



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti  
Struttura di Vigilanza sulle Concessionarie Autostradali



AMMODERNAMENTO A N° 4 CORSIE DELLA S.S. 514  
"DI CHIARAMONTE" E DELLA S.S. 194 RAGUSANA  
DALLO SVINCOLO CON LA S.S. 115 ALLO  
SVINCOLO CON LA S.S. 114.

(C.U.P. F12C03000000001)

PROGETTO DEFINITIVO

PARTE GENERALE  
GEOLOGIA E GEOTECNICA  
Piano indagini - indagini geofisiche  
Rapporto interpretativo

Il Progettista

Supporto specialistico

Responsabile di progetto ed  
incaricato delle integrazioni tra  
le varie prestazioni:



Ing. Santa Monaco - Ordine Ing. Torino 5760H

Ottimizzazione della cantierizzazione  
delle opere



Ing. Gianmaria De Stavola - Ordine Ing. Venezia 2074

Consulenze specialistiche

Geologo:

Dott. Geologo Fabio Melchiorri  
Ordine Geologi del Lazio A.P. n 663

Geotecnica e opere d'arte minori:

Ing. Antonio Alparone



Opere d'arte principali:

Viadotti  
Ing. G. Mondello

ITALCONSULT

Gallerie  
Ing. G. Guiducci

GP ingegneria

Ecosistemi e  
paesaggio



Rumore,  
vibrazioni  
ed atmosfera

ALTRAN

RIFERIMENTO ELABORATO

FASE	TRILT	DISCIPLINA/OPERA	DOC	PROGR.	ST./REV.
D01	T100	GG000	1	RZ	002-0A

FOGLIO

01 DI 01

DATA

GENNAIO '17

SCALA

-

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO/CONSULENTE	VERIFICATO	APPROVATO
A	GENNAIO '17	Emissione	I & C	Salucci	Monaco

IL RESPONSABILE  
DEL  
PROCEDIMENTO

IL CONCESSIONARIO

SARC SRL



L'ENTITA' COSTRUTTRICE

VISTO PER ACCETTAZIONE



REGIONE SICILIA  
PROVINCE DI RAGUSA, CATANIA E SIRACUSA

COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE COMPRESO TRA LO SVINCOLO DELLA S.S. 514  
"DI CHIARAMONTE" CON LA S.S. 155 E LO SVINCOLO DELLA S.S. 194 "RAGUSANA" CON LA S.S. 114

INDAGINI GEOFISICHE  
A CORREDO DELLE ATTIVITA' DI PROGETTAZIONE DEFINITIVA



RAPPORTO INTERPRETATIVO

**GF**

ELABORATO

ALLEGATO	--	MARZO 2013	12-019 GF
		DATA EMISSIONE	CODICE



Via Donati, 14  
10121 Torino

Tel: 011-3975311  
Fax: 011-3493790  
info@jecitalia.it

Dott. A. Colombo  
REDATTO

Dott. L. Pignatta  
CONTROLLATO

Dott. M. Ferrari  
APPROVATO



SILEC S.p.A.  
Strada Caselle, 69  
10040 Leini (TO)

REGIONE SICILIA  
PROVINCE DI RAGUSA, CATANIA E SIRACUSA

COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE COMPRESO TRA LO SVINCOLO DELLA S.S. 514  
"DI CHIARAMONTE" CON LA S.S. 155 E LO SVINCOLO DELLA S.S. 194 "RAGUSANA" CON LA  
S.S. 114

INDAGINI GEOFISICHE  
A CORREDO DELLE ATTIVITA' DI PROGETTAZIONE DEFINITIVA

*Rapporto interpretativo*

---

*Marzo 2013*

---

**SOMMARIO**

1. PREMESSA .....	3
2. METODOLOGIE DI INDAGINE .....	4
2.1. SISMICA A RIFRAZIONE .....	5
2.1.1. Tomografia sismica .....	8
2.2. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) .....	9
2.3. DOWN-HOLE.....	11
3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....	15
3.1. Sismografo.....	15
3.2. Sorgente di energizzazione.....	16
3.3. Ricevitori .....	16
3.4. Trigger .....	16
4. DESCRIZIONE DEL RILIEVO .....	17
4.1. SISMICA A RIFRAZIONE .....	17
4.2. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) .....	20
4.3. DOWN-HOLE.....	22
5. ELABORAZIONE DATI.....	24
5.1. SISMICA A RIFRAZIONE .....	24
5.2. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) .....	25
5.3. DOWN-HOLE.....	25
6. RISULTATI DEL RILIEVO.....	27

7. DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA..... 38

*Allegati*

<b>A</b>	<i>Planimetrie delle aree di indagine</i>
<b>B</b>	<i>Sismica a rifrazione</i>
<b>B1</b>	<i>Risultati delle indagini</i>
<b>B2</b>	<i>Coordinate plano-altimetriche delle basi sismiche</i>
<b>C</b>	<i>MASW</i>
<b>C1</b>	<i>Risultati delle indagini</i>
<b>C2</b>	<i>Coordinate plano-altimetriche delle prove</i>
<b>D</b>	<i>Down-Hole</i>
<b>D1</b>	<i>Risultati delle indagini</i>

## 1. PREMESSA

*Su incarico di SILEC S.p.A. sono state realizzate delle indagini geofisiche a corredo delle attività di progettazione definitiva del collegamento autostradale compreso tra lo svincolo della S.S. 514 "di Chiaramonte" con la S.S. 155 e lo svincolo della S.S. 194 "Ragusana" con la S.S. 114 che attraverserà le province di Ragusa, Catania e Siracusa.*

*Sono state realizzate indagini di tipo sismico sia in superficie sia in foro ed in particolare:*

- *Sismica superficiale:*

- ✓ ***Tomografia sismica a rifrazione** (n. 166 basi) per la determinazione della velocità delle onde compressionali  $P$  al fine di caratterizzare il sottosuolo lungo il tracciato del nuovo collegamento;*
- ✓ ***Prospezioni MASW Multichannel Analysis of Surface Waves** (n. 97 prove) finalizzate a definire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio  $S$  attraverso l'analisi della dispersione delle onde di superficie di Rayleigh, per la determinazione del parametro rappresentativo  $V_{S30}$  utile alla caratterizzazione sismica dei terreni indagati, secondo quanto disposto dalla normativa tecnica vigente;*

- *Sismica in foro:*

- ✓ ***Prove down-hole** (n. 46 prove) effettuate allo scopo di determinare le velocità di propagazione delle onde compressionali  $P$  e delle onde di taglio  $S$  per la definizione delle proprietà meccaniche dei materiali indagati, oltre al parametro rappresentativo  $V_{S30}$  per la caratterizzazione sismica.*

*Tutte le indagini sono state eseguite nel periodo compreso tra il 7 Gennaio e l'11 Marzo 2013 secondo le specifiche tecniche. L'ubicazione delle indagini, approvata dal Committente, è stata in parte modificata (rispetto a quanto previsto dalle specifiche originali) per problemi di natura logistica a seguito dei sopralluoghi effettuati nella settimana compresa tra il 17 e il 21 Dicembre 2013.*

*Come definito nel contratto di affidamento, le indagini di sismica a rifrazione sono state eseguite dalla società Geomerid S.r.l..*

*Nella presente relazione sono descritti le metodologie di indagine adottate, la strumentazione utilizzata e i risultati ottenuti.*

## 2. METODOLOGIE DI INDAGINE

Le indagini sismiche si basano sulla misura della velocità di propagazione delle onde elastiche in rocce e terreni. Le onde elastiche vengono create artificialmente per mezzo di esplosioni controllate o di altre tipologie di sorgenti e la loro propagazione viene rilevata in punti diversi, in superficie e/o in profondità tramite trasduttori che generano un segnale elettrico misurabile corrispondente alla sollecitazione elastica del terreno nel punto di misura.

Se un corpo in equilibrio subisce una sollecitazione in un punto, esso tende a deformarsi in relazione alle caratteristiche elastiche del corpo stesso e al tipo di sollecitazione. La propagazione della deformazione nei punti circostanti avviene come propagazione di onde la cui velocità dipende dalle caratteristiche elastiche del corpo (Godio et al., 2001).

Le onde sismiche (o onde elastiche) si generano e si propagano in un corpo quando questo viene sollecitato da uno sforzo impulsivo di piccola energia (cioè nel campo delle piccole tensioni e delle piccole deformazioni). Quando il corpo sollecitato si deforma nel campo elastico (campo di linearità della legge di Hooke) le sue particelle si spostano dalla loro posizione di equilibrio.

Al cessare della sollecitazione le particelle tendono a tornare alla loro posizione di equilibrio innescando un moto di oscillazione (vibrazione). Tale moto di oscillazione si propaga in tutte le direzioni alle particelle circostanti con velocità che dipende dalla facilità delle particelle ad abbandonare il loro stato di quiete, cioè dalle caratteristiche meccaniche del corpo.

Le onde elastiche così generatesi interessano tutto il volume del corpo (onde di volume), non sono dispersive (la velocità di propagazione non dipende dalla frequenza) e possono essere distinte in funzione della direzione di vibrazione rispetto alla direzione di propagazione.

Si hanno dunque:

- onde di compressione (onde P): longitudinali e primarie, si propagano ad alta velocità sia nei solidi che nei liquidi e sono caratterizzate da un moto delle particelle nella stessa direzione di propagazione dell'onda, con successive compressioni e rarefazioni;
- onde di taglio (onde S): trasversali e secondarie, si propagano più lentamente delle onde P e presentano un moto delle particelle perpendicolare alla direzione di propagazione; non si trasmettono nei fluidi;
- onde di Rayleigh: sono onde superficiali e determinano spostamenti ellittici delle particelle il cui moto avviene nel piano verticale e con verso retrogrado rispetto alla direzione di propagazione stessa;

- onde di Love: sono onde superficiali che si sviluppano solo in presenza di uno strato a bassa velocità e non si trasmettono nei fluidi; gli spostamenti sono orizzontali e trasversali rispetto alla direzione di propagazione.

