

**COMUNE**  
**DI**  
**SANTA MARIA CAPUA VETERE**  
*(Provincia di Caserta)*

**Piano Urbanistico Comunale**  
**Adeguamento dello Studio Geologico**

*Allegato G2*

*Indagini Sismiche MASW*

*Dr.ssa Geol. Paola RUSSO*

*Novembre 2023*

**Indagini Masw eseguite dal geologo Russo Paola**

<b>Rif. Ubic.</b>	<b>Ubicazione Masw</b>	<b>Anno</b>
1	S.P. 13 Aversa - S. Maria C.V.	2022
2	Via S. Agostino	2022
3	Piazza Teresa Musco- Angolo Via Martiri Cristiani	2021
4	Strada Comunale Via Cardamone	2019
5	Via Avezzana	2019
6	Via del Lavoro	2021
7	Via F. Carraro, 12 - ex Via Galatina	2022
8	Via Giove Tifatino	2021
9	Via De Michele	2021
10	Via Latina	2021
11	Via Monfalcone	2021
12	Via Cavalieri di Vittorio Veneto	2021
13	Via F. Maria Pratilli	2021
14	Via Verdi	2019
15	Via Merano, Vico II	2020
16	Via Napoli	2019







dott. Paola Russo

EOLOGO

M1

INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: *Relazione geologica inerente il "Potenziamento con il prodotto metano per l'esercizio di un impianto di distribuzione carburanti ad uso pubblico alla S.P. 13 Aversa – S. Maria C.V. con la realizzazione del muro di recinzione".*

## RAPPORTO TECNICO

Febbraio 2022

IL Tecnico Responsabile  
RUSSO  
dott. geol. Paola Russo



### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE

## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Gennaio 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Napoli.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.

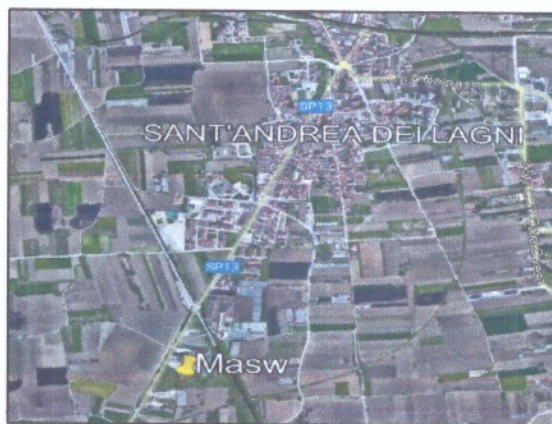


Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

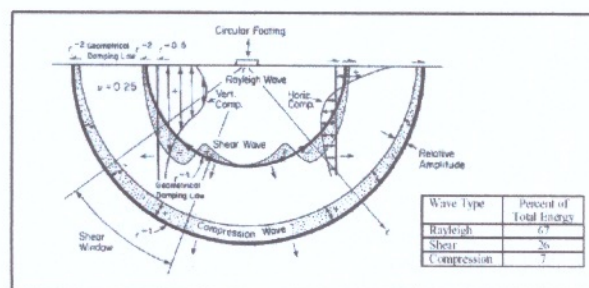


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 12 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 12 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 12 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	147.350	- 2
2	2	279.620	- 4
3	4	392.310	- 8
4	4	480.660	- 12
5	4	577.780	- 16
6	14	602.710	- 30
7	0	671.510	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_s \text{ eq MASW} = 432 \text{ m/s}$$

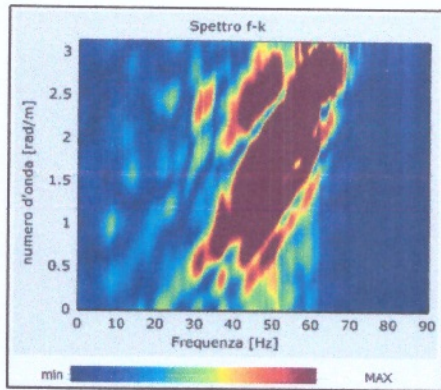
a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo B** (si veda la tabella seguente).

Classe	Descrizione
<b>A</b>	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
<b>B</b>	<b>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .</b>
<b>C</b>	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .
<b>D</b>	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
<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 metri.

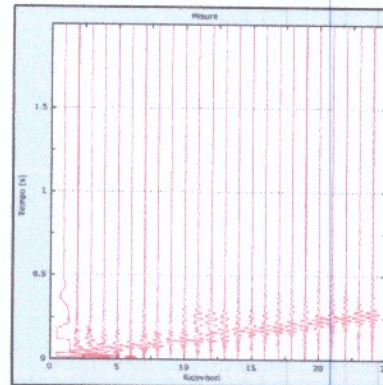
**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

## Rappresentazioni grafiche MASW

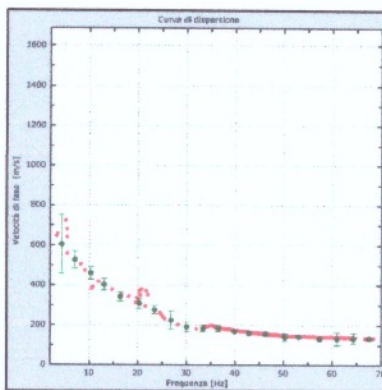
Spettro f - k



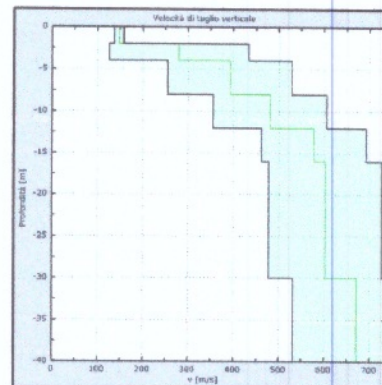
Tracce sperimentali



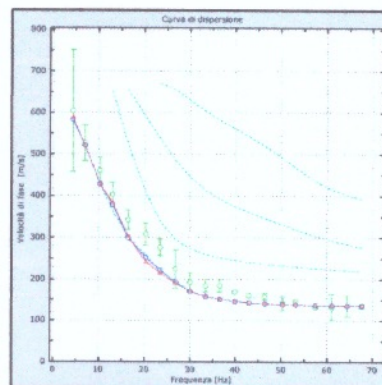
Curva di dispersione



Profilo verticale Vs



Velocità numeriche



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

**EOLOGO**

**M2**

**INDAGINE SISMICA MASW**  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente l' "Intervento di rigenerazione urbana, volto alla riduzione di fenomeni di marginalizzazione e degrado sociale, nonché al miglioramento della qualità del decoro urbano, del tessuto sociale ed ambientale consistenti nell' ampliamento e alla rifunzionalizzazione di un centro sportivo multifunzionale".

## **RAPPORTO TECNICO**

**Novembre 2022**

Responsabile  
  
dott. geol. Paola Russo



### **INDICE**

- 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**
- 2. INDAGINE GEOFISICA MASW**
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE**
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**
- 3. ANALISI DEI DATI**
- 4. CALCOLO DELLE VSeq**

**RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE**

## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 17 Ottobre 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), Via S. Agostino.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

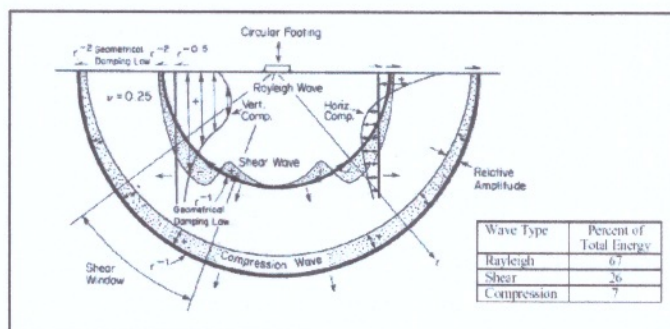


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).



La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidezza del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 26 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 2 m dal primo geofono.

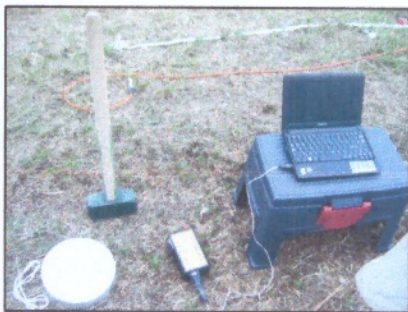


Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
24	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW con disposizione PC e unità di testa



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 24 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	178.860	- 2
2	3	230.350	- 5
3	3	278.110	- 8
4	4	366.850	- 12
5	4	375.500	- 16
6	14	408.490	- 30
7	0	535.880	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

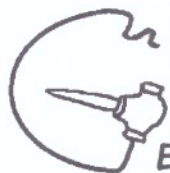
$$V_{S_{eq}} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell'  $i$ -esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell'  $i$ -esimo strato;

$N$  indica il numero di strati;



dott. Paola Russo

**EOLOGO**

**M3**

**INDAGINE SISMICA MASW**  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente il "P. di C. - art. 10 co. 1 del D.P.R. 380/2001 e s.m.i. - Interventi di sostituzione edilizia (abbattimento e ricostruzione) con incremento volumetrico in applicazione dell'art. 5 della L. R. Campania n. 1/2011 e s.m.i., nell'ambito del fabbricato sito in Piazza Teresa Musco n. 12 angolo via Martiri Cristiani".

