

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

3. PROSPEZIONI SISMICHE BASATE SULL'ANALISI DELLE ONDE SUPERFICIALI DI RAYLEIGH

Quando un terreno viene sollecitato elasticamente, lungo l'interfaccia terreno-aria, si generano onde di Rayleigh attraverso l'interazione tra le onde di compressione P e le onde di taglio S.

In questo tipo di onde, le particelle descrivono un movimento di tipo ellittico la cui ampiezza decresce esponenzialmente con la distanza dalla superficie libera. L'asse maggiore dell'ellisse è normale alla superficie libera del mezzo ed alla direzione di propagazione delle onde e le particelle compiono questo movimento ellittico in senso retrogrado rispetto al verso di propagazione delle onde che vengono generate: tale movimento è giustificato dal fatto che nella vibrazione delle particelle le componenti orizzontali e verticali sono sfasate di 90°

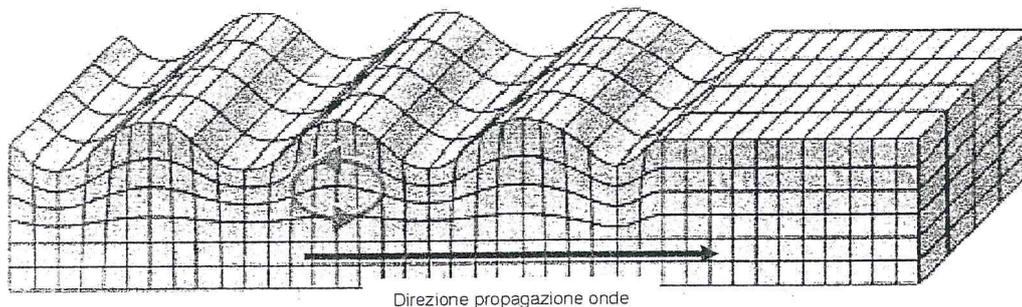


Fig. b) – Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto alla direzione di propagazione

E' noto che la propagazione delle onde superficiali, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una unica velocità ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità.

Questo comportamento viene definito dispersione in frequenza ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie.

Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie.

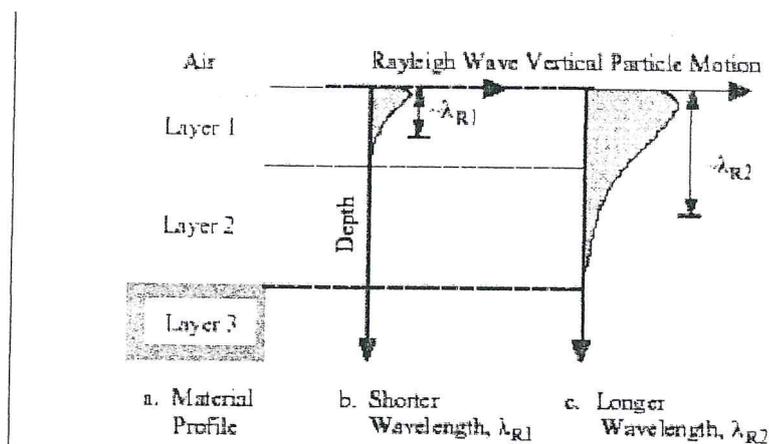


Fig. c) - Rappresentazione schematica della dipendenza della profondità di investigazione delle onde di Rayleigh dalla lunghezza d'onda (quindi frequenza), da Stoke II and Santamarina (2000)

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Dal punto di vista fisico, nel corso di una energizzazione sismica la percentuale di energia convertita in onde di Rayleigh è pari a circa 67%, quindi, molto superiore rispetto a quella convertita in onde P (7%) ed in onde S (26%).

La velocità di propagazione delle onde di Rayleigh (V_r) è pari a $0,91 V_s$ (Achenbach 1999) e ai fini pratici ciò si traduce nel fatto che misurando la V_r si ottiene la V_s con un errore di calcolo del tutto trascurabile.

I metodi basati sull'analisi delle onde superficiali di Rayleigh forniscono una buona risoluzione e non sono limitati, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità. Inoltre la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_P e dalla densità, è funzione innanzitutto della V_S , parametro di fondamentale importanza per la caratterizzazione geotecnica di un sito secondo quanto previsto dalle recenti normative antisismiche (O.P.C.M. 3274/03; O.P.C.M. 3431/05; D.M. 14 gennaio 2008).

Infatti, mentre la velocità delle onde P misurata in terreni saturi dipende in maniera sostanziale dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale, la velocità delle onde S è caratteristica delle vibrazioni trasmesse dal solo scheletro solido e, pertanto, a differenza delle onde P, risulta rappresentativa delle reali proprietà meccaniche del terreno.

Le tecniche di analisi delle onde di Rayleigh vengono realizzate con procedure operative meno onerose della comune sismica a rifrazione e delle prove in foro e hanno un grado di incertezza nella determinazione delle $V_S < 15\%$.