## 2.1. SISMICA A RIFRAZIONE

I metodi geofisici di tipo sismico si basano sull'analisi della propagazione delle onde elastiche nel sottosuolo. La determinazione delle velocità delle onde compressionali (onde P) e di taglio (onde S) è utilizzata per la caratterizzazione del sottosuolo in termini di geometria, spessore degli strati e parametri meccanici.

Le onde si propagano nel sottosuolo ogni qual volta quest'ultimo è sottoposto ad una sollecitazione che provoca una variazione dello stato di sforzo nei materiali. La velocità e la direzione di propagazione delle onde cambiano in base alle caratteristiche elastiche dei materiali che attraversano.

Quando le onde sismiche incontrano una discontinuità o un orizzonte di separazione tra due mezzi a differente velocità, i raggi sismici incidenti sull'orizzonte di separazione si comportano seguendo le leggi di Snell.

La sismica a rifrazione utilizza i raggi sismici rifratti criticamente: quando la velocità dello strato più profondo è maggiore della velocità dello strato superficiale, i raggi incidono sull'orizzonte di separazione con un angolo di incidenza critico ( $I_c$ ), sono rifratti con un angolo di  $90^\circ$ , viaggiano parallelamente alla discontinuità e risalgono nello strato superficiale con un angolo pari a quello di incidenza.

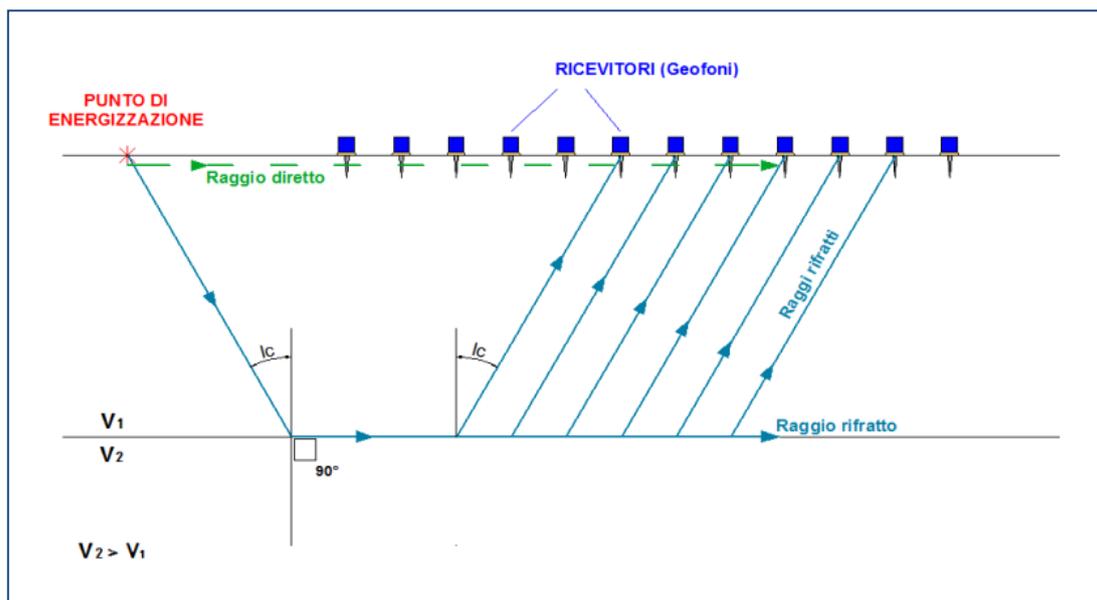
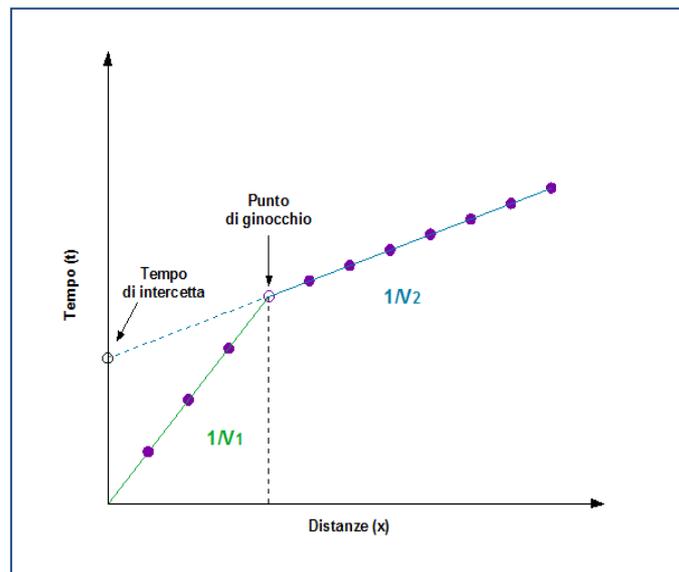


Figura 1: Rappresentazione schematica di un'indagine sismica a rifrazione

Un'indagine sismica a rifrazione consiste nel generare un'onda sismica di compressione o di taglio in un punto in superficie attraverso una sorgente di energia (mazza e piastra di battuta, cannoncino sismico, esplosivo) e misurare mediante dei ricevitori sempre posti in superficie (geofoni) il tempo di primo arrivo, ossia il tempo che l'impulso impiega dalla sorgente a raggiungere i ricevitori attraverso il sottosuolo.

La spaziatura tra i geofoni e il numero di punti di energizzazione disposti simmetricamente lungo l'allineamento di geofoni dovranno essere scelti in funzione della risoluzione spaziale e della profondità obiettivo dell'indagine.

L'analisi dei tempi di primo arrivo degli impulsi ai geofoni permette di costruire un diagramma (dromocrona) nel quale in ascisse sono rappresentate le distanze dei ricevitori e in ordinate i tempi.



*Figura 2: Curva tempi-distanze*

Il metodo convenzionale di interpretazione delle indagini sismiche a rifrazione (metodo dei tempi di intercetta) consiste proprio nell'analisi delle dromocrone di ogni punto di energizzazione. Il tratto iniziale della curva (sopra riportata) rappresenta i primi arrivi diretti che viaggiano solo all'interno dello strato più superficiale. La pendenza di questo tratto corrisponde al reciproco della velocità dello strato più superficiale. Il secondo tratto ha una pendenza inferiore e rappresenta i primi arrivi rifratti che al di là del punto di ginocchio arrivano in superficie prima dei raggi diretti. La pendenza di questo tratto sarà uguale al reciproco della velocità dello strato più profondo. Calcolando i tempi di intercetta e dei punti di ginocchio si possono ricostruire la profondità e la geometria di ogni rifrattore.

Oltre al metodo dei tempi di intercetta sono state implementate differenti tecniche interpretative che consentono di ottenere dei risultati più robusti:

- Metodi reciproci (Plus-Minus)
- Metodo reciproco generalizzato (*GRM Generalized Reciprocal Method*)
- Metodi di *delay-time*
- Metodi di *ray-tracing*

Ogni tecnica di elaborazione ha in sé i propri limiti e vantaggi e talvolta queste metodologie si basano su assunzioni semplificative che frequentemente entrano in conflitto con le reali condizioni geologiche quali eterogeneità, discontinuità laterali e gradienti. In generale è però possibile definire le condizioni di applicabilità e i limiti del metodo sismico a rifrazione, come di seguito riportato.

#### **Applicabilità:**

- ✓ Determinazione del substrato roccioso (*bedrock*) al di sotto delle coperture alluvionali
- ✓ Caratterizzazione litologica degli strati che costituiscono il sottosuolo
- ✓ Determinazione della profondità della tavola d'acqua
- ✓ Definizione della profondità degli strati nel sottosuolo

#### **Limiti del metodo:**

- ✓ La zona cieca che si verifica qualora l'impulso sismico incontri uno strato ad impedenza meccanica inferiore rispetto a quella degli strati sovrastanti. In questo caso le condizioni di velocità sono tali per cui non si genera un'onda rifratta e lo strato non può essere individuato.
- ✓ Lo strato nascosto che si verifica qualora si incontri uno strato caratterizzato da una velocità maggiore rispetto allo strato sovrastante ma leggermente inferiore a quello sottostante. In questo caso lo strato non risulta rilevabile poiché i raggi rifratti risultano coperti da quelli dello strato sottostante che raggiungono prima la superficie. Oppure si può verificare qualora lo strato abbia uno spessore così ridotto che gli impulsi rifratti si confondono con quelli dei rifrattori sopra e sottostanti.
- ✓ Altri limiti possono dipendere dalla presenza di acqua che può uniformare le velocità  $V_p$  di materiali a diversa litologia e renderne talvolta impossibile la distinzione.

La velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo è molto variabile. Genericamente si può affermare che i terreni hanno velocità inferiore alle rocce; ma la velocità di ogni materiale è influenzata da numerosi fattori quali la densità, la porosità, la saturazione oppure il grado di alterazione, di fratturazione e

fessurazione. La presenza della falda acquifera ad esempio influenza notevolmente la velocità delle onde compressionali che si trasmettono sia nello scheletro solido del mezzo sia nell'acqua (a differenza delle onde di taglio che non si trasmettono in acqua). Nelle rocce stratificate si possono avere sensibili variazioni di velocità se questa viene misurata lungo strato o perpendicolarmente ad esso.

Nella tabella di seguito si riportano alcuni range indicativi delle velocità delle onde P per diversi litotipi:

LITOTIPO	V <sub>p</sub> (m/s)
<b>Basalto</b>	5500-6300
<b>Gabbro</b>	6400-6800
<b>Granito</b>	4500-6000
<b>Gneiss</b>	4600-5500
<b>Calcere</b>	3000-6000
<b>Arenaria</b>	2400-4200
<b>Dolomia</b>	3500-6500
<b>Gesso</b>	2100-3600
<b>Materiali alluvionali</b>	300-700
<b>Argilla</b>	1100-2500
<b>Ghiaia</b>	750-1000
<b>Limo</b>	650-1250
<b>Sabbia asciutta</b>	300-1000
<b>Sabbia satura</b>	1200-1900

### 2.1.1. Tomografia sismica

La tomografia è una tecnica che permette di ricostruire un oggetto attraverso immagini bidimensionali o tridimensionali utilizzando le proiezioni monodimensionali di grandezze misurabili funzioni delle proprietà fisiche dell'oggetto stesso. Questa tecnica consente pertanto di caratterizzare un'area non accessibile per mezzo di impulsi di energia che attraversano l'area oggetto di indagine.