## **RAPPORTO TECNICO**

**Aprile 2021**

  
Responsabile  
dott. geol. Paola Russo

### **INDICE**

- 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**
- 2. INDAGINE GEOFISICA MASW**
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE**
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**
- 3. ANALISI DEI DATI**
- 4. CALCOLO DELLE VSeq**

### **RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE**





## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Marzo 2021, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Piazza Teresa Musco n. 12.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

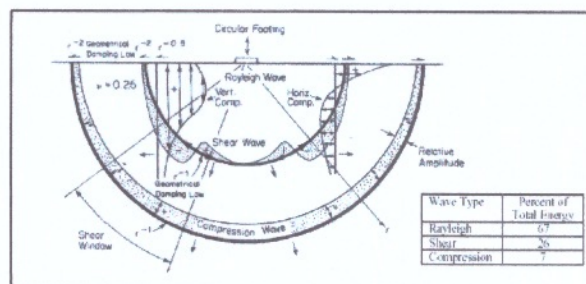


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 15 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 15 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
15	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 15 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	139.460	- 2
2	3	199.120	- 5
3	3	236.410	- 8
4	4	332.450	- 12
5	4	398.790	- 16
6	14	460.480	- 30
7	0	579.520	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,

$V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione: 
$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{S_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 317 \text{ m/s}$$

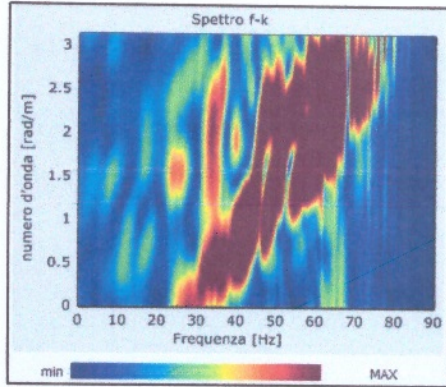
a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

Classe	Descrizione
<b>A</b>	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
<b>B</b>	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
<b>C</b>	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
<b>D</b>	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
<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 metri.

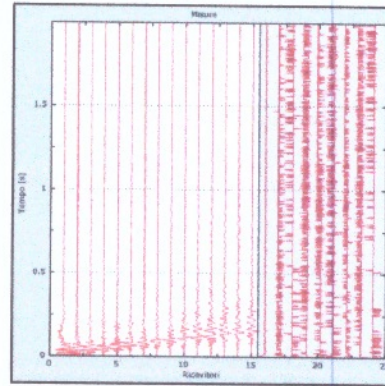
**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

## Rappresentazioni grafiche MASW

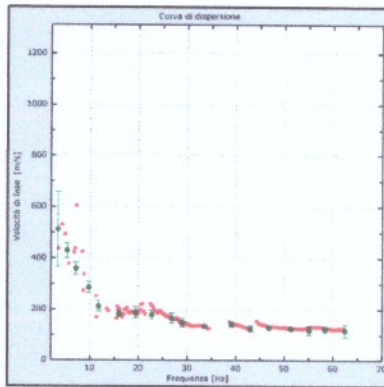
**Spettro f - k**



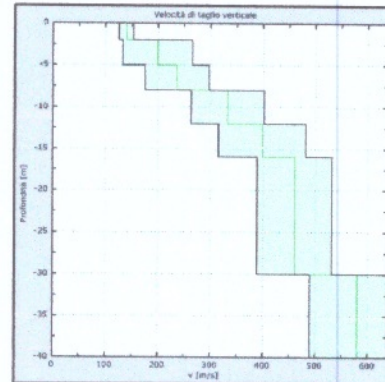
**Tracce sperimentali**



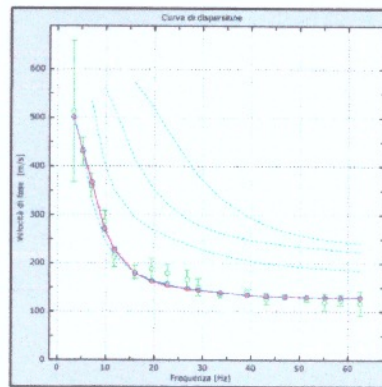
**Curva di dispersione**



**Profilo verticale Vs**



**Velocità numeriche**



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

EOLOGO

M4

INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente il  
"Progetto per la realizzazione di un'azienda  
agricola con annessa abitazione sul terreno  
sito in S. Maria C.V. alla strada  
comunale/Via Gardamone o Cardamone".

## RAPPORTO TECNICO

11 Luglio 2019

Il Responsabile  
  
dott. geol. Paola Russo

### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE

## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 20 Giugno 2019, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Cardamone.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

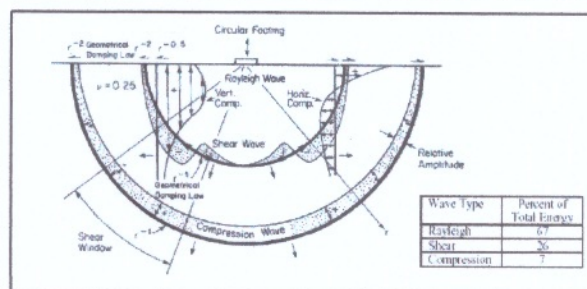


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).



La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 26 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Fig. 4: Ubicazione stendimento sismico



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW con postazione di battuta



Fig. 6: Disposizione PC e unità di testa



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 26 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	139.920	- 2
2	3	201.480	- 5
3	3	267.520	- 8
4	4	371.440	- 12
5	4	395.590	- 16
6	14	424.840	- 30
7	0	434.550	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 318 \text{ m/s}$$

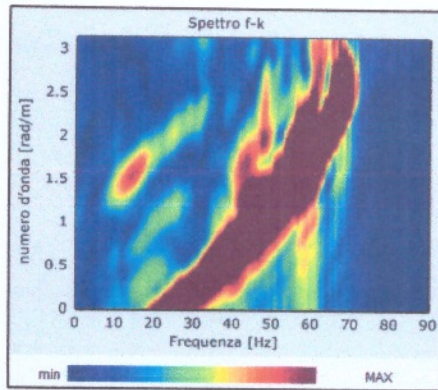
a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

Classe	Descrizione
<b>A</b>	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
<b>B</b>	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
<b>C</b>	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
<b>D</b>	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
<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 metri.

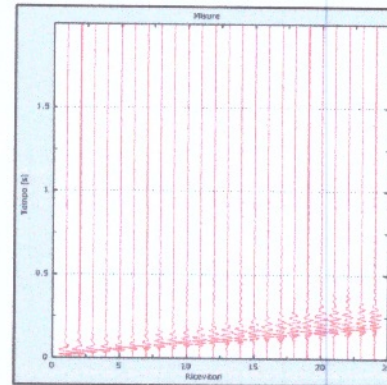
**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

## Rappresentazioni grafiche MASW

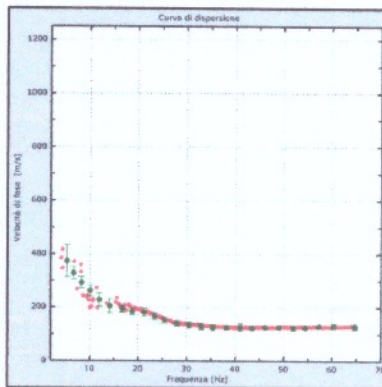
**Spettro f – k**



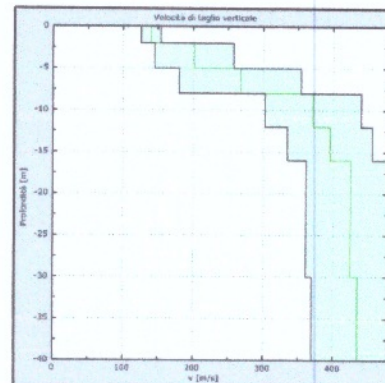
**Tracce sperimentali**



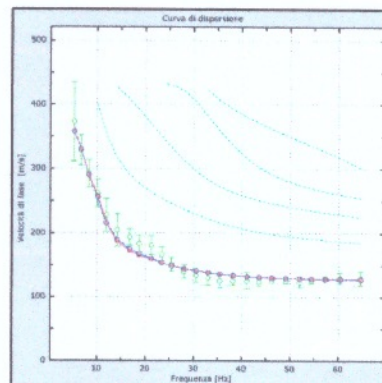
**Curva di dispersione**



**Profilo verticale Vs**



**Velocità numeriche**



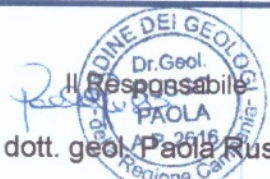
Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).



**INDAGINE SISMICA MASW**  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente la  
"SCIA per pensilina fotovoltaica".

  
Il Responsabile  
dott. geol. Paola Russo

## **RAPPORTO TECNICO**

**16 Luglio 2019**

### **INDICE**

- 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**
- 2. INDAGINE GEOFISICA MASW**
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE**
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**
- 3. ANALISI DEI DATI**
- 4. CALCOLO DELLE VSeq**

### **RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE**

## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 15 Luglio 2019, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Avezzana.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

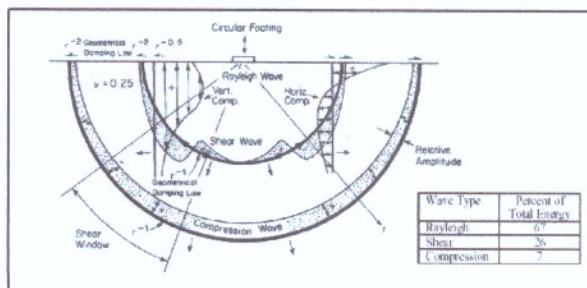


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).



La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 22 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 24 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW con disposizione PC e unità di testa



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 24 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	209.890	- 2
2	3	252.500	- 5
3	3	307.360	- 8
4	4	381.280	- 12
5	4	414.550	- 16
6	14	460.720	- 30
7	0	663.790	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 367 \text{ m/s}$$

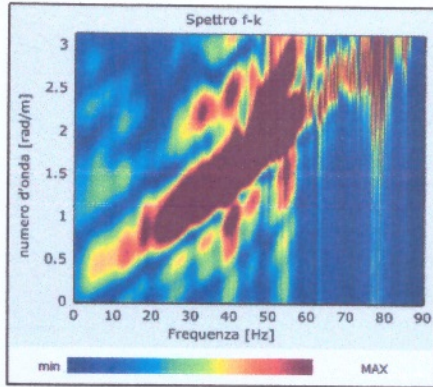
a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo B** (si veda la tabella seguente).

Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	<b>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .</b>
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

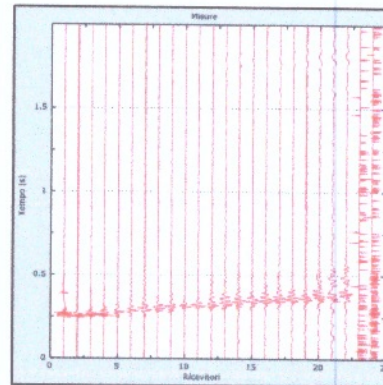
**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

## Rappresentazioni grafiche MASW

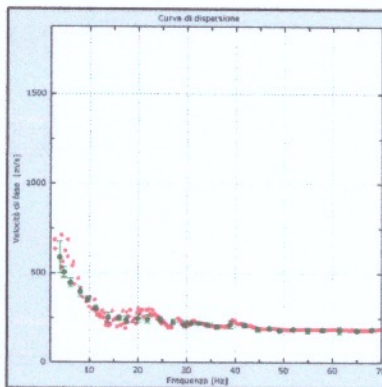
Spettro f - k



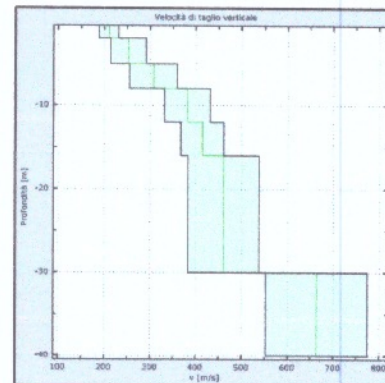
Tracce sperimentali



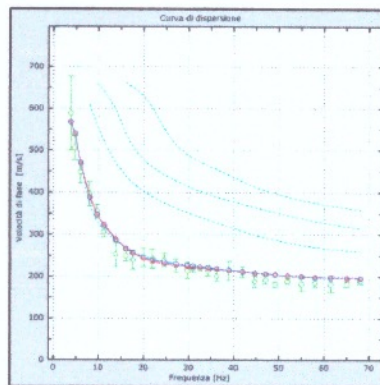
Curva di dispersione



Profilo verticale Vs



Velocità numeriche



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).



**INDAGINE SISMICA MASW**  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente la  
"Variante al PDC n. 52 del 5 Agosto 2016 –  
Realizzazione del complesso edilizio in S.  
Maria C.V. alla Via Del Lavoro, adibito ad  
officine di assistenza, esposizione e  
vendita autovetture".

Il Responsabile  
  
RUSSO  
PAOLA  
A.P. 2616  
dott. geol. Paola Russo  


## **RAPPORTO TECNICO**

**Aprile 2021**

### **INDICE**

- 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**
- 2. INDAGINE GEOFISICA MASW**
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE**
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**
- 3. ANALISI DEI DATI**
- 4. CALCOLO DELLE VSeq**

**RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE**

## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 02 Aprile 2021, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via del Lavoro.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

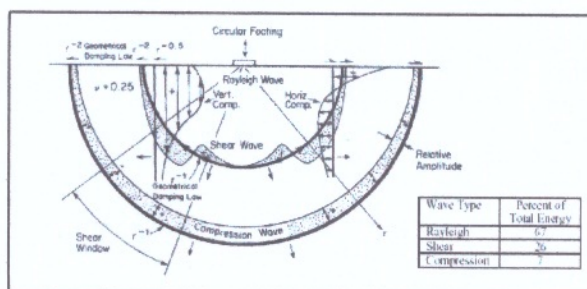


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).



La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 26 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m, 2 m e 4 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio Vs in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 26 m).

STRATO	SPESSORE (m)	Vs (m/s)	PROFONDITA'
1	2	192.130	- 2
2	2	269.600	- 4
3	4	365.630	- 8
4	4	446.510	- 12
5	4	467.980	- 16
6	14	576.600	- 30
7	0	689.590	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE VSeq

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle Vseq, che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S_{eq}} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

dove:

hi indica lo spessore dell' i-esimo strato;

Vsi indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_s \text{ eq MASW} = 425 \text{ m/s}$$

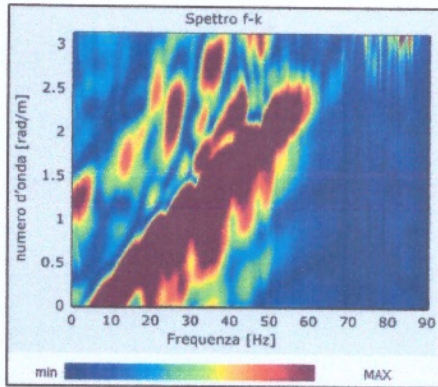
a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo B** (si veda la tabella seguente).

Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	<b>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .</b>
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

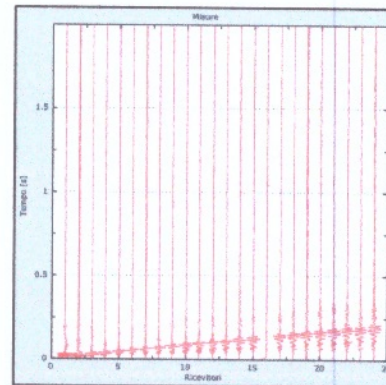
**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

## Rappresentazioni grafiche MASW

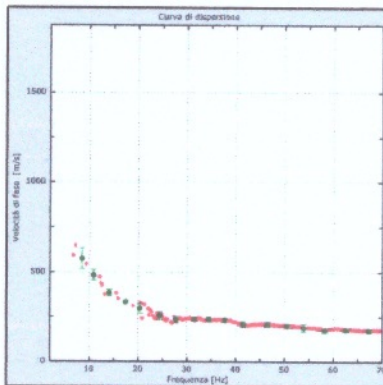
**Spettro f - k**



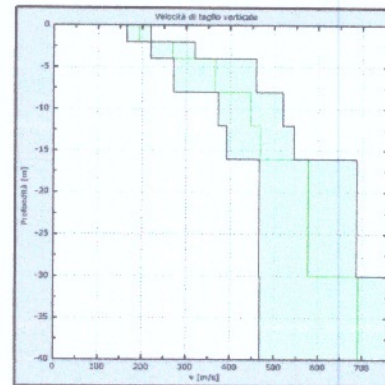
**Tracce sperimentali**



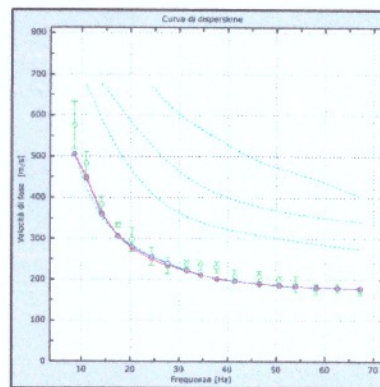
**Curva di dispersione**



**Profilo verticale Vs**



**Velocità numeriche**



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).




**INDAGINE SISMICA MASW**  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria C. V. (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente la  
" Scia per ristrutturazione urbanistica  
condizionata. Diversa distribuzione interna e  
apertura di un vano scala nel solaio del  
piano primo con inserimento di una scala  
indipendente", in *Via Franco Carrano, 12 –  
ex Via Galatina III trav., n. 15*, nel Comune  
di Santa Maria Capua Vetere (CE).

## **RAPPORTO TECNICO**

**Aprile 2022**

  
Il Responsabile  
dott. geol. Paola Russo

### **INDICE**

- 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**
- 2. INDAGINE GEOFISICA MASW**
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE**
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**
- 3. ANALISI DEI DATI**
- 4. CALCOLO DELLE VSeq**

### **RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE**



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 21 Marzo 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Galatina trav. III, n. 15.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

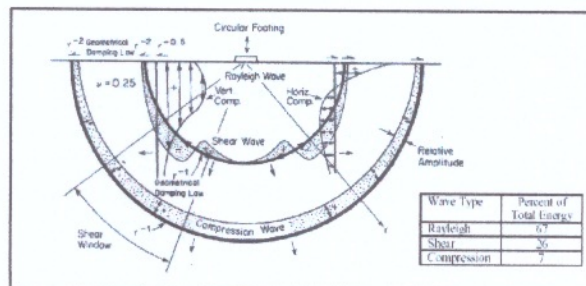


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).



La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 24 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.

