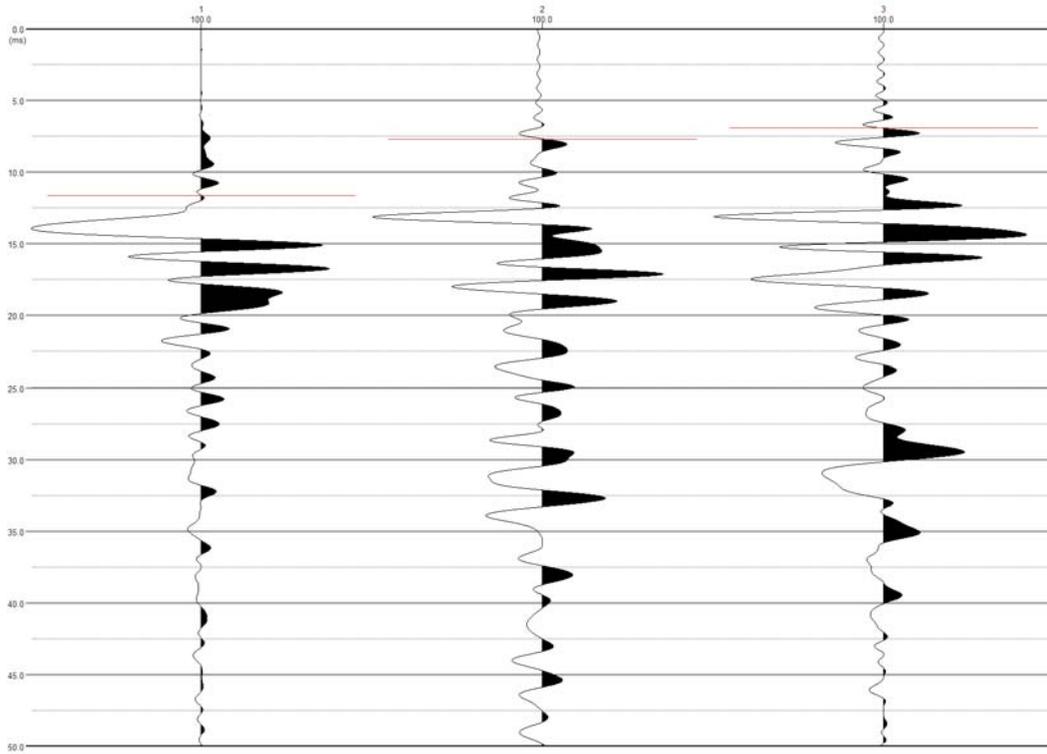
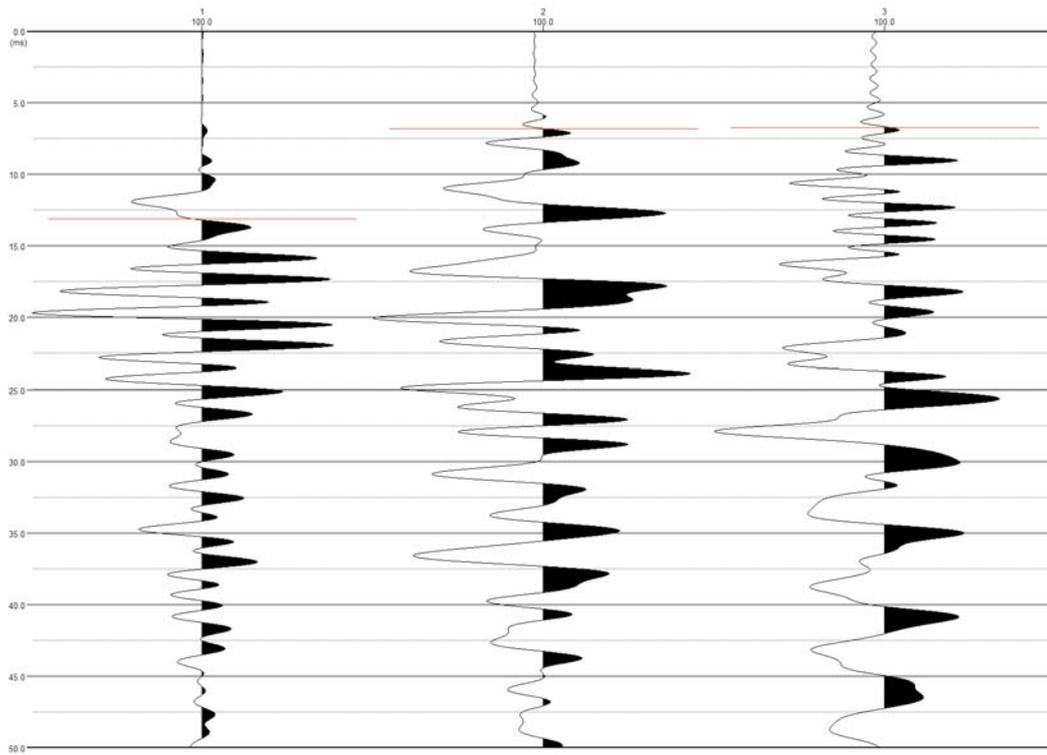