Le tecniche di inversione tomografica sono state applicate ai metodi sismici poiché presentano dei vantaggi rispetto ai tradizionali metodi di interpretazione. La tomografia sismica a rifrazione, infatti, è in grado di risolvere gradienti, variazioni laterali di velocità e irregolarità stratigrafiche con un elevato grado di risoluzione e può essere impiegata in situazioni in cui le tecniche interpretative classiche hanno minore applicabilità quali aree di faglia, zone carsiche o di compattazione.

La grandezza misurabile nella tomografia sismica è costituita dai tempi che le onde compressionali e di taglio impiegano per attraversare il sottosuolo.

Per poter ricostruire le anomalie di velocità di propagazione è necessario che il sottosuolo sia discretizzato, ossia suddiviso in celle, a ciascuna delle quali è assegnata una velocità congruente con i tempi di arrivo dei raggi sismici.

La risoluzione delle immagini tomografiche dipende dal numero e dalla dimensione delle celle che a loro volta sono funzione della distribuzione e della densità dei raggi sismici. La copertura del sottosuolo deve essere quanto più possibile omogenea per poter risolvere con un dettaglio adeguato l'oggetto di indagine (la dimensione delle celle dovrà essere necessariamente inferiore alle dimensioni del target). Per questo motivo nelle indagini in tomografia si utilizzano un maggior numero di punti di energizzazione e di ricezione rispetto alla tradizionale sismica a rifrazione.

La tomografia è un problema di tipo inverso poiché inizialmente si misurano i tempi di arrivo degli impulsi sismici e successivamente questi stessi valori sono utilizzati per dedurre la velocità caratteristica del mezzo attraverso il quale l'impulso si è propagato.

La soluzione del problema tomografico può essere ricavata attraverso processi di tipo iterativo.

Questi metodi comportano la definizione di un modello iniziale di velocità del sottosuolo sulla base del quale si calcolano, note le posizioni di sorgenti e ricevitori, i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Successivamente si possono calcolare i tempi residui, ossia la differenza tra tempi effettivamente osservati e tempi calcolati.

A questo punto si sviluppa un sistema di equazioni lineari per definire una relazione tra i tempi residui e la correzione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello reale attendibile.

Il calcolo della soluzione del sistema di equazioni viene reiterato fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta compresa in un range di errore accettabile e il modello di velocità calcolato appare privo di artefatti matematici non congruenti con la realtà fisica e geologica.

## **2.2. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)**

Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga: questa proprietà si chiama dispersione.

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali. La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo comprende tre passi successivi:

- l'acquisizione delle onde superficiali (*ground roll*);
- la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza);
- l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle  $V_s$ .

Il principale vantaggio di questo metodo è la capacità di riconoscimento dei diversi comportamenti, che consente di identificare ed estrarre il segnale utile dall'insieme di varie e differenti tipi di onde sismiche. Quando un impatto è applicato sulla superficie del terreno, tutte queste onde vengono simultaneamente generate con differenti proprietà di attenuazione, velocità e contenuti spettrali. Queste proprietà sono individualmente identificabili in una registrazione multicanale e lo stadio successivo del processo fornisce grande versatilità nell'estrazione delle informazioni utili.

Per ottenere un profilo  $V_s$  bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. Una molteplicità di tecniche diverse sono state utilizzate nel tempo per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi. L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando la curva di dispersione misurata come riferimento sia per la modellizzazione diretta che per la procedura ai minimi quadrati.

Quando si generano le onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh, vengono generate anche una molteplicità di tipi diversi di onde. Fra queste le onde di corpo, le onde superficiali non piane, le onde riverberate (*back scattered*) dalle disomogeneità superficiali, il rumore ambientale e quello imputabile alle attività umane. Le onde di corpo sono in vario modo riconoscibili in un sismogramma multicanale. Quelle rifratte e riflesse sono il risultato dell'interazione fra le onde e l'impedenza acustica (il contrasto di velocità) fra le superfici di discontinuità, mentre le onde di corpo dirette viaggiano, come è implicito nel nome, direttamente dalla sorgente ai ricevitori (geofoni). Le onde che si propagano a breve distanza dalla sorgente sono sempre onde superficiali. Queste onde, in prossimità della sorgente, seguono un complicato comportamento non lineare e non possono essere trattate come onde piane. Le onde superficiali riverberate (*back scattered*) possono essere prevalenti in un sismogramma multicanale se in prossimità delle misure sono presenti discontinuità orizzontali quali fondazioni e muri di contenimento.

Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno.

La scomposizione di un campo di onde registrate in un formato a frequenza variabile consente l'identificazione della maggior parte del rumore, analizzando la fase e la frequenza dipendentemente dalla distanza dalla sorgente. La scomposizione può essere quindi utilizzata in associazione con la registrazione multicanale per minimizzare il rumore durante l'acquisizione. La scelta dei parametri di elaborazione così come del miglior intervallo di frequenza per il calcolo della velocità di fase, può essere fatto con maggior accuratezza utilizzando dei sismogrammi multicanale. Una volta scomposto il sismogramma, una opportuna misura di coerenza applicata nel tempo e nel dominio della frequenza può essere utilizzata per calcolare la velocità di fase rispetto alla frequenza. La velocità di fase e la frequenza sono le due variabili ( $x$ ;  $y$ ), il cui legame costituisce la curva di dispersione.

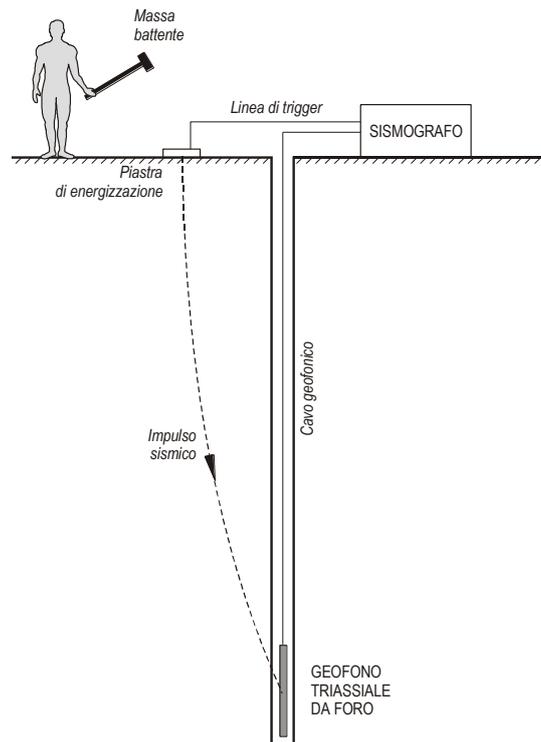
Le onde di superficie sono facilmente generate da una sorgente sismica quale, ad esempio, una mazza battente. La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a riflessione (CMP). Però alcune regole operative per MASW sono incompatibili con l'ottimizzazione della riflessione. Questa similitudine permette di ottenere, con la procedura MASW, delle sezioni superficiali di velocità che possono essere utilizzate per accurate correzioni statiche dei profili a riflessione.

### **2.3. DOWN-HOLE**

Le prove sismiche Down-Hole vengono eseguite con lo scopo di misurare la velocità delle onde sismiche dirette che si propagano dalla superficie, nel terreno in profondità.

Il terreno viene energizzato in superficie in prossimità di un foro di sondaggio e la registrazione avviene all'interno del foro stesso grazie ad un geofono triassiale ancorato a profondità via via crescenti che registra gli spostamenti (tradotti sotto forma di impulsi elettrici) lungo tre direzioni ortogonali tra loro ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Le onde sismiche possono essere generate energizzando il terreno in direzione verticale oppure in direzione trasversale (parallelamente al suolo): nel primo caso verranno generate prevalentemente onde compressive (onde P) che si propagano in profondità e vengono registrate al meglio dal geofono verticale (asse  $z$ ); nel secondo caso verranno generate prevalentemente onde di taglio (onde S) visibili principalmente sui geofoni con l'asse posto orizzontalmente (assi  $x$  e  $y$ ).



**Figura 3: Rappresentazione schematica di una prova sismica di tipo down-hole.**

Le onde di taglio hanno velocità inferiori rispetto a quelle compressive e quindi raggiungeranno il geofono triassiale quando il primo fronte d'onda compressiva è già transitato. Questo passaggio costituisce un disturbo per la misura delle onde trasversali in quanto i geofoni orizzontali si trovano ancora in movimento all'arrivo dell'onda S. Per migliorare il rapporto fra l'energia dell'onda compressiva P e l'energia dell'onda trasversale S a favore di quest'ultima, si realizza una doppia energizzazione orizzontale con verso opposto. La sottrazione delle forme d'onda relative a queste due acquisizioni riduce sensibilmente la componente compressiva presente nel segnale.

La misura dei tempi dei primi arrivi delle onde sismiche deve essere realizzata con precisione e con un dettaglio non inferiore al decimo di millisecondo. Ogni ritardo fra il momento dell'energizzazione fornita al terreno e l'inizio della registrazione sul sismografo si traduce in un errore significativo nei valori di velocità misurati. Per annullare ogni effetto di ritardo, si ricorre alla chiusura di un circuito elettrico che avviene al momento dell'energizzazione.

