



PROPONENTE:

# Siel Agrisolare S.r.l.

- Corso Giacomo Matteotti, 20121 Milano - [sielagrisolaresrl@pec.it](mailto:sielagrisolaresrl@pec.it) - p.iva 12000420963

## REGIONE SICILIA CITTA' METROPOLITANA DI CATANIA COMUNE DI CALTAGIRONE

**Oggetto: PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO AGRIVOLTAICO CON POTENZA DI PICCO PARI A 222,26 MWp E POTENZA DI IMMISSIONE 195 MW, UBICATO NEL COMUNE DI CALTAGIRONE (CT) IN CONTRADA PIETRANERA E OPERE CONNESSE RICADENTI NEI COMUNI DI LICODIA EUBEA (CT) E CHIAROMONTE GULFI (RG)**

**ELABORATO:** Relazione Tecnica Sulle Indagini Eseguite

**PROGETTAZIONE:** I-PROJECT S.R.L.

<b>ELABORATO:</b> AVCALT-T059	<b>Elaborato da:</b> Geol. Ranieri Santarosa 	<b>COORDINATORE SIA:</b> Ing. Salvatore Mele	<b>IL PROGETTISTA:</b> Arch. Antonio Manco 
<b>SCALA:</b>			
<b>DATA:</b> Giugno 2022			

<b>Prot. int. n°:</b> 0108	<b>Rev.:</b> 1	<b>Mod.:</b> 0
Pratica: Caltagirone	Archivio File:	



**Consulenza, Progettazione e Sviluppo Impianti ad Energia Rinnovabile**

Sede Legale: Via Del Vecchio Politecnico, 9 - 20121 Milano (MI) - P.IVA 11092870960-PEC: [i-project@legalmail.it](mailto:i-project@legalmail.it)

Sede Operativa: Via Bisceglie n° 17 - 84044 Albanella (SA) -mail: [a.manco@iprojectsrl.com](mailto:a.manco@iprojectsrl.com)- Cell: 3384117245

**COMUNE DI CALTAGIRONE**  
**PROVINCIA DI CATANIA**

**INDAGINI GEOFISICHE TIPO MASW ESEGUITE PER IL PROGETTO PER LA  
REALIZZAZIONE DI UN PARCO AGRIVOLTAICO CON POTENZA DI PICCO PARI A  
222,26 MWP E POTENZA DI IMMISSIONE 195 MW, UBICATO NEL COMUNE DI  
CALTAGIRONE (CT) IN CONTRADA PIETRANERA E OPERE CONNESSE RICADENTI  
NEI COMUNI DI LICODIA EUBEA (CT) E CHIAROMONTE GULFI (RG)**

**COMMITTENTE:** Siel Agrisolare s.r.l.

**RELAZIONE-TECNICA-SULLE-INDAGINI**

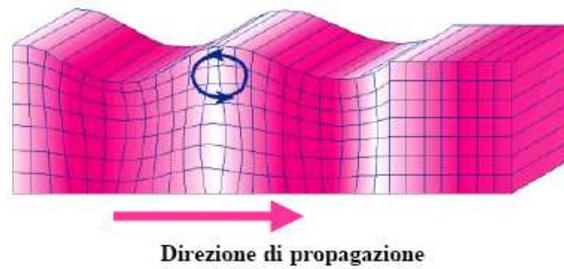
**INDAGINI GEOFISICHE TIPO MASW ESEGUITE PER IL PROGETTO  
INDAGINI GEOFISICHE TIPO MASW ESEGUITE PER IL PROGETTO PER LA  
REALIZZAZIONE DI UN PARCO AGRIVOLTAICO CON POTENZA DI PICCO PARI A  
222,26 MWP E POTENZA DI IMMISSIONE 195 MW, UBICATO NEL COMUNE DI  
CALTAGIRONE (CT) IN CONTRADA PIETRANERA E OPERE CONNESSE RICADENTI  
NEI COMUNI DI LICODIA EUBEA (CT) E CHIAROMONTE GULFI (RG)**

**PROSPEZIONI SISMICHE BASATE SULL'ANALISI DELLE ONDE SUPERFICIALI DI RAYLEIGH  
TECNICA MASW**

Sono state eseguite, nell'area in studio N° 3 indagini sismiche con metodologia M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde superficiali di Rayleigh) al fine di individuare spessori e geometrie dei litotipi, le caratteristiche sismostratigrafiche degli stessi e per classificare sismicamente il suolo dell'area in studio.