Foto n.3: Cross Hole 1, particolare dell'unità di ricezione (geofono triassiale) pronta per l'acquisizione



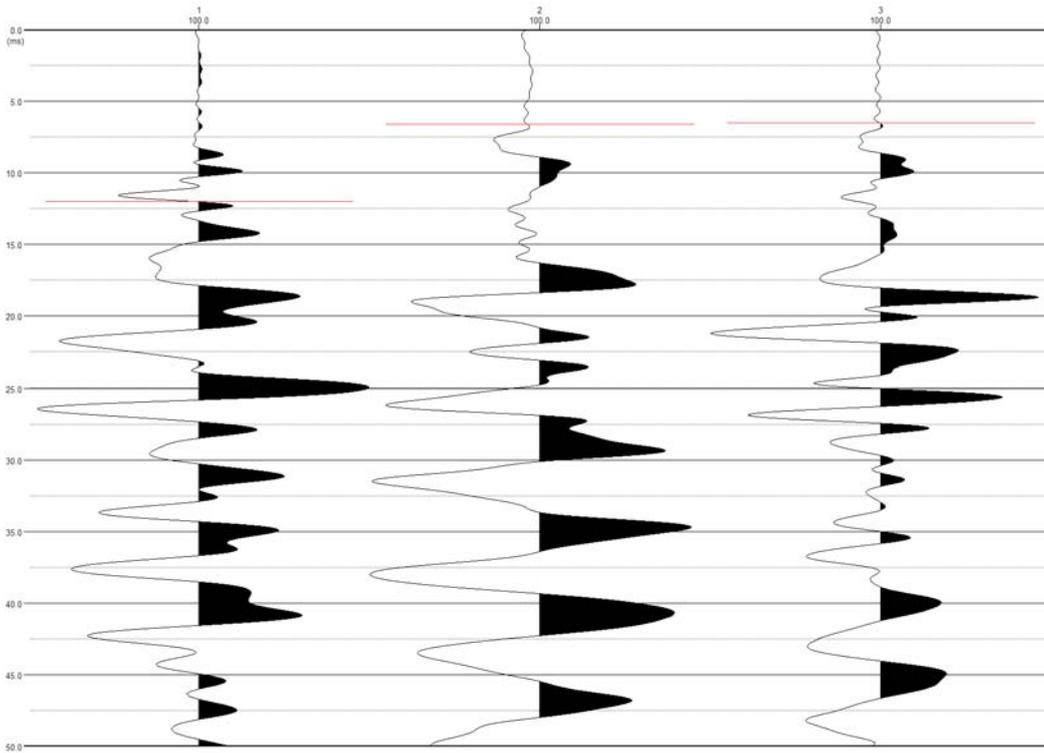
Cross-Hole Ch1 S3/S3-2

Acquisizione file N. 1166.sg2

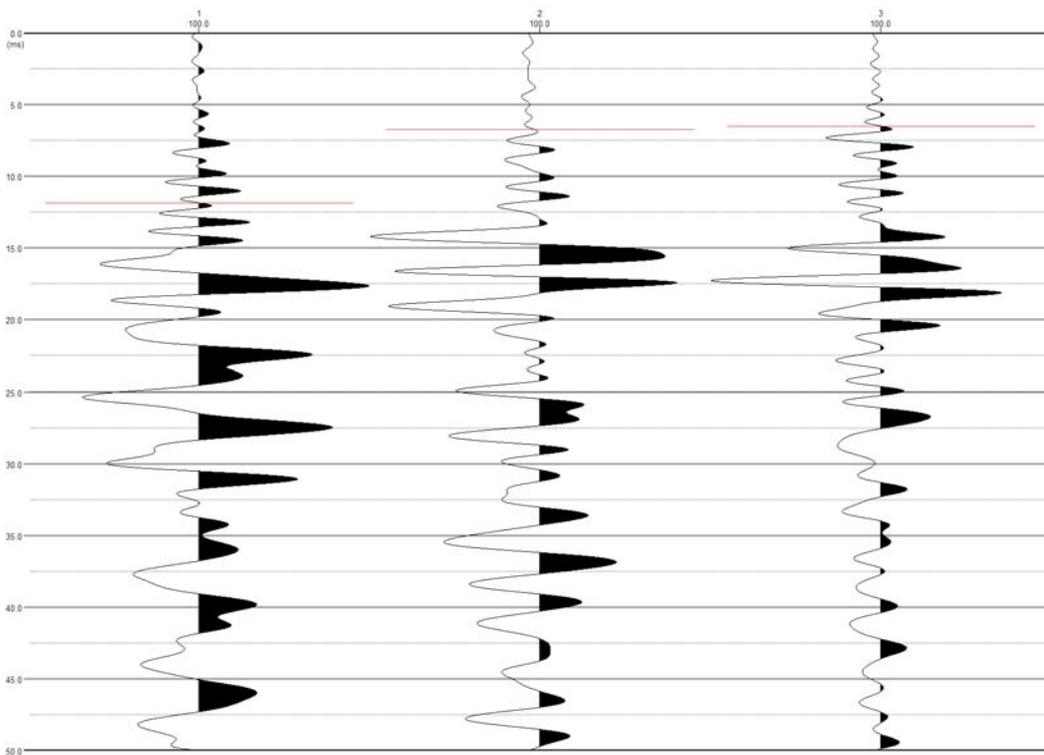


Cross-Hole Ch1 S3/S3-2

Acquisizione file N. 1168.sg2



*Cross-Hole Ch2 S7/S7-2*  
*Acquisizione file N. 1195.sg2*



*Cross-Hole Ch2 S7/S7-2*  
*Acquisizione file N. 1195.sg2*

**PROVA SISMICA CH:** CH1  
**Area:** Novara  
**Foro di energizzazione:** S7-1  
**Ricevitore:** S7-2  
**Distanza fra i fori** 500 cm  
**Profondità del foro** 30.00 m

