

COMUNE DI PESARO

Provincia di Pesaro e Urbino

Lavoro:

**PIANO PARTICOLAREGGIATO INDIVIDUATO DAL P.R.G. COMUNE DI PESARO
COME U.M.I. 2.3.3**

Località:

Chiusa di Ginestreto

Data:

Ottobre 2018

Elaborato:

**STUDIO DI FATTIBILITA' GEOLOGICA
AGGIORNAMENTO**
Indagine geofisica

I professionisti:

Studio Associato Geologi
P. Rondoni & M. Darder
info@geologipesaro.it

Studio di Geologia
S. Caturani & V. Mariani

**PIANO PARTICOLAREGGIATO INDIVIDUATO DAL P.R.G. DEL COMUNE DI
PESARO COME U.M.I. 2.3.3.**

STUDIO DI FATTIBILITA' GEOLOGICA

AGGIRNAMENTO

Indagine geofisica

1. PREMESSA

Il presente studio è stato condotto ad integrazione della relazione geologica presentata a corredo del progetto di fattibilità "Piano Particolareggiato individuato dal P.R.G. del comune di Pesaro come U.M.I. 2.3.3.", redatta sempre dagli scriventi, al fine di documentare le caratteristiche sismiche dell'area.

Lo studio geofisico per la determinazione della categoria di suolo è stato eseguito ai sensi ed in applicazione della normativa vigente (NTC2018) e si è basato su una prova sismica tipo MASW.

Lo studio è corredato del seguente allegato:

All.to1 Indagine sismica

2. INDAGINE GEOFISICA

Al fine di caratterizzare il profilo del sottosuolo dal punto di vista sismico così come prescritto dalle NTC2018 e permettere l'assegnazione della categoria di sottosuolo, si sono considerati gli esiti di un'indagine geofisica, eseguita nell'area dell'intervento, consistente in un profilo sismico con metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La strumentazione di prova è composta da:

- un acquisitore a 24 canali della SARA Electronics Instruments a 16 bit (registratore DOREMI)
- 24 geofoni a frequenza di 4.5 Hz ed un pc.

Come sistema di energizzazione è stata utilizzata una mazza di 8 kg battente su un piattello metallico.

L'indagine MASW è stata realizzata predisponendo una stendimento lineare di 48 m di lunghezza con 24 geofoni a 4.5 Hz equidistanziati di 2.0 m.

Per l'acquisizione dei dati sono state effettuate 4 energizzazioni disposte alle estremità del profilo ad una distanza di 2 e 3 m dal primo e dall'ultimo geofono. Per ogni punto di energizzazione sono stati generati 3 impulsi sismici (shots). I dati sono stati elaborati tramite il software MASW (V. Roma, 2007).

L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "f-k" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica ed in cui è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie.

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.

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione del 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 "fittine" con i valori sperimentali.

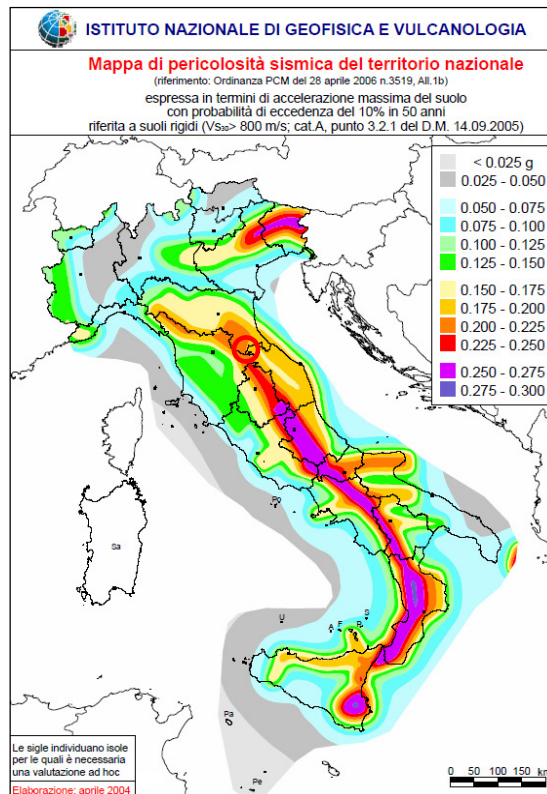
Nell'All.to 1 (Indagine geofisica) si riporta integralmente l'esito dell'indagine suddetta.

3. RISCHIO SISMICO

Il rischio sismico (R) è inteso come la risultante tra tre diverse componenti: $R = P \times E \times V$ intendendo con: P = "pericolosità sismica" cioè la sismicità di un territorio, ovvero la forza e frequenza con cui un terremoto si può manifestare in un determinato periodo di tempo; E = "esposizione" cioè il valore, la qualità, la consistenza e la dislocazione dei beni presenti sul territorio; V = "vulnerabilità sismica" ovvero la propensione di una struttura a subire un danno di un determinato livello a fronte di un evento sismico.

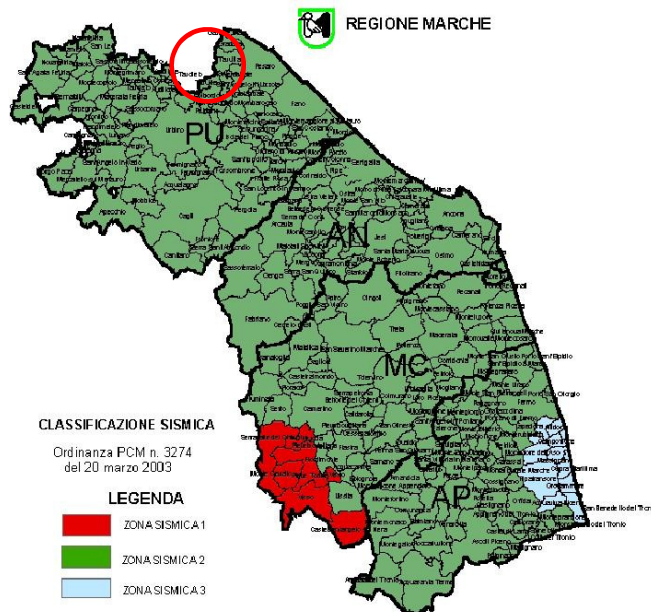
Non essendo possibile intervenire sulla "pericolosità" (che è una caratteristica intrinseca del territorio) la riduzione del rischio sismico è possibile solo cercando di ubicare gli interventi urbanistici in zone esposte a minor pericolo e garantendo le migliori qualità in termini di progettazione e realizzazione al fine di diminuire la loro vulnerabilità. La componente "pericolosità" del rischio sismico è costituita da due parti: la "pericolosità sismica di base" che deriva dalla sismicità dell'area (energia tipo e frequenza dei terremoti); la "pericolosità sismica locale" che risulta legata a fattori geologici/stratigrafici e morfologici che sono in grado di modificare ed amplificare il moto sismico in superficie.