Le onde di Rayleigh sono polarizzate in un piano verticale (Fig. A) e si generano in corrispondenza della superficie libera del mezzo quando viene sollecitato acusticamente. In questo tipo di onde le particelle descrivono un movimento di tipo ellittico la cui ampiezza decresce esponenzialmente con la distanza dalla superficie libera. L'asse maggiore delle ellissi è normale alla superficie libera del mezzo ed alla direzione di propagazione delle onde e le particelle compiono questo movimento ellittico in senso retrogrado alla direzione di propagazione delle onde che vengono così generate.

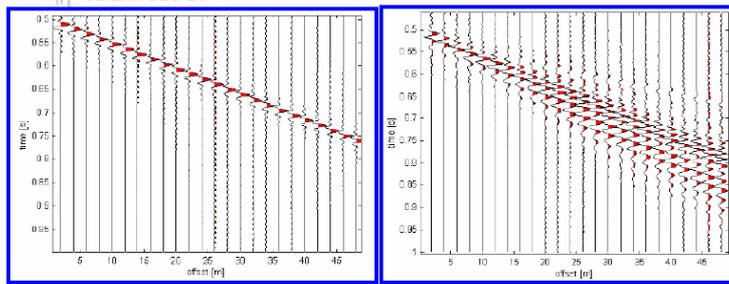
Le onde superficiali di Rayleigh, quando si propagano in un mezzo omogeneo, non presentano dispersione e la loro velocità è uguale a  $0.92 V_s$ . In un mezzo disomogeneo, quale la Terra, la loro velocità varia in funzione della lunghezza d'onda tra i limiti 0 e  $0.92 V_s$ . La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).



**Fig. A - Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto al senso di propagazione dell'onda.**

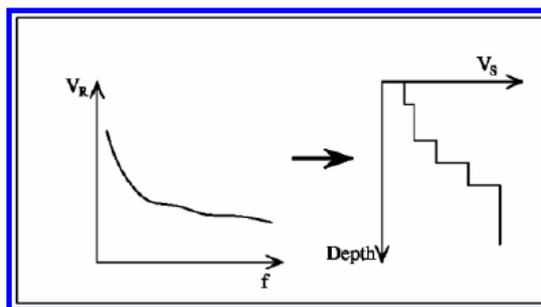
La determinazione della velocità delle onde di taglio  $V_S$  tramite le misure delle onde superficiali di Rayleigh risulta particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti e ambienti rumorosi poiché la percentuale di energia convertita in onde di Rayleigh è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde  $P$  (7%) ed  $S$  (26%). I metodi basati sull'analisi delle onde superficiali di Rayleigh forniscono una buona risoluzione e non sono limitati, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità. Inoltre la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla  $V_p$  e dalla densità, è funzione innanzitutto della  $V_s$ , parametro di fondamentale importanza per la caratterizzazione geotecnica di un sito secondo quanto previsto dall'O.P.C.M. Infatti, mentre la velocità delle onde  $P$  misurata in terreni saturi dipende in maniera sostanziale dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale, la velocità delle onde  $S$  è caratteristica delle vibrazioni trasmesse dal solo scheletro solido e, pertanto, a differenza delle onde  $P$ , risulta rappresentativa delle reali proprietà meccaniche del terreno.

La proprietà fondamentale delle onde superficiali di Rayleigh, sulla quale si basa l'analisi per la determinazione delle  $V_s$ , è costituita dal fenomeno della dispersione che si manifesta in mezzi stratificati (Fig. B).



**Fig. B – Segnali sismici che evidenziano (in rosso) le onde superficiali di Rayleigh in un mezzo non stratificato (a sinistra) e in un mezzo stratificato (a destra). Risulta evidente il fenomeno della dispersione delle onde superficiali di Rayleigh in un mezzo stratificato.**

Pertanto, analizzando la curva di dispersione, ossia la variazione delle velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della lunghezza d'onda (o della frequenza, che è l'inverso della lunghezza d'onda), è possibile determinare la variazione della velocità delle onde di taglio con la profondità tramite il processo d'inversione (Fig. C).