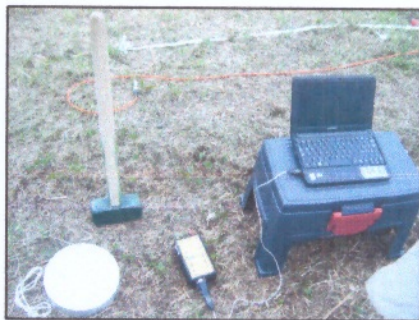


Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 24 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	160.110	- 2
2	3	198.580	- 5
3	3	269.600	- 8
4	6	360.630	- 14
5	8	388.630	- 22
6	8	403.900	- 30
7	0	571.460	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell'  $i$ -esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell'  $i$ -esimo strato;

$N$  indica il numero di strati;



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

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 313 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

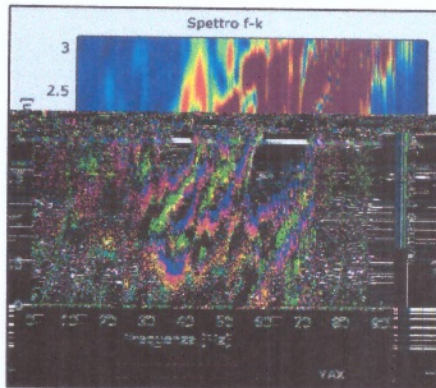
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
C	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

Tabella 2: Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

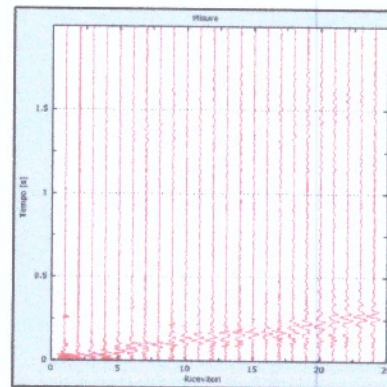


## Rappresentazioni grafiche MASW

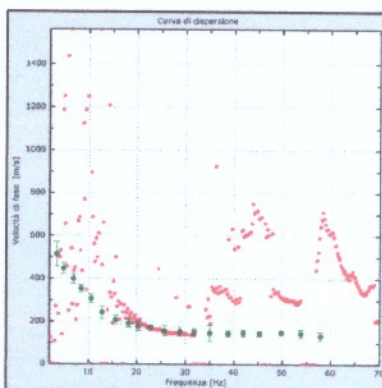
Spettro f - k



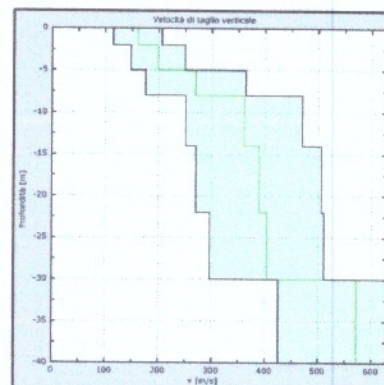
Tracce sperimentali



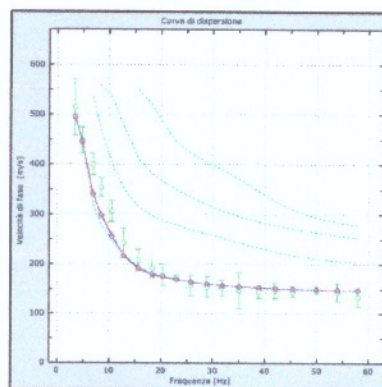
Curva di dispersione



Profilo verticale Vs



Velocità numeriche



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).



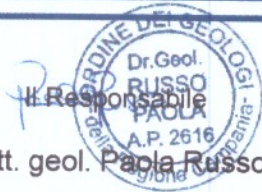
**INDAGINE SISMICA MASW**  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente il  
"Progetto di ampliamento ai sensi della L.R.  
01/2011 del fabbricato sito alla Via Giove  
Tifatino".

## **RAPPORTO TECNICO**

**7 Giugno 2021**



Il Responsabile  
dott. geol. Paola Russo

### **INDICE**

- 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**
- 2. INDAGINE GEOFISICA MASW**
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE**
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**
- 3. ANALISI DEI DATI**
- 4. CALCOLO DELLE VSeq**

### **RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE**







In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 19 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 21 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio Vs in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 21 m).

STRATO	SPESSORE (m)	Vs (m/s)	PROFONDITA'
1	2	151.840	- 2
2	3	216.520	- 5
3	3	241.380	- 8
4	4	276.190	- 12
5	4	378.500	- 16
6	14	495.760	- 30
7	0	521.850	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE VSeq

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle Vseq, che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

h<sub>i</sub> indica lo spessore dell' i-esimo strato;

V<sub>s<sub>i</sub></sub> indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 323 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

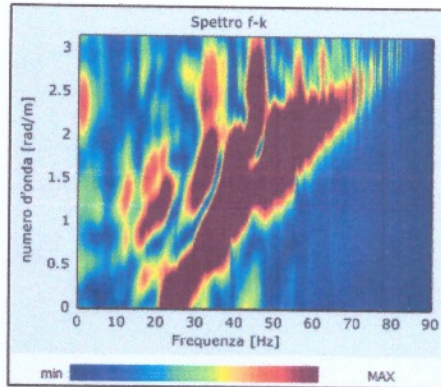
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
C	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

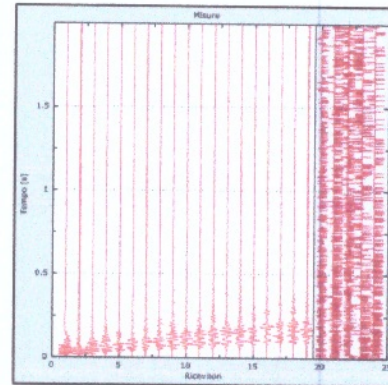


## Rappresentazioni grafiche MASW

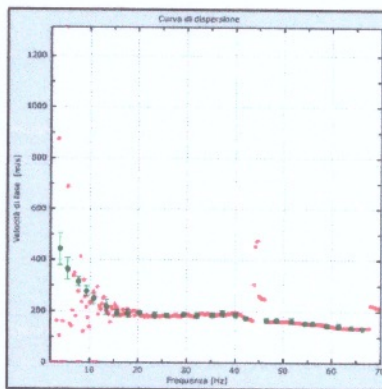
Spettro f – k



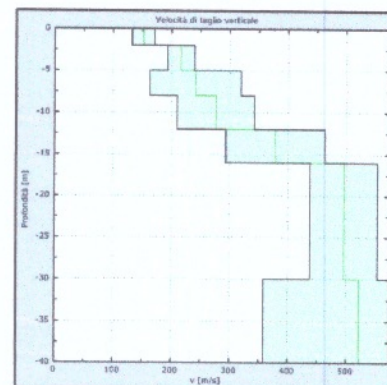
Tracce sperimentali



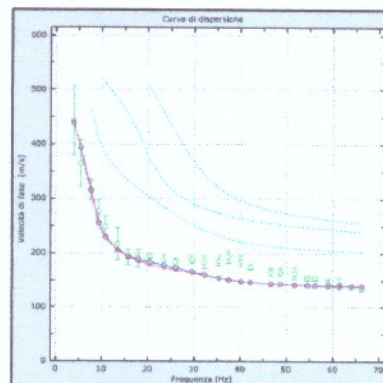
Curva di dispersione



Profilo verticale Vs



Velocità numeriche



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

EOLOGO

M9

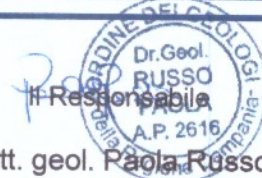
INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente le  
"Opere di ristrutturazione edilizia art.22  
D.P.R. 380/01 diversa distribuzione  
interna, opere atte al miglioramento sismico  
e contenimento energetico dell'immobile  
sito alla via L. De Michele n.79 (CE)".

## RAPPORTO TECNICO

Marzo 2021

  
Il Responsabile  
dott. geol. Paola Russo

### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Gennaio 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Napoli.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

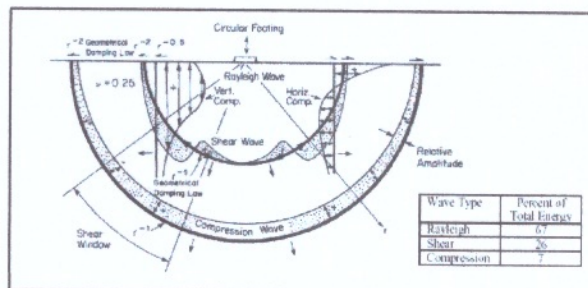


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 25 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 25 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	160.360	- 2
2	3	216.520	- 5
3	3	278.840	- 8
4	4	335.010	- 12
5	4	398.880	- 16
6	14	528.900	- 30
7	0	557.390	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



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

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 350 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo B** (si veda la tabella seguente).

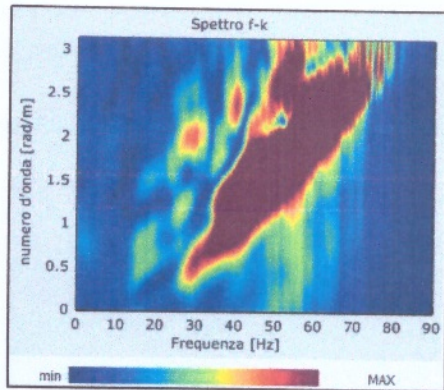
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
C	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

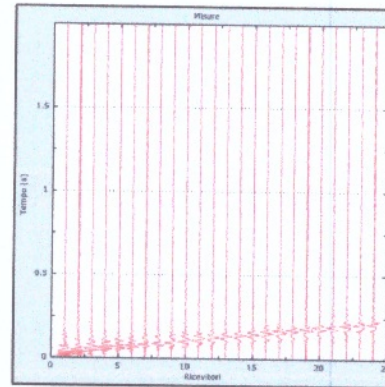


## Rappresentazioni grafiche MASW

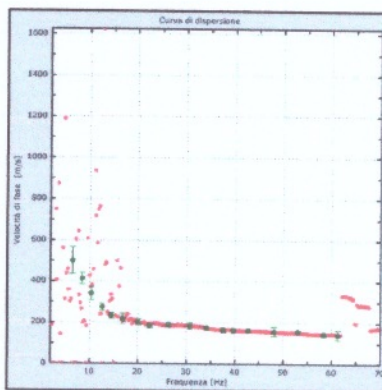
Spettro f – k



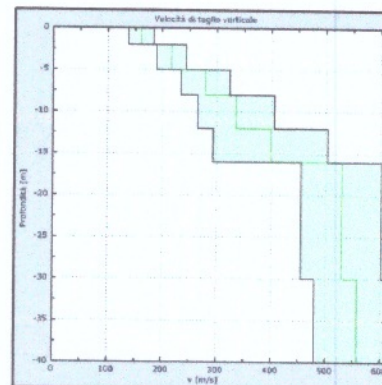
Tracce sperimentali



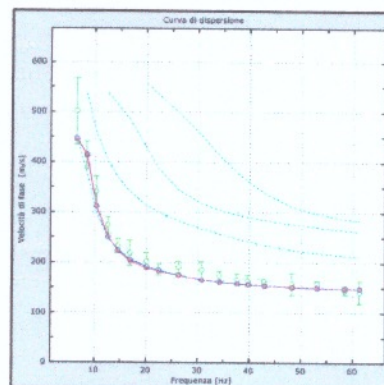
Curva di dispersione



Profilo verticale Vs



Velocità numeriche



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

EOLOGO

M10

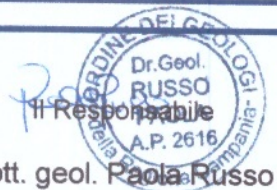
INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente il  
"Progetto di sostituzione edilizia in via  
Latina/f.lli DeSimone – abbattimento e  
ricostruzione delle vecchie strutture  
dissestate".