La prova si sviluppa secondo le seguenti fasi:

- dopo aver predisposto un opportuno piano d'appoggio, le sorgenti vengono collocate sulla superficie in prossimità del foro a una distanza dal suo asse di circa 2 m e orientate perpendicolarmente al raggio uscente dal foro. Per la produzione di onde P si utilizza il sistema a massa battente (una mazza del peso di circa 10 kg) a impatto verticale su una piastra metallica. Per la produzione di onde

S, viene appoggiata al terreno una trave in legno sulla quale si applica un carico statico addizionale (ruote di un veicolo) per renderla aderente e solidale al piano di appoggio, sia al momento della battuta, sia successivamente per evitare che l'energia prodotta venga in parte dispersa. L'energizzazione avviene colpendo con una mazza del peso di circa 10 kg in direzione orizzontale le due estremità della trave;

- il sistema ricevente, costituito da un ricevitore (geofono triassiale) in grado di ancorarsi alle pareti del tubo mediante un sistema di ancoraggio meccanico, viene posizionato a fondo foro e orientato con uno degli assi orizzontali parallelo alla trave;
- la prova si esegue in risalita lungo la verticale di sondaggio con passo di misura pari ad 1 m. Le energizzazioni (generazione di onde P ed S) si ripetono ogni volta che il ricevitore viene spostato fino al raggiungimento della profondità di 1 m da piano campagna.

Misurando sui sismogrammi i tempi di transito relativi alle onde P ed S è possibile stimare l'andamento delle velocità  $V_p$  e  $V_s$ .

Per effettuare questo calcolo si possono utilizzare il metodo diretto o quello intervallare.

Il **metodo diretto** consiste nel correggere il tempo di arrivo in funzione della distanza tra la sorgente e il ricevitore per considerare l'inclinazione seguita dalle onde sismiche. La velocità è calcolata come il rapporto tra il tempo corretto e la profondità del ricevitore per strati omogenei; in un grafico tempo-profondità, la variazione di pendenza della retta di interpolazione indica una variazione di velocità.

Il **metodo intervallare** consiste nel rilevare i tempi di arrivo contemporaneamente con due ricevitori posti in foro a distanza di 1-2 m e calcolare la velocità come rapporto tra la differenza delle profondità e dei tempi ai ricevitori come di seguito riportato:

$$V = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1}$$

Questo metodo permette di ricavare un profilo di velocità con una migliore definizione. È possibile calcolare le velocità con questo metodo anche quando si ha a disposizione un solo ricevitore, in questo caso il metodo è definito **pseudo-intervallare** poiché l'impulso non è registrato contemporaneamente ma in istanti successivi.

Conoscendo la velocità delle onde P e delle onde S e la densità dei materiali indagati è possibile calcolare i parametri elastici dinamici che caratterizzano il sottosuolo ed in particolare:

**Modulo di deformazione a taglio (G) o modulo di rigidità:** definisce il rapporto tra lo sforzo applicato e la distorsione prodotta perpendicolarmente allo sforzo di taglio applicato:

$$G = \rho \times V_S^2$$

**Modulo di Young (E):** definisce il rapporto lineare elastico tra lo sforzo applicato e la deformazione prodotta nella direzione di applicazione dello sforzo:

$$E = 2\rho \times V_S^2 \times (1 + \nu)$$

**Coefficiente di Poisson (ν):** che definisce il rapporto tra deformazione trasversale e assiale:

$$\nu = \frac{0.5 \times \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1}{\left[\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2\right] - 1}$$

Dove:

$\rho$  è la densità

$V_P$  la velocità delle onde compressionali

$V_S$  la velocità delle onde trasversali

### 3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Il sistema di acquisizione dati è sostanzialmente costituito dai seguenti elementi:

- Sismografo
- Sorgente di energizzazione
- Ricevitori
- Trigger

Nei paragrafi seguenti sono descritte le caratteristiche tecniche di ogni singolo componente del sistema.

#### 3.1. Sismografo

Per le indagini sismiche a rifrazione è stato utilizzato il sismografo della PASI modello G16S24-U a 24 canali di cui si riportano di seguito le caratteristiche tecniche

<b>A/D Converter</b>	24 bit
<b>Filtri anti-aliasing</b>	Attivi
<b>Filtri analogici e digitali</b>	Butterworth 48 dB/ottava
<b>Intervallo di campionamento</b>	selezionabile da 125 $\mu$ s a 2.0 ms
<b>Massima lunghezza di acquisizione</b>	65536 ms
<b>Formato dati</b>	SEG-2

Per le prove MASW e down-hole come acquirente è stato utilizzato è il sismografo “GEODE” della Geometrics a 24 canali, di cui si riportano di seguito le caratteristiche tecniche:

<b>A/D Converter</b>	24 bit
<b>Range dinamico</b>	144 dB
<b>Distorsione</b>	0.0005%
<b>Risoluzione</b>	da 1.75 Hz a 20 kHz
<b>Rumore</b>	0.20 $\mu$ V
<b>Precisione dello stacking</b>	1/32 dell'intervallo di campionamento
<b>Filtri anti-aliasing</b>	-3 dB 83% della frequenza di Nyquist
<b>Filtri analogici e digitali</b>	Butterworth 24 o 48 dB/ottava; Notch
<b>Intervallo di campionamento</b>	selezionabile da 0.02 a 16.0 ms
<b>Massima lunghezza di acquisizione</b>	16384 campioni per canale
<b>Formato dati</b>	SEG-2

### 3.2. Sorgente di energizzazione

Come sorgente di energizzazione per la sismica a rifrazione, le MASW e per le prove down-hole (onde P) è stato utilizzato un sistema a massa battente costituito da una mazza da 8 kg con una piastra di impatto metallica di dimensioni 15 cm x 15 cm. L'energizzazione è stata prodotta dai colpi della mazza sulla piastra direttamente collocata sul piano campagna.

Per la generazione delle onde S nelle prove down-hole è stato utilizzato un sistema di energizzazione composto da una mazza da 8 kg e da una trave in legno di lunghezza pari a 2 m rivestita alle estremità con piastre metalliche. L'energizzazione è stata prodotta colpendo con la mazza le due estremità della trave posta sul piano campagna. Per impedire eventuali spostamenti, garantire un buona aderenza con il terreno e conseguentemente ridurre la dispersione di energia, la trave è stata gravata con il peso di un autocarro.

### 3.3. Ricevitori

Sia per le indagini sismiche a rifrazione sia per le prove MASW sono stati utilizzati n. 24 geofoni verticali di tipo elettromagnetico a massa sospesa. Per la rifrazione sono stati usati geofoni con frequenza propria pari a 10 Hz della PASI e mentre per le MASW a 4,5 Hz della OYO Geospace.

Per le prove down-hole è stato utilizzato un geofono triassiale (modello BHG-3 della Geostuff) con frequenza pari a 15 Hz dotato di unità di controllo e sistema di ancoraggio meccanico alle pareti del foro. I geofoni sono sensori di tipo elettromagnetico che generano una tensione proporzionale alla velocità della perturbazione sismica.

Di seguito sono riportate le caratteristiche tecniche del geofono da foro:

<b>Geofoni</b>	n. 1 Verticale n. 2 Orizzontali
<b>Frequenza propria</b>	15 Hz
<b>Angolo di inclinazione massimo</b>	30°
<b>Precisione</b>	< 5°
<b>Distorsione</b>	< 0.75 %
<b>Sensibilità</b>	0.52 V/cm/sec
<b>Peso della massa</b>	7.8 g
<b>Bussola</b>	Sensore potenziometrico
<b>Ancoraggio</b>	Meccanismo elettrico
<b>Dimensioni alloggiamento</b>	Diametro 48 mm Diametro massimo di ancoraggio 18 cm Lunghezza 1,1 m Peso 3,4 kg
<b>Temperatura di esercizio</b>	da -40°C a 100°C
<b>Alimentazione</b>	12-24 Vdc

### 3.4. Trigger

Come sistema di trigger è stato utilizzato un geofono starter posizionato in prossimità del punto di energizzazione.

## 4. DESCRIZIONE DEL RILIEVO

### 4.1. SISMICA A RIFRAZIONE

Al fine di caratterizzare l'area di indagine sono stati eseguiti, come da specifiche tecniche, n. 166 stendimenti la cui posizione è riportata nelle tavole dell'allegato A.

Tutte le linee sono state acquisite mediante n. 24 geofoni con interdistanza pari a 5 m. L'energizzazione è stata effettuata in corrispondenza di n. 5 posizioni disposte simmetricamente e reciprocamente rispetto allo stendimento ed in particolare:

- n. 2 shot esterni ad una distanza pari alla metà dell'interdistanza geofonica dal primo o ultimo geofono;
- n. 1 shot al centro della linea;
- n. 2 shot in posizioni intermedie e rispettivamente tra i geofoni G6/G7 e G18/G19.

Le coordinate plano-altimetriche in formato WGS84 ricavate dal rilievo topografico eseguito dei singoli punti di ricezione è riportata per ciascuna sezione in allegato (**All. B1**).

L'acquisizione dati è stata realizzata con passo di campionamento pari a 0,128 ms. Ogni tiro è stato ripetuto più volte per migliorare attraverso operazione di *stacking* (somma di più impulsi sismici generati nella medesima posizione) la qualità del segnale acquisito.