## REPORT TABELLARE

### Tabulato dei valori misurati e calcolati

Profondità m	Distanza m	$T_p$ ms	$T_s$ ms	$V_p$ m/s	$V_s$ m/s	$V_p/V_s$ adim	$V_s/V_p$ adim	$\nu$ adim	$E$ MPa	$G$ MPa	$\rho$ Ton/mc
1	5.000	11.0	19.3	455	259	1.8	0.57	0.259	275.7	109.5	1.6
2	5.000	10.1	18.0	495	278	1.8	0.56	0.270	319.7	125.8	1.6
3	5.000	6.3	11.5	794	435	1.8	0.55	0.286	817.5	318.0	1.7
4	5.000	6.2	11.3	806	442	1.8	0.55	0.285	846.1	329.3	1.7
5	5.000	6.5	11.6	769	431	1.8	0.56	0.271	794.4	312.5	1.7
6	5.000	6.5	11.5	768	434	1.8	0.57	0.265	801.9	316.8	1.7
7	5.000	6.3	11.3	791	444	1.8	0.56	0.271	841.3	331.1	1.7
8	5.000	6.8	12.5	738	401	1.8	0.54	0.290	699.1	270.9	1.7
9	5.000	6.8	12.4	738	404	1.8	0.55	0.285	707.5	275.2	1.7
10	5.000	6.6	12.1	758	414	1.8	0.55	0.287	743.7	289.0	1.7
11	5.000	7.0	13.1	711	383	1.9	0.54	0.295	639.2	246.7	1.7
12	5.000	6.6	12.2	758	408	1.9	0.54	0.296	726.6	280.3	1.7
13	5.000	6.9	12.8	725	389	1.9	0.54	0.297	661.3	255.0	1.7
14	5.000	6.9	12.4	720	402	1.8	0.56	0.274	692.1	271.7	1.7
15	5.000	6.7	12.3	744	405	1.8	0.54	0.289	711.5	276.0	1.7
16	5.000	6.9	12.8	721	390	1.9	0.54	0.294	660.2	255.2	1.7
17	5.000	6.9	12.7	729	394	1.8	0.54	0.293	675.9	261.3	1.7
18	5.000	6.5	12.4	767	403	1.9	0.52	0.310	714.5	272.7	1.7
19	5.000	6.8	12.7	735	394	1.9	0.54	0.299	677.3	260.7	1.7
20	5.000	6.9	12.8	730	391	1.9	0.54	0.298	668.8	257.6	1.7
21	5.000	7.1	13.0	709	385	1.8	0.54	0.290	644.1	249.6	1.7
22	5.000	7.4	12.7	674	395	1.7	0.59	0.238	650.0	262.4	1.7
23	5.000	7.2	12.3	692	406	1.7	0.59	0.236	686.9	277.8	1.7
24	5.000	6.5	11.7	767	428	1.8	0.56	0.274	784.8	307.9	1.7
25	5.000	7.2	13.1	696	382	1.8	0.55	0.284	631.8	246.1	1.7
26	5.000	7.0	12.9	714	388	1.8	0.54	0.291	652.6	252.7	1.7
27	5.000	6.9	12.5	725	400	1.8	0.55	0.281	689.4	269.1	1.7
28	5.000	7.3	13.1	685	382	1.8	0.56	0.275	624.7	245.0	1.7
29	5.000	7.1	12.6	704	398	1.8	0.57	0.265	674.5	266.5	1.7
30	5.000	7.2	12.5	694	400	1.7	0.58	0.252	673.7	269.1	1.7

Profondità: Profondità del geofono alla misura  
 Distanza: Distanza dal geofono in metri  
 $T_p$ : Tempo di arrivo delle onde compressive in millisecondi  
 $T_s$ : Tempo di arrivo delle onde trasversali in millisecondi  
 $V_p$ : Velocità delle onde compressive in metri al secondo  
 $V_s$ : Velocità delle onde trasversali in metri al secondo  
 $\nu$ : Coefficiente di Poisson  
 $E$ : Modulo di elasticità dinamica (Young) in MegaPascal (Mpa)  
 $G$ : Modulo di taglio in MegaPascal (Mpa)  
 $\gamma$ : Densità relativa in ton/mc

**PROVA SISMICA CH:** CH2  
**Area:** Novara  
**Foro di energizzazione:** S7-1  
**Ricevitore:** S7-2  
**Distanza fra i fori** 500 cm  
**Profondità del foro** 30.00 m