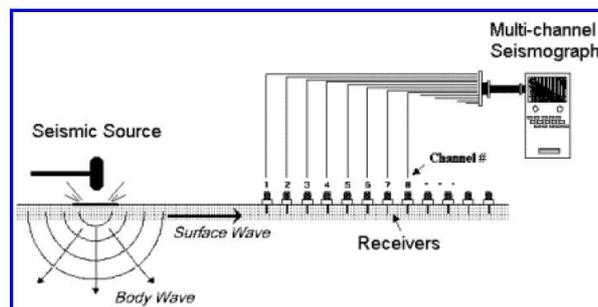
**Fig. C – Velocità delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza (a sinistra) e profilo di velocità delle onde di taglio in funzione della profondità (a destra) ricavato tramite processo d'inversione**

La velocità delle onde di Rayleigh ( $V_R$ ) è pari a circa il 90% delle onde di taglio ( $V_s$ ). Le tecniche di analisi delle onde di Rayleigh vengono realizzate con procedure operative più onerose della comune sismica a rifrazione e delle prove in foro e hanno un grado di incertezza nella determinazione della  $V_s < 20\%$ .

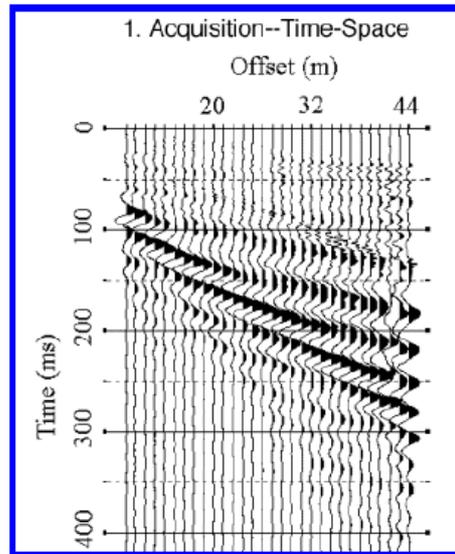
## PROSPEZIONI SISMICHE MASW

L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh – MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) – è un efficiente metodologia sismica per la determinazione delle velocità delle onde di taglio  $V_s$ . Tale metodo utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale. Le onde di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali, simili alla tecnica SASW, basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno. L'intera procedura per una MASW consiste di 4 passi fondamentali:

A) Ripetute acquisizioni multicanale dei segnali sismici (Fig. 2), generati da una sorgente energizzante artificiale (mazza battente su piastra), lungo uno stendimento rettilineo di sorgente geofoni (Fig. 1) che viene spostato lungo la linea dello stendimento stesso dopo ogni acquisizione;

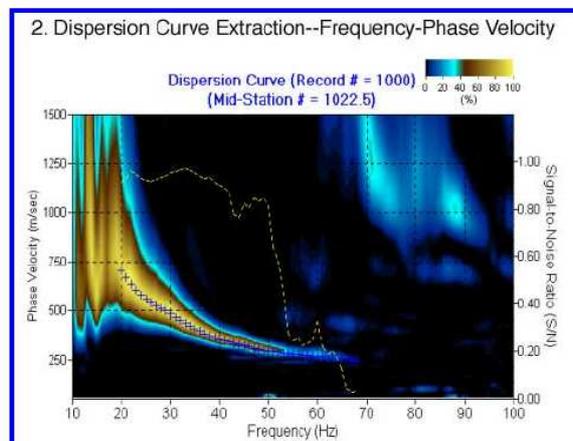


**Fig. 1 – Schema di acquisizione dei segnali sismici con metodo MASW.**



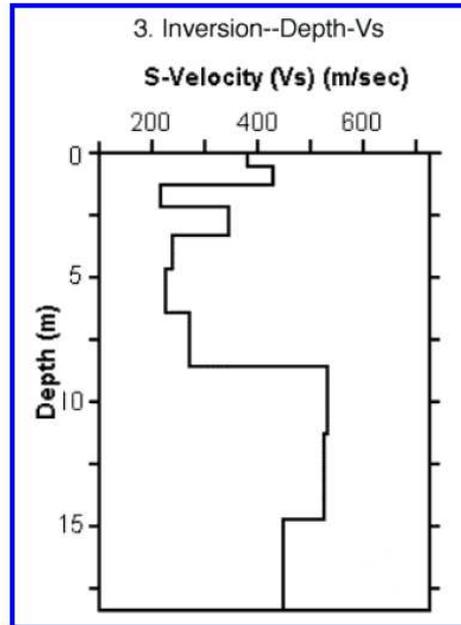
**Fig. 2 – Segnali sismici acquisiti dai geofoni lungo uno stendimento.**