Le quantità del rilievo eseguito sono riassunte nella **Tabella 1** di seguito riportata:

DATA ACQUISIZIONE	FASE	IDENTIFICATIVO	LUNGHEZZA SEZIONE (m)
07/01/2013	1	BS_199	115
07/01/2013	1	BS_196	115
07/01/2013	1	BS_194	115
07/01/2013	1	BS_191	115
08/01/2013	1	BS_189	115
08/01/2013	1	BS_186	115
08/01/2013	1	BS_184	115
08/01/2013	1	BS_180	115
09/01/2013	1	BS_119	115
09/01/2013	1	BS_121	115
09/01/2013	1	BS_140	115
10/01/2013	1	BS_178	115
10/01/2013	1	BS_176	115
10/01/2013	1	BS_172	115
10/01/2013	1	BS_170	115
11/01/2013	1	BS_130	115
11/01/2013	1	BS_144	115
11/01/2013	1	BS_146	115
11/01/2013	1	BS_148	115
11/01/2013	1	BS_151	115
14/01/2013	1	BS_155	115
14/01/2013	1	BS_183	115
14/01/2013	1	BS_175	115
15/01/2013	1	BS_168	115
15/01/2013	1	BS_167	115

DATA ACQUISIZIONE	FASE	IDENTIFICATIVO	LUNGHEZZA SEZIONE (m)
15/01/2013	1	BS_164	115
16/01/2013	1	BS_165	115
16/01/2013	1	BS_162	115
16/01/2013	1	BS_161	115
17/01/2013	1	BS_157	115
17/01/2013	1	BS_160	115
17/01/2013	1	BS_139	115
18/01/2013	1	BS_142	115
18/01/2013	1	BS_128	115
18/01/2013	1	BS_126	115
21/01/2013	1	BS_135	115
21/01/2013	1	BS_094	115
21/01/2013	1	BS_096	115
21/01/2013	1	BS_069	115
21/01/2013	1	BS_069bis	115
22/01/2013	1	BS_067	115
22/01/2013	1	BS_064	115
22/01/2013	1	BS_065	115
22/01/2013	1	BS_062	115
23/01/2013	1	BS_061	115
23/01/2013	1	BS_072	115
23/01/2013	1	BS_056	115
23/01/2013	1	BS_059	115
28/01/2013	1	BS_001	115
28/01/2013	1	BS_002	115
28/01/2013	1	BS_004	115
28/01/2013	1	BS_005	115
28/01/2013	1	BS_006	115
29/01/2013	1	BS_007	115
29/01/2013	1	BS_009	115
29/01/2013	1	BS_010	115
29/01/2013	1	BS_011	115
29/01/2013	1	BS_016	115
30/01/2013	1	BS_018	115
30/01/2013	1	BS_022	115
30/01/2013	1	BS_020	115
30/01/2013	1	BS_025	115
30/01/2013	1	BS_026	115
31/01/2013	1	BS_028	115
31/01/2013	1	BS_033	115
31/01/2013	1	BS_036	115
31/01/2013	1	BS_039	115
31/01/2013	1	BS_044	115
01/02/2013	1	BS_048	115
01/02/2013	1	BS_049	115
<b>Totale FASE 1</b>			<b>8050</b>
04/02/2013	2	BS_003	115
04/02/2013	2	BS_008	115
04/02/2013	2	BS_014	115
04/02/2013	2	BS_027	115
04/02/2013	2	BS_043bis	115
05/02/2013	2	BS_045	115
05/02/2013	2	BS_047	115
05/02/2013	2	BS_052	115
05/02/2013	2	BS_070	115
05/02/2013	2	BS_080	115
06/02/2013	2	BS_082	115
06/02/2013	2	BS_084	115
06/02/2013	2	BS_086	115
06/02/2013	2	BS_098	115
06/02/2013	2	BS_123	115
07/02/2013	2	BS_150	115
07/02/2013	2	BS_166	115
07/02/2013	2	BS_174	115

DATA ACQUISIZIONE	FASE	IDENTIFICATIVO	LUNGHEZZA SEZIONE (m)
07/02/2013	2	BS_182	115
07/02/2013	2	BS_188	115
08/02/2013	2	BS_190	115
08/02/2013	2	BS_192	115
08/02/2013	2	BS_193	115
08/02/2013	2	BS_198	115
08/02/2013	2	BS_200	115
11/02/2013	2	BS_152	115
11/02/2013	2	BS_031	115
11/02/2013	2	BS_034	115
11/02/2013	2	BS_038	115
12/02/2013	2	BS_041	115
12/02/2013	2	BS_179	115
12/02/2013	2	BS_138	115
12/02/2013	2	BS_133	115
13/02/2013	2	BS_074	115
13/02/2013	2	BS_076	115
13/02/2013	2	BS_078	115
14/02/2013	2	BS_088	115
13/02/2013	2	BS_090	115
13/02/2013	2	BS_093	115
13/02/2013	2	BS_101	115
14/02/2013	2	BS_107	115
14/02/2013	2	BS_115	115
18/02/2013	2	BS_054	115
18/02/2013	2	BS_100	115
18/02/2013	2	BS_110	115
19/02/2013	2	BS_113	115
19/02/2013	2	BS_117	115
19/02/2013	2	BS_127	115
<b>Totale FASE 2</b>			<b>5520</b>
25/02/2013	3	BS_019	115
25/02/2013	3	BS_030	115
25/02/2013	3	BS_035	115
25/02/2013	3	BS_037	115
26/02/2013	3	BS_043	115
26/02/2013	3	BS_046	115
26/02/2013	3	BS_051	115
26/02/2013	3	BS_053	115
26/02/2013	3	BS_055	115
27/02/2013	3	BS_057	115
27/02/2013	3	BS_068	115
27/02/2013	3	BS_075	115
27/02/2013	3	BS_077	115
27/02/2013	3	BS_079	115
28/02/2013	3	BS_081	115
28/02/2013	3	BS_083	115
28/02/2013	3	BS_084bis	115
28/02/2013	3	BS_085	115
28/02/2013	3	BS_087	115
01/03/2013	3	BS_089bis	115
01/03/2013	3	BS_095	115
01/03/2013	3	BS_099	115
01/03/2013	3	BS_106	115
01/03/2013	3	BS_109	115
04/03/2013	3	BS_089	115
04/03/2013	3	BS_111	115
04/03/2013	3	BS_114	115
04/03/2013	3	BS_116	115
04/03/2013	3	BS_118	115
05/03/2013	3	BS_120	115
05/03/2013	3	BS_122	115
05/03/2013	3	BS_129	115
05/03/2013	3	BS_141	115

DATA ACQUISIZIONE	FASE	IDENTIFICATIVO	LUNGHEZZA SEZIONE (m)
05/03/2013	3	BS_143	115
06/03/2013	3	BS_145	115
06/03/2013	3	BS_147	115
06/03/2013	3	BS_149	115
06/03/2013	3	BS_154	115
06/03/2013	3	BS_156	115
07/03/2013	3	BS_158	115
07/03/2013	3	BS_163	115
07/03/2013	3	BS_169	115
07/03/2013	3	BS_171	115
07/03/2013	3	BS_173	115
08/03/2013	3	BS_185	115
08/03/2013	3	BS_187	115
08/03/2013	3	BS_195	115
08/03/2013	3	BS_197	115
<b>Totale FASE 3</b>			<b>5520</b>
<b>TOTALE COMPLESSIVO</b>			<b>19090</b>

*Tabella 1: riepilogo indagine sismica a rifrazione.*

#### 4.2. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

In base alle specifiche tecniche sono state eseguite n. 97 prospezioni sismiche di tipo MASW la cui posizione è riportata nelle tavole dell'allegato A.

Ogni stendimento è stato realizzato con 24 geofoni disposti con interdistanza pari a 2 m fino a coprire un'estensione lineare di 46 m complessivi.

L'energizzazione è stata effettuata in 2 punti collocati a circa 10 m di distanza dal primo e dall'ultimo geofono dello stendimento.

La scelta di energizzare in due punti diversi è dettata dalla possibilità, in fase di elaborazione dati, di selezionare la registrazione migliore e più chiara ai fini del calcolo del  $V_{s30}$ ; pertanto nelle tavole illustrative dei risultati riportate in allegato (All. C1) viene riportato unicamente il sismogramma utilizzato per l'elaborazione.

Le quantità delle prove eseguite sono riassunte nella **Tabella 2** di seguito riportata:

DATA ACQUISIZIONE	FASE	IDENTIFICATIVO
09/01/2013	1	M001bis
09/01/2013	3	M001
09/01/2013	1	M002
09/01/2013	3	M002bis
09/01/2013	1	M004
09/01/2013	1	M005
10/01/2013	1	M005bis
10/01/2013	2	M006
10/01/2013	1	M008
10/01/2013	1	M009
10/01/2013	1	M010
10/01/2013	1	M011
11/01/2013	2	M012
10/01/2013	1	M013
10/01/2013	1	M014

DATA ACQUISIZIONE	FASE	IDENTIFICATIVO
10/01/2013	1	M014bis
10/01/2013	2	M015bis
10/01/2013	1	M016
12/01/2013	2	M017
12/01/2013	1	M019
12/01/2013	3	M020
12/01/2013	1	M021
12/01/2013	1	M027
12/01/2013	2	M028
16/01/2013	1	M022
16/01/2013	3	M023
16/01/2013	1	M024
16/01/2013	2	M025
16/01/2013	1	M026
17/01/2013	3	M015
17/01/2013	3	M042
17/01/2013	1	M045
18/01/2013	3	M030
18/01/2013	1	M031
18/01/2013	3	M032
18/01/2013	1	M033
18/01/2013	3	M034
18/01/2013	3	M035
18/01/2013	2	M050
18/01/2013	1	M059
19/01/2013	3	M060
19/01/2013	3	M063
19/01/2013	1	M064
19/01/2013	1	M065
19/01/2013	1	M066
19/01/2013	1	M068
19/01/2013	1	M070
20/01/2013	3	M051
20/01/2013	3	M052
20/01/2013	2	M053
20/01/2013	3	M054
20/01/2013	2	M055
20/01/2013	2	M056
20/01/2013	3	M057
20/01/2013	2	M058
21/01/2013	1	M075
21/01/2013	1	M076
21/01/2013	1	M077
21/01/2013	1	M082
21/01/2013	1	M084
21/01/2013	1	M091
21/01/2013	1	M095
22/01/2013	3	M092
22/01/2013	2	M092bis
22/01/2013	2	M093
22/01/2013	3	M096
22/01/2013	2	M097
22/01/2013	2	M098
22/01/2013	3	M100
22/01/2013	3	M101
22/01/2013	2	M102
23/01/2013	3	M036
23/01/2013	2	M037
23/01/2013	3	M038
23/01/2013	2	M039
23/01/2013	2	M041
23/01/2013	2	M043
23/01/2013	1	M044
23/01/2013	2	M046
23/01/2013	3	M047

DATA ACQUISIZIONE	FASE	IDENTIFICATIVO
23/01/2013	3	M049
23/01/2013	2	M062
24/01/2013	3	M085
24/01/2013	2	M085bis
25/01/2013	2	M067
25/01/2013	2	M067bis
25/01/2013	3	M067tris
26/05/2013	2	M073
26/05/2013	3	M074
26/05/2013	3	M075bis
26/05/2013	3	M078
26/05/2013	1	M079
26/05/2013	3	M086
26/05/2013	1	M087
26/05/2013	3	M088
26/05/2013	3	M090
21/01/2013	1	M003
<b>Totale Prove FASE 1</b>		<b>39</b>
<b>Totale Prove FASE 2</b>		<b>26</b>
<b>Totale Prove FASE 3</b>		<b>32</b>
<b>TOTALE COMPLESSIVO</b>		<b>97</b>

*Tabella 2: riepilogo prospezioni sismiche di tipo MASW.*

### 4.3. DOWN-HOLE

In base alle specifiche tecniche sono state eseguite n. 46 prospezioni sismiche in foro di tipo down-hole la cui posizione è riportata nelle tavole dell'allegato **A** (l'ubicazione dei fori di sondaggio interessati dalle prove è stata fornita dal Committente).

