



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero

CONVENZIONE IAMC-PRISMA S.R.L.

ACQUISIZIONE GEOFISICA MASW TERRA-MARE SULLA SPIAGGIA "LIDO AZZURRO" - TARANTO PROGETTO PARCO BELEOLICO



Francesco Paolo Buonocunto, Vincenzo Di Fiore, Michele Punzo, Nicola Pelosi, Michele Iavarone,
Paolo Scotto di Vettimo

La presente relazione tecnico-scientifica rientra nella convenzione in essere tra l'IAMC-CNR sede di Napoli e la società PRISMA S.r.l., ns. prot. N. 0003933 del 29.06.12 e successiva integrazione in riferimento al Progetto di realizzazione di un parco eolico, ns. prot. N. 0007129 del 24.09.2013.

Il sottoscritto, dr. Francesco Paolo Buonocunto, in qualità di Responsabile scientifico per l'IAMC-CNR, relaziona circa la caratterizzazione sismica mediante MASW terra-mare del sito di realizzo del parco eolico, progetto BELEOLICO, in Taranto.

L'IAMC-CNR sede di Napoli ha partecipato attivamente alla campagna di acquisizione e processing del dato sismico.

SOMMARIO

1. PREMESSA	3
2. INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW	5
2.1 Analisi multicanale delle onde superficiali	
2.2 Strumentazione e metodologia d'indagine	
2.3 Descrizione generale della procedura MASW	
3. RISULTATI	11
4. Bibliografia	16

1 PREMESSA

Nell'ambito dell'incarico, l'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del CNR con sede in Napoli, Calata Porta di Massa, 80133 Napoli, ha eseguito un'indagine geofisica per la caratterizzazione del sottosuolo presso la spiaggia dell'insediamento residenziale di "Lido Azzurro" (TA), ovvero a circa 300 metri dal punto PP05 del progetto di realizzazione di un parco eolico "near shore".