## RAPPORTO TECNICO

Maggio 2021

  
dott. geol. Paola Russo

### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Gennaio 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Napoli.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

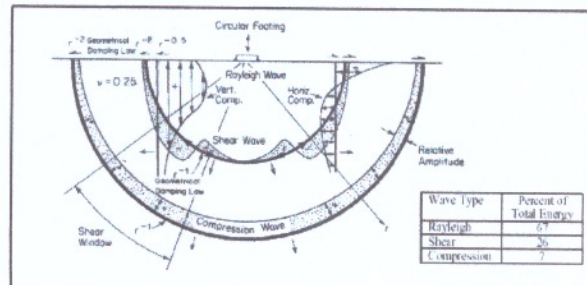


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 19 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 21 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW





### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 21 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	165.220	- 2
2	3	200.250	- 5
3	3	266.400	- 8
4	4	343.640	- 12
5	4	397.570	- 16
6	14	485.940	- 30
7	0	624.400	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell'  $i$ -esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell'  $i$ -esimo strato;

$N$  indica il numero di strati;



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

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 337 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

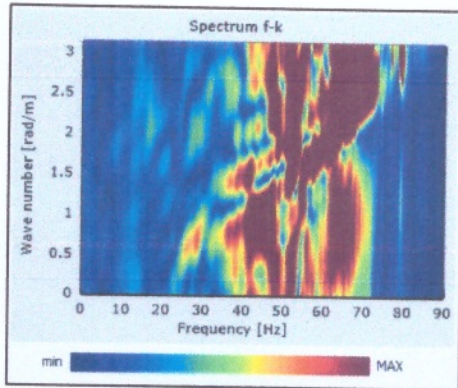
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
C	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

Tabella 2: Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

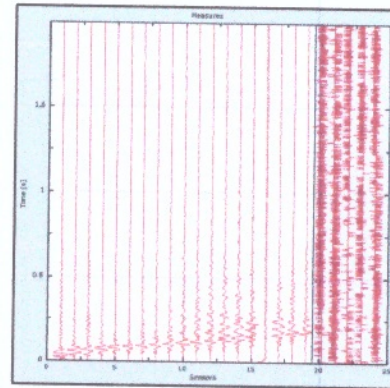


## Rappresentazioni grafiche MASW

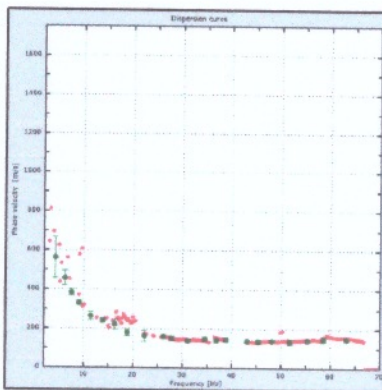
Spettro f - k



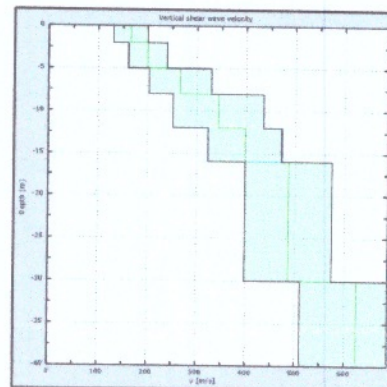
Tracce sperimentali



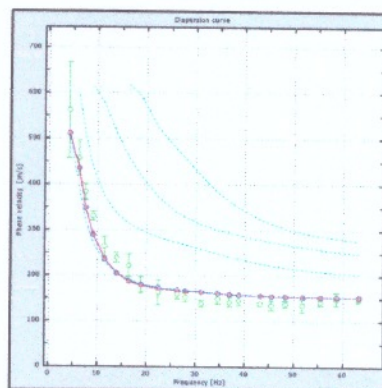
Curva di dispersione



Profilo verticale Vs



Velocità numeriche



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

EOLOGO

**M11**

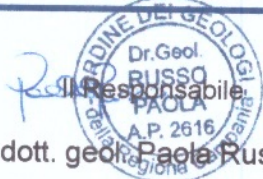
INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente l' "Abbattimento e ricostruzione, L.R. 19/2009 art. 4 e opere atte al contenimento energetico e miglioramento sismico (decreto rilancio) dell'immobile ad uso abitativo sito alla via Monfalcone n°1".

## RAPPORTO TECNICO

Luglio 2021

  
Responsabile  
dott. geol. Paola Russo

### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
- 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
- 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Gennaio 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Napoli.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.

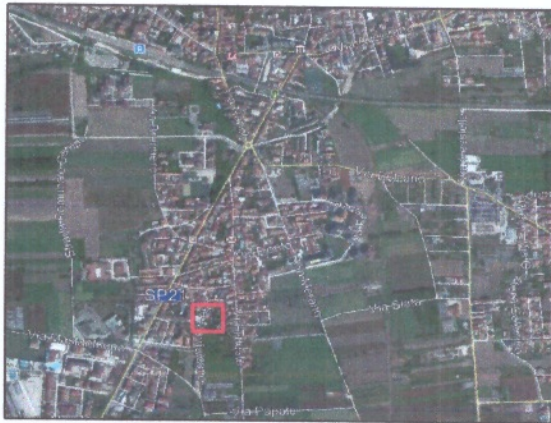


Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

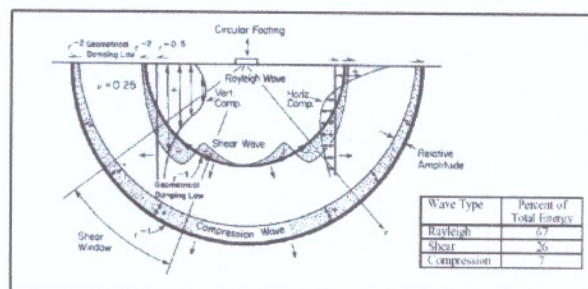


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).



La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 16 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 18 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Fig. 4: Vista dello stendimento MASW



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio Vs in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 18 m).

STRATO	SPESSORE (m)	Vs (m/s)	PROFONDITA'
1	2	149.490	- 2
2	3	179.320	- 5
3	3	275.440	- 8
4	4	315.440	- 12
5	4	384.820	- 16
6	14	443.790	- 30
7	0	563.860	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE VSeq

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle Vseq, che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

h<sub>i</sub> indica lo spessore dell' i-esimo strato;



$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;

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

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s_{eq}} \text{ MASW} = 313 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

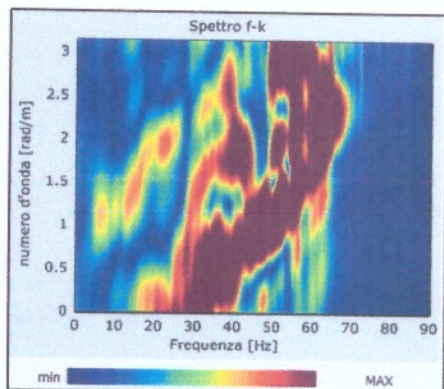
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
C	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

Tabella 2: Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

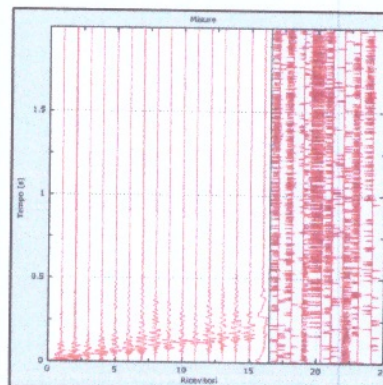


## Rappresentazioni grafiche MASW

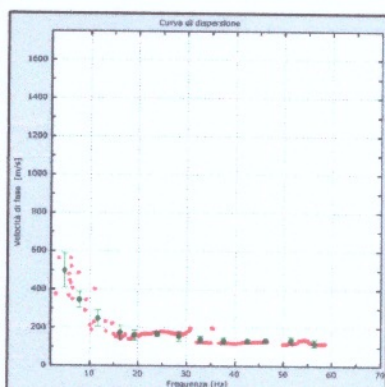
**Spettro f - k**



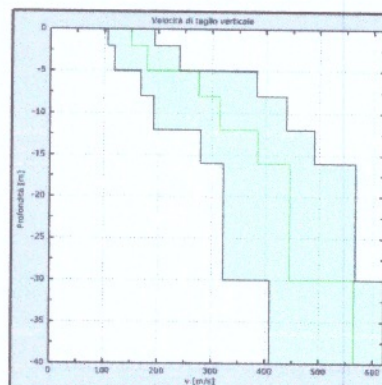
**Tracce sperimentali**



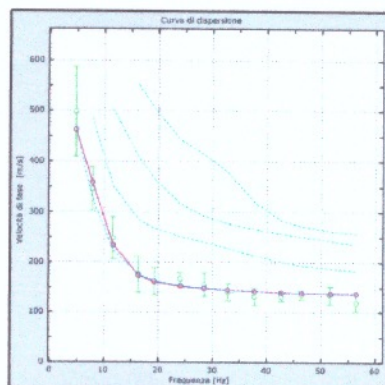
**Curva di dispersione**



**Profilo verticale Vs**



**Velocità numeriche**



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).