Combinando i dati della pericolosità sismica di base con quelli degli effetti locali è possibile giungere alla definizione di una "azione sismica di progetto" sulla base della quale eseguire la progettazione sismica dei manufatti sul territorio.



Pericolosità sismica di base

Il territorio di Pesaro con Ordinanza P.C.M. n°3274 del 23/03/03 è stato classificato in zona sismica 2.



Con l'entrata in vigore del D.M.17/01/18 (NTC 2018) la stima della pericolosità sismica è stata definita attraverso un approccio "sito dipendente" e non più tramite un criterio "zona dipendente", l'azione di progetto in base alla quale valutare il rispetto dei diversi stati limite presi in considerazione, viene definita partendo dalla "pericolosità di base" del sito di intervento che è l'elemento essenziale di conoscenza per la determinazione dell'azione sismica.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni contengono i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima al sito), F_0 (valore max del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e T^*c (periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale) per 10751 punti della superficie d'Italia che rappresentano il reticolo di riferimento.

La definizione della pericolosità sismica di base per il sito in oggetto è stata fatta mediante interpolazione dei punti del reticolo di riferimento considerando i seguenti aspetti:

1. coordinate (ED50): Latitudine 43.871924° - Longitudine -12.819676° *.
2. l'intervento previsto è considerato in Classe III.
3. La vita nominale considerata è di 50 anni.

* Le coordinate si riferiscono a zone in cui si prevedono opere in ca.

Classi d'Uso secondo le NTC 2018.

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Per definire "l'azione sismica di progetto" è necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale che, nell'approccio semplificato (3.2.2. NTC 2018), si basa sulla individuazione della categoria di sottosuolo e della condizioni topografiche a cui appartiene il sito di progetto.

I risultati dell'indagine geofisica eseguita nel lotto hanno permesso di verificare che le onde di taglio equivalenti per il sito in oggetto assumono velocità di 491 m/s pertanto il terreno è ascrivibile alla Categoria di sottosuolo B.

Categorie di sottosuolo secondo le NTC 2018.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
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 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 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 superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 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 m.

L'area ricade in una zona in cui può essere assunta la categoria topografica T1.

Categorie topografiche secondo le NTC 2018.

Tab. 3.2.III – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Sulla base delle tabelle dei parametri spettrali fornite dal ministero è possibile ricavare i seguenti dati:

STATO LIMITE	Tr (anni)	ag (g)	Fo	Tc' (s)
Operatività (SLO)	45	0,062	2,513	0,278
Danno (SLD)	75	0,080	2,534	0,283
Salvaguardia Vita (SLV)	712	0,218	2,507	0,305
Prevenzione collasso (SLC)	1462	0,285	2,497	0,318

COEFFICIENTI SISMICI	SLO	SLD	SLV	SLC
Ss Amplificazione stratigrafica	1,20	1,20	1,18	1,12
Cc Coeff. funz. Categoria	1,42	1,41	1,39	1,38
St Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00	1,00
kh	0,015	0,019	0,072	0,089
kv	0,007	0,010	0,036	0,045
Amax m/sec²	0,729	0,941	2,256	3,126
Beta	0,200	0,200	0,280	0,280

ALLEGATI

All.to1 Indagine sismica

**INDAGINE SISMICA MASW**

In località GINESTRETO
in Comune di PESARO

RELAZIONE GEOFISICA

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 68/10	N. pag.: 19	Allegati: 0
00	14/10/10	emissione	G. Venturini	M. Mularoni
<i>Rev.</i>	<i>Data</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Elaborato</i>	<i>Controllato</i>
				<i>Approvato</i>



INDICE

1 - PREMESSA	3
2 - INDAGINE MASW	4
2.1 - DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA MASW	4
2.2 - PROSPEZIONI SISMICHE MASW	6
2.3 - STRUMENTAZIONE, MODALITA' DI ACQUISIZIONE.....	10
3 - ELABORAZIONE DATI	11
3.1 - DATI SPERIMENTALI.....	11
3.2 - RISULTATI DELLE ANALISI	11
3.3 - CURVA DI DISPERSIONE.....	12
3.4 - PROFILO IN SITO.....	14
3.5 - RISULTATI FINALI E CALCOLO DELLE Vs30.....	17

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
<i>Rev.</i>	<i>Data</i>	<i>Elaborato</i>	<i>Controllato</i>	<i>Approvato</i>

1 - PREMESSA

La presente relazione riporta le elaborazioni ed i risultati ottenuti dall'esecuzione di un' indagine geofisica consistente in un profilo sismico con metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) effettuato in località Ginestreto in Comune di PESARO al fine di caratterizzare il profilo del sottosuolo.

La campagna di indagine è stata eseguita in data 27 settembre 2010 allo scopo di definire la classificazione sismica del suolo per il calcolo dell'azione sismica di progetto ricostruendo, per l'area in oggetto, l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità (V_s -z) e determinando il parametro V_s30 in accordo con O.P.C.M. 3274 e s.m.i, D.M.14.09.2005 e D.M. 14.01.2008.

Nei capitoli successivi verranno descritte le modalità d'esecuzione delle misure sperimentali e l'interpretazione geofisica delle stesse.

In Figura 1 si riporta l'ubicazione delle indagini integrate eseguite.

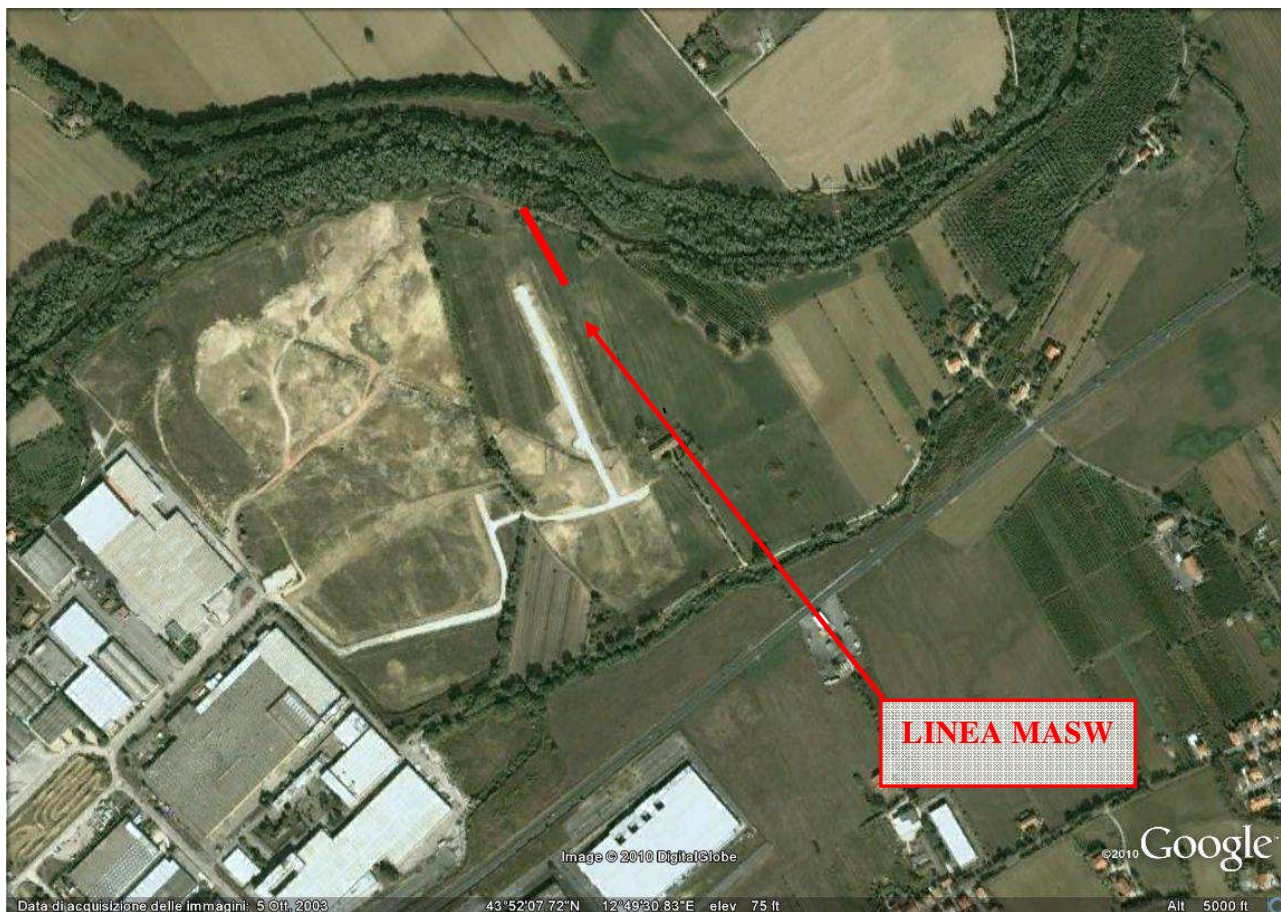


Fig. 1 – Foto aerea da Google Earth con ubicazione dell' indagine geofisica eseguita.

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

2 – INDAGINE MASW

2.1 – DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA MASW

Le onde di Rayleigh sono polarizzate in un piano verticale (Fig. 2) e si generano in corrispondenza della superficie libera del mezzo quando viene sollecitato acusticamente. In questo tipo di onde le particelle descrivono un movimento di tipo ellittico la cui ampiezza decresce esponenzialmente con la distanza dalla superficie libera. L'asse maggiore delle ellissi è normale alla superficie libera del mezzo ed alla direzione di propagazione delle onde e le particelle compiono questo movimento ellittico in senso retrogrado alla direzione di propagazione delle onde che vengono così generate.

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



Fig. 2 - Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto al senso di propagazione dell'onda.

La determinazione della velocità delle onde di taglio V_s tramite le misure delle onde superficiali di Rayleigh risulta particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti e ambienti rumorosi poiché la percentuale di energia convertita in onde di Rayleigh è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde P (7%) ed S (26%).

Inoltre la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_p e dalla densità, è funzione innanzitutto della V_s , parametro di fondamentale importanza per la caratterizzazione geotecnica di un sito secondo quanto previsto dall'O.P.C.M. 3274/03. Infatti, mentre la velocità delle onde P misurata in terreni saturi dipende in maniera sostanziale dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale, la velocità delle onde S è caratteristica delle vibrazioni trasmesse dal solo scheletro solido e, pertanto, a differenza delle onde P , risulta rappresentativa delle reali proprietà meccaniche del terreno.

La proprietà fondamentale delle onde superficiali di Rayleigh, sulla quale si basa l'analisi per la determinazione delle V_s , è costituita dal fenomeno della dispersione che si manifesta in mezzi stratificati (Fig. 3).

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

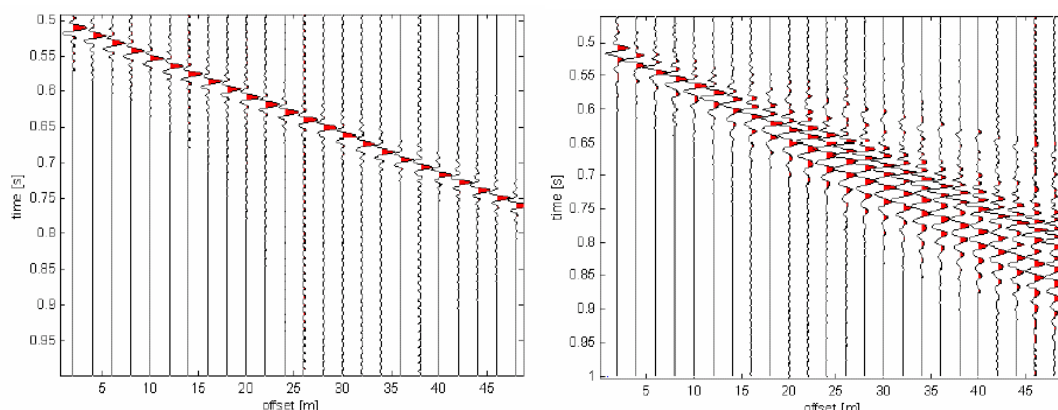


Fig. 3 – Segnali sismici che evidenziano (in rosso) le onde superficiali di Rayleigh in un mezzo non stratificato (a sinistra) e in un mezzo stratificato (a destra). Risulta evidente il fenomeno della dispersione delle onde superficiali di Rayleigh in un mezzo stratificato.

Pertanto, analizzando la curva di dispersione, ossia la variazione delle velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della lunghezza d'onda (o della frequenza, che è l'inverso della lunghezza d'onda), è possibile determinare la variazione della velocità delle onde di taglio con la profondità tramite il processo d'inversione (Fig. 4).