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

La modellazione del sottosuolo mediante l'impiego di comuni geofoni verticali a 4.5Hz e l'analisi delle onde superficiali di Rayleigh viene ottenuta con le seguenti metodologie: ReMi (Refraction Microtremor), FTAN (Frequency Time ANalysis), SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La tecnica ReMi, determinando velocità di fase sperimentali nel range di frequenze compreso tra 0Hz e 15 Hz, consente di raggiungere profondità ragguardevoli fornendo un profilo verticale medio delle VS relative al volume di sottosuolo sotteso dallo stendimento messo in opera (ben al di sotto dei 50 m fino anche a 100 m di profondità dal piano campagna in funzione della maggiore o minore rigidità del suolo). Questa tecnica viene estensivamente utilizzata negli Stati Uniti nell'ambito del NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) tanto che il software fornisce anche direttamente il valore di VS30 e la categoria della classificazione del suolo secondo la normativa americana.

Il metodo FTAN per la determinazione delle VS30 ha bisogno di un solo ricevitore e permette la definizione di un profilo medio su distanze di decine centinaia di metri. Inoltre il metodo fornisce valori di velocità delle onde di taglio in buon accordo con le misure in foro.

Il metodo SASW viene generalmente impiegato per la determinazione delle VS di strati superficiali (<30m) e per la determinazione delle proprietà elastiche di strade e pavimentazioni (Stokoe & Nazarian, 1985) e, pertanto, sembra essere tra i metodi non invasivi quello più popolare tra gli ingegneri.

La tecnica MASW, fondata sulla tecnica SASW, consente una dettagliatissima ricostruzione della distribuzione della velocità delle onde S nel sottosuolo.

3.1. METODO DI INDAGINE MASW

L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una efficiente ed accreditata metodologia sismica per la determinazione delle velocità delle onde di taglio VS. Tale metodo utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale. Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno.

La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW prevede tre passi fondamentali:

1. acquisizione multicanale dei segnali sismici, generati da una sorgente energizzante artificiale (maglio battente su piastra in alluminio), lungo uno stendimento rettilineo di sorgente-geofoni;
2. estrazione del modo fondamentale dalle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (una curva per ogni acquisizione); il modo fondamentale non è altro che un'onda semplice definita da una coppia di valori frequenza-numero d'onda, dove il numero d'onda è quello più grande;
3. inversione delle curve di dispersione per ottenere profili verticali 1D delle VS (un profilo verticale posizionato nel punto medio di ogni stendimento geofonico);
4. Conseguimento della velocità equivalente nei primi 30 m di profondità V_{s30} e da essa la categoria sismica del suolo, secondo la normativa sismica vigente.

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Quando vengono generate onde sismiche usando una sorgente impattante come una mazza/martello su una piastra vengono generate sia onde di volume (P ed S), sia onde di superficie (Rayleigh e Love), che si propagano in tutte le direzioni. Alcune di queste onde vengono riflesse e disperse quando incontrano oggetti superficiali o poco profondi (ad esempio, fondazioni di edifici, canali sotterranei, trovanti lapidei, ecc.) e diventano rumore.

Inoltre, vengono quasi sempre rilevate vibrazioni da rumore ambientale (noise) proveniente dal traffico veicolare, dall'attività industriale e, in generale, dall'attività umana.

Il vantaggio principale dell'approccio multicanale della tecnica MASW sta nella sua intrinseca capacità di distinguere tutte queste onde dovute al rumore e di isolarle dalle onde superficiali di Rayleigh evidenziando solo il modo fondamentale di oscillazione dei terreni. L'isolamento del modo fondamentale di oscillazione si basa su molteplici caratteristiche sismiche dei segnali.

Le proprietà della dispersione di tutti i tipi di onde (di volume e superficiali) sono visualizzate attraverso un metodo di trasformazione (basato sull'analisi spettrale dei segnali sismici) del campo d'onda che converte direttamente i segnali sismici acquisiti in una immagine dove un modello di dispersione è riconosciuto nella distribuzione dell'energia trasformata in oscillazioni.

Successivamente, il modo fondamentale (proprietà fondamentale della dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh) viene estratto da un modello specifico. Tutte le altre onde (riflesse, disperse, modi superiori delle onde superficiali, noise ambientale) vengono quindi rimosse durante il processo di elaborazione.

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

4. ATTREZZATURA UTILIZZATA E MODALITÀ DI ACQUISIZIONE DEI DATI

L'indagine è stata eseguita con un sismografo della SARA Electronics a 12/24 canali e 16 bit reali. Sono stati adoperati 12 geofoni "Geospace con frequenza di 4,5 Hz" collocati nel terreno lungo uno stendimento rettilineo.

L'interdistanza tra geofoni è stata posta a m di 2 m per uno stendimento complessivo di 22 metri.