## REPORT TABELLARE

### Tabulato dei valori misurati e calcolati

Profondità m	Distanza m	$T_p$ ms	$T_s$ ms	$V_p$ m/s	$V_s$ m/s	$V_p/V_s$ adim	$V_s/V_p$ adim	$\nu$ adim	$E$ MPa	$G$ MPa	$\rho$ Ton/mc
1	5.000	10.6	19.0	472	263	1.8	0.56	0.274	287.8	112.9	1.6
2	5.000	9.9	16.8	507	298	1.7	0.59	0.237	357.5	144.5	1.6
3	5.000	8.4	15.2	593	329	1.8	0.55	0.278	465.1	182.0	1.7
4	5.000	7.0	14.9	714	336	2.1	0.47	0.358	514.6	189.4	1.7
5	5.000	7.1	13.0	700	385	1.8	0.55	0.284	639.0	248.8	1.7
6	5.000	6.5	11.4	773	438	1.8	0.57	0.264	814.9	322.4	1.7
7	5.000	6.5	11.8	768	423	1.8	0.55	0.282	771.9	301.0	1.7
8	5.000	6.7	12.4	742	403	1.8	0.54	0.290	705.7	273.5	1.7
9	5.000	6.7	12.3	742	407	1.8	0.55	0.285	714.5	277.9	1.7
10	5.000	6.6	12.0	762	417	1.8	0.55	0.287	751.6	292.0	1.7
11	5.000	7.0	13.0	714	385	1.9	0.54	0.296	644.8	248.8	1.7
12	5.000	6.6	12.2	762	410	1.9	0.54	0.297	777.0	299.6	1.8
13	5.000	6.9	12.8	728	391	1.9	0.54	0.298	706.5	272.2	1.8
14	5.000	6.9	12.4	724	403	1.8	0.56	0.275	739.5	290.0	1.8
15	5.000	6.7	12.3	747	407	1.8	0.54	0.290	760.5	294.8	1.8
16	5.000	6.9	12.8	725	391	1.9	0.54	0.295	705.1	272.2	1.8
17	5.000	6.8	12.7	733	395	1.9	0.54	0.295	721.9	278.7	1.8
18	5.000	6.5	12.4	773	404	1.9	0.52	0.312	764.6	291.5	1.8
19	5.000	6.8	12.7	735	394	1.9	0.54	0.299	718.4	276.5	1.8
20	5.000	7.0	12.9	714	388	1.8	0.54	0.291	692.1	268.0	1.8
21	5.000	7.4	12.6	679	397	1.7	0.59	0.240	698.8	281.8	1.8
22	5.000	7.2	12.2	696	409	1.7	0.59	0.236	738.5	298.7	1.8
23	5.000	6.5	11.6	773	431	1.8	0.56	0.274	844.6	331.4	1.8
24	5.000	7.1	13.0	700	384	1.8	0.55	0.285	676.1	263.1	1.8
25	5.000	6.4	10.7	784	469	1.7	0.60	0.221	958.3	392.5	1.8
26	5.000	6.3	12.0	794	418	1.9	0.53	0.308	816.7	312.3	1.8
27	5.000	6.3	11.9	795	422	1.9	0.53	0.304	827.1	317.1	1.8
28	5.000	6.6	12.5	754	400	1.9	0.53	0.304	744.5	285.4	1.8
29	5.000	6.8	12.3	735	407	1.8	0.55	0.280	754.6	294.8	1.8
30	5.000	6.5	11.6	769	430	1.8	0.56	0.273	838.3	329.2	1.8

Profondità: Profondità del geofono alla misura  
 Distanza: Distanza dal geofono in metri  
 $T_p$ : Tempo di arrivo delle onde compressive in millisecondi  
 $T_s$ : Tempo di arrivo delle onde trasversali in millisecondi  
 $V_p$ : Velocità delle onde compressive in metri al secondo  
 $V_s$ : Velocità delle onde trasversali in metri al secondo  
 $\nu$ : Coefficiente di Poisson  
 $E$ : Modulo di elasticità dinamica (Young) in MegaPascal (Mpa)  
 $G$ : Modulo di taglio in MegaPascal (Mpa)  
 $\gamma$ : Densità relativa in ton/mc

## **Appendice 4**

**ACQUISIZIONI CROSS-HOLE CH1-CH2**

**GRAFICI RIASSUNTIVI**

**$V_s, V_p$  -  $E_{din}$ ,  $G_{din}$  -  $\nu$  coeff. Poisson**







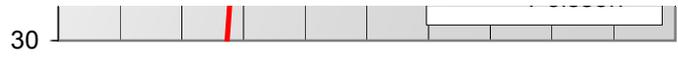














## Tavola 1

Corografia di inquadramento alla scala 1:10.000  
(base topografica fogli 116\_080 e 116\_120 della Catra Tecnica Regione Piemonte)



## Tavola 2

Ubicazioni delle indagini alla scala 1:5.000  
 (base topografica fogli 116\_080 e 116\_120 della Carta Tecnica  
 Regione Piemonte)