Ogni prova è stata effettuata in risalita (a partire da fondo foro fino al piano campagna) per l'intera verticale di ciascun sondaggio con passo di misura pari a 1 m.

La piastra per l'energizzazione delle onde P e la trave per le onde S sono state posizionate ad una distanza variabile dal sondaggio da circa 1,0 m fino a 4,0 m in base alle condizioni logistiche riscontrate in prossimità della testa foro.

Le quantità delle prove eseguite sono riassunte nella **Tabella 3** di seguito riportata:

DATA	FASE	IDENTIFICATIVO	LUNGHEZZA (m)
11/03/2013	3	S005	30
21/02/2013	1	S011	30
21/02/2013	1	S012	30
11/02/2013	1	S015	30
07/03/2012	3	S034	30
04/02/2013	1	S036	30
21/02/2013	3	S041	30
07/02/2013	1	S044	30
07/03/2012	3	S051	30
19/02/2013	1	S059	30
11/03/2013	3	S063	30
08/02/2013	1	S068	30
07/02/2013	1	S070	30

DATA	FASE	IDENTIFICATIVO	LUNGHEZZA (m)
06/02/2013	1	S074	30
05/02/2013	1	S077	30
05/02/2013	1	S080	30
18/02/2013	1	S083	35
20/02/2013	2	S093	30
06/02/2013	1	S097	30
09/02/2013	1	S099	30
08/02/2013	1	S101	30
12/02/2013	3	S105	30
22/02/2013	1	S107	30
11/03/2013	2	S112	30
11/02/2013	1	S125	30
13/02/2013	1	S139	30
22/02/2013	3	S146	30
10/03/2013	3	S153	30
19/02/2013	1	S157bis	30
09/02/2013	1	S160	30
14/02/2013	1	S166	30
10/03/2013	3	S172	30
09/03/2013	2	S174	30
09/03/2013	2	S178	40
15/02/2013	1	S181	50
19/02/2013	1	S184	30
20/02/2013	2	S190	30
16/02/2013	1	S198	30
16/02/2013	1	S201	35
16/02/2013	1	S203	30
08/03/2012	2	S208	35
20/02/2013	1	S211	30
13/02/2013	1	S215	30
14/02/2013	1	S218	30
15/02/2013	1	S220bis	40
18/02/2013	1	S225	40
<b>Totale Prove FASE 1</b>			<b>980</b>
<b>Totale Prove FASE 2</b>			<b>195</b>
<b>Totale Prove FASE 3</b>			<b>270</b>
<b>TOTALE COMPLESSIVO</b>			<b>1445</b>

*Tabella 3: riepilogo prove sismiche in foro di tipo down-hole.*

## 5. ELABORAZIONE DATI

La procedura di elaborazione dati per ogni tipologia di prova è sinteticamente descritta nei paragrafi seguenti.

### 5.1. SISMICA A RIFRAZIONE

I dati acquisiti in formato SEG2 sono stati analizzati con il software Rayfract della Intelligent Resources Inc. per la determinazione dei tempi di primo arrivo.

Per ogni punto di ricezione ed energizzazione sono state inserite le coordinate plano-altimetriche  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ricavate dal rilievo topografico eseguito.

L'elaborazione tomografica dei dati è stato realizzata con il medesimo software Rayfract che si basa sul metodo di inversione WET (*Wavepath Eikonal Traveltime*).

L'algoritmo di inversione utilizza per la modellizzazione della propagazione delle onde sismiche l'approccio basato sulle zone di Fresnel. A differenza dei metodi di *ray-tracing* che considerano la frequenza dell'impulso sismico infinita e utilizzano come modello di propagazione delle onde i raggi sismici ("*thin rays*"), questo metodo di inversione considera la frequenza dell'impulso finita (valuta, anche se in modo parziale, i fenomeni di diffrazione e dispersione) e rappresenta le traiettorie d'onda come fasci di raggi tridimensionali ("*fat rays*"), riproducendo una condizione maggiormente rappresentativa della realtà.

Il primo step di elaborazione, eseguito con il metodo Delta-t-V, consiste nel determinare in corrispondenza di ogni stazione (posizione dei ricevitori e degli spari) dello stendimento sismico un profilo monodimensionale velocità/profondità direttamente ricavato dall'analisi dei tempi di primo arrivo.

L'algoritmo *smooth inversion* permette di calcolare un modello iniziale 1D mediando i valori di velocità ottenuti dai profili sopra citati ed estendendo lateralmente questi valori a tutta la sezione.

Lo step successivo consiste nell'elaborazione tomografica che permette di ottenere un modello bidimensionale del sottosuolo. L'inversione WET 2D ottimizza il modello iniziale attraverso un processo iterativo che minimizza i tempi residui, ossia la differenza tra tempi di arrivo misurati e tempi di arrivo calcolati per ottenere un modello quanto più possibile attendibile.

Dal processo di inversione tomografica si ottengono il modello calcolato delle velocità delle onde sismiche P, le dromocrone osservate e calcolate, la copertura dei raggi sismici dello spazio indagato e il valore di RMS per ogni singola sezione elaborata.

Il modello di velocità è rappresentato attraverso interpolazione geometrica 2D (l'algoritmo utilizzato è il kriging) mediante il software Surfer. Per i modelli di velocità è stata scelta una opportuna scala colore con un range compreso tra i 200 m/sec e i 4000 m/sec.

I risultati sono rappresentati nelle tavole riportate all'allegato **B1**.

## 5.2. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

L'elaborazione dei dati è stata eseguita con il software WinMasw Standard della Eliosoft.

I dati acquisiti in formato SEG2 sono stati elaborati per determinare lo spettro di velocità. Per ogni prova vengono acquisiti differenti *dataset* tra i quali si sceglie quello che definisce lo spettro di velocità più pulito. A tal fine i dati possono essere opportunamente filtrati o selezionati in parte per eliminare eventuali disturbi che possono inficiare lo spettro.

Una volta definite le velocità e le frequenze massime e minime che permettono di ottenere uno spettro di velocità che meglio identifica il segnale di interesse si procede alla definizione delle curve di dispersione attraverso l'operazione di *picking*.

Le curve di dispersione possono essere utilizzate per calcolare il possibile modello di sottosuolo attraverso la modellizzazione diretta, con la quale l'utente definisce il modello con la migliore coerenza tra la distribuzione di energia dello spettro e le curve di dispersione teoriche a partire dalla conoscenze stratigrafiche del sito in esame, oppure mediante processo di inversione.

Quest'ultimo è un processo basato su algoritmi genetici che a differenza dei comuni metodi di inversione lineare basati sul metodo del gradiente, non necessita di un modello di partenza ma solo la definizione di uno spazio di ricerca compatibile con le caratteristiche geologiche del sito (i parametri che definiscono questo spazio sono: spessore degli strati, velocità delle onde di taglio, densità, coefficiente di Poisson) all'interno del quale vengono valutate diverse possibili soluzioni.

La soluzione finale estratta è quella considerata maggiormente attendibile sia sulla base di parametri statistici sia sulle conoscenze geologiche del sito in esame.

Dall'elaborazione dei dati si ricava un possibile profilo verticale delle onde S definito come successione di strati con differenti spessori e velocità oltre alle curve di dispersione dei modi di vibrazione del sottosuolo indagato.

I risultati sono rappresentati nelle tavole riportate all'allegato **C1**.

## 5.3. DOWN-HOLE

L'analisi dei dati prevede che le battute eseguite in diversi momenti, avanzando in profondità o in risalita, vengano raccolte a ricostruire un unico sismogramma, identico a quello che sarebbe stato ricevuto da una catena di tanti geofoni quante sono le posizioni di misura nel foro.

In particolare vengono raggruppate in un sismogramma le forme d'onda relative al geofono verticale (asse z) e in un altro sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni orizzontali (assi x e y).

Una volta determinati i tempi di arrivo (arrivi diretti) dell'impulso delle onde compressionali P e delle onde di taglio S ai ricevitori a ogni profondità, vengono calcolate le velocità P ed S lungo la verticale di sondaggio. Successivamente si calcolano le velocità pseudo-intervallari (velocità sismiche del tratto corrispondente a due successive posizioni di misura) e da ultimo i parametri dinamici di elasticità e taglio ottenibili per correlazione dei dati di cui sopra.

I parametri dinamici prevedono ovviamente alcune approssimazioni relative soprattutto alle ipotesi circa il peso di volume ( $\gamma$ ) dei materiali investigati. In questo caso si è deciso di utilizzare dei valori compresi tra 18 e 23 kN/m<sup>3</sup>: I valori inferiori sono stati attribuiti ai depositi di natura sedimentaria mentre i valori più alti alle rocce sedimentarie e vulcaniche. Tali ipotesi sono state formulate sulla base delle stratigrafie dei sondaggi fornite dal Committente.

I risultati delle prove Down-Hole sono illustrati nelle tabelle e nei grafici allegati (**All. D1**), in cui vengono riportate velocità  $V_p$ ,  $V_s$  e parametri dinamici.