B) Estrazione del modo fondamentale dalle curve di dispersione delle velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (una curva per ogni acquisizione) (Fig. 3);



**Fig. 3 – Curva di dispersione delle velocità di fase in funzione della frequenza delle onde superficiali di Rayleigh.**

C) Inversione delle curve di dispersione per ottenere profili verticali 1D delle Vs (Fig. 4) (un profilo verticale per ogni curva di dispersione, posizionato nel punto medio di ogni stendimento geofonico);



**Fig. 4 – Modello di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) ottenuto dalla curva di dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh attraverso l’inversione di un modello multistrato di terreno. La velocità delle onde di taglio è approssimativamente pari a  $1.1V_R$  ( $V_R$ =velocità delle onde di Rayleigh) e la profondità è pari a circa  $0.4 \cdot \lambda$  (lunghezza d’onda).**

D) Ricostruzione di una sezione (modello 2D) delle  $V_s$  dei terreni con approccio multicanale (con almeno due acquisizioni dei segnali, ovvero due spostamenti lungo la linea dello stendimento).

Quando vengono generate onde sismiche usando una sorgente impattante come un martello su una piastra vengono generate sia onde di volume ( $P$  e  $S$ ), sia onde di superficie (Rayleigh e Love), che si propagano in tutte le direzioni. Alcune di queste onde vengono riflesse e disperse quando incontrano oggetti superficiali o poco profondi (ad esempio, fondazioni di edifici, canali sotterranei, trovanti lapidei, ecc.) e diventano rumore. Inoltre, vengono quasi sempre rilevate vibrazioni da rumore ambientale proveniente dal traffico veicolare, dall’attività industriale e, in generale, dall’attività umana. Il vantaggio principale dell’approccio multicanale della tecnica MASW sta nella sua intrinseca capacità di distinguere tutte queste onde dovute al rumore e di isolarle dalle onde superficiali di Rayleigh evidenziando solo il modo fondamentale di oscillazione dei terreni. L’isolamento del modo fondamentale di oscillazione si basa su molteplici caratteristiche sismiche dei segnali. Le proprietà della dispersione di tutti i tipi di onde (di volume e superficiali) sono visualizzate

attraverso un metodo di trasformazione (basato sull'analisi spettrale dei segnali sismici) del campo d'onda che converte direttamente i segnali sismici acquisiti in una immagine dove un modello di dispersione è riconosciuto nella distribuzione dell'energia trasformata in oscillazioni. Successivamente, il modo fondamentale (proprietà fondamentale della dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh) viene estratto da un modello specifico. Tutte le altre onde (riflesse, disperse, modi superiori delle onde superficiali, noise ambientale) vengono quindi rimosse durante il processo di elaborazione.

Ai fini della caratterizzazione del tipo di suolo dell'area investigata sono state eseguite N° 3 prospezioni sismiche MASW con uno stendimento geofonico all'interno dell'area in esame. Le indagini sono state condotte mediante l'utilizzo di sismografo M.A.E. A6000S/E 24 bit 24 canali. L'elevata dinamica (24 bit di risoluzione) unita alla notevole memoria per l'acquisizione, ne consente l'utilizzo per tecniche di indagine di tipo non convenzionale. La sorgente sismica è costituita da una massa battente (mazza dal peso di circa 10 kg) che batte su una piastra di alluminio. Il colpo del martello funge contemporaneamente da starter poichè collegato a mezzo di trigger al sismografo. Le oscillazioni del suolo sono state rilevate da 24 geofoni (Geospace – 4.5Hz) posizionati lungo il profilo di indagine con offset di 1.5m (totale lunghezza stendimento= 40 m. La lunghezza degli stendimenti è stato sufficiente a determinare la sismostratigrafia dei terreni fino alla profondità di oltre 30.0 m nell' area di progetto. I segnali sismici acquisiti sono stati successivamente elaborati con apposito programma (SWAN versione 1.4 della Geostudi Astier) per la determinazione della sismostratigrafia del sottosuolo.

## ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI

Le acquisizioni dei segnali, di lunghezza temporale  $T=1.4s$ , sono state effettuate con passo di campionamento  $dt=0.5ms$ . La frequenza di campionamento è data da:  $f_{campionamento}=1/dt=2000Hz$ . La frequenza massima dei segnali, ovvero la frequenza di Nyquist, è data da:  $f_{Nyquist} = 1/2dt=1000Hz$ . La frequenza minima dei segnali è data da:  $f_{min}=1/T=0.714Hz$ . L'elaborazione dei dati e l'inversione delle curve di dispersione delle velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh sono state effettuate con il programma SWAN versione 1.4 della Geostudi Astier che ha permesso di eseguire l'intero processo di elaborazione delle sezioni sismostratigrafiche delle  $V_s$ .

Dalla disamina delle prospezioni geofisiche eseguite si è definito inoltre il valore di  $V_{s,eq}$  cioè la velocità media di propagazione entro 30,00 metri di profondità delle onde di taglio calcolata con la seguente espressione:

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

Dove

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

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

$h_i$  = Spessore in metri dello strato  $i$ -esimo

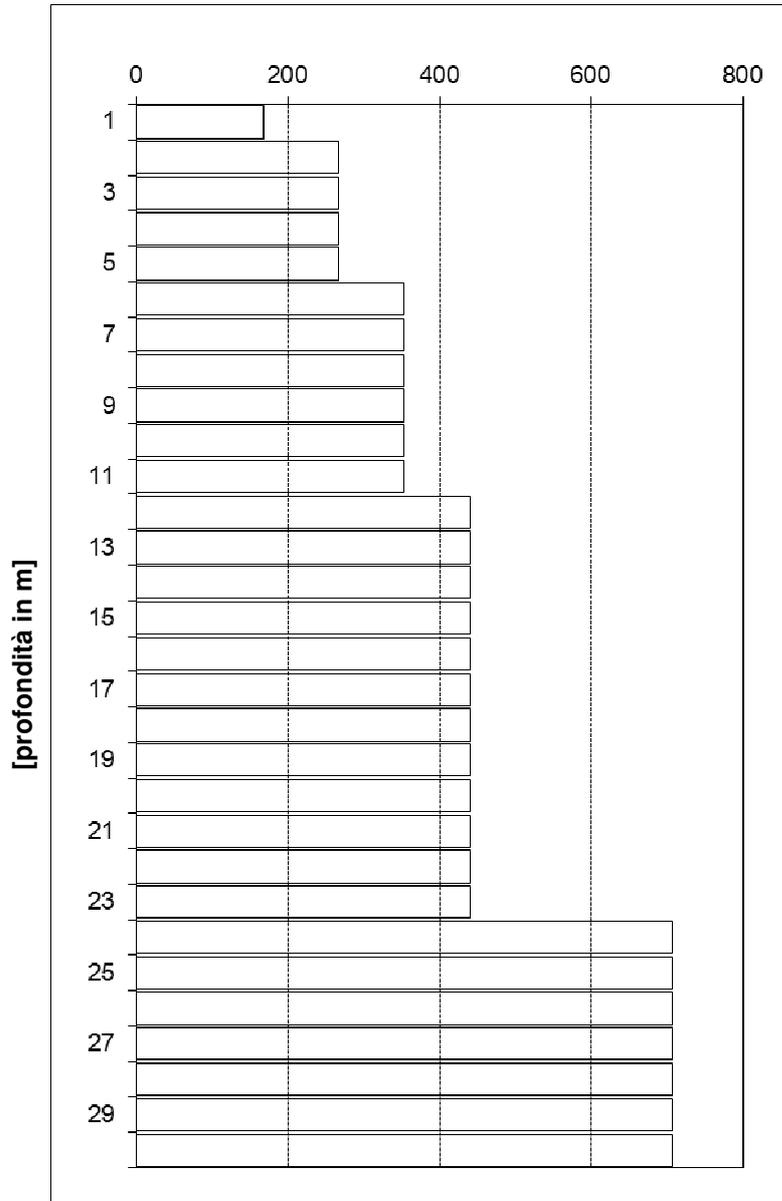
$V_i$  = Velocità dell'onda di taglio  $i$ -esima

$N$  = Numero di strati

Masw 1

Vs in m/s

Vs m/s	m dal p.c.	Sismostrati
168	1	1
266	2	2
266	3	2
266	4	2
266	5	2
354	6	3
354	7	3
354	8	3
354	9	3
354	10	3
354	11	3
440	12	4
440	13	4
440	14	4
440	15	4
440	16	4
440	17	4
440	18	4
440	19	4
440	20	4
440	21	4
440	22	4
440	23	4
707	24	5
707	25	5
707	26	5
707	27	5
707	28	5
707	29	5
707	30	5

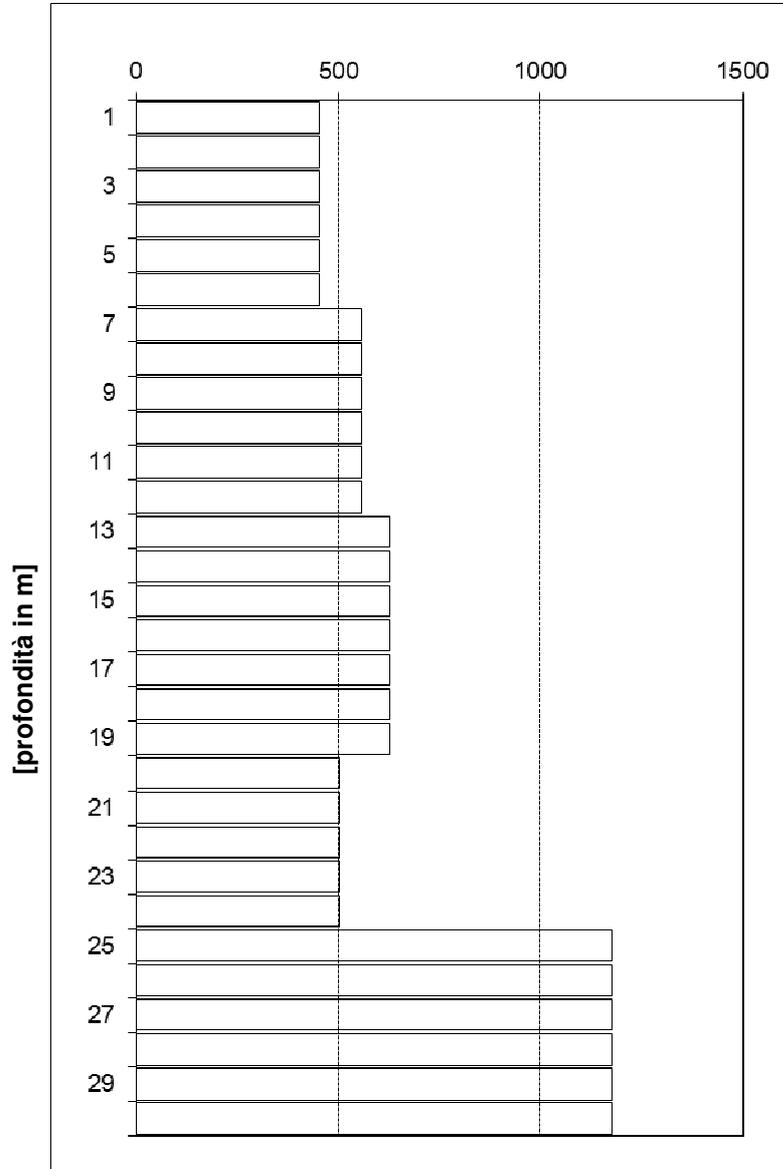


Vs,eq = 381 m/s Categoria "B"

Masw 2

Vs in m/s

Vs m/s	m dal p.c.	Sismostrati
452	1	1
452	2	1
452	3	1
452	4	1
452	5	1
452	6	1
557	7	2
557	8	2
557	9	2
557	10	2
557	11	2
557	12	2
629	13	3
629	14	3
629	15	3
629	16	3
629	17	3
629	18	3
629	19	3
502	20	4
502	21	4
502	22	4
502	23	4
502	24	4
1177	25	5
1177	26	5
1177	27	5
1177	28	5
1177	29	5
1177	30	5

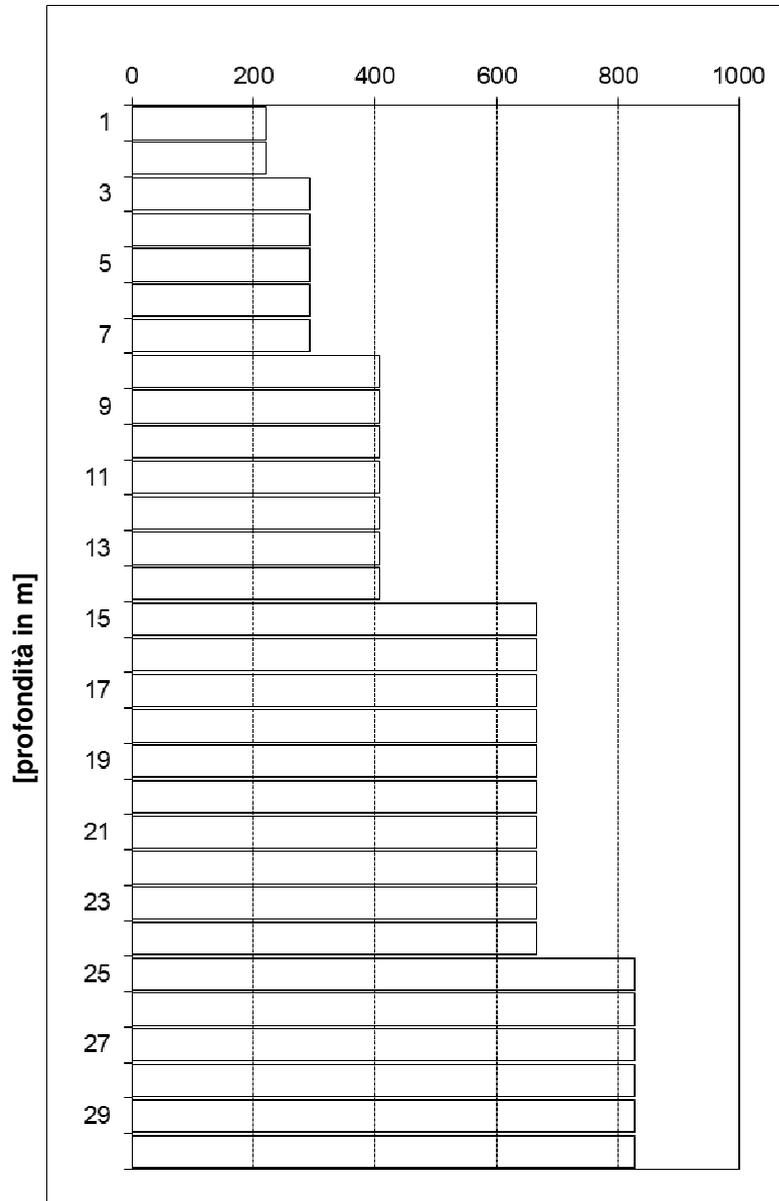


Vs,eq = 524 m/s. Categoria "B"

Masw 3

Vs in m/s

Vs m/s	m dal p.c.	Sismostrati
222	1	1
222	2	1
294	3	2
294	4	2
294	5	2
294	6	2
294	7	2
407	8	3
407	9	3
407	10	3
407	11	3
407	12	3
407	13	3
407	14	3
666	15	4
666	16	4
666	17	4
666	18	4
666	19	4
666	20	4
666	21	4
666	22	4
666	23	4
666	24	4
827	25	5
827	26	5
827	27	5
827	28	5
827	29	5
827	30	5



Vs,eq = 397 m/s Categoria "B".

## CLASSIFICAZIONE DEL SITO

Classificazione del D.M. 17/01/2018 "Norme tecniche per le costruzioni".

Committente	<b>Siel Agrisolare s.r.l.</b>
Località	<b>C.da Pietranera – Caltagirone (CT)</b>
Strumentazione utilizzata	<b>Sismografo MAE A6000SE</b>
Metodo di indagine	<b>M.A.S.W.</b>
Metodo di energizzazione	<b>Mazza da 10 kg</b>
Geometria dello stendimento	<b>Lineare con 24 geofoni (4,5Hz) – interasse 1,5 m</b>

<b>VELOCITA' MEDIA DELLE ONDE SISMICHE DI TAGLIO <math>V_{s,eq}(m/s)</math></b>	<b>434</b>
<i>Dati i risultati, il sito in esame risulta classificato alla categoria di suolo di tipo</i>	<b>B</b>

SUOLO	DESCRIZIONE LITOTECNICA	$V_{s,eq}$ (m/s)
<b>A</b>	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s30} > 800$ m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m	<b>&gt;800</b>
<b>B</b>	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s	<b>360÷800</b>
<b>C</b>	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalenti compresi tra 180 m/s e 360 m/s	<b>180÷360</b>
<b>D</b>	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s	<b>100 ÷ 180</b>
<b>E</b>	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m	

Il tecnico

Dr Geol. ~~Banieri~~ Santarosa