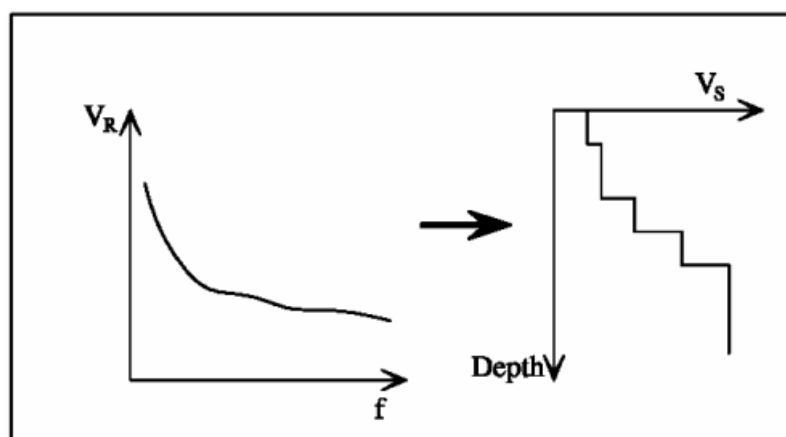


Fig. 4 – Velocità delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza (a sinistra) e profilo di velocità delle onde di taglio in funzione della profondità (a destra) ricavato tramite processo d'inversione.

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

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 tecniche: ReMi (Refraction Microtremor), FTAN (Frequency Time Analysis), SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

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

2.2 – PROSPEZIONI SISMICHE MASW

L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh – MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) – è un' efficiente metodologia sismica per la determinazione delle velocità delle onde di taglio V_s .

Tale metodo utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale. Le onde di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali, basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno.

Il contributo predominante alle 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. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. And Richards, P.G., 1980), detto in maniera equivalente, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. 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, mentre le onde a bassa frequenza raggiungono gli strati più profondi.

Il metodo di indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, D.J., 1999). Il metodo utilizzato nell'indagine è quello attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente e sono misurate da uno stendimento lineare di geofoni). Tal e metodo consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenza compreso tra 5Hz e 70 Hz, quindi dà informazioni nei primi 30-50 m, in funzione della rigidità del suolo.

La metodologia MASW non è influenzata dai fenomeni di inversione di velocità (strati soffici compresi tra strati più rigidi) o presenza di falde acquifere superficiali consentendo di individuare il profilo di velocità V_s anche in presenza di contrasti di rigidità fra gli strati del suolo.

Considerando un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo, si dimostra che la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh è indipendente dalla frequenza e che il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi ad una profondità circa pari ad una lunghezza d'onda. Ciò vuol dire che la profondità raggiunta dipende dalla lunghezza d'onda e che, a diverse lunghezze d'onda corrisponde la stessa velocità di fase (VR). In un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito cioè da strati aventi proprietà meccaniche differenti, il comportamento delle onde superficiali è differente.

In particolare, la propagazione presenta un comportamento dispersivo (a frequenze diverse corrispondono diverse velocità di fase). Ciò vuol dire che lunghezze d'onda diverse interessano strati diversi ai quali sono associate proprietà meccaniche diverse: ogni lunghezza d'onda si propaga ad una velocità di fase che dipende dalle caratteristiche dello strato interessato dalla propagazione.

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

Quindi, nel caso di un mezzo eterogeneo, le onde superficiali non hanno una singola velocità ma una velocità di fase che è funzione della frequenza: tale fenomeno, dipende dalla distribuzione spaziale delle proprietà sismiche del sottosuolo è noto come dispersione geometrica e la relazione che lega la frequenza alla velocità di fase prende il nome di curva di dispersione.

Alle alte frequenze, la velocità di fase coincide con la velocità delle onde di Rayleigh dello strato più superficiale, mentre, alle basse frequenze, l'effetto degli strati più profondi diventa importante, e la velocità di fase tende asintoticamente alla velocità dello strato più profondo come se questo fosse esteso infinitamente in profondità. La curva di dispersione gioca un ruolo centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni, infatti, è funzione delle caratteristiche di rigidità del mezzo e, posto di riuscire a misurarla sperimentalmente, può essere utilizzata per un processo inverso avente come obiettivo la stima delle caratteristiche di rigidità stesse.

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse lunghezze d'onda. Di conseguenza, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase, ad ognuna delle quali corrisponde un modo di propagazione, e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente.

La curva di dispersione ottenuta elaborando i dati derivanti dalle indagini sismiche con il metodo SWM è una curva apparente, derivante dalla sovrapposizione delle curve relative ai vari modi di vibrazione, e che per i limiti indotti dal campionamento non necessariamente coincide con i singoli modi nei diversi intervalli di frequenza campionati.

Il processo di caratterizzazione basato sul metodo delle onde superficiali può essere suddiviso nelle tre fasi di:

- 1) Acquisizione
- 2) Processing
- 3) Inversione

1. Ripetute acquisizioni multicanale dei segnali sismici (Fig. 6), generati da una sorgente energizzante artificiale (mazza battente su piastra), lungo uno stendimento rettilineo di geofoni, energizzando ai due estremi dello stendimento. (Fig. 5);

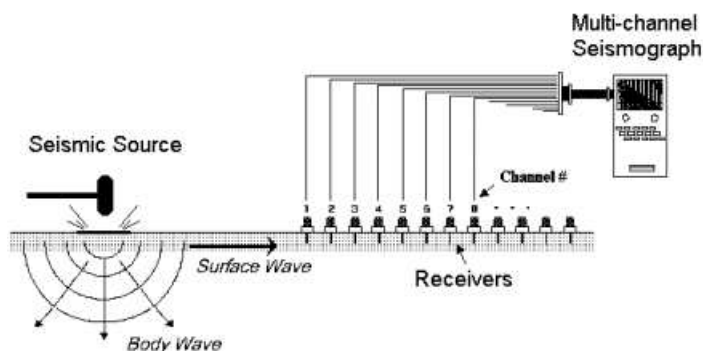


Fig. 5 – Schema di acquisizione dei segnali sismici con metodo MASW.

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

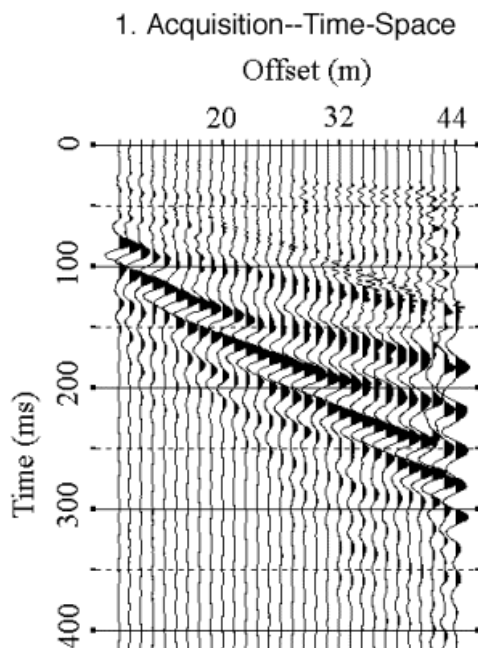


Fig. 6 – Segnali sismici acquisiti dai geofoni lungo uno stendimento.