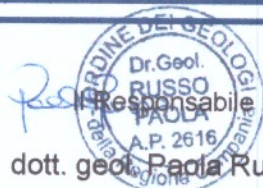
**INDAGINE SISMICA MASW**  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente  
la "Demolizione e ricostruzione a parità di  
volume del fabbricato per civili abitazioni  
sito in S. Maria C.V. (CE)".

## **RAPPORTO TECNICO**

**Novembre 2021**

  
dott. geol. Paola Russo

### **INDICE**

- 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**
- 2. INDAGINE GEOFISICA MASW**
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE**
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**
- 3. ANALISI DEI DATI**
- 4. CALCOLO DELLE VSeq**

### **RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE**



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Gennaio 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Cavalieri di Vittorio Veneto n. 68.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 1. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

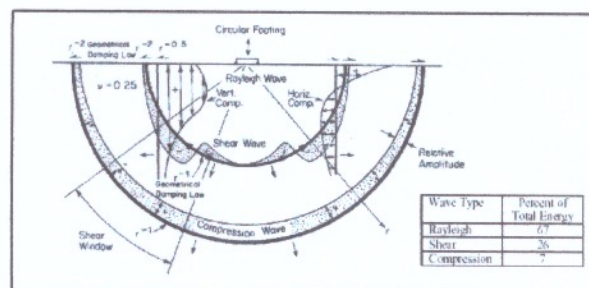


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 19 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 19 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 19 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	164.970	- 2
2	3	214.750	- 5
3	3	247.470	- 8
4	4	293.760	- 12
5	4	378.160	- 16
6	14	447.540	- 30
7	0	513.620	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 2. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 320 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

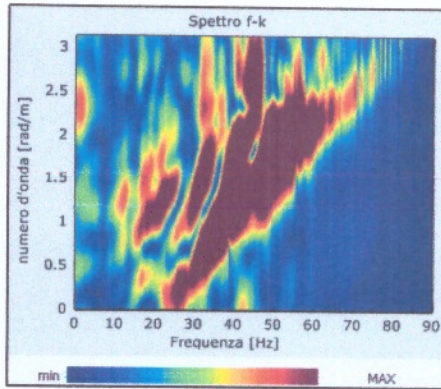
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
C	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

Tabella 2: Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

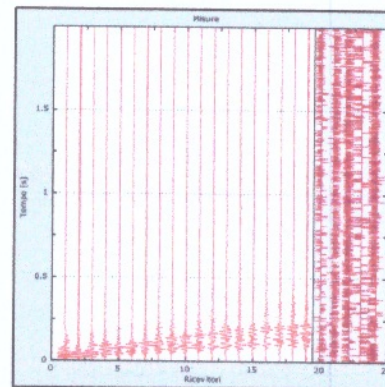


## Rappresentazioni grafiche MASW

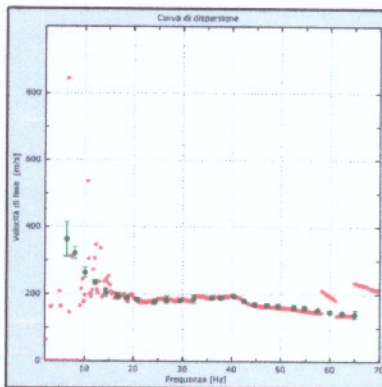
Spettro f - k



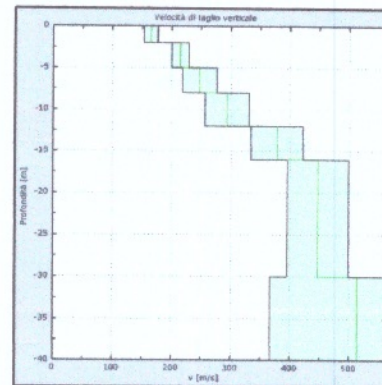
Tracce sperimentali



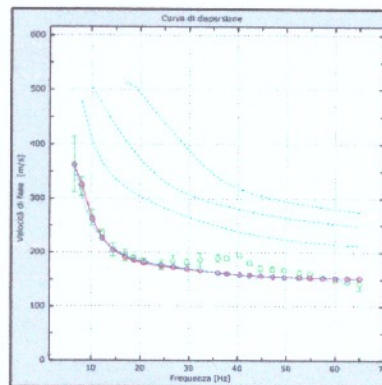
Curva di dispersione



Profilo verticale Vs



Velocità numeriche



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

EOLOGO

M13

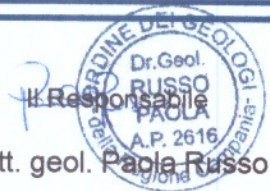
INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente il  
"P.d.c.- art. 10 del D.P.R. 380/2001 e smi  
– Ampliamento con annesse modifiche  
interne, per adeguamento igienico  
funzionale, da realizzarsi nell'ambito dei  
locali terranei del fabbricato sito in Via  
Francesco Maria Pratilli n. 60".

## RAPPORTO TECNICO

Marzo 2021

  
dott. geol. Paola Russo

### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Gennaio 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), Via Pratilli, n. 60.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

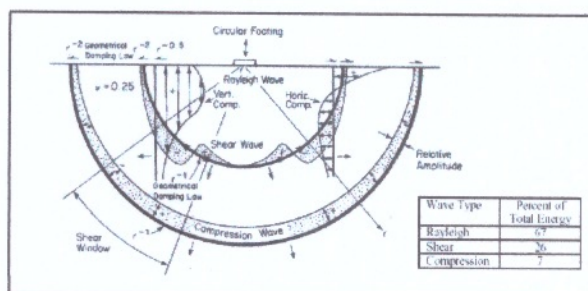


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 12 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 12 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico

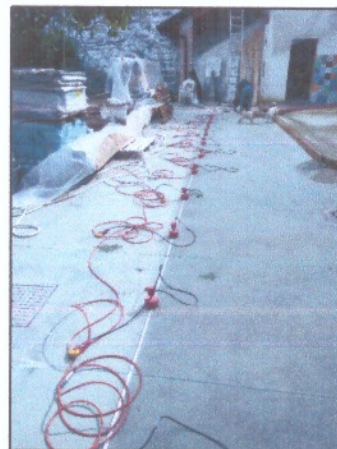


Fig. 5: Vista dello stendimento MASW



### 1. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 12 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	183.010	- 2
2	3	223.610	- 5
3	3	281.610	- 8
4	4	352.520	- 12
5	4	372.520	- 16
6	14	444.020	- 30
7	0	545.530	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 3. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 338 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

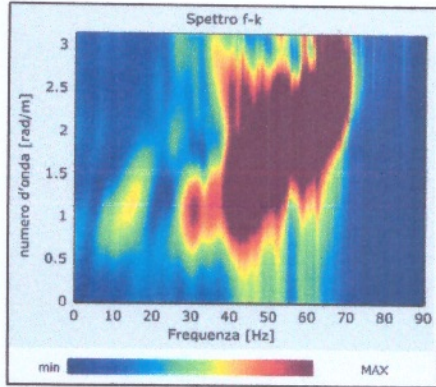
Classe	Descrizione
<b>A</b>	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
<b>B</b>	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
<b>C</b>	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
<b>D</b>	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
<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 metri.

**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

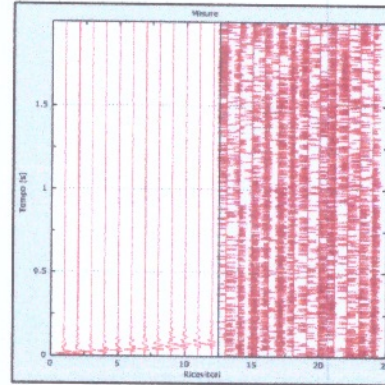


## Rappresentazioni grafiche MASW

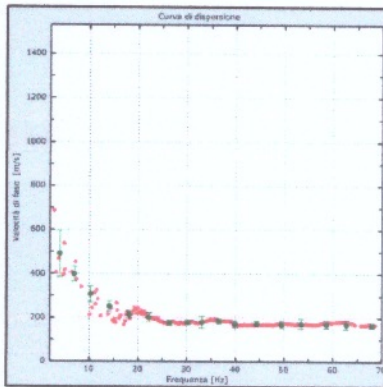
**Spettro f - k**



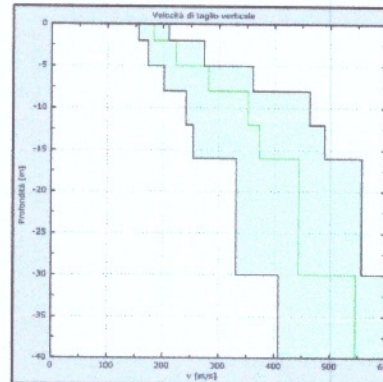
**Tracce sperimentali**



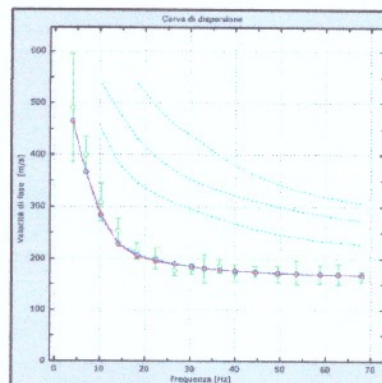
**Curva di dispersione**



**Profilo verticale Vs**



**Velocità numeriche**



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

EOLOGO

M14

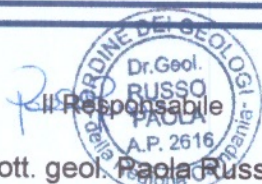
INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria C. V. (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente l'  
"Intervento di completamento di un  
fabbricato sito in Via Verdi, 46" nel  
Comune di Santa Maria Capua Vetere  
(CE).

## RAPPORTO TECNICO

Febbraio 2019

  
Il Responsabile  
dott. geol. Paola Russo

### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Gennaio 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Verdi, 46.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.