## 6. RISULTATI DEL RILIEVO E CONCLUSIONI

I risultati delle indagini sono riportati negli allegati **B** (sismica a rifrazione), **C** (MASW) e **D** (Down-Hole), mentre le ubicazioni delle singole prove sono state riportate sulla cartografia (scala 1:2000) fornita dal Committente e rappresentate nelle tavole allegate (All. **A**).

### 6.1. SISMICA A RIFRAZIONE

I risultati dell'indagine in tomografia sismica a rifrazione sono riportati nelle tavole dell'allegato **B1** dove per ogni sezione sono stati rappresentati:

- Dromocrone calcolate e osservate;
- Modello tomografico delle velocità delle onde compressionali P ottenuto dall'elaborazione dei dati con relativa scala colore (da 200 a 4000 m/s);
- Geometria di acquisizione della sezione;
- Stralcio planimetrico con ubicazione della base sismica.

Su ogni modello sono stati differenziati dei sismostrati definiti per classi di velocità indicate sulla scala colore. Sono stati identificati complessivamente tre differenti sismostrati:

- Sismostrato I a bassa velocità (200-1300 m/s): rappresenta i materiali superficiali aerati o poco compatti;
- Sismostrato II a media velocità (1200-2600 m/s): indica materiali con maggiore grado di compattazione rispetto a quelli superficiali (mediamente compatto);
- Sismostrato III ad alta velocità (2500-4000 m/s): è caratterizzato da materiali compatti o molto compatti.

Le coordinate plano-altimetriche di ogni ricevitore sono riportate in formato WGS 84 in allegato (All. **B2**), inoltre per ogni sezione è stata calcolata la coordinata del geofono 1 (inizio linea) sia come WGS 84 sia in Gauss Boaga.

### 6.2. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

I risultati delle prospezioni sismiche di tipo MASW sono riportati nelle tavole dell'allegato **C1** dove per ogni sezione sono stati rappresentati:

- Sismogramma utilizzato per l'elaborazione dei dati e relativo spettro di velocità;
- Profilo verticale della velocità  $V_s$  (m/s) in funzione della profondità oltre alle curve di dispersione (mediante le quali è stato calcolato) sovrapposte allo spettro di velocità;

- Modello stratigrafico delle velocità  $V_s$  (m/s) rappresentato con strati di differenti colori (le variazioni di colore passano dal verde dei materiali a velocità più basse al rosso cupo dei materiali con velocità più elevate);
- Tabella di riepilogo dove sono indicate la profondità e la relativa  $V_s$  di ogni strato definito dal modello ipotizzato e  $V_{s30}$  (m/s) calcolata da piano campagna;

Le coordinate plano-altimetriche dei punti centrali degli stendimenti di ciascuna prova sono riportati in formato WGS 84 e Gauss Boaga in allegato (All. **B2**).

### **6.3. DOWN-HOLE**

I risultati delle prove Down-Hole sono rappresentati in formato grafico e tabellare in allegato (All. **D1**), in cui per ogni prova sono riportati:

- Tabella di riepilogo dove sono riportati in funzione della profondità il tempo di arrivo delle onde P ( $T_p$ ) e S ( $T_s$ ) in secondi, le velocità calcolate delle onde P ( $V_p$ ) e S ( $V_s$ ) in m/s, il rapporto  $V_p/V_s$ , la densità ipotizzata ( $\gamma$ ) in  $\text{kN/m}^3$ , il coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), il modulo di Young ( $E$ ) e il modulo di taglio ( $G$ ) in MPa, il parametro  $V_{s30}$  (m/s) calcolata da piano campagna;
- Grafico dei tempi di arrivo delle onde P e S (s) in funzione della profondità;
- Grafico delle velocità di pseudo-intervallo delle onde P (m/s) in funzione della profondità;
- Grafico delle velocità di pseudo-intervallo delle onde S (m/s) in funzione della profondità;
- Grafico del coefficiente di Poisson dinamico ( $\nu$ ) in funzione della profondità;
- Grafico del modulo elastico di Young ( $E$ ) dinamico (MPa) in funzione della profondità;
- Grafico del modulo di taglio ( $G$ ) dinamico (MPa) in funzione della profondità;
- Grafico della densità ( $\gamma$ ) ipotizzata ( $\text{kN/m}^3$ ) in funzione della profondità.

Si ricorda che i parametri dinamici risentono delle approssimazioni dovute ai dati ipotizzati circa il peso di volume ( $\gamma$ ) dei materiali investigati. In questo caso si è deciso di utilizzare dei valori compresi tra 18 e 24  $\text{kN/m}^3$  sulla base delle informazioni ricavate dalle stratigrafie dei sondaggi fornite dal Committente. I valori inferiori (18-21  $\text{kN/m}^3$ ) sono stati attribuiti ai depositi di natura sedimentaria mentre i valori più alti alle rocce di tipo sedimentario e vulcanico (21-24  $\text{kN/m}^3$ ).

## 6.4. CONCLUSIONI

La Normativa Italiana (Decreto Ministeriale del 14/01/2008 Norme Tecniche per le costruzioni e S.O. n. 30 alla G.U. n. 29 del 04/02/08), coerentemente con quanto indicato nell'Eurocodice 8, prevede ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto la valutazione della risposta sismica locale mediante specifiche analisi definite nella norma oppure in mancanza di tali analisi attraverso un approccio semplificato che si basa sulla individuazione di categorie di sottosuolo come riportato nella tabella di seguito:

Classe	Descrizione
<b>A</b>	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
<b>B</b>	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30}$ compresi fra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{spt30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>C</b>	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30}$ compresi fra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{spt30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>D</b>	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{spt30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>E</b>	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_{s30} > 800$ m/s).

L'attribuzione della classe viene definita in funzione della velocità equivalente  $V_{s30}$  di propagazione delle onde di taglio S entro i primi 30 m di profondità dal piano di imposta della fondazione dell'opera o nel caso di fondazioni su pali dalla testa dei pali. Per le categorie di sottosuolo sopra definite la norma definisce le azioni sismiche.

Esistono però altre due categorie per le quali non è utilizzabile alcuna procedura semplificata ma è necessario prevedere specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche. Le due categorie sono descritte nella tabella di seguito:

Classe	Descrizione
<b>S1</b>	Depositi di terreni caratterizzati da valori di VS30 inferiori 100 m/s (ovvero $10 < cu_{30} < 20$ kPa) che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includano almeno 3 m di torba o argille altamente organiche.
<b>S2</b>	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Per il calcolo del parametro Vs30 si utilizza la formula proposta dall'O.P.C.M. 3274 s.m.i., ovvero:

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

Dove:

- $h_i$  = spessore dell' $i$ -esimo strato compreso nei primi 30 m di profondità
- $V_{s,i}$  = velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato
- $N$  = numero di strati compresi nei primi 30 m di profondità

Per Vs30 si intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati fino a 30 metri di profondità dal piano di posa della fondazione. In generale il fenomeno dell'amplificazione sismica diventa più accentuato passando dalla classe A alla classe E.

Le prospezioni sismiche di tipo MASW e Down-Hole hanno permesso di calcolare il parametro Vs30 a partire dal piano campagna oltre a definire l'andamento delle Vs in profondità. Dall'analisi dei modelli calcolati sono state attribuite le possibili classi previste dalla norme tecniche precedentemente citate.

I risultati sono riportati nelle tabelle 4 (per le MASW) e 5 (per le prove Down-Hole):

IDENTIFICATIVO	Vs30 (m/s)	Possibile Tipo di Suolo
<b>M001</b>	1047	A
<b>M001bis</b>	974	A
<b>M002</b>	437	B
<b>M002bis</b>	743	B
<b>M003</b>	524	S2
<b>M004</b>	731	S2
<b>M005</b>	682	B
<b>M005bis</b>	704	S2
<b>M006</b>	774	S2
<b>M008</b>	885	A
<b>M009</b>	461	B
<b>M010</b>	603	S2

IDENTIFICATIVO	Vs30 (m/s)	Possibile Tipo di Suolo
M011	593	B
M012	391	S2
M013	720	B
M014	358	S2
M014bis	391	B
M015	1077	A
M015bis	498	S2
M016	381	B
M017	387	S2
M019	355	C
M020	428	B
M021	557	B
M022	537	B
M023	587	B
M024	562	B
M025	712	B
M026	527	B
M027	545	B
M028	536	B
M030	528	B
M031	585	B
M032	498	B
M033	538	B
M034	518	B
M035	382	B
M036	695	S2
M037	584	B
M038	368	B
M039	471	B
M041	380	B
M042	397	B
M043	299	C
M044	318	C
M045	618	B
M046	342	C
M047	352	C
M049	331	C
M050	290	C
M051	316	C
M052	329	C
M053	344	C
M054	481	E
M055	346	C
M056	782	B
M057	336	C
M058	426	S2
M059	659	B
M060	474	S2
M062	509	B
M063	428	B
M064	543	B
M065	423	B
M066	852	S2
M067	364	B
M067bis	596	B
M067tris	751	S2
M068	747	S2
M070	810	S2
M073	706	B

IDENTIFICATIVO	Vs30 (m/s)	Possibile Tipo di Suolo
M074	756	S2
M075	635	S2
M075bis	683	S2
M076	562	S2
M077	1025	A
M078	625	B
M079	494	S2
M082	514	B
M084	572	B
M085	705	S2
M085bis	622	S2
M086	357	C
M087	347	C
M088	282	C
M090	360	C
M091	325	C
M092	288	S2
M092bis	320	S2
M093	333	S2
M095	360	C
M096	378	B
M097	630	E
M098	334	C
M100	352	C
M101	765	A
M102	314	C

Tabella 4: riepilogo dei risultati (Vs30 e possibile classe di suolo) delle prospezioni sismiche di tipo MASW.