2. Estrazione del modo fondamentale dalle curve di dispersione delle velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (una curva per ogni acquisizione) (Fig. 7);

2. Dispersion Curve Extraction--Frequency-Phase Velocity

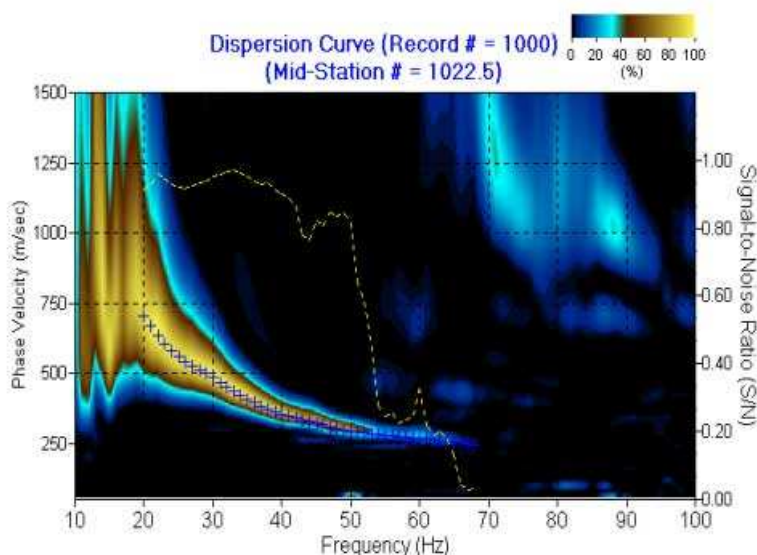


Fig. 7 – Curva di dispersione delle velocità di fase in funzione della frequenza delle onde superficiali di Rayleigh.

I dati acquisiti vengono cioè sottoposti ad una fase di processing che consente di stimare la curva di dispersione caratteristica del sito in oggetto, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza. Esistono diverse tecniche di processing per estrarre dai sismogrammi le

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

caratteristiche dispersive del sito. La metodologia più diffusa è l'analisi spettrale in dominio f-k (frequenza-numero d'onda).

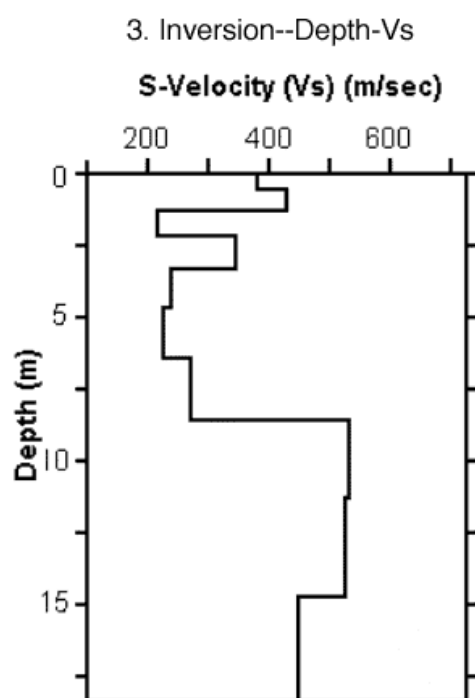
I dati sismici registrati vengono sottoposti ad una doppia trasformata di Fourier che consente di passare dal dominio x-t (spazio-tempo) al dominio f-k. Lo spettro f-k del segnale consente di ottenere una curva di dispersione per le onde di Rayleigh, nell'ipotesi che nell'intervallo di frequenze analizzato le onde che si propagano con il maggiore contenuto di energia siano proprio le onde di Rayleigh, e se le caratteristiche del sito sono tali da consentire la propagazione delle onde superficiali e un comportamento dispersivo delle stesse. Si dimostra infatti che la velocità delle onde di Rayleigh è associata ai massimi dello spettro f-k; si può ottenere facilmente una curva di dispersione individuando ad ogni frequenza il picco spettrale al quale è associato un numero d'onda k e quindi una velocità delle onde di Rayleigh V_r , determinabile in base alla teoria delle onde dalla relazione:

$$V_r(f) = 2\pi f/k$$

Riportando le coppie di valori (V_r, f) in un grafico si ottiene la curva di dispersione utilizzabile nella successiva fase di inversione.

In sintesi dal calcolo della curva di dispersione sperimentale si passa al calcolo della curva di dispersione apparente numerica mediante il metodo Roma (2001) ed al calcolo della dispersione effettiva numerica mediante il metodo Lai-Rix (1998).

3. Inversione delle curve di dispersione per ottenere profili verticali 1D delle V_s (Fig. 8) (un profilo verticale per ogni curva di dispersione, posizionato nel punto medio di ogni stendimento geofonico);



Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	


	SERVIZI GEOLOGICI E GEOTECNICI LABORATORIO TERRE	Indagine geofisica	MOD. 85 REV. 00 DATA 08/03/10
	RIMINI	SISTEMA QUALITA'	PAG. 10 DI 19

Fig. 8 – Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) ottenuto dalla curva di dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh attraverso l'inversione di un modello multistrato di terreno. La velocità delle onde di taglio è approssimativamente pari a $1.1V_R$ (V_R =velocità delle onde di Rayleigh) e la profondità è pari a circa 0.4λ (λ =lunghezza d'onda).

La fase di inversione –deve essere preceduta da una parametrizzazione del sottosuolo che viene di norma schematizzato come un mezzo visco-elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati. Il processo di inversione è iterativo: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati ed eventualmente delle informazioni note a priori riguardo la stratigrafia, il problema viene risolto diverse volte variando i parametri che definiscono il modello.

Il processo termina quando viene individuato quel set di parametri di modello che minimizza la differenza tra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione sintetica). Usualmente, algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati vengono utilizzati per automatizzare la procedura.

Lo scopo è quello di raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la curva di dispersione sperimentale e la curva di dispersione numerica corrispondente al modello di suolo assegnato; l'affidabilità del profilo di velocità V_s trovato durante il processo di inversione è valutata tramite la definizione dell'errore relativa tra le due curve.

2.3 – STRUMENTAZIONE, MODALITA' DI ACQUISIZIONE

La strumentazione utilizzata è composta da: un acquisitore a 24 canali della SARA Electronics Instruments a 16 bit (registratore DOREMI), 24 geofoni a frequenza di 4.5 Hz ed un pc. Come sistema di energizzazione è stato utilizzata una mazza di 8 kg battente su un piattello metallico.