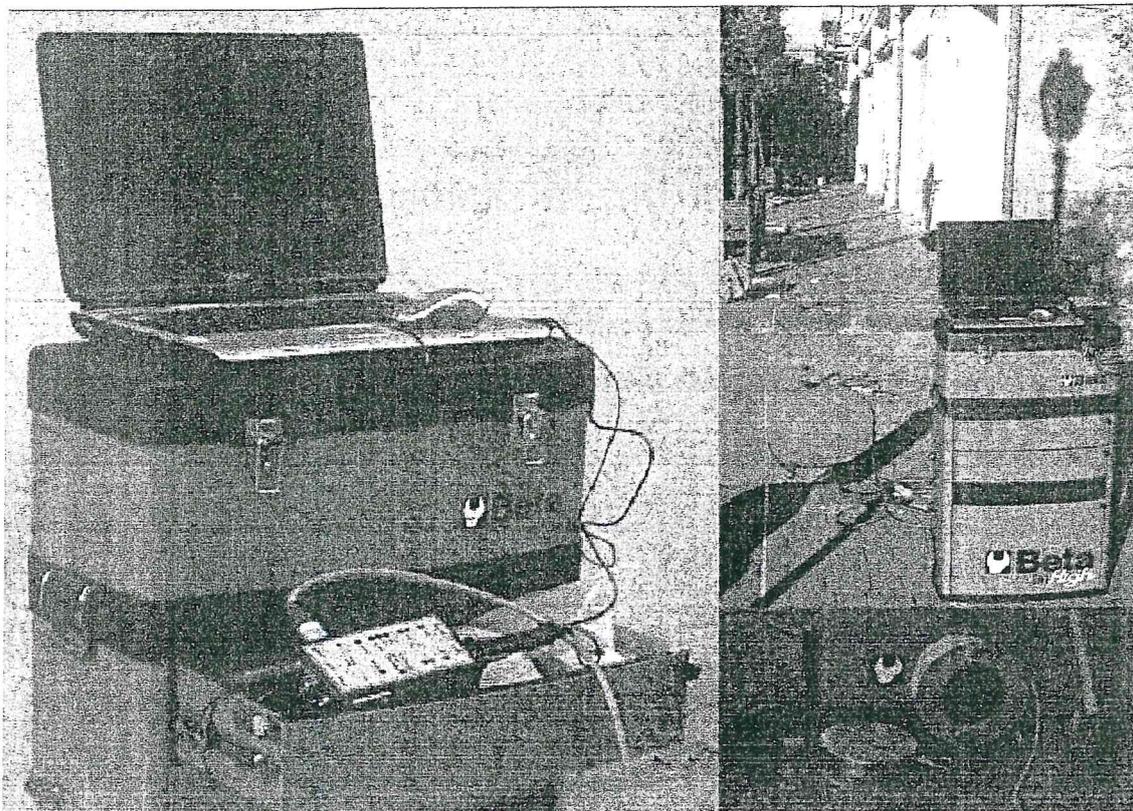


Fig. d) – Rappresentazione/configurazione strumentale tipo.

La lunghezza complessiva dello stendimento è stata sufficiente a determinare la sismostratigrafia dei terreni di sedime fino alla profondità di circa 30 m dal p.c.

Il sistema di energizzazione è costituito da mazza di battuta da 10 Kg battente su un piattello metallico, accoppiato al geofono sensore di start.

Sono state eseguite diverse registrazioni. Il dispositivo per la sollecitazione meccanica del suolo è stato posizionato, nel corso di ognuna delle acquisizioni, ad una distanza di 2,00 m (offset 2,00 metri) dal primo geofono e successivamente ad una distanza di 4,00 m (offset 4,00 metri) dal primo geofono.

5. ELABORAZIONE DEI DATI E RISULTATI

5.1 Elaborazione dei dati

L'interpretazione è stata eseguita utilizzando un software specializzato (MASW ver. 3.0.0.2 con regolare licenza rilasciata dalla Roma & Associati s.r.l.).

5.2 Dati sperimentali

Nome del file delle tracce	
Numero di ricevitori	12
Distanza tra i sensori:.....	2m
Numero di campioni temporali.....	2000
Passo temporale di acquisizione	1ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi	12
L'intervallo considerato per l'analisi comincia a	0ms
L'intervallo considerato per l'analisi termina a	1999ms
I ricevitori non sono invertiti (l'ultimo ricevitore è l'ultimo per l'analisi)	