IDENTIFICATIVO	Vs30 (m/s)	Possibile Tipo di Suolo
S011	619	B
S012	716	S2
S015	752	S2
S036	430	E
S044	430	S2
S059	414	S2
S068	486	S2
S070	368	B
S074	443	B
S077	386	B
S080	351	C
S083	407	B
S097	712	B
S099	441	B
S101	486	B
S107	668	B
S125	337	C
S139	395	S2
S157bis	601	S2
S160	512	B
S166	906	A
S181	472	S2
S184	288	C
S198	268	S2
S201	266	C
S203	243	C

IDENTIFICATIVO	Vs30 (m/s)	Possibile Tipo di Suolo
S211	344	C
S215	359	C
S218	329	S2
S220bis	326	C
S225	267	C
S093	666	B
S112	409	B
S174	612	S2
S178	534	S2
S190	648	B
S208	307	S2
S005	718	S2
S034	818	A
S041	841	A
S051	453	S2
S063	402	B
S105	365	B
S146	454	S2
S153	646	B
S172	875	A

*Tabella 4: riepilogo dei risultati (Vs30 e possibile classe di suolo) delle prospezioni sismiche di tipo Down-Hole.*

Alla luce dei risultati ottenuti e considerata la presenza di numerose possibili classi di suolo di tipo S2, ovvero classi di suolo per le quali non è utilizzabile alcuna procedura semplificata per la classificazione sismica del terreno di fondazione, su richiesta del Committente sono stati utilizzati i criteri contenuti nelle Linee Guida del Dipartimento della Protezione Civile per la Microzonazione Sismica per una nuova classificazione. Tale operazione è stata applicata ai materiali attribuiti alla classe S2 per profili di Vs con inversioni di velocità.

Nei criteri definiti per la microzonazione sismica sopra citati si definisce inversione di velocità nel profilo delle Vs qualora sia realizzata la condizione in cui un terreno rigido sovrasta stratigraficamente un terreno meno rigido (soffice) con un rapporto  $\frac{V_{s\text{rig}}}{V_{s\text{sof}}} > 2$  e con la Vs dello strato più rigido maggiore di 500 m/s.

Applicando tale criterio è stato possibile riclassificare una parte dei modelli calcolati riportandoli nelle classi di suolo per le quali è possibile applicare la procedura semplificata di risposta sismica locale.

È opportuno ricordare che il criterio utilizzato per la definizione delle inversioni di velocità è applicabile in situazioni in cui il sottosuolo è assimilabile ad un modello monodimensionale (strati piano paralleli e orizzontali, omogenei e a comportamento viscoelastico); coerentemente con le Linee Guida per la Microzonazione sismica emanate dal Dipartimento di Protezione Civile, qualora le condizioni geologiche non permettano una tale semplificazione per la presenza di aree soggette a fenomeni di instabilità, di pendii fortemente acclivi o a complesse morfologie del substrato sono necessarie ulteriori indagini per valutare eventuali fenomeni di amplificazione e la risposta sismica locale.

Inoltre è da considerare che il parametro Vs30 calcolato nel presente rapporto è sempre riferito al piano campagna e non al piano di imposta della fondazioni (dato non conosciuto), pertanto l'attribuzione delle classi potrebbe subire variazioni in funzione di tali informazioni.

I risultati della nuova classificazione sono riportati nelle tabelle 6 (per le MASW) e 7 (per le prove Down-Hole) con alcune note che rimandano alla tipologia di opera da realizzare:

IDENTIFICATIVO	Vs30 (m/s)	Possibile Tipo di Suolo NTC/08	Possibile Tipo di Suolo Linee Guida P.C.
M001	1047	A	A
M001bis	974	A	A
M002	437	B	B
M002bis	743	B	B
M003	524	S2	B
M004	731	S2	B
M005	682	B	B
M005bis	704	S2	B
M006	774	S2	B
M008	885	A	A
M009	461	B	B
M010	603	S2	B
M011	593	B	B
M012	391	S2	B / C *(1)
M013	720	B	B
M014	358	S2	C
M014bis	391	B	B
M015	1077	A	A
M015bis	498	S2	S2
M016	381	B	B
M017	387	S2	S2 / B *(2)
M019	355	C	C
M020	428	B	B
M021	557	B	B
M022	537	B	B
M023	587	B	B
M024	562	B	B
M025	712	B	B
M026	527	B	B
M027	545	B	B
M028	536	B	B
M030	528	B	B
M031	585	B	B
M032	498	B	B
M033	538	B	B
M034	518	B	B
M035	382	B	B
M036	695	S2	B
M037	584	B	B
M038	368	B	B
M039	471	B	B
M041	380	B	B
M042	397	B	B
M043	299	C	C
M044	318	C	C
M045	618	B	B
M046	342	C	C
M047	352	C	C
M049	331	C	C
M050	290	C	C

IDENTIFICATIVO	Vs30 (m/s)	Possibile Tipo di Suolo NTC/08	Possibile Tipo di Suolo Linee Guida P.C.
M051	316	C	C
M052	329	C	C
M053	344	C	C
M054	481	E	E
M055	346	C	C
M056	782	B	B
M057	336	C	C
M058	426	S2	B
M059	659	B	B
M060	474	S2	B
M062	509	B	B
M063	428	B	B
M064	543	B	B
M065	423	B	B
M066	852	S2	S2 / A *(3)
M067	364	B	B
M067bis	596	B	B
M067tris	751	S2	B
M068	747	S2	B
M070	810	S2	A
M073	706	B	B
M074	756	S2	B
M075	635	S2	B
M075bis	683	S2	B
M076	562	S2	B
M077	1025	A	A
M078	625	B	B
M079	494	S2	B
M082	514	B	B
M084	572	B	B
M085	705	S2	B
M085bis	622	S2	B
M086	357	C	C
M087	347	C	C
M088	282	C	C
M090	360	C	C / B *(1)
M091	325	C	C
M092	288	S2	S2 *(4)
M092bis	320	S2	C *(5)
M093	333	S2	C *(5)
M095	360	C	C
M096	378	B	B
M097	630	E	E / B *(6)
M098	334	C	C
M100	352	C	C
M101	765	A	A
M102	314	C	C

**Tabella 6: riepilogo dei risultati (Vs30 e possibile classe di suolo in funzione delle N.T:C e dei criteri della Protezione Civile) delle prospezioni sismiche di tipo MASW.**

**Note:** \*(1) da valutare in funzione dell'opera;

\*(2) il rapporto  $V_{rig}/V_{soft}$  è inferiore a 2 ma  $V_{rig} < 500$  m/s: si consiglia di verificare in funzione dell'opera;

\*(3) il rapporto  $V_{rig}/V_{soft}$  è prossimo a 2: si consiglia di verificare in funzione dell'opera;

\*(4)  $V_{rig} \ll 500$  m/s;

\*(5)  $V_{rig} < 500$  m/s ma  $\Delta V_s < 50$  m/s: da valutare in funzione dell'opera;

\*(6) se lo scavo è maggiore di 2 m, potrebbe diventare B: valutare in funzione dell'opera.

IDENTIFICATIVO	$V_{s30}$ (m/s)	Possibile Tipo di Suolo NTC/08	Possibile Tipo di Suolo Linee Guida P.C.
S005	718	S2	B
S011	619	B	B
S012	716	S2	S2 / B *(1)
S015	752	S2	S2
S034	818	A	A
S036	430	E	E / B *(2)
S041	841	A	A
S044	430	S2	S2
S051	453	S2	S2
S059	414	S2	S2 / B *(1)
S063	402	B	B
S068	486	S2	S2
S070	368	B	B
S074	443	B	B
S077	386	B	B
S080	351	C	C
S083	407	B	B
S093	666	B	B
S097	712	B	B
S099	441	B	B
S101	486	B	B
S105	365	B	B
S107	668	B	B
S112	409	B	B
S125	337	C	C
S139	395	S2	S2 / B *(3)
S146	454	S2	B
S153	646	B	B
S157bis	601	S2	B
S160	512	B	B
S166	906	A	A
S172	875	A	A
S174	612	S2	B
S178	534	S2	B
S181	472	S2	B
S184	288	C	C
S190	648	B	B
S198	268	S2	S2
S201	266	C	C
S203	243	C	C
S208	307	S2	S2 / C *(3)
S211	344	C	C
S215	359	C	C

IDENTIFICATIVO	Vs30 (m/s)	Possibile Tipo di Suolo NTC/08	Possibile Tipo di Suolo Linee Guida P.C.
S218	329	S2	S2 / C *(3)
S220bis	326	C	C
S225	267	C	C

*Tabella 7: riepilogo dei risultati (Vs30 e possibile classe di suolo in funzione delle N.T:C e dei criteri della Protezione Civile) delle prospezioni sismiche di tipo Down-Hole.*

**Note:** \*(1) il rapporto  $V_{rig}/V_{soft}$  è prossimo a 2: si consiglia di verificare in funzione dell'opera;

\*(2) da valutare in funzione dell'opera;

\*(3) il rapporto  $V_{rig}/V_{soft}$  è inferiore a 2 ma  $V_{rig} < 500$  m/s: si consiglia di verificare in funzione dell'opera.

Si richiama pertanto la necessità di procedere ad un impiego oculato delle attribuzioni di cui alle tabelle precedenti, in funzione delle scelte progettuali e della geometria del problema a scala locale.

## 7. DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



**Figura 4 - Sismica a rifrazione: Predisposizione stendimento BS\_148.**



**Figura 5 - Sismica a rifrazione: Base BS\_186.**



**Figura 6 - Sismica a rifrazione: Energizzazione con sistema a massa battente**



**Figura 7 - Sismica a rifrazione: Sistema di acquisizione.**



**Figura 8 - MASW: Predisposizione stendimento M013.**



**Figura 9 - MASW: Prova M019.**



**Figura 10 - MASW:** Sistema di acquisizione (sismografo collegato a *laptop*).



**Figura 11- Down-Hole:** Esecuzione di una prova.



**Figura 12- Down-Hole:** Trave per energizzazione delle onde S.



**Figura 13 - Down-Hole:** Sistema di acquisizione (sismografo collegato a *laptop*).