L'indagine MASW è stata realizzata predisponendo una stendimento lineare di 48 m di lunghezza con 24 geofoni a 4.5 Hz equidistanziati di 2.0 m.

Per l'acquisizione dei dati sono state effettuate 4 energizzazioni disposte alle estremità del profilo ad una distanza di 2 e 3.0 m dal primo e dall'ultimo geofono. Per ogni punto di energizzazione sono stati generati 3 impulsi sismici (shots).

I dati sono stati elaborati tramite il software MASW (V. Roma, 2007). L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "f-k" 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. 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. Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione del 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 "fittine" con i valori sperimentali.

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

3 – ELABORAZIONE DATI

3.1 – DATI SPERIMENTALI

Numero di ricevitori.....24
 Numero di campioni temporali2000
 Passo temporale di acquisizione 1ms
 Numero di ricevitori usati per l'analisi24
 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)

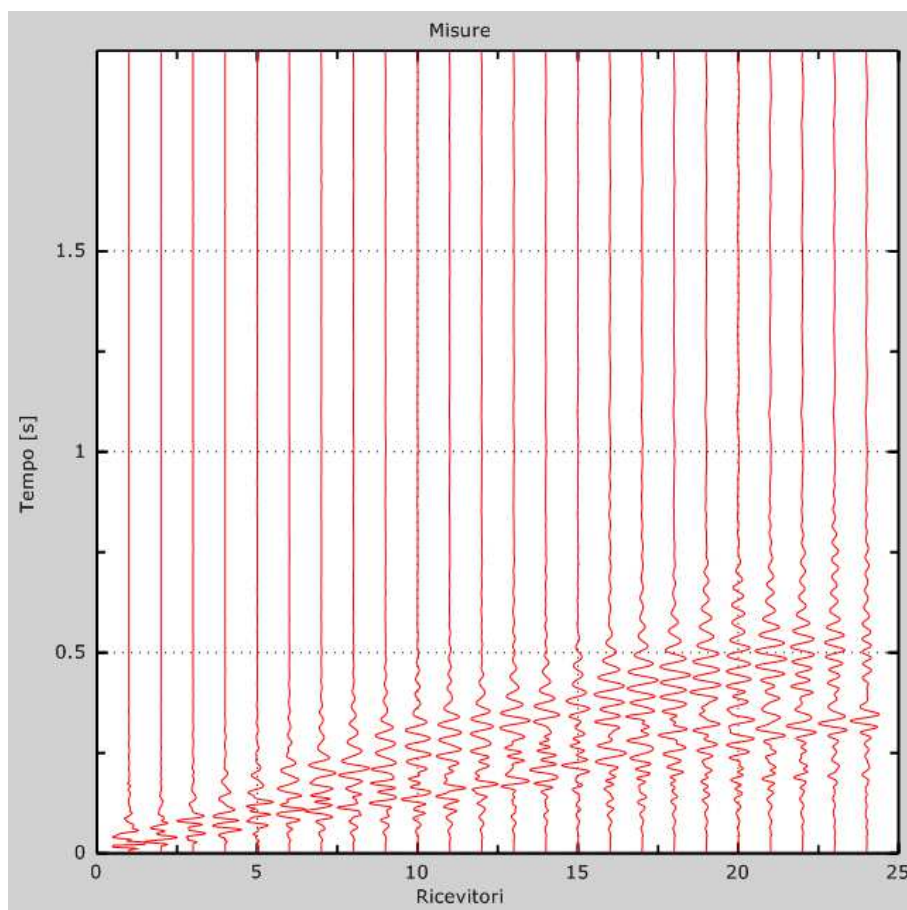


Figura 9: Tracce sperimentali

3.2 – RISULTATI DELLE ANALISI

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
<i>Rev.</i>	<i>Data</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Elaborato</i>	<i>Controllato</i>
			<i>Approvato</i>	

Frequenza finale 70Hz

Frequenza iniziale 2Hz

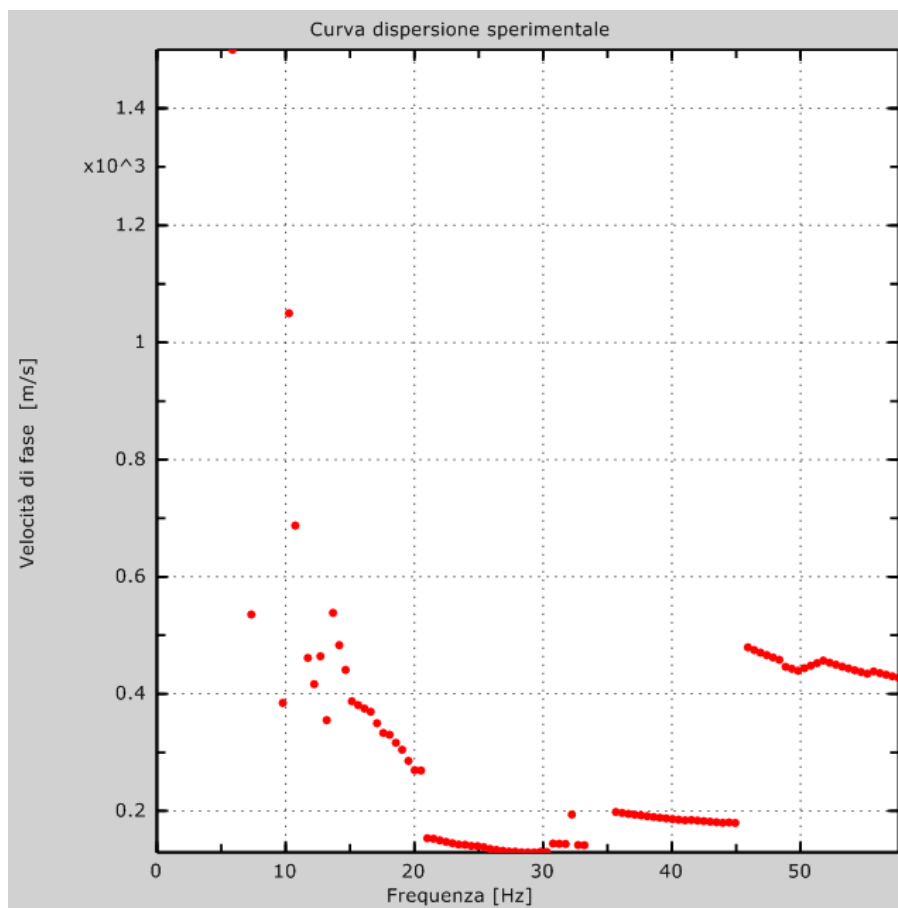


Figura 10: Curva dispersione sperimentale

3.3 – CURVA DI DISPERSIONE

Tabella 1: Curva di dispersione

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
13.5465	458.75	330.485	587.015
14.3916	439.646	404.169	475.124
14.9551	401.44	379.607	423.272
15.8002	385.065	363.233	406.898
16.7862	371.42	355.046	387.794

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	



17.2088	341.401	325.026	357.775
18.4766	327.755	316.839	338.672
18.7583	305.923	297.736	314.11
19.6034	284.091	273.175	295.007
20.5895	229.51	177.658	281.362
22.9841	224.052	166.742	281.362
24.9561	202.219	164.013	240.426
27.069	199.49	172.2	226.781
29.6045	185.845	144.909	226.781
31.1539	185.845	164.013	207.677
32.2808	177.658	153.096	202.219
35.9432	202.219	194.032	210.406
37.6335	196.761	191.303	202.219
39.4647	185.845	183.116	188.574
41.0141	196.761	172.2	221.323
42.9862	194.032	180.387	207.677
44.2539	185.845	169.471	202.219
45.2399	341.401	185.845	496.956
48.198	338.672	295.007	382.336
50.7335	333.214	300.465	365.962
52.9872	338.672	322.297	355.046
54.5367	325.026	305.923	344.13
57.213	327.755	305.923	349.588

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

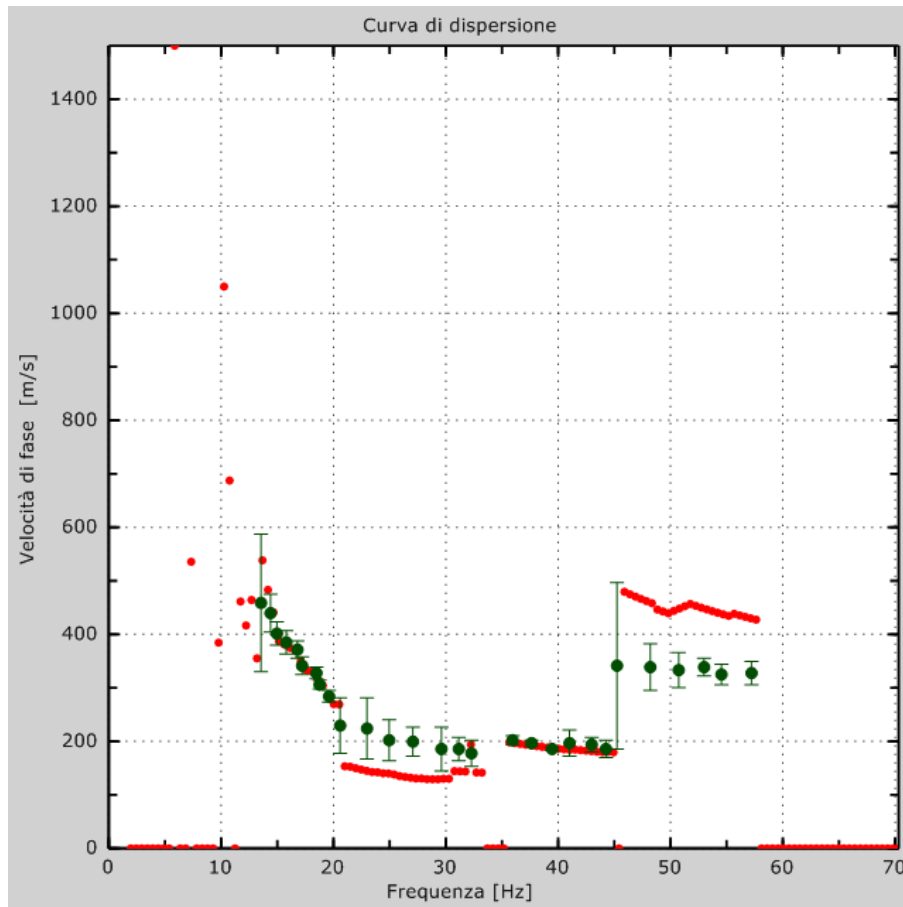


Figura 11: Curva di dispersione

3.4 – PROFILO IN SITO

Numero di strati (escluso semispazio)	2
Spaziatura ricevitori [m]	2m
Numero ricevitori	24
Numero modi	1
Numero iterazioni	4
Massimo errore [%]	2.000000e-001
Consenti forti contrasti di rigidezza tra 2 strati consecutivi	

Strato 1

h [m]	7
z [m]	-7

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
<i>Rev.</i>	<i>Data</i>	<i>Elaborato</i>	<i>Controllato</i>	<i>Approvato</i>



Densità [kg/m ³]	1800
Poisson	0.2
Vs [m/s]	206.49
Vp [m/s]	377.92
Vs min [m/s]	103.25
Vs max [m/s]	412.99
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s]	231.427

Strato 2

h [m]	0
z [m]	-00
Densità [kg/m ³]	1800
Poisson	0.2
Vs [m/s]	509.72
Vp [m/s]	1222.28
Vs min [m/s]	254.86
Vs max [m/s]	1019.44
Falda non presente nello strato	
Strato non alluvionale	
Vs fin.[m/s]	748.489

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
<i>Rev.</i>	<i>Data</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Elaborato</i>	<i>Controllato</i>
			<i>Approvato</i>	