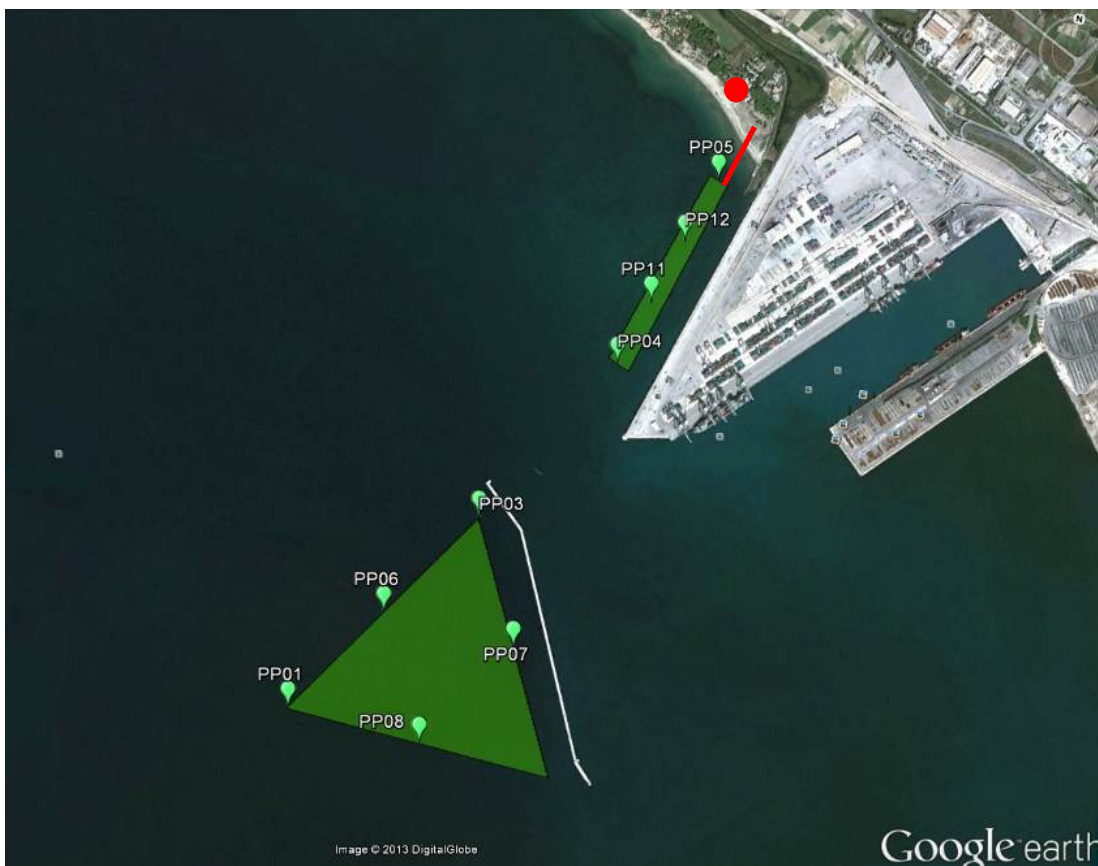


Figura 1 – Immagine tratta da GOOGLE EARTH - In rosso vengono indicati lo stendimento sismico terra-mare ed il sondaggio diretto PP00 effettuato dalla DIMMS nella stessa area, in verde sono indicati i punti di sondaggio a mare corrispondenti ai punti di infissione delle pale eoliche.

A tale scopo è stato realizzato n.1 stendimento sismico terra-mare con metodologia MASW (Figg. 1-2) per la determinazione del profilo verticale delle onde di taglio e del valore Vs30, in riferimento tra l'altro alla classificazione dei terreni di fondazione degli interventi in progetto nelle categorie di suolo, come da paragrafo 3.2.2 delle N.T.C. 2008 "D.M. 14/01/2008".



Figura 2. Sinistra: immagine di Google Earth dell'area antistante la spiaggia del Lido Azzurro. Destra: Localizzazione (in rosso) del profilo acquisito; in giallo sono raffigurati i punti di energizzazione.

Nello svolgimento dell'incarico sono stati impegnati ricercatori, tecnici e personale in servizio presso l'I.A.M.C. - C.N.R., sede di Napoli, con mansioni e competenze diverse (Tabella 1):

Nome	Qualifica	Competenze
Dr. Geologo Francesco P. Buonocunto	Ricercatore/Tecnologo	Responsabile Scientifico del Progetto
Dr. Geologo Vincenzo Di Fiore	Ricercatore	Responsabile Geofisico
Dr. Nicola Pelosi	Ricercatore	Procedure di acquisizione
Sig.re Paolo Scotto	Tecnico	Procedure di acquisizione
Sig.re Michele Iavarone	Tecnico	Procedure di acquisizione
Dr. Michele Punzo	Tecnico	Processing del dato

Tabella 1 – Personale dell'IAMC-CNR

2 INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA MASW

2.1 Analisi multicanale delle onde superficiali

Il metodo MASW è una tecnica non invasiva che consente di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali effettuata in corrispondenza dei diversi sensori (idrofondi).

Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali. Le onde di Rayleigh sono generate dall'iterazione tra le onde di pressione e le onde di taglio verticali ogni qualvolta esiste una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo. 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). La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Per ottenere un profilo V_s bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. I dati acquisiti vengono 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 per estrarre dai sismogrammi acquisiti le caratteristiche dispersive del sito. La metodologia più diffusa è l'analisi spettrale nel 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 maggior contenuto di energia siano proprio le onde di Rayleigh e che le caratteristiche del sito siano tali da consentire la propagazione delle onde superficiali e un comportamento dispersivo

delle stesse.

La velocità delle onde di Rayleigh è infatti associata ai massimi dello spettro $f-k$; si può così ottenere una curva di dispersione individuando ad ogni frequenza un 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. 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, il problema diretto 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). Il processo di inversione si basa su algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati che consentono di automatizzare la procedura.

2.2 Strumentazione e metodologia d'indagine

La strumentazione utilizzata per la prospezione sismica è composta da un'unità di registrazione ed un sistema di elaborazione dati.

L'unità di registrazione è costituita da 1 sismografo modulare GEODE della Geometrics (da 24 canali). Il Geode è un sismografo a 24 bit ad elevata dinamica (144 dB di range dinamico totale - 105 dB istantanei), ampia banda d'ingresso (1.75 Hz - 20 kHz), con passo di campionamento da 0.02 ms a 16 ms, che amplifica e digitalizza il segnale ricevuto dagli idrofoni e lo invia all'unità d'immagazzinamento dati. Ogni modulo è estremamente compatto (27 x 25 x 18 cm – circa 3 Kg) ed è alimentato autonomamente con batterie esterne da 12 Volt. Per la presente indagine si è adottata una frequenza di campionamento

pari a 1000 Hz e una durata del campionamento di 2 secondi.