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

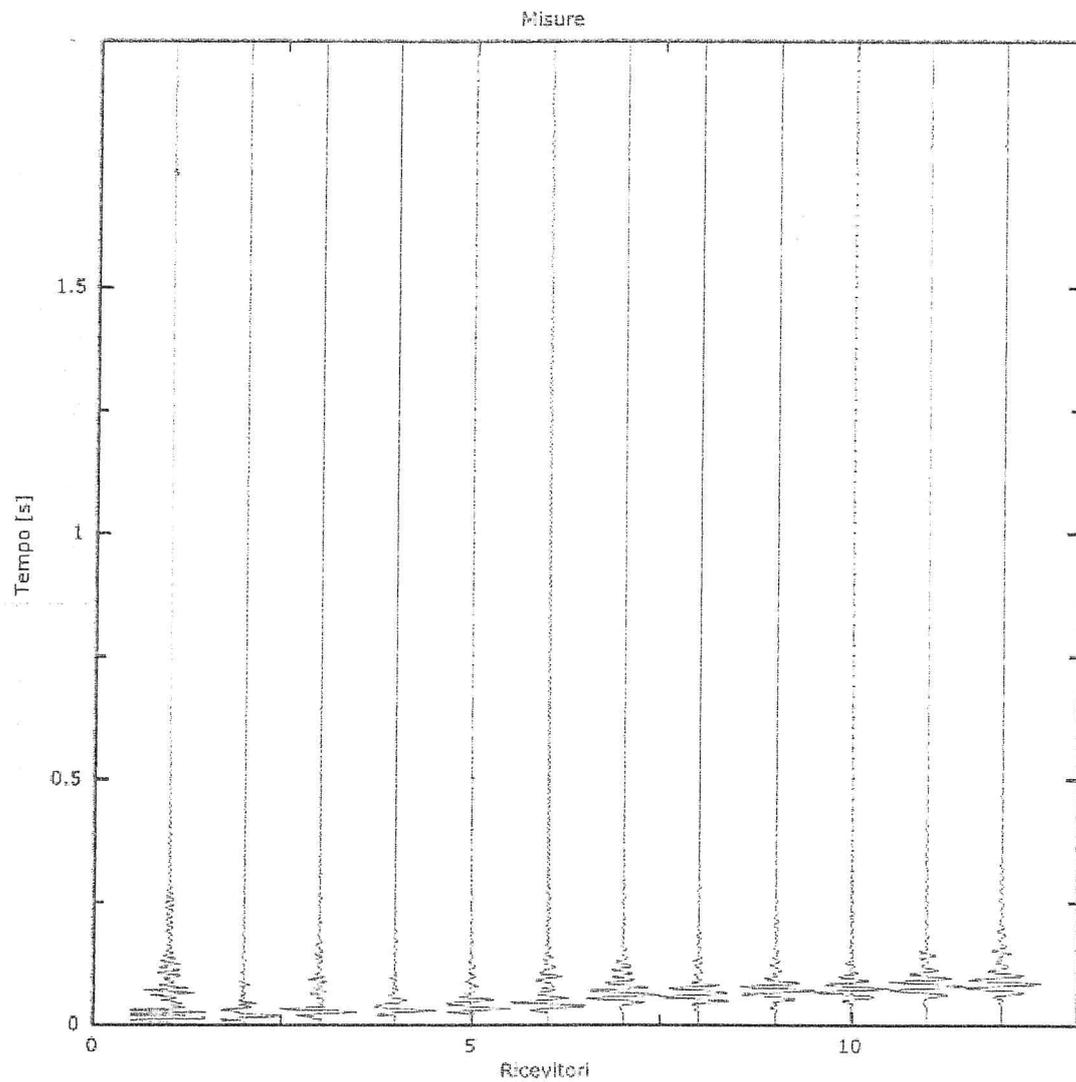


Figura 1: Tracce sperimentali

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

5.3 Risultati delle analisi

Frequenza finale70Hz
Frequenza iniziale2Hz

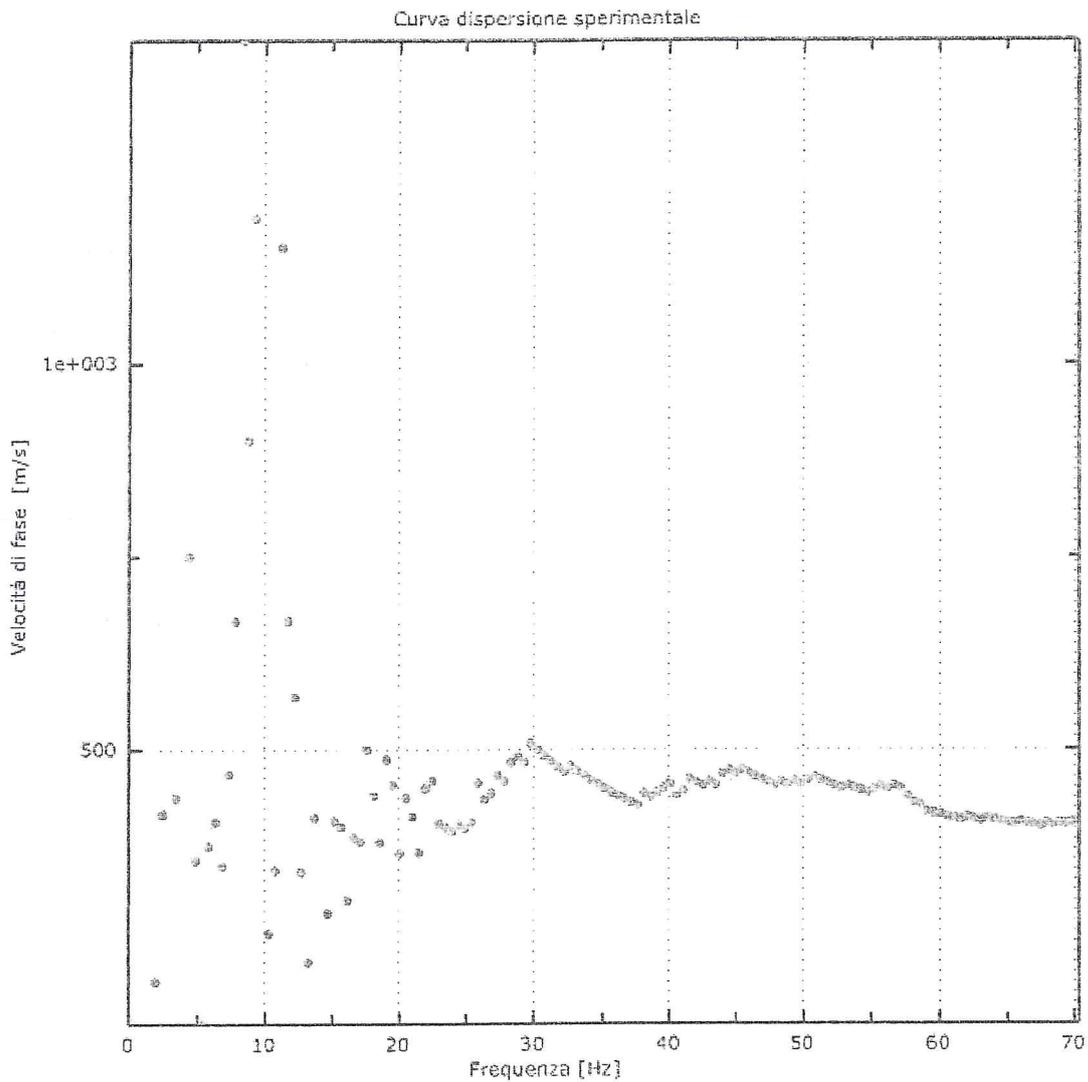


Figura 2: Curva dispersione sperimentale

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

5.4 Curva di dispersione

Tabella 1: Curva di dispersione

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
2.41168	417.382	348.729	486.034
6.49538	408.523	331.013	486.034
13.7019	415.167	364.232	466.102
17.2251	388.592	344.3	432.884
21.0686	415.167	348.729	481.604
23.9512	399.665	353.159	446.171
26.4334	441.742	397.45	486.034
28.2751	486.034	435.098	536.969
30.2769	499.321	457.244	541.398
32.2787	477.175	439.527	514.823
34.6008	457.244	424.025	490.463
37.1632	437.313	397.45	477.175
39.8055	446.171	401.879	490.463
43.1686	457.244	393.021	521.467
46.5316	466.102	424.025	508.179
50.215	459.459	435.098	483.819
52.3769	450.6	426.24	474.961
54.2186	455.029	432.884	477.175
56.4606	450.6	435.098	466.102
58.1422	437.313	406.309	468.317
60.4643	412.952	379.734	446.171
62.4661	415.167	379.734	450.6
64.7081	406.309	366.446	446.171
67.4306	410.738	381.948	439.527
69.9929	410.738	384.163	437.313

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

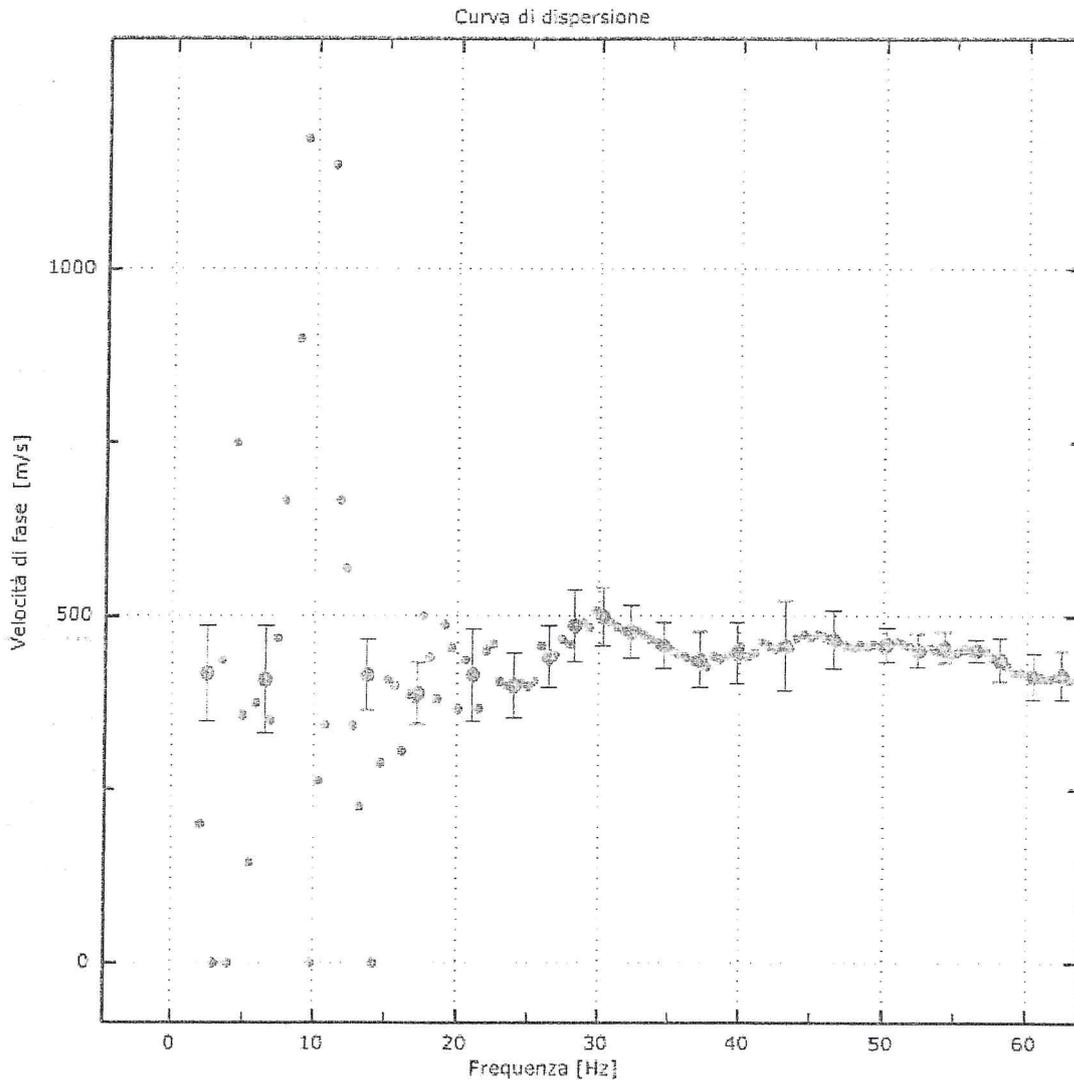


Figura 3: Curva di dispersione

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

5.5 Profilo in sito

Numero di strati (escluso semispazio).....	9
Spaziatura ricevitori [m].....	2m
Numero ricevitori.....	12
Numero modi.....	3
Numero iterazioni.....	5
Massimo errore [%].....	2.000000e-001
Consenti forti contrasti di rigidità tra 2 strati consecutivi	

Strato 1

h [m].....	2
z [m].....	-2
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Vs [m/s].....	456
Vp [m/s].....	745
Vs min [m/s].....	228
Vs max [m/s].....	913
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s].....	456

Strato 2

h [m].....	3
z [m].....	-5
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Vs [m/s].....	501
Vp [m/s].....	818
Vs min [m/s].....	250
Vs max [m/s].....	1001
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s].....	501

Strato 3

h [m].....	3
z [m].....	-8
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Committente: Ing. Gaetano Vedda	16

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Vs [m/s].....	555
Vp [m/s].....	906
Vs min [m/s].....	277
Vs max [m/s].....	1110
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s].....	555
Strato 4	
h [m].....	4
z [m].....	-12
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Vs [m/s].....	432
Vp [m/s].....	705
Vs min [m/s].....	216
Vs max [m/s].....	864
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s].....	432
Strato 5	
h [m].....	4
z [m].....	-16
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Vs [m/s].....	461
Vp [m/s].....	753
Vs min [m/s].....	231
Vs max [m/s].....	923
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s].....	461
Strato 6	
h [m].....	5
z [m].....	-21
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Vs [m/s].....	461

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Vp [m/s].....	753
Vs min [m/s].....	231
Vs max [m/s].....	923
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s].....	461

Strato 7

h [m].....	5
z [m].....	-26
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Vs [m/s].....	454
Vp [m/s].....	741
Vs min [m/s].....	227
Vs max [m/s].....	908
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s].....	454

Strato 8

h [m].....	6
z [m].....	-32
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Vs [m/s].....	454
Vp [m/s].....	741
Vs min [m/s].....	227
Vs max [m/s].....	908
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s].....	454

Strato 9

h [m].....	0
z [m].....	-00
Densità [kg/m ³].....	1800
Poisson.....	0.2
Vs [m/s].....	464
Vp [m/s].....	758

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Vs min [m/s]	232
Vs max [m/s]	928
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s]	464

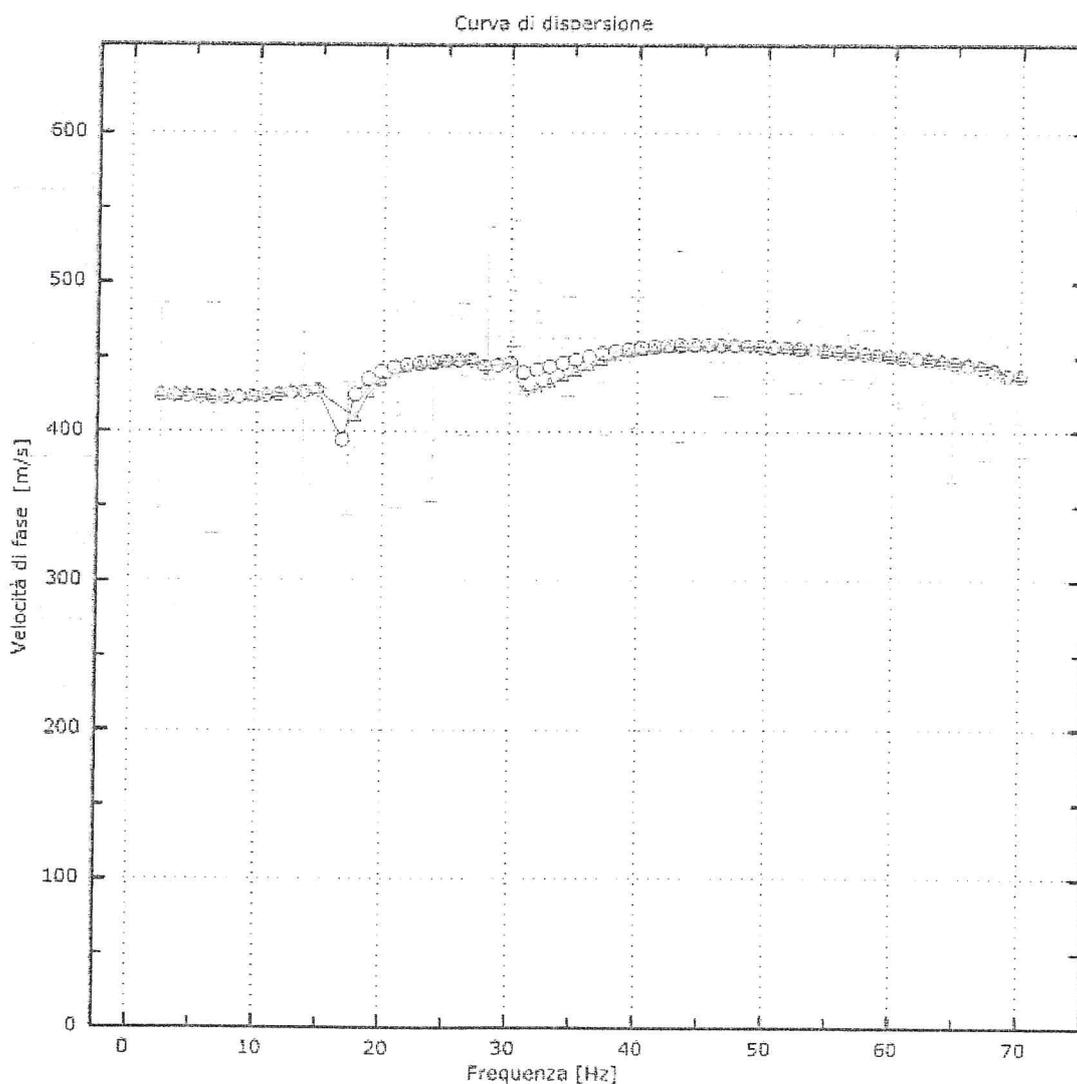


Figura 4: Velocità numeriche – punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano), curva apparente(blu), curva numerica (rosso)

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

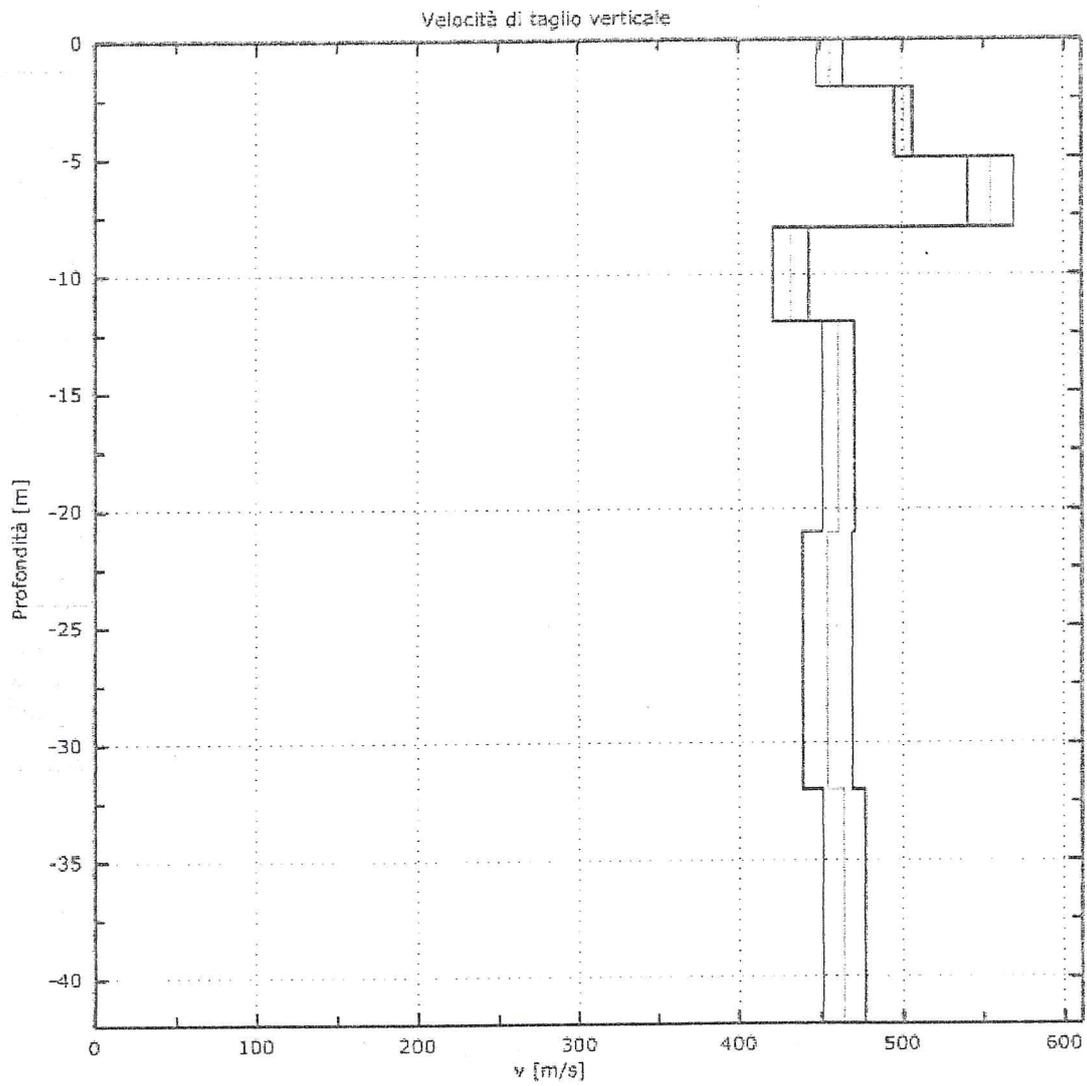


Figura 5: Velocità

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

6. Risultati finali

Piano di riferimento z=0 [m]..... 0

Vs30 [m/s]..... 456

La normativa applicata è il DM 14 gennaio 2008

Il sito appartiene alle classi A, B, C, D, E o S1 (alluvionale, ghiaia, sabbia, limo, argilla, roccia).

Il sito non è suscettibile di liquefazione e non è argilla sensitiva.

L'unità geotecnica dello strato rigido è la numero 9

Le caratteristiche meccaniche degli strati migliorano gradualmente con la profondità

Tipo di suolo B

categoria dei suoli (O.P.C.M. 3274;D.M. 14.01.2008); in evidenza il parametro Vs30 e le categorie dei litotipi.

TIPO DI TERRENO	PROFILO STRATIGRAFICO	PARAMETRI		
		Vs30 m/s	N _{SPT}	Cu (kPa)
A	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi	> 800		
B	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	< 800 > 360	> 50	> 250
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero 15 < NSPT30 < 50 nei terreni a grana grossa e 70 < cu30 < 250 kPa nei terreni a grana fina).	< 360 > 180	< 50 > 15	< 250 > 70
D	Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti	< 180	< 15	< 70
E	Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di Vs30 simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con VS30 > 800m/s		-	-
S1	Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità (PI > 40) e contenuto di acqua	< 100	-	< 20 > 10
S2	Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti		-	-

Data: dicembre 2011

Lo sperimentatore

Committente: Ing. Gaetano Vedda

21

Oggetto: Verifiche sismiche scuola materna B. Buoizzi – Vittoria (RG). – Ordinanza 3505/06 D.P.C.M. 05/03/2007.

Indagine Geofisica con la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)



MASW stendimento