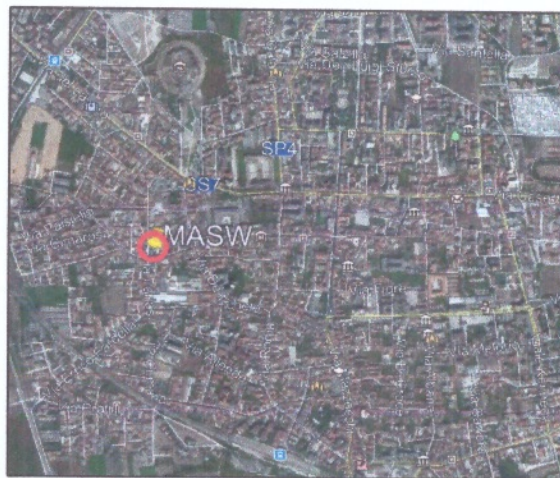


Figura 1: Ubicazione dell'area

## 1. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

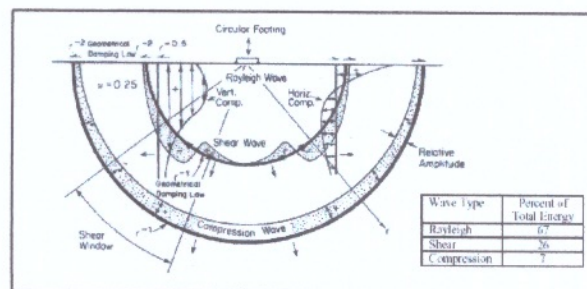


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 19 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 21 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



Fig. 5: Vista dello stendimento MASW



Fig. 6: Postazione di battuta con disposizione PC e unità di testa





### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 21 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	205.070	- 2
2	3	227.550	- 5
3	3	247.530	- 8
4	4	275.000	- 12
5	4	377.460	- 16
6	14	462.390	- 30
7	0	524.820	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

N indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_s \text{ eq MASW} = 331 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

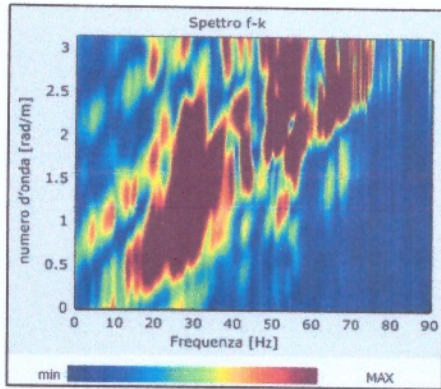
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
C	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

**Tabella 2:** Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

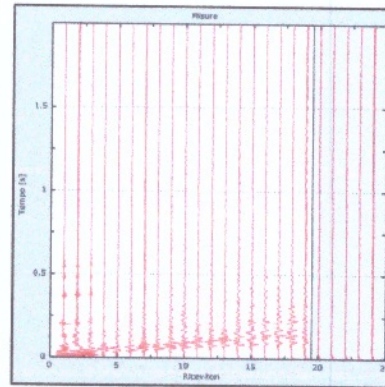


## Rappresentazioni grafiche MASW

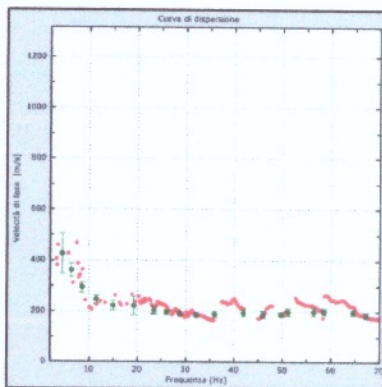
**Spettro f – k**



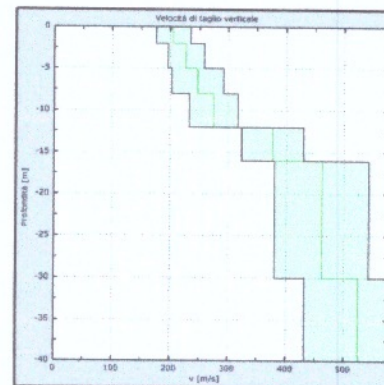
**Tracce sperimentali**



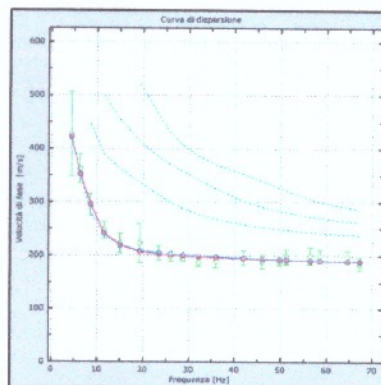
**Curva di dispersione**



**Profilo verticale Vs**



**Velocità numeriche**



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

EOLOGO

M15

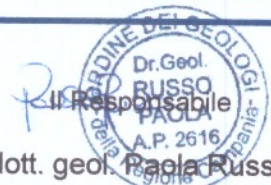
INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente la  
"Ristrutturazione casa in Santa Maria  
Capua Vetere alla Via Vico Il Merano n. 1".

## RAPPORTO TECNICO

21 Luglio 2020

  
Il Responsabile  
dott. geol. Paola Russo

### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 26 Gennaio 2022, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), Via Vico Il Merano, n.1. E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

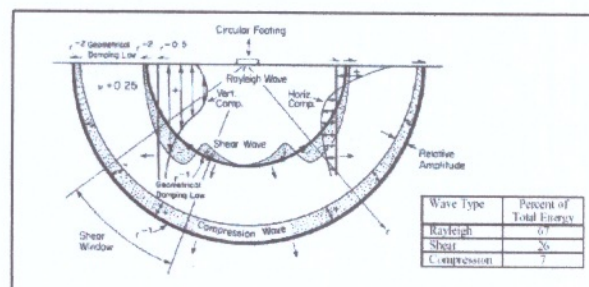


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 20 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 22 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 1 m e 2 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico

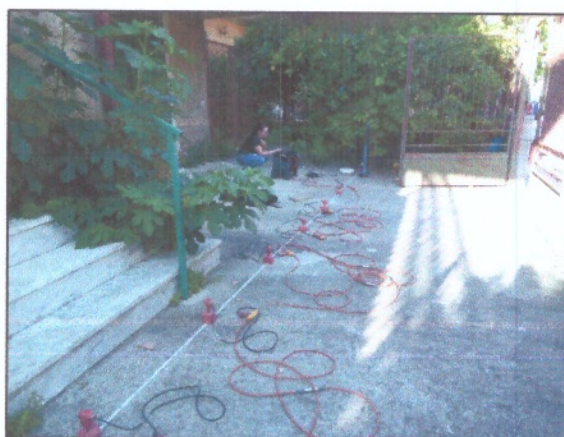


Fig. 5: Vista dello stendimento MASW



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 22 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	127.170	- 2
2	3	288.550	- 5
3	3	365.220	- 8
4	4	392.800	- 12
5	8	449.470	- 20
6	10	558.830	- 30
7	0	615.100	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{Seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

$N$  indica il numero di strati;



H indica la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_s \text{ eq MASW} = 373 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo B** (si veda la tabella seguente).

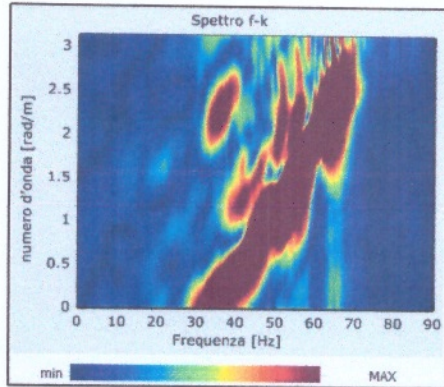
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	<b>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .</b>
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

Tabella 2: Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

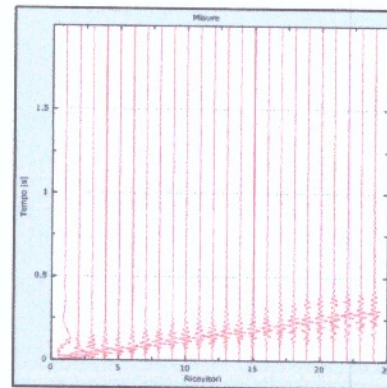


## Rappresentazioni grafiche MASW

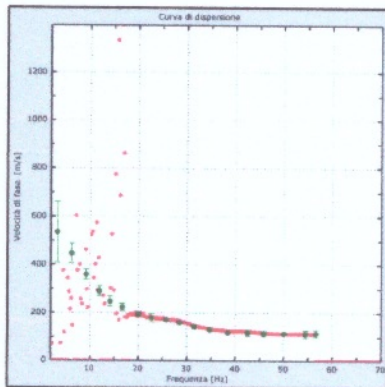
**Spettro f - k**



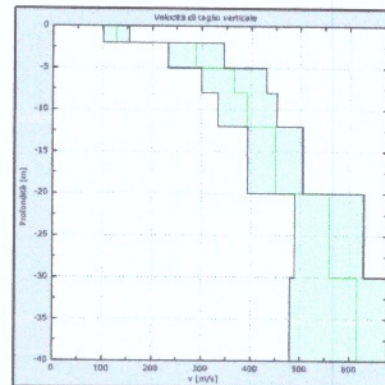
**Tracce sperimentali**



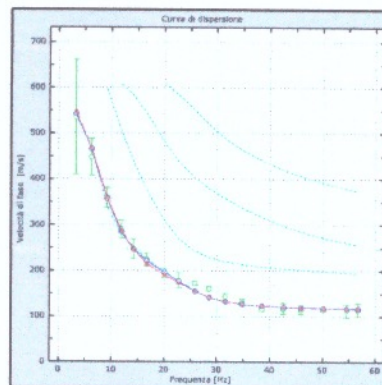
**Curva di dispersione**



**Profilo verticale Vs**



**Velocità numeriche**



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).





dott. Paola Russo

EOLOGO

M16

INDAGINE SISMICA MASW  
(Multichannel Analysis of Surface Waves)

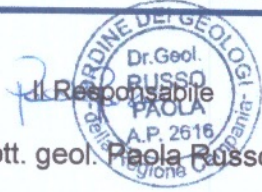
Comune: Santa Maria Capua Vetere (CE)

Oggetto: Relazione geologica inerente la  
"Sistemazione della struttura edilizia sita  
in Via Napoli 111, Santa Maria Capua  
Vetere (CE)"

## RAPPORTO TECNICO

18 Dicembre 2019

Il Responsabile  
dott. geol. Paola Russo



### INDICE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO
2. INDAGINE GEOFISICA MASW
  - 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE
  - 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA
3. ANALISI DEI DATI
4. CALCOLO DELLE VSeq

### RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE



## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini sismiche eseguite mediante metodologia MASW in data 18 Novembre 2019, nel Comune di Santa Maria Capua Vetere (CE), in Via Napoli, 111.