Il sistema di trasduzione è costituito da un cavo sismico marino da 24 canali. Gli idrofoni (Figura 3) (o geofoni a pressione) utilizzati sono dei sensori piezoelettrici che hanno la proprietà di dare luogo ad una differenza di potenziale elettrico proporzionale alla pressione istantanea dell'acqua. Questa differenza di potenziale generata è a sua volta proporzionale alla velocità di spostamento delle particelle d'acqua messe in movimento dal segnale acustico. Sono stati impiegati sensori con frequenza naturale di 10 Hz interdistanziati 2,5 metri. Il cavo è stato adagiato sul fondale; un sub ha provveduto al corretto posizionamento del cavo in mare. I segnali elettrici uscenti dagli idrofoni vengono inviati tramite il cavo sismico (streamer), nel quale sono incorporati, al sismografo che li digitalizza consentendone la successiva acquisizione.



Figura 3 - a) idrofono b) cavo sismico; c) un operatore ha provveduto a stendere il cavo sul fondo del mare.

Il sistema d'immagazzinamento dati è rappresentato da un Laptop. Il laptop, collegato tramite rete locale Ethernet al Geode, svolge il compito di archiviare i dati digitalizzati provenienti dal Geode (in formato seg-2), di gestire i parametri d'acquisizione e consente di valutare interattivamente la qualità dei dati acquisiti.

Il sistema di energizzazione è costituito da una sorgente sismica a cannoncino modello "Minibang". La sorgente utilizza cartucce industriali tipo calibro 8; la canna del cannoncino viene introdotta ad una profondità di circa 30 cm in un piccolo foro precedentemente preparato con una piccola trivella a mano. Per evitare il rinculo ed avere la massima propagazione dell'energia prodotta dall'esplosione della cartuccia, la base di supporto del cannoncino è trattenuta solidale al terreno dal peso dell'addetto allo scoppio.

Il sistema di trigger consiste in un circuito elettrico che viene aperto nell'istante in cui il cannoncino sismico spara il colpo, consentendo di produrre un impulso che viene inviato al

sistema di acquisizione determinandone l'avvio dell'acquisizione. In questo modo la registrazione ha inizio all'esatto istante in cui la sorgente viene attivata. In particolare, per ogni punto di scoppio, si è energizzato per 3 volte, al fine di evidenziare il segnale sismico (processo di stacking) rispetto ai rumori ambientali presenti.

I profili sismici sono stati acquisiti con una geometria di tipo "long offset shot". Tale strategia d'acquisizione, che ha previsto l'impiego di uno stendimento di idrofoni con spaziatura regolare di 1 metro, è consistita nell'esecuzione di energizzazioni ad uno estremo dello stendimento idrofonico.

Le informazioni salienti del profilo sismico sono riassunte nella tabella seguente.

	Profilo Sismico
Lunghezza	87.5 m
Sorgente sismica	Cannoncino sismico
Distanza idrofonica	2.5 m
Spaziatura sorgenti	5 m
Numero energizzazioni complessive	6
Numero canali complessivi	24
Massimo offset	87.5 m
Finestra temporale	2000 ms
Campionamento temporale	1 ms

Tabella 2 - Parametri della geometria d'acquisizione.

2.3 Descrizione generale della procedura MASW

L'intera procedura per la MASW è consistita in 3 passi fondamentali (*Park et al., 1999*):

1. Ripetute acquisizioni multicanale dei segnali sismici (figura 4), generati da una sorgente energizzante artificiale (fucile sismico), lungo uno stendimento rettilineo di idrofoni.

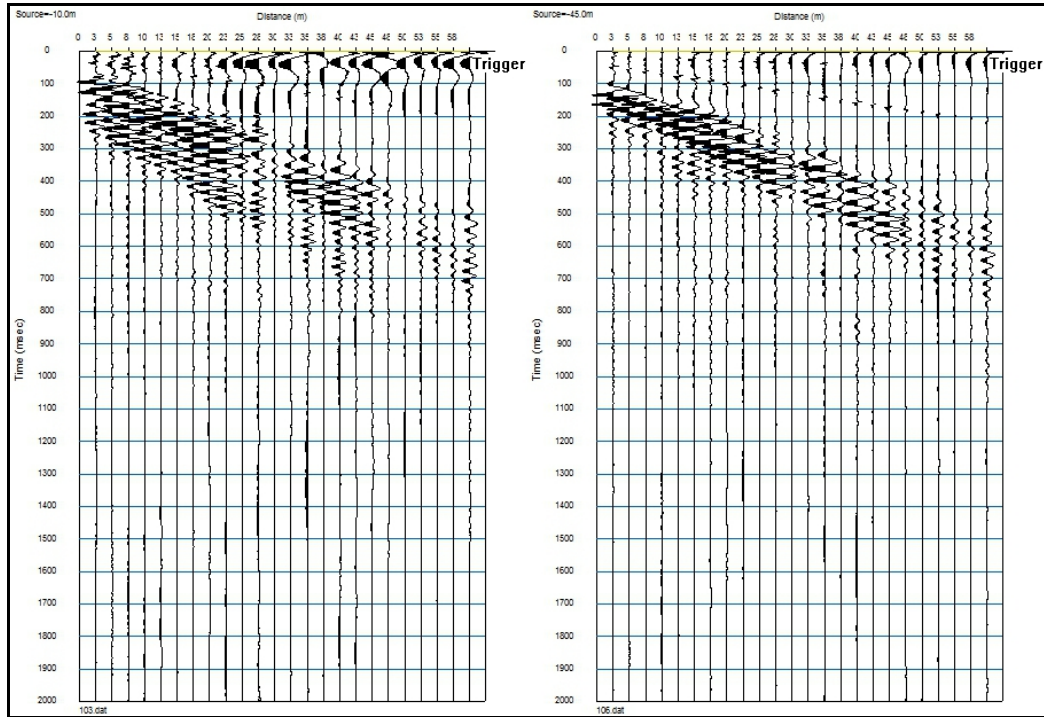


Figura 4 - Esempio di shot-gather acquisito sulla spiaggia

2. Estrazione del modo fondamentale dalle curve di dispersione delle velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (grafico della velocità di fase rispetto la frequenza) (figura 5).

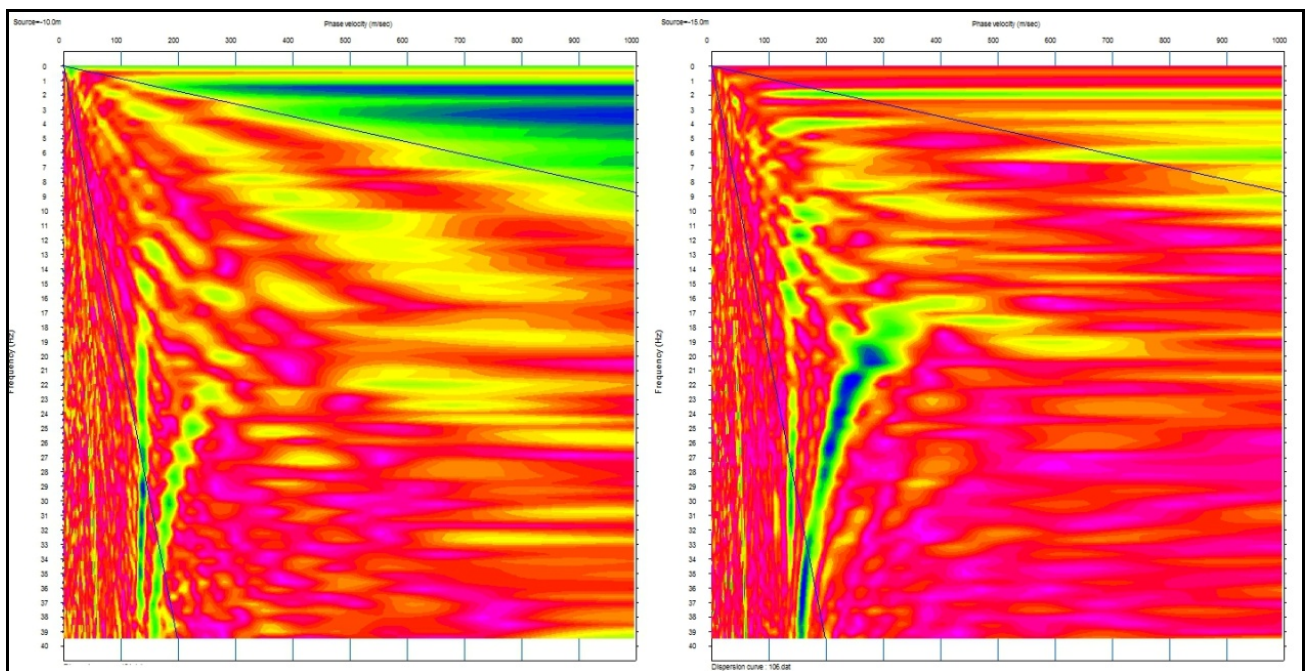


Figura 5 - Esempio di curve di dispersione.

3. 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 in Fig. 6).

Dall’inversione della curva di dispersione si ottiene un modello medio di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativo dell’area investigata.

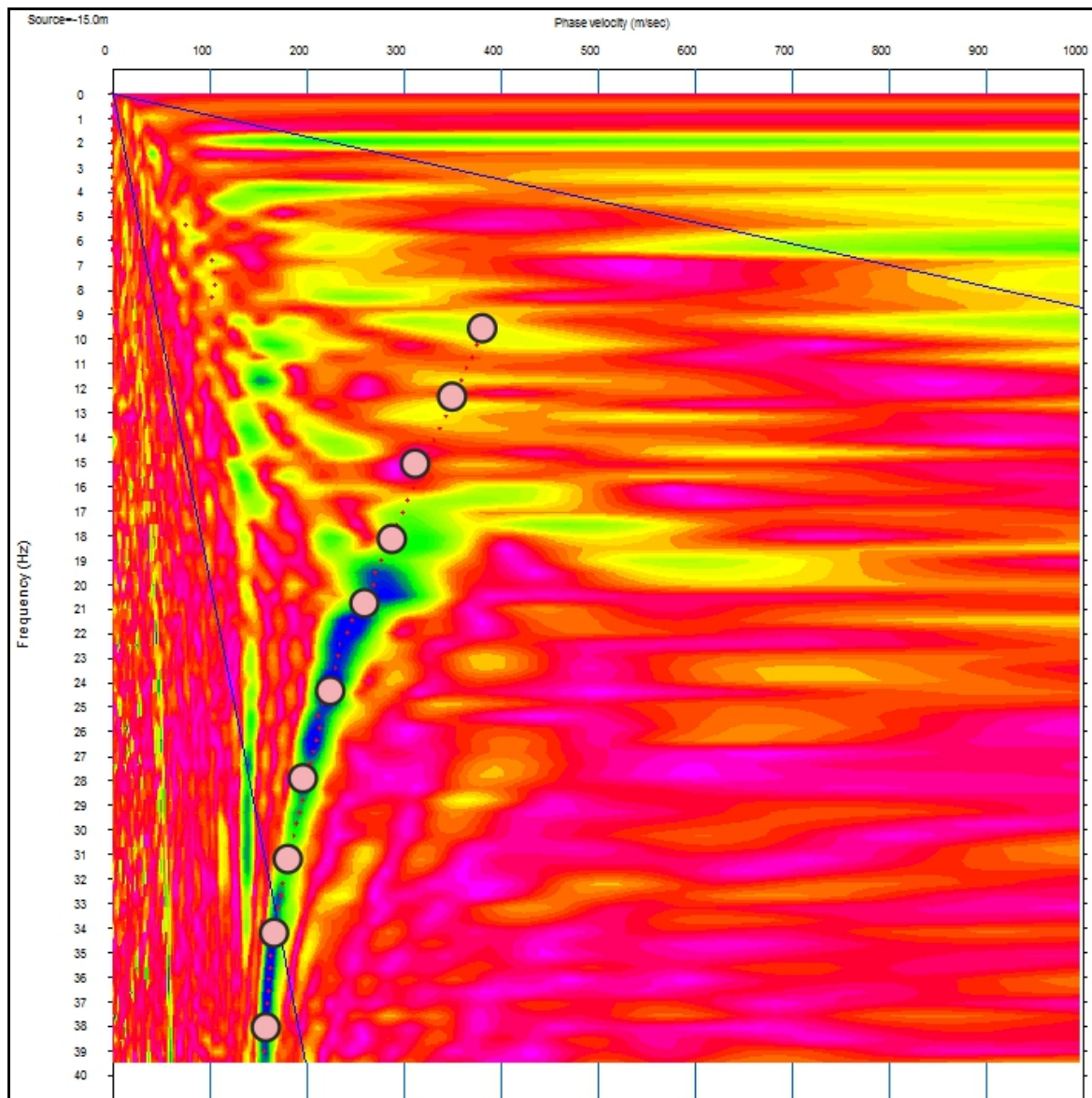


Figura 6 - Esempio di picking della curva di dispersione. Il "modo fondamentale" è stato individuato nel campo di frequenze compreso tra i 9 e i 40 Hz.

3 RISULTATI

L'esecuzione dell'indagine sismica con metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) consente di classificare i terreni di fondazione degli interventi in progetto nelle categorie di suolo descritte al paragrafo 3.2.2 delle N.T.C. 2008 "D.D.L. 14/01/2008".

La metodologia MASW presenta rispetto ad altre tecniche sismiche il vantaggio di non essere limitata dalla presenza di inversioni di velocità, consentendo pertanto l'individuazione di strati soffici compresi tra strati più rigidi o di strati più rigidi compresi tra strati più soffici. Il metodo MASW consente quindi di individuare il profilo di velocità V_s anche in presenza di contrasti di rigidezza tra gli strati del suolo. Tale prova fornisce un profilo di velocità V_s monodimensionale. La velocità di propagazione delle onde di taglio dipende dalle proprietà elastiche dei mezzi attraversati e il parametro geofisico V_{s30} è quello che meglio rappresenta la condizione geotecnica media dei materiali geologici del sottosuolo dei primi 30 metri. Infatti la velocità di propagazione delle onde trasversali dipende dalle proprietà elastiche del mezzo attraversato, come si evince dalla seguente relazione:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\gamma}}$$

dove γ rappresenta la densità del corpo e μ il modulo di rigidità o modulo di taglio che indica la resistenza di un corpo alle variazioni di forma. Le proprietà elastiche del mezzo sono a loro volta influenzate da numerosi fattori quali la compattezza o il grado di litificazione, la porosità, la tessitura, il grado alterazione e/o fratturazione, la composizione mineralogica, il contenuto di fluidi, la profondità, ecc.

Con V_{s30} si definisce la velocità media di propagazione nei primi 30 metri di profondità delle onde di taglio, il cui calcolo viene effettuato utilizzando la seguente espressione:

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

Dove h_i e V_i indicano lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 metri superiori.

Il profilo verticale delle onde di taglio (figura 7) e il valore V_{s30} necessario per la classificazione dei terreni di fondazione dell'area di interesse nelle categorie di suolo descritte al paragrafo 3.2.2 delle N.T.C. 2008, sono riassunti nella tabella di seguito riportata.

Profondità (m)	h_i (m)	V_i (m/s)	V_{s30}
0 - 1.7	1.7	138	$V_{s30}=329.6$ m/sec Categoria di sottosuolo "C"
1.7 - 3.8	2.1	205	
3.8 - 6.3	2.5	282	
6.3 - 9.2	2.9	331	
9.2 - 12.5	3.3	364	
12.5 - 16.2	3.5	388	
16.2 - 20.4	4.2	406	
20.4 - 25	4.6	423	
25 - 30	5	440	

Tabella 3 - Calcolo della V_{s30} del sito in esame

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire dai dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della V_s e, di conseguenza, del parametro V_{s30} .

Dal profilo verticale monodimensionale delle V_s si evince la presenza di terreni caratterizzati da un progressivo aumento del valore di V_s .

Le indagini mostrano un modello di sottosuolo costituito da terreni che nei primi 10 metri mostrano un aumento marcato delle velocità delle onde di taglio (V_s) (138-330 m/sec); oltre queste profondità, le velocità hanno un range di variabilità meno marcato; i valori, infatti, si attestano tra 360 e 440 m/sec.

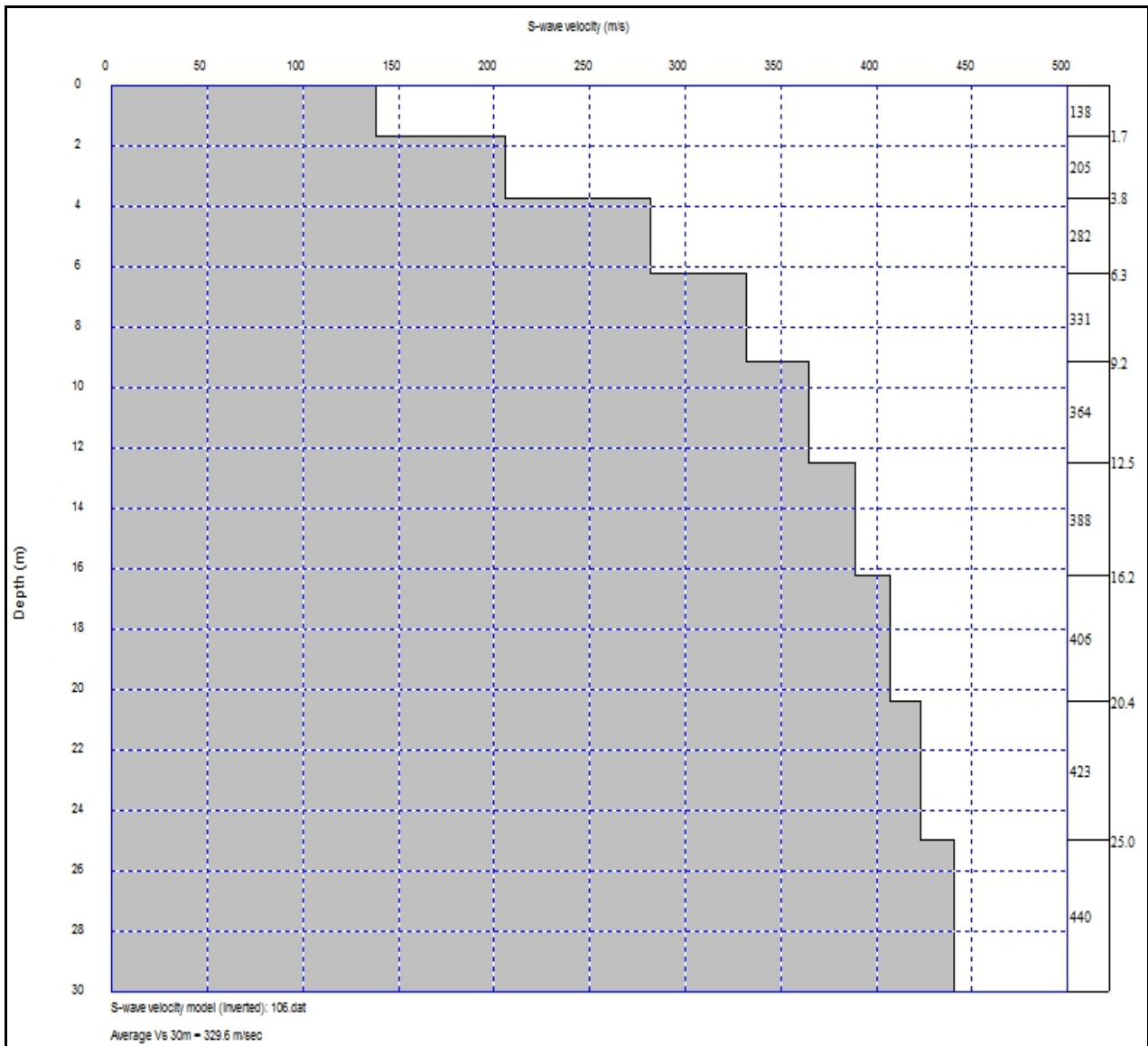


Figura 7 - Profilo verticale delle onde di taglio

Da un confronto con i dati stratigrafici dei sondaggi diretti effettuati nell'area per lo stesso progetto (figura 8), i valori riscontrati si correlano perfettamente con terreni di tipo limoso/sabbiosi per i primi 10 metri di profondità e con le argille da consolidate a sovraconsolidate per i successivi metri, ovvero **Argille Subappennine** (Pleistocene inferiore), localmente denominate "Argille del Bradano" (S.G.I., 1969) o "Argille di Taranto". Si tratta di marne argillose ed argille marnose e siltose con intercalazioni sabbiose di colore grigio-azzurro e talora grigio verdastro, fossilifere con intercalazioni sabbiose ed un'abbondante tenore di carbonati.

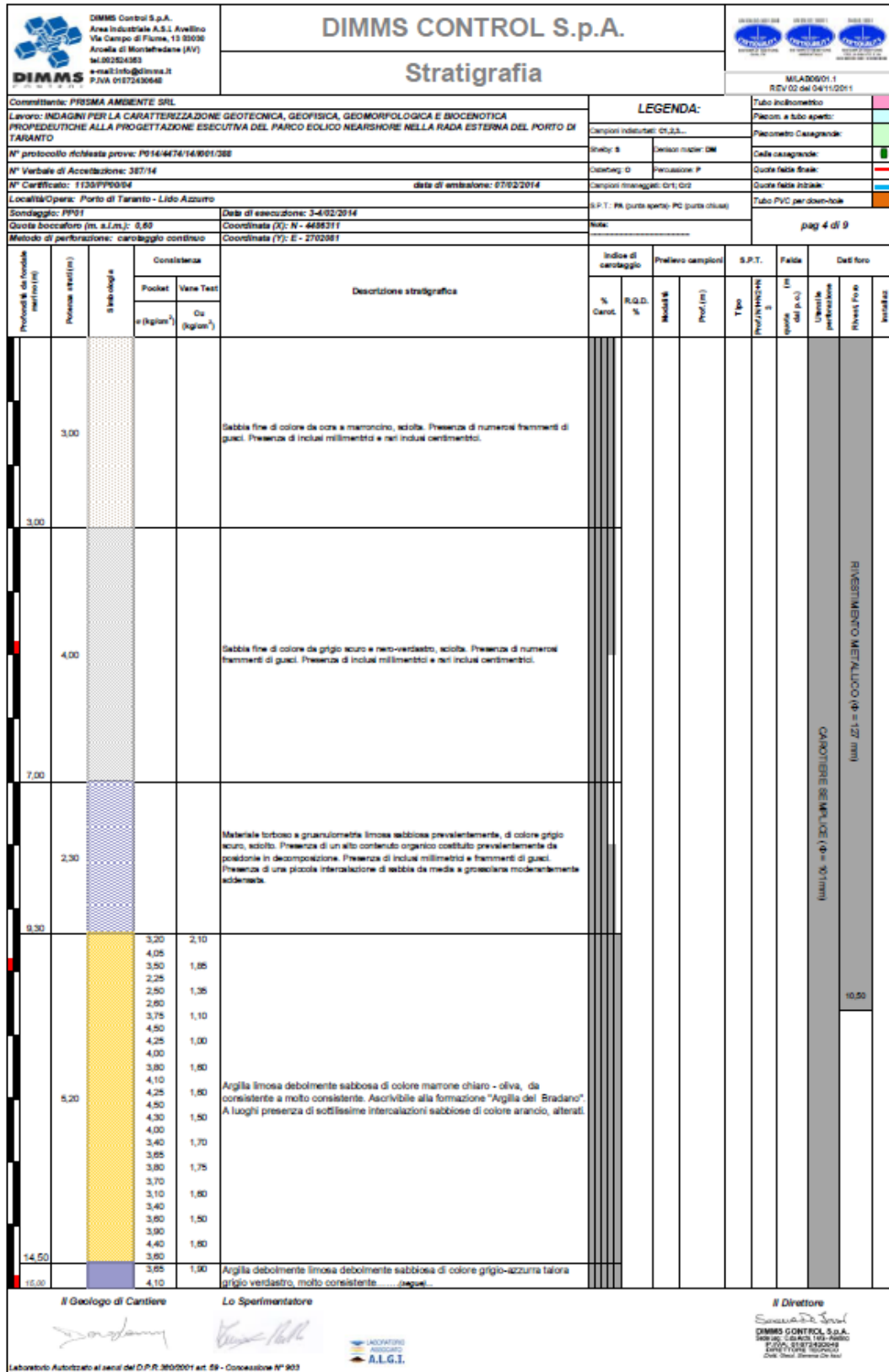


Figura 8 – Stratigrafia del sondaggio PP00 effettuato nella stessa area della indagine geofisica.

In riferimento alle “Norme tecniche per le costruzioni” (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005), il sito di progetto rientra quindi nella categoria C (“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m caratterizzati da graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori del VS30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina”).

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $NSPT_{30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $NSPT_{30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Secondo quanto infatti riportato dalle Norme Tecniche: “... fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo (parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso), ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità. Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali”.

4. BIBLIOGRAFIA

Achenbach, J.D. (1999) Wave Propagation in Elastic Solids. North-Holland, Amsterdam, Netherlands.

Aki, K. and Richards, P.G. (1980) Quantitative Seismology, Theory and Methods Vol. 1-2 W.H. Freeman & Co., New York.

NTC2008 - Norme tecniche per le costruzioni - D.M. 14 Gennaio 2008

Park C. B., Miller R. D., Xia J.; 1999: Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64, 3, 800-808.