

**COMUNE DI ALESSANDRIA DELLA ROCCA**

**PROVINCIA DI AGRIGENTO**

## STUDIO GEOLOGICO



**em<sup>2</sup>**  
geologi  
Studio di geologia  
Ambientale e Tecnica

OGGETTO:

**"PROGETTO PRELIMINARE PER I LAVORI DI COMPLETAMENTO  
DEGLI IMPIANTI SPORTIVI IN ZONA DI ESPANSIONE"**

TAVOLA:

ELABORATO:

**ALLEGATO II: RELAZIONE SISMICA**

ALLEGATI:

VISTI:

COMMITTENTE:

COMUNE DI ALESSANDRIA DELLA ROCCA

IL GEOLOGO:

DOTT. GEOL. ELEONORA ALESSIA NAPOLI

*Eleonora A. Napoli*



REGIONE SICILIANA  
UFFICIO DEL GENIO CIVILE  
AGRIGENTO

U.O.C. 5°

INFRASTRUTTURE E TRASPORTI

Prot. N. 10 SP/17 Si esprime parere favorevole di massima per la fattibilità delle opere contenute nel presente progetto, in relazione alla normativa sismica Legge 4/74.

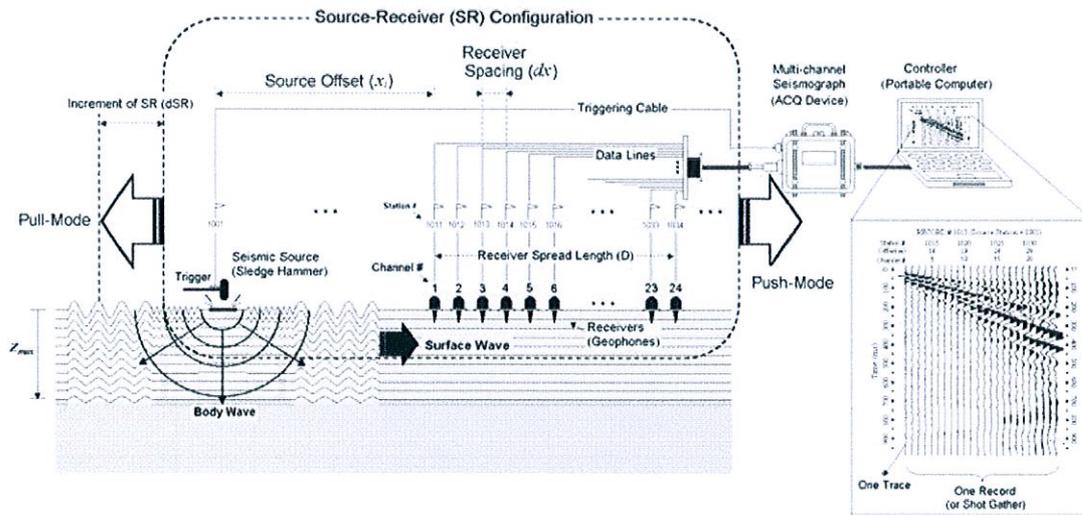
Agrigento, li 27/11/2015

L. CAVALLO U.O.C. 5°

*[Handwritten signature]*  
IL CAPO U.O.C. 5°  
DIRIGENTE TECNICO



## RELAZIONE SISMICA



struttore

**OGGETTO:** "PROGETTO PRELIMINARE PER I LAVORI DI COMPLETAMENTO DEGLI IMPIANTI SPORTIVI NELLA ZONA DI ESPANSIONE".

**LOCALITA':** ALESSANDRIA DELLA ROCCA

Il geologo

## 1. Indagini sismiche in sito

La presente relazione descrive i risultati ottenuti da una campagna di indagini geofisiche di superficie, eseguita tramite prove sismiche di tipo attivo (Rifrazioni e Masw) per caratterizzare il terreno interessato dal progetto per i lavori di completamento degli impianti sportivi nella zona di espansione del Comune di Alessandria della Rocca.

L'indagine sismica di tipo Masw ha lo scopo di evidenziare il comportamento sismico del substrato di fondazione e di definire l'azione sismica di progetto che si basa, facendo riferimento all'approccio semplificato, sull'individuazione delle categorie di sottosuolo di riferimento e sulle condizioni topografiche del sito.

Ai fini dell'individuazione della categoria di sottosuolo, secondo quanto disposto dalle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) di cui al D.M. 14 Gennaio 2008 e dalla circolare 02/02/2009 n. 617 del Consiglio Superiore LL.PP., viene effettuata la caratterizzazione sismostratigrafica dei litotipi presenti e determinata la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità, secondo l'espressione  $V_{s30} = 30 / (\sum h_i / V_{si})$ , dove  $h_i$  e  $V_{si}$  indicano rispettivamente lo spessore e la velocità delle onde dello strato  $i$ -esimo.

Le indagini realizzate, inoltre, consentono di acquisire i valori delle velocità sismiche degli strati del sottosuolo, di valutare gli spessori dei vari rifrattori e di migliorare la conoscenza dell'assetto geometrico-giaciturale del substrato. A tal fine sono state eseguite sugli stessi stendimenti due prove sismiche a "Rifrazione".

L'ubicazione degli stendimenti eseguiti è riportata in **fig.1**. L'orientamento delle stese sismiche è all'incirca NW-SE (Ss1), NE-SW (Ss2) mentre le coordinate geografiche espresse in gradi sessagesimali-decimali (ED50) dei sondaggi sismici riferite al centro degli stendimenti sono:

**Ss1:** lat.: 37,560466° - long.: 13,45674°

**Ss2:** lat.: 37,560459° - long.: 13,456849°

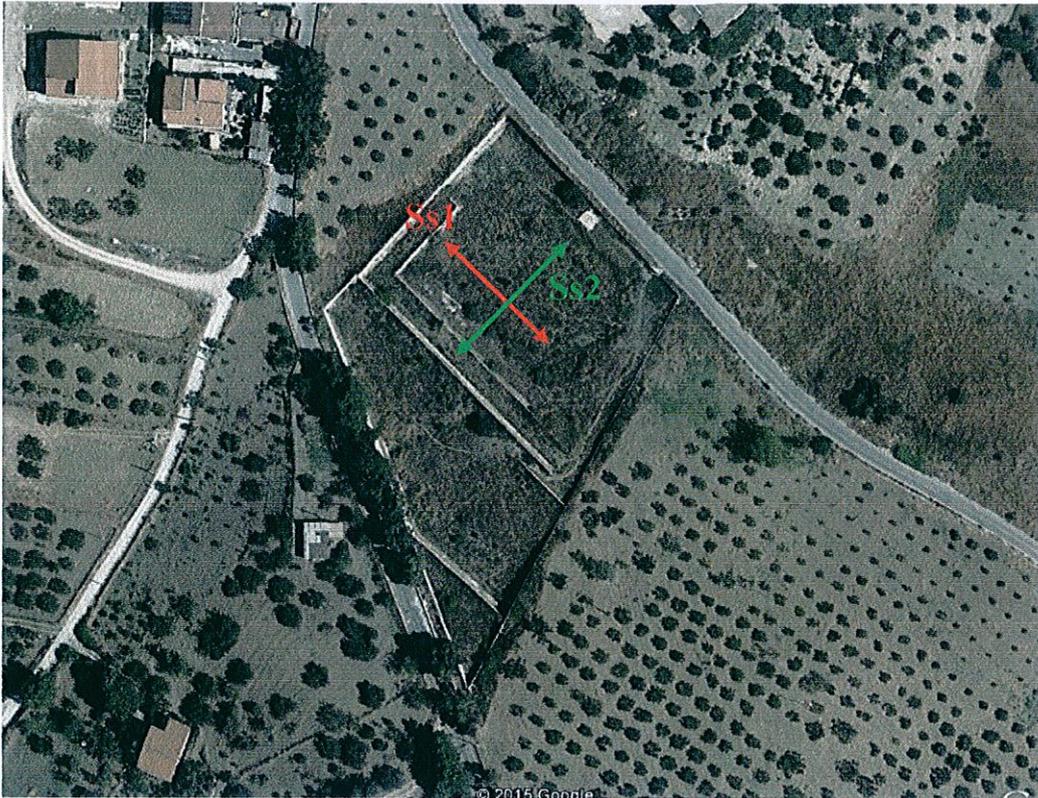


Fig. 1 - Ortofoto con ubicazione degli stendimenti Ss1 e Ss2

## 2. Principi Generali sul Metodo Sismico a Rifrazione

Stante la natura dei terreni presenti nell'area di indagine e le caratteristiche geologiche e geostratigrafiche del sito in esame è stato possibile utilizzare la metodologia di indagine sismica di tipo a rifrazione per la velocità delle onde sismiche nel sottosuolo.

Questo tipo di prova è ampiamente utilizzata perché permette la:

- valutazione del substrato lapideo;
- valutazione spessori di terreno scarsamente addensato (discariche, riporti ecc.)
- verifica di zone in frana;
- localizzazione di faglie, ecc.;

La sismica a rifrazione è un'indagine indiretta che consente di esplorare il sottosuolo mediante lo studio della propagazione di onde elastiche provocate da vibrazioni indotte al terreno con mezzi meccanici o con esplosioni.

Questo metodo utilizza i fronti d'onda conici generati dalle superfici di discontinuità che vengono captati dai geofoni disposti lungo un allineamento prestabilito e posizionati a

intervalli regolari per ottenere un maggiore grado di risoluzione. La lunghezza dell'allineamento è funzione della profondità che si intende investigare. Le discontinuità ricercate sono di natura fisico-elastica e la ricostruzione della geometria del sottosuolo può essere legata sia a variazioni litologiche in senso stretto, sia a variazioni di natura fisica presenti nell'ambito dello stesso litotipo.

I tempi di acquisizione dei primi arrivi delle onde P (onde di compressione) e le distanze corrispondenti all'interspazio geofonico vengono diagrammati in tempi-distanze e rappresentano le dromocrone mediante le quali è possibile risalire alle velocità di propagazione delle onde negli strati sottostanti e ai loro relativi spessori.

Condizione necessaria per la prova è che la velocità delle onde P sia crescente con la profondità e che sia soddisfatta la condizione:  $V_1 < V_2 < V_3$ .

### **3. Il Metodo Sismico Masw**

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che consente di ricavare il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali rilevata attraverso vari sensori (accelerometri o geofoni) appositamente predisposti sulla superficie del suolo. Le onde superficiali sono rappresentate in modo predominante dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità strettamente correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

La velocità di propagazione delle onde di Rayleigh ( $V_r$ ) e delle onde di taglio ( $V_s$ ) sono legati dalla relazione:  $V_r = (0.862 + 1.14 \nu / (1 + \nu)) V_s$ ,

dove  $\nu$  rappresenta il coefficiente di Poisson.

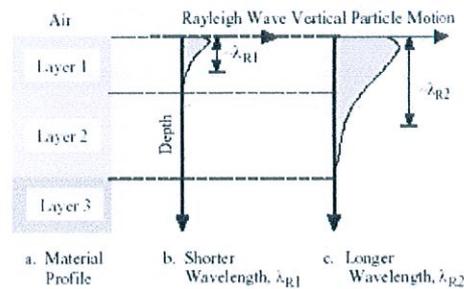
In sintesi la  $V_r$  risulta leggermente inferiore alla  $V_s$  di un valore compreso tra 0.862 e 0.955 e può esprimersi:  $V_r = 0.91 V_s \pm 0.046$ , cioè con un errore inferiore al 5%.

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo

(Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980 ) o per meglio dire la velocità di fase apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è legata al fatto che le onde ad alta frequenza (lunghezza d'onda corta) si propagano negli strati più superficiali fornendo informazioni sulla parte più superficiale del terreno, mentre le onde a bassa frequenza (lunghezza d'onda più lunga) si propagano negli strati più profondi, interessando strati più profondi del suolo come mostrato in figura 2.

Fig. 2



I metodi di indagine si distinguono in metodo *attivo* e metodo *passivo* (Zywicki, D.J.1999) o in una combinazione di entrambi. Il metodo attivo (MASW) consente di ricavare una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente sui primi 30m-50m di suolo, in funzione della rigidità del suolo. Il metodo passivo consente di ricavare una velocità di fase apparente sperimentale alle più basse frequenze, generalmente al di sotto dei 50m, in funzione della rigidità del suolo. La presente indagine viene eseguita col metodo **MASW ATTIVO**.

Il metodo MASW consiste in tre fasi:

- 1) - calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale;
- 2) - calcolo della velocità di fase apparente numerica;
- 3) - individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

#### 4. Scelta del Profilo Sismico

Lo studio per la scelta dei profili sismici viene svolto basandosi sulle informazioni di carattere geologico strutturale riguardanti il territorio in esame.

I rilievi speditivi sul terreno hanno consentito di ricavare un modello geologico concettuale, di effettuare la scelta dell'orientamento del tracciato in situ e predisporre i profili sismici di misura tali da ottimizzare il modello di interpretazione il quale dipende oltre che dalla geometria dello stendimento, anche dalla posizione dei punti di energizzazione e dal grado di dettaglio desiderato.

#### 5. Strumentazione, Acquisizione e Interpretazione Dati.

Le prove sismiche vengono eseguite utilizzando il sismografo digitale 16S24-U a 24 canali della PASI s.r.l. ad alta risoluzione, alimentato con batteria 12V esterna, con interfaccia USB per la gestione e immagazzinamento di dati tramite PC esterno (Foto n. 1) in grado di registrare i segnali provenienti da geofoni a componente verticale e di permettere, grazie ad un software di elaborazione, un rapido controllo della qualità della registrazione, consentendo un processing preliminare dei dati in situ. Il sismografo in questione costituisce il componente fondamentale dell'apparato di acquisizione dei dati.

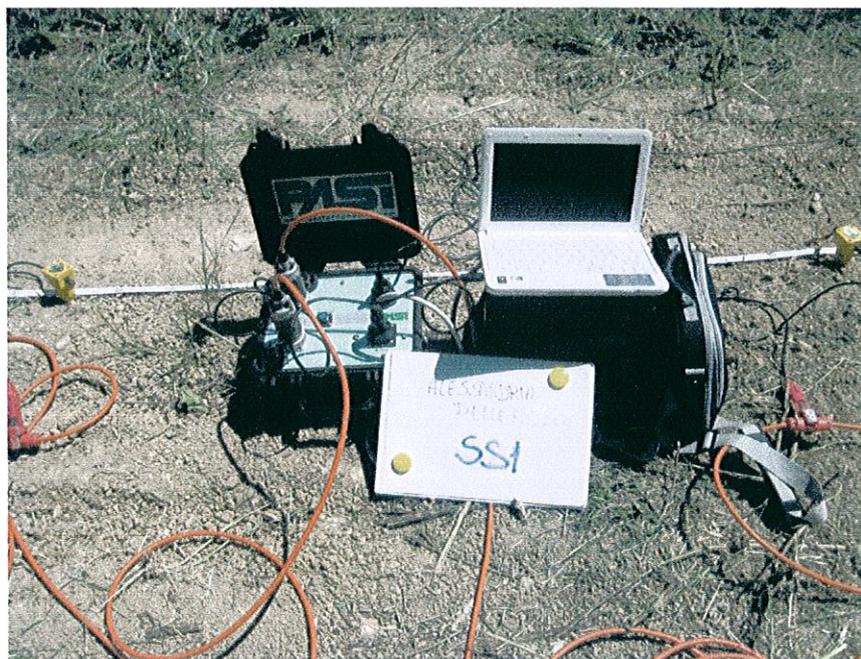


Foto 1- Strumentazione: sismografo digitale 16S 24-U 24 canali della PASI s.r.l., batteria di alimentazione e pc di acquisizione e immagazzinamento dati.

I tempi di campionamento sono compresi tra 125 ms e 500 ms. Le impostazioni dei parametri di acquisizione dello strumento sono scelti in funzione del tipo di indagine eseguita, della lunghezza dello stendimento, del grado di risoluzione ricercato, delle condizioni ambientali rispetto alle fonti di rumore e tenendo conto anche della relativa uniformità delle successioni sedimentarie presenti nel substrato indagato. Al fine di incrementare il rapporto segnale\rumore viene effettuato, su tutte le registrazioni, un processo di stacking con numero di stacks variabili da tre a cinque.

Una massa del peso di 9 kg, battente su una piastra metallica fissata al terreno è utilizzata come dispositivo in grado di generare onde sismiche.

Il metodo di indagine "Rifrazione" misura le onde generate in un punto della superficie che vengono captate dai sensori lungo l'allineamento programmato.

Dai sismogrammi sperimentali vengono ricavati i tempi di arrivo dei First-break per la costruzione delle dromocrone (diagrammi tempi-distanza) e l'interpretazione viene eseguita mediante software INTERSIM del Geo&Soft.

L'elaborazione e l'interpretazione dei dati ricavati dai sondaggi sismici del tipo MASW (Multichannel Analysis Of Surface Waves) vengono eseguiti con l'ausilio del software WinMASW vers. 4.3. della ELIOSOFT che consente di analizzare i dati sismici acquisiti in campagna e di elaborarli in modo tale da poter ricavare il profilo verticale della VS (velocità delle onde di taglio). Tale risultato viene ottenuto tramite inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh, determinate tramite la tecnica MASW.

La procedura si sviluppa in due tempi:

1) determinazione dello spettro di velocità (sul quale l'utente deve identificare la curva di dispersione);

2) inversione della curva di dispersione (precedentemente individuata) attraverso l'utilizzo di algoritmi genetici (detti anche evolutivi).

Gli algoritmi evolutivi (come altri analoghi) a differenza dei metodi lineari per i quali è necessario fornire un modello di partenza, offrono un'esplorazione molto più ampia delle possibili soluzioni. E' sufficiente definire uno "spazio di ricerca" (search space) all'interno del quale vengono valutate diverse possibili soluzioni. Quella finale viene, infine, proposta con una stima della sua attendibilità (deviazioni standard).

Determinato il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  è possibile procedere al calcolo della velocità equivalente nei primi 30m di substrato ( $V_{s30}$ ) e, quindi, risalire alla classificazione della categoria litologica del suolo.

Le scelte interpretative sono indirizzate a criteri di sicurezza e in presenza di biunivocità vengono preferite condizioni di spessori e valori di  $V_s$  che conducono a situazioni più sfavorevoli dal punto di vista degli effetti sismici del sito.

## 6. Sondaggi sismici

I sondaggi Ss1-Ss2 sono stati effettuati realizzando degli stendimenti (foto n.2-Ss1 e Ss2,) aventi le seguenti caratteristiche:

Profilo sismico	Tipo di indagine	Lunghezza totale (m)	Numero geofoni (4.5Hz)	Distanza intergeofonica (m)	Punti di scoppio rifrazione
Ss1	RIFRAZIONE-MASW	36	24	1,5	3
Ss2	RIFRAZIONE-MASW	36	24	1,5	5

Tabella 1 – Caratteristiche degli stendimenti utilizzati e posizione dei punti di scoppio





Foto 2- Stese sismiche Ss1 e Ss2

## 7. Sondaggi sismici a Rifrazione

### 7.1 - Interpretazione dei dati dei sondaggi sismici a Rifrazione Ss1-Ss2

Nelle tabelle 2 e 3 vengono evidenziate le profondità dei vari rifrattori, mentre nelle **figure 3-4-5-6** sono riportate le domocrone ricavate e la ricostruzione grafica dei profili sismostratigrafici;

N. Geof.	Dist. Rifr. 1 [m]	Dist. Rifr. 2 [m]
1	0.9	3.5
2	0.8	3.4
3	1.1	2.9
4	1.0	3.1
5	1.0	3.1
6	1.0	2.7
7	0.9	2.9
8	0.9	2.6
9	0.8	3.0
10	0.8	2.8
11	0.8	3.1
12	0.7	3.1
13	0.7	3.6
14	0.7	3.6
15	0.7	3.5
16	0.6	3.5
17	0.6	3.2
18	0.6	3.2
19	0.5	2.9
20	0.5	2.8
21	0.4	3.3
22	0.5	2.9
23	0.7	2.5
24	0.6	2.6

N. Geof.	Dist. Rifr. 1 [m]	Dist. Rifr. 2 [m]
1	0.6	3.0
2	0.8	3.1
3	0.9	3.3
4	1.0	3.8
5	1.0	3.5
6	1.1	4.3
7	1.2	4.0
8	1.3	4.1
9	1.4	3.9
10	1.2	4.2
11	1.3	4.6
12	1.4	4.9
13	1.5	5.1
14	1.6	5.3
15	1.7	4.7
16	1.8	5.0
17	2.0	5.1
18	2.4	5.3
19	2.8	5.0
20	2.9	6.0
21	3.0	5.4
22	3.1	5.5
23	3.2	5.7
24	3.3	5.9

Tabella 2 – Posizione dei geofoni e profondità rifrattori Ss1.

Tabella 3 – Posizione dei geofoni e profondità rifrattori Ss2.

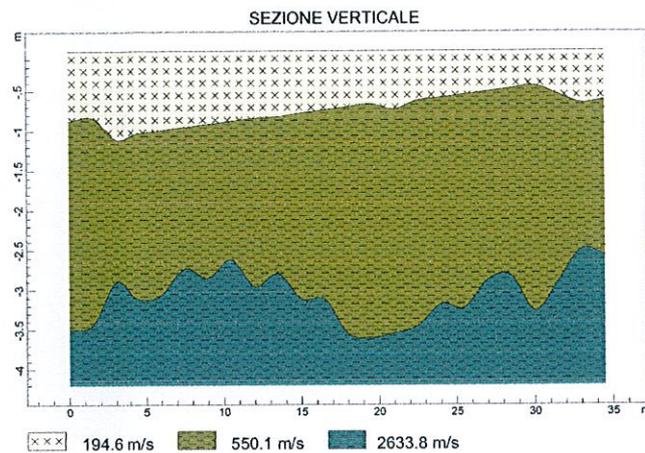
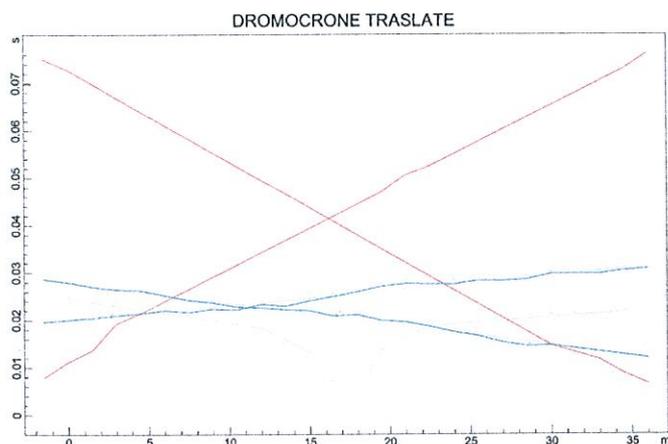
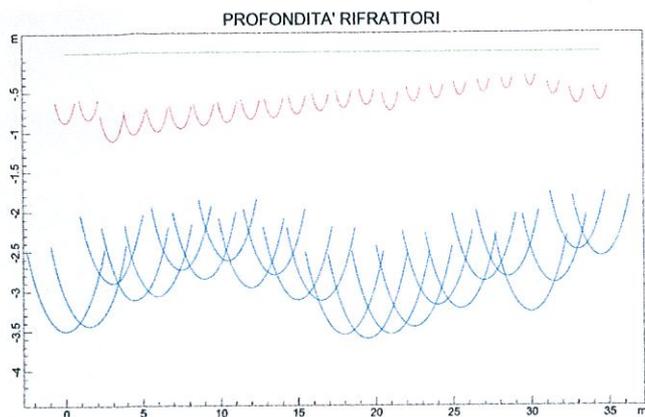
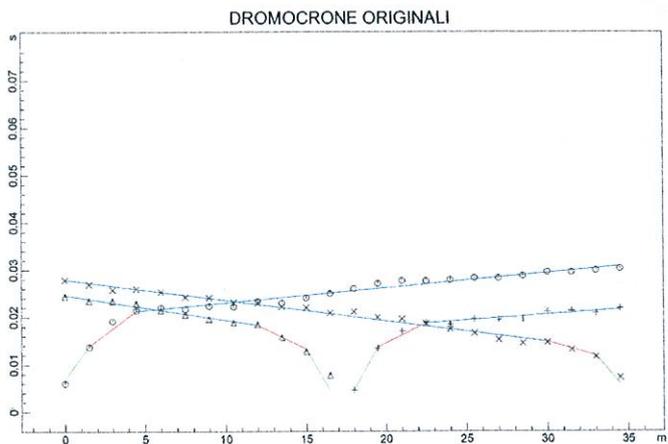


Fig.3 - Dromocrone originali e traslate.Ss1

Fig. 4- Profondità rifrattori e sezione.Ss1

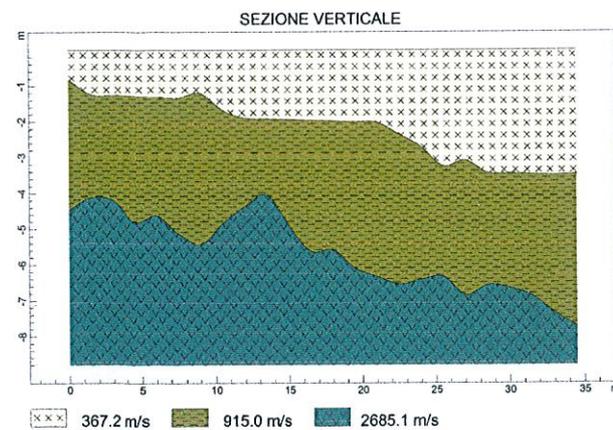
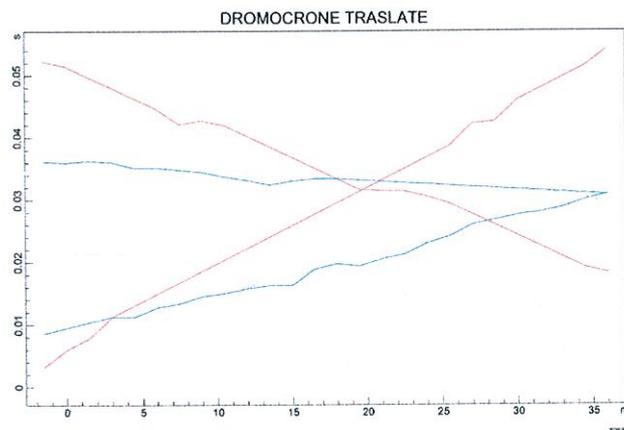
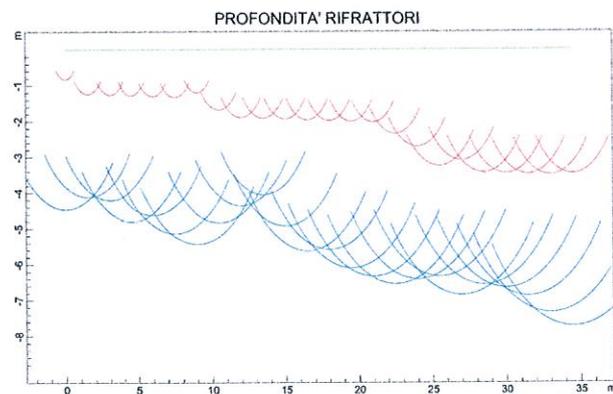
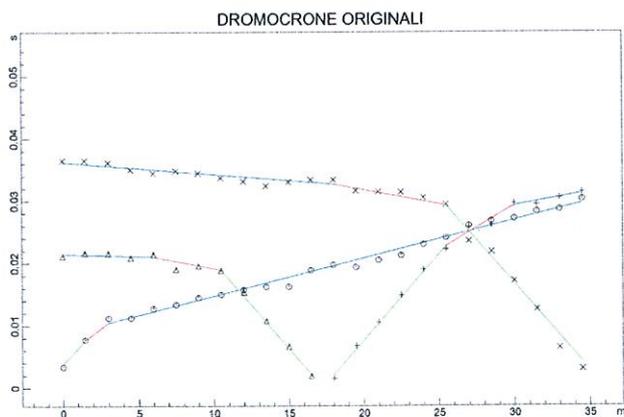


Fig. 5 - Dromocrone originali e dromocrone traslate Ss2

Fig. 6- Profondità rifrattori e sezione.Ss2

Con le prove sismiche eseguite sono state effettuate le misure di velocità delle onde P ed individuate le distanze degli strati rifrattori rispetto alla posizione dei geofoni posti in superficie che hanno consentito di ricostruire le sezioni sismostratigrafiche nelle direzioni analizzate. Per questo tipo di modellistica, lo spessore dell'ultimo strato è da considerarsi indefinito.

La prove hanno evidenziato nel substrato la presenza di n. 3 sismostrati:

- il primo sismostrato per uno spessore medio di circa 2,5 m, è caratterizzato da  $V_p$  comprese tra 194-367 m/s ed è ascrivibile alle argille detritiche ed al riporto superficiale;

- il secondo sismostrato, fino ad una profondità di 4-6 m circa, è caratterizzato da  $V_p$  550-915 m/s ed è riconducibile litologicamente al materiale argilloso sabbioso giallastro riscontrato nei sondaggi meccanici e nei pozzetti esplorativi;

- alla base segue con velocità  $V_p$  comprese tra 2633-2685 m/s uno strato di suolo più compatto ascrivibile alle argille gessose bluastre che costituiscono il substrato dell'area in studio.

## **8. Sondaggi Sismici di tipo MASW**

L'interpretazione delle prove è stata effettuata tenendo conto delle conoscenze geologiche ricavate sull'area e avvalendosi dei risultati ottenuti dai sondaggi geognostici e dei pozzetti esplorativi eseguiti nelle diverse fasi di progetto.

### **8.1 - Sondaggio MASW Ss1**

I dati utilizzati per l'analisi, la curva di dispersione ottenuta e il picking del modo fondamentale sono mostrati in **figura 7**. L'inversione dei dati è stata eseguita utilizzando una modellistica a 6 strati.

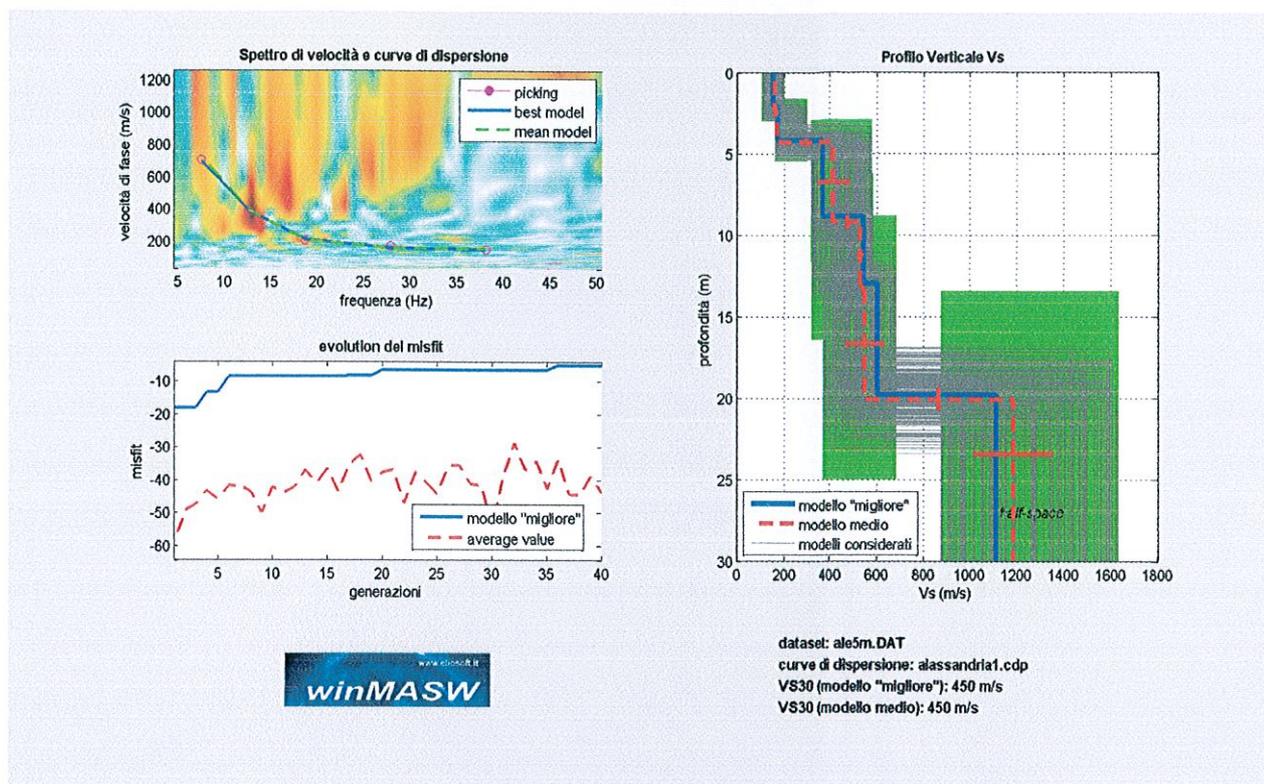


Figura 7 – Profilo verticale della velocità di propagazione delle onde S e spettro di frequenza.

I valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio e gli spessori determinati per gli strati considerati sono riportati in tabella 4.

MODELLO MEDIO		
	spessore (m)	VS (m/s)
<b>I strato</b>	2.4	157
<b>II strato</b>	1.9	169
<b>III strato</b>	4.9	415
<b>IV strato</b>	4.1	533
<b>V strato</b>	6.8	550
<b>VI strato</b>	---	1184

Tabella 4 – Valori di velocità di propagazione delle onde di taglio e spessori ricavati attraverso l'analisi di tipo MASW, secondo la modellistica adottata

L'analisi delle onde superficiali ha permesso di determinare un valore di  $V_{s30}$  pari a **450 m/s**. In base alla classificazione dei terreni prevista dal D.M. 14 Gennaio 2008, utilizzando come riferimento il modello medio, il possibile tipo di suolo ricade nella Categoria **B** : " Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da graduale

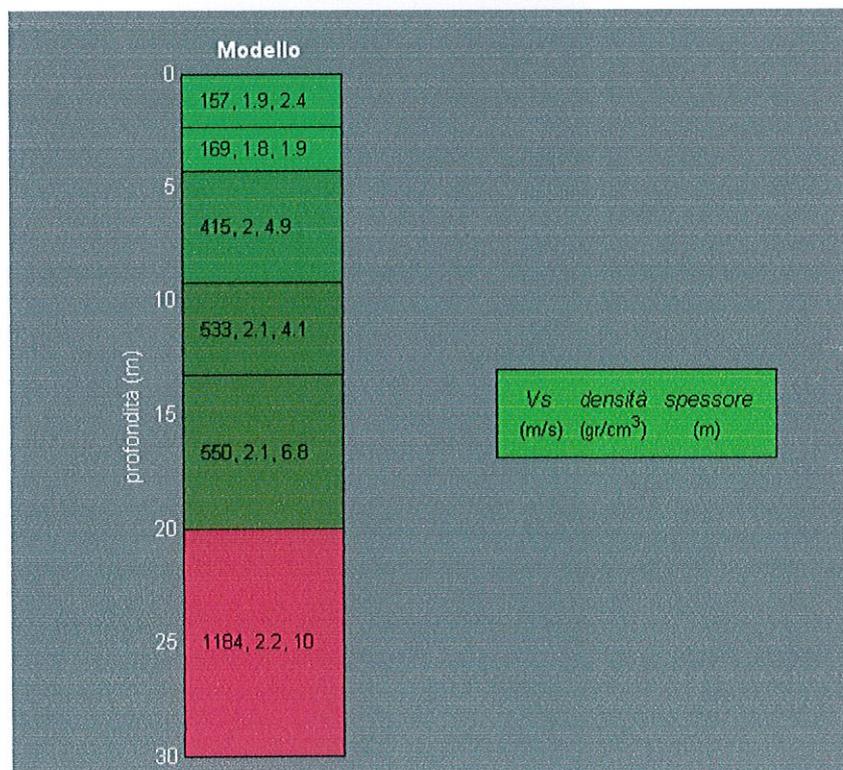
miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori del VS30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina) ".

La profondità di penetrazione dell'indagine MASW è determinata dalla relazione tra velocità e frequenze rappresentate nella curva di dispersione.

$$\lambda = v/f$$

L'energia delle onde superficiali si attenua esponenzialmente con la profondità in relazione al periodo di oscillazione dell'onda; onde caratterizzate da periodi maggiori (bassa frequenza) si attenuano meno, penetrando più nel sottosuolo. Generalmente la massima profondità di penetrazione è data dall'approssimazione  $\lambda/2.5-3$ .

Il modello geofisico elaborato consente di estrapolare una colonna sismostratigrafica come riportata in **fig. 8**.



**Figura 8** – colonna sismostratigrafica

Le variazioni di alcuni parametri fisico – meccanici del terreno, possono determinare una non coincidenza tra gli spessori litologici e i sismostrati.

Nella tabella 5 si riportano i valori della densità (stimata) e del modulo di taglio ricavato analiticamente sulla base dei valori delle Vs.

PROFILO SISMICO S1		
	Densità (gr/cm <sup>3</sup> )	Modulo di taglio (MPa)
I strato	1.90	47
II strato	1.84	53
III strato	2.02	348
IV strato	2.08	591
V strato	2.09	631
VI strato	2.25	3151

Tabella 5 – Valori della densità e del modulo di taglio.

## 8.2 - Sondaggio MASW Ss2

Il set di dati utilizzato per l'analisi di tipo MASW e la curva di dispersione ottenuta con modellazione diretta sono mostrati in **figura 9**. L'inversione dei dati del sondaggio Ss2 è stata eseguita utilizzando una modellistica a 6 strati. La tabella 6 riporta i valori di velocità di propagazione delle onde di taglio e di spessore determinati per gli strati considerati.

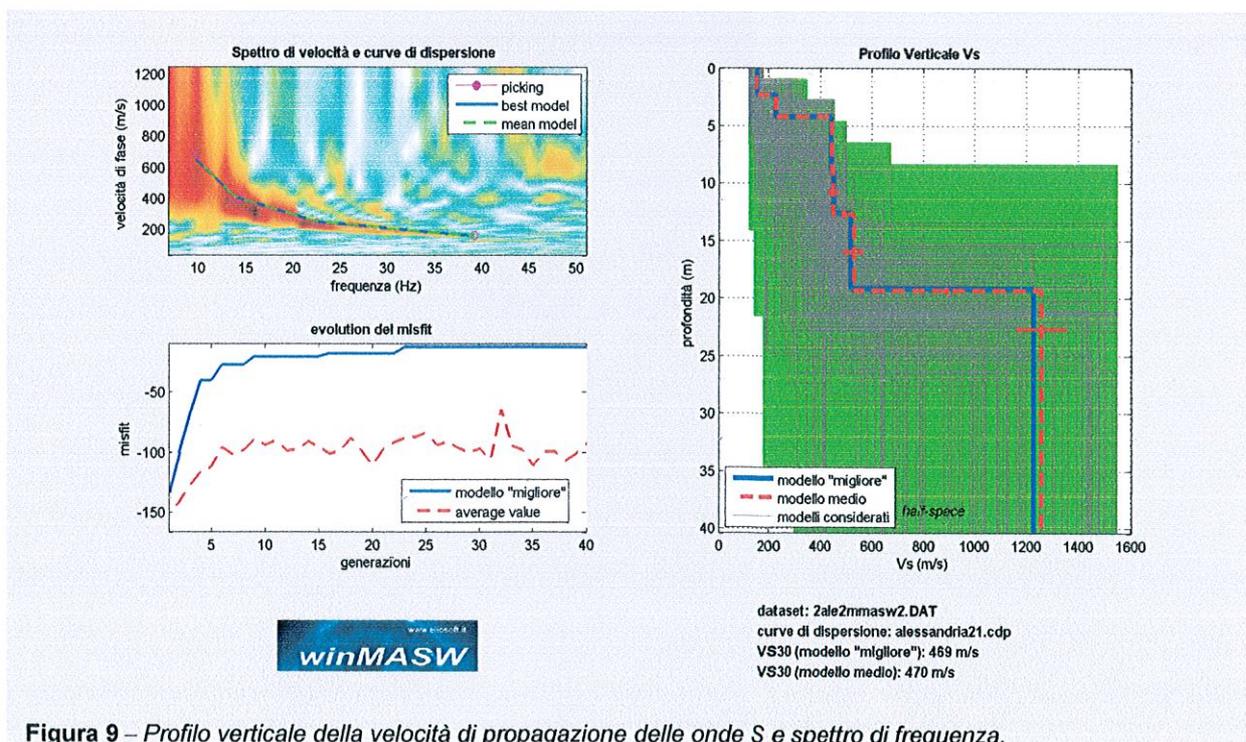


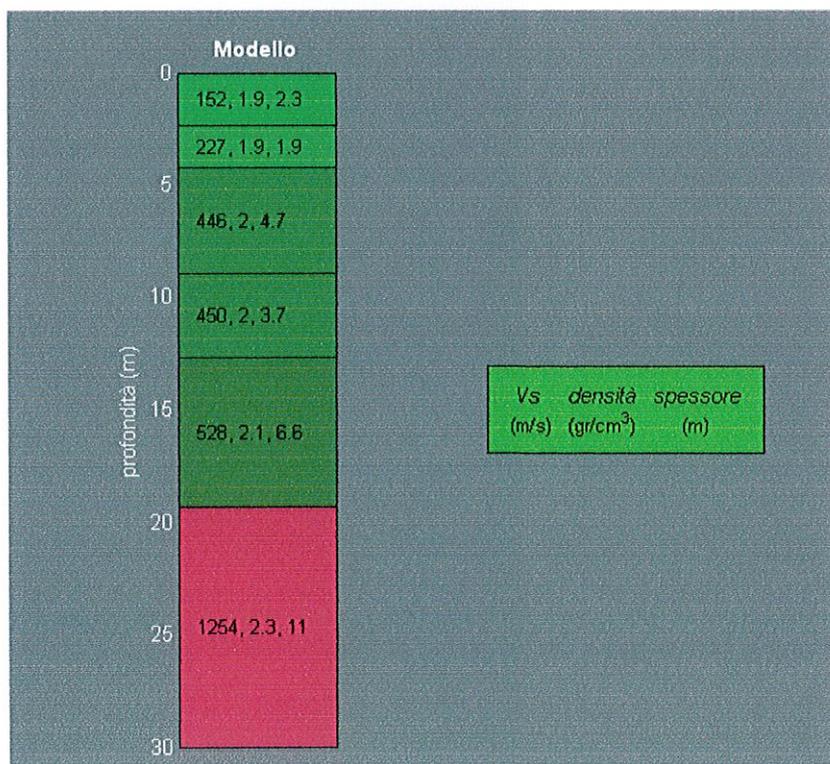
Figura 9 – Profilo verticale della velocità di propagazione delle onde S e spettro di frequenza.

MODELLO MEDIO		
	spessore (m)	VS (m/s)
<b>I strato</b>	2.3	152
<b>II strato</b>	1.9	227
<b>III strato</b>	4.7	446
<b>IV strato</b>	3.7	450
<b>V strato</b>	6.6	528
<b>VI strato</b>	---	1254

**Tabella 6** – Valori di velocità di propagazione delle onde di taglio e spessori ricavati attraverso l'analisi di tipo MASW, secondo la modellistica adottata

L'analisi delle onde superficiali ha permesso di determinare un valore di  $V_{s30}$  pari a **470 m/s**. In base alla classificazione dei terreni prevista dal D.M. 14 Gennaio 2008, utilizzando come riferimento il modello medio, il possibile tipo di suolo ricade nella Categoria "B".

Il modello geofisico elaborato consente di estrapolare una colonna sismostratigrafica come riportata in **fig. 10**. Nella tabella 7 si riportano i valori della densità (stimata) e del modulo di taglio ricavato analiticamente sulla base dei valori delle Vs.



**Figura 10** – colonna sismostratigrafica

PROFILO SISMICO S2		
	Densità (gr/cm <sup>3</sup> )	Modulo di taglio (MPa)
<b>I strato</b>	1.89	44
<b>II strato</b>	1.91	99
<b>III strato</b>	2.04	405
<b>IV strato</b>	2.04	413
<b>V strato</b>	2.08	579
<b>VI strato</b>	2.26	3556

Tabella 7 – Valori della densità e del modulo di taglio.

## 9. Risultati e conclusioni.

Con le prove sismiche di tipo MASW sono state effettuate le misure di velocità delle onde di superficie al fine di ottenere un modello di velocità in Vs fino a trenta metri di profondità e ricavare il valore del parametro Vs30 come previsto dal D.M. 14/01/2008. Tale profondità va riferita al presunto piano di imposta per fondazioni superficiali e alla testa dei pali per fondazioni su pali. Attraverso l'elaborazione automatica è stato immesso nel software di analisi un modello di formulazione nel quale si è tenuto conto dei risultati indagini geognostiche effettuate nel sito in esame.

In particolare i risultati delle prove MASW, evidenziano quanto segue:

- I primi sismo strati, per uno spessore di circa 4,0 m, caratterizzati mediamente da una velocità delle onde compresa tra Vs= 152-169 m/s, sono poco compatti e assimilabili a materiale argilloso detritico e/o riporto superficiale, così come riscontrato nei pozzetti esplorativi;
- il sismostrato successivo, con velocità Vs pari 227 m/s è associabile alle argille e sabbie argillose giallastre di copertura, mentre quelli più profondi evidenziano un graduale miglioramento nella compattezza e nelle caratteristiche dei terreni essendo caratterizzati da velocità Vs comprese tra 415 e 1144 m/s. Questi sismostrati sono riconducibili al substrato dell'area in studio rappresentato dalle argille gessose bluastre riscontrate in tutti i sondaggi geognostici realizzati nel sito.

Il modello ottenuto dalle elaborazioni permette di calcolare un valore del parametro di Vs30 compreso tra **450 e 470 m/s** che consente di classificare il suolo di fondazione appartenente alla categoria **"B"**.

Sciacca, addì Maggio 2015

**Il Geologo**



*Eleonora Alessia*