E' stata eseguita una campagna geofisica mediante acquisizione MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) ossia un' analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva, al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità equivalente, così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.

Di seguito vengono descritte: la metodologia d'indagine, lo schema operativo, le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, ed infine l'interpretazione dei dati elaborati.



Figura 1: Ubicazione dell'area

## 1. INDAGINE GEOFISICA MASW

### 2.1 METODOLOGIA D'INDAGINE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro  $V_{seq}$ .

Il contributo predominante delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

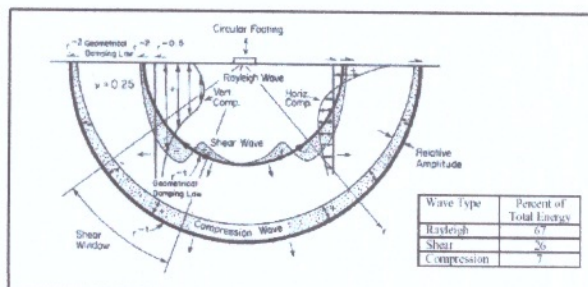


Fig. 2: Schema di propagazione delle onde di Rayleigh



In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che le onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazione sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano in profondità interessando gli strati più profondi del suolo. Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con massa battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m – 50 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

## 2.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (della SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz con una distanza intergeofonica pari a 1 m (stendimento complessivo 28 metri). Come sorgente di energia sismica per le onde di Rayleigh si è fatto uso di una mazza con maglio da 5 kg battente su una piastra di pvc duro posta sul suolo in linea con lo stendimento. La battuta è stata effettuata ad una distanza di 2 m e 3 m dal primo geofono.



Fig. 3: Strumentazione utilizzata

MASW		
N°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	Sismografo DoReMi a 24 canali della SARA
12	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Sorgente	Mazza battente su piattello in pvc duro



Figura 4: Ubicazione stendimento sismico



### 3. ANALISI DEI DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (MASW – V. Roma, 2007). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo. L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi la curva di dispersione combinata presentata in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 27 m).

STRATO	SPESSORE (m)	$V_s$ (m/s)	PROFONDITA'
1	2	155.000	- 2
2	3	227.550	- 5
3	3	247.700	- 8
4	5	283.970	- 13
5	5	364.430	- 18
6	12	452.790	- 30
7	0	487.680	- ∞

Tabella 1: Modello sismico monodimensionale M.A.S.W.

### 4. CALCOLO DELLE $V_{Seq}$

A partire dal modello sismico monodimensionale è possibile calcolare il valore delle  $V_{seq}$ , che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione delle onde di taglio. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  indica lo spessore dell' i-esimo strato;

$V_{s_i}$  indica la velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato;

$N$  indica il numero di strati;



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

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$V_{s \text{ eq MASW}} = 312 \text{ m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo C** (si veda la tabella seguente).

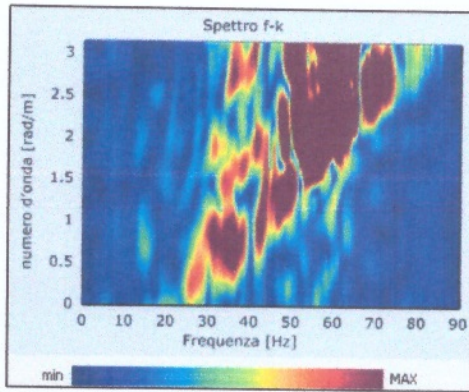
Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 metri.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o di terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s .
C	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 180 m/s e 360 m/s .</b>
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiore a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 100 m/s e 180 m/s .
E	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 metri.

Tabella 2: Categorie di sottosuolo dal D.M. 17/01/2018

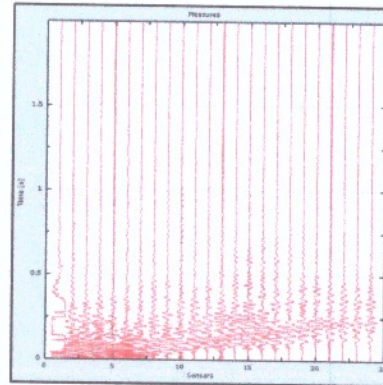


## Rappresentazioni grafiche MASW

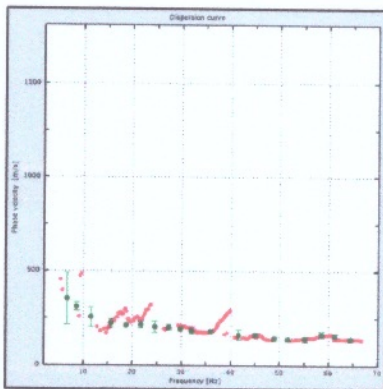
Spettro f – k



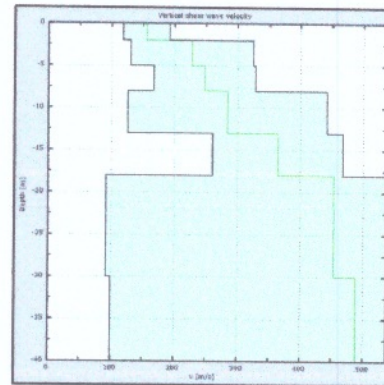
Tracce sperimentali



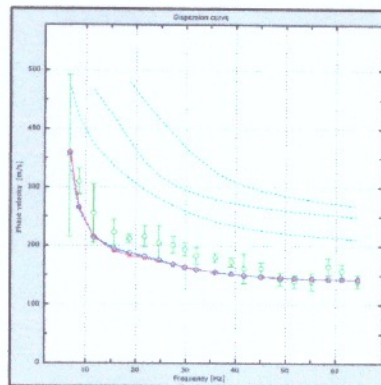
Curva di dispersione



Profilo verticale Vs



Velocità numeriche



Punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano),  
curva apparente (blu), curva numerica (rosso).



**DOTT. GIUSEPPE ANTONIO DIPLOMATICO**

*Geologo*

Via A. Grandi n°14 - 81055 - S. Maria Capua Vetere (CE)

☎ 328-9694771 – email: [gadiplomatico@virgilio.it](mailto:gadiplomatico@virgilio.it)

DICHIARAZIONE COPIA CONFORME INDAGINI PREGRESSE REALIZZATE  
SUL TERRITORIO DI S. MARIA C.V. UTILIZZATE PER LA REDAZIONE DELLO  
STUDIO GEOLOGICO E CARATTERIZZAZIONE SISMICA PER IL PUC

Il sottoscritto Giuseppe Antonio Diplomatico, nato a Liege (B) il 04/08/1957, CF: DPLGPP57M04Z103Z in qualità di Geologo incaricato della redazione delle indagini geologiche relative al PUC di Santa Maria Capua Vetere (CE), consapevole delle sanzioni penali nel caso di dichiarazioni mendaci, di formazione o uso di atti falsi, richiamate dall'art. 76 del D.P.R. n° 445 del 28/12/2000

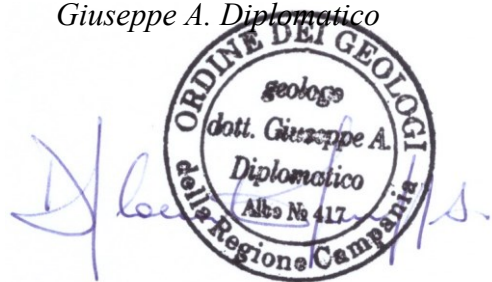
DICHIARA

Che la copia in formato digitale delle Indagini Sismiche MASW pregresse utilizzate per la redazione dello Studio Geologico del PUC presente **nell'ALLEGATO G2**, è una valida ed efficace copia conforme digitale di originale analogico.

S. Maria C.V., 03 novembre 2023

In fede

*Giuseppe A. Diplomatico*





Cognome... **DIPLOMATICO**  
 Nome... **GIUSEPPE ANTONIO**  
 nato il... **04/08/1957**  
 (atto n. **1919** P..... S.....)  
 a... **LIEGI** (.....) **BELGIO**  
 Cittadinanza... **ITALIANA**  
 Residenza... **SANTA MARIA CAPUA VETERE (CE)**  
 Via... **ACHILLE GRANDI**  
 Stato civile... **CONIUGATO**  
 Professione... **GEOLOGO**  
 CONNOTATI E CONTRASSEGNI SALIENTI  
 Statura... **1.68**  
 Capelli... **BRIZZOLATI**  
 Occhi... **MARRONI**  
 Segni particolari... **----**



Firma del titolare... *Giuseppe Diplomatico*  
 S. MARIA C.V. (CE) 12/04/2016



Il SINDACO  
**UFFICIALE D'ANAGRAFE**  
**Maria Rosaria Martorelli**

*Maria Rosaria Martorelli*



REPUBBLICA ITALIANA



COMUNE DI  
 SANTA MARIA CAPUA VETERE

**CARTA D'IDENTITA'**  
 N° **AX5803370**  
 DI  
**DIPLOMATICO**  
**GIUSEPPE ANTONIO**