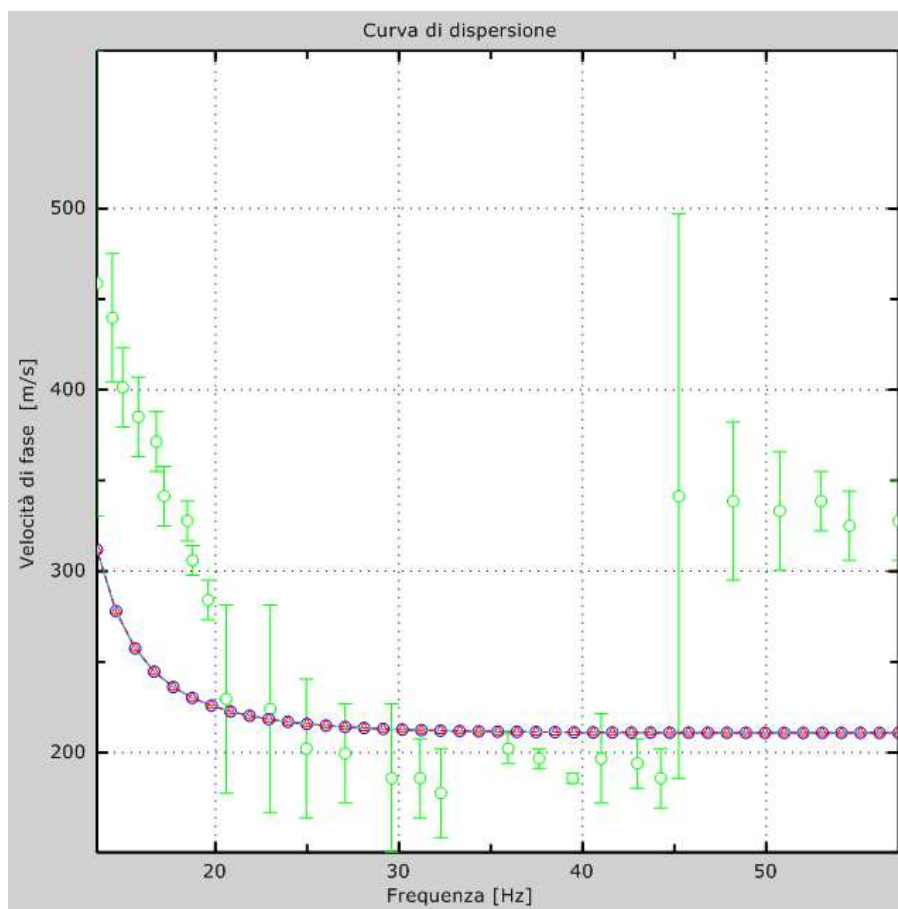


Figura 4: Velocità numeriche – punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano), curva apparente(blu), curva numerica (rosso)

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

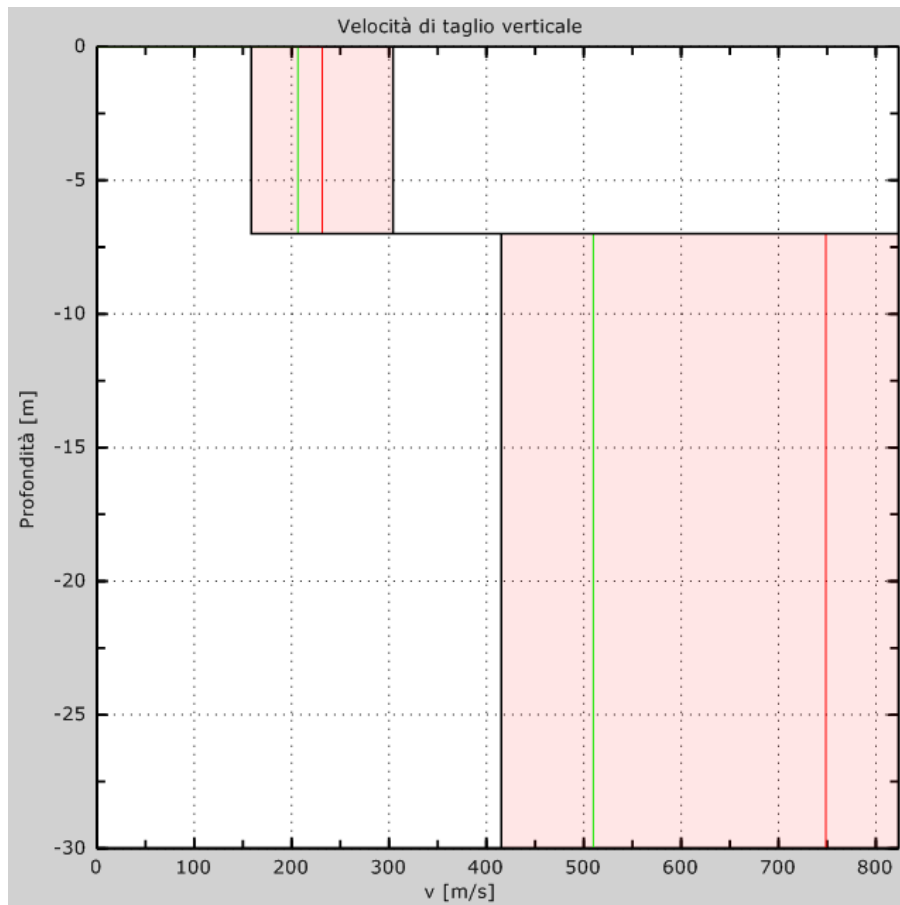


Figura 5: Velocità

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 ottiene il seguente modello medio di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativo dell'area investigata (stendimento complessivo di circa 48 m):

Modello 1			
Strato	Spessore(m)	Profondità (m)	Vs (m/s)
1	7.0	7.0	231.42
2	∞	∞	748.48

L'analisi del profilo di velocità Vs mostra una successione di terreni contraddistinti da un aumento graduale della velocità Vs con la profondità. L'analisi delle velocità consente di attribuire l'orizzonte alluvionale fino alla profondità di 30 m.

3.5 – RISULTATI FINALI E CALCOLO DELLE Vs30

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	



Offset [m].....0

Vs30 [m/s].....491

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 2.

Tipo di suolo B

Dall'analisi delle indagini geognostiche e dalle indagini geofisiche realizzate risulta che il sottosuolo si presenta fondamentalmente a due strati.

A partire dal modello sismico monodimensionale riportato nel capitolo precedente, è possibile calcolare il valore delle Vs30, che rappresenta la "velocità equivalente" di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio.

Per il calcolo delle Vs30 si fa riferimento alla seguente espressione, riportata nel D.M. 14.09.2005 e nel D.M. 14.01.2008 ("Norme tecniche per le costruzioni"):

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove Hi e Vi indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore (quota iniziale = piano campagna attuale):

Vs30 =491 m/s

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

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	

Appendice

Tipo di suolo

Tipo A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di Vs30 superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.

Tipo B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu30 > 250 kPa nei terreni a grana fina).

Tipo C: Depositati 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).

Tipo D: Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 inferiori a 180 m/s (ovvero NSPT30 < 15 nei terreni a grana grossa e cu30 < 70 kPa nei terreni a grana fina).

Tipo E: Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con Vs > 800 m/s).

Tipo S1: Depositati costituiti da, o contenenti uno strato di almeno 10m di spessore, argille/limi soffici con un alto indice di plasticità (PI>40) e contenuto d'acqua

Tipo S2: Depositati di terreno liquefacibile o argille sensitive o altri profili di terreno non inclusi nei tipi A, B, C, D, E o S1. Attenzione: la nuova norma classifica come S2 una serie di siti che prima erano classificati come B, C, D, E.

Rif.: 10395	File:10395caturani.doc	Cod. doc.: 67/10	N. pag.: 19	Allegati:
00	14/10/10	G. Venturini	G. Venturini	M. Mularoni
Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Controllato
			Approvato	