

ALLEGATO “BB”

Cartografia sismica della pianura della Provincia di Treviso
Mappa della Vs30

Redazione a cura di

R. Francese
A. Bondesan
J. Centonze
N. Wardell

Adastra

***Istituto Nazionale di Oceanografia e di
Geofisica Sperimentale***

SOMMARIO

1	<i>Introduzione</i>	<i>pag.</i>	2
2	<i>Inquadramento Generale</i>	<i>pag.</i>	2
3	<i>Costruzione Della Mappa Dei Corpi Deposizionali Omogenei</i>	<i>pag.</i>	3
4	<i>Metodologia Sperimentale</i>	<i>pag.</i>	3
	4.1. <i>La Tecnica Dei Microtremori (Remi)</i>	<i>pag.</i>	5
5	<i>Acquisizione Dei Dati Sismici</i>	<i>pag.</i>	8
	5.1. <i>Strumentazione E Rete Di Misura</i>	<i>pag.</i>	8
6	<i>Elaborazione Dei Dati</i>	<i>pag.</i>	9
7	<i>Risultati E Discussione</i>	<i>pag.</i>	10

INDICE TAVOLE FUORI TESTO

<i>Tav.A</i>	<i>F.01</i>	<i>Area di studio</i>
<i>Tav.B</i>	<i>F.01</i>	<i>Mappa di ubicazione delle stazioni di misura</i>
<i>Tav.C</i>	<i>F.01</i>	<i>Mappa della V_S30</i>



1 INTRODUZIONE

Il presente rapporto descrive le basi teoriche, le metodologie operative e i risultati finali ottenuti nell'ambito della Convenzione tra Amministrazione Provinciale di Treviso ed Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale di Trieste per la redazione della cartografia sismica della pianura della provincia. Lo scopo dello studio è quello di costruire un modello di velocità di propagazione delle onde elastiche, in modalità trasversale, nei primi 30 metri di profondità. Lo studio si inquadra nel Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) e si ispira alla nuova normativa sismica nazionale, Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri 3274/2003 e successive modifiche ed integrazioni, la quale prevede che i progetti delle opere di ingegneria siano accompagnati da una caratterizzazione sismologica del suolo e del sottosuolo di fondazione sulla quale insisterà la costruzione. La normativa individua, in particolare, nel parametro V_{s30} (velocità media delle onde di taglio nei primi 30 metri di profondità) l'indicatore di eventuali coefficienti amplificativi locali dell'accelerazione sismica da impiegare nel calcolo strutturale delle opere.

Questa nuova mappa di riferimento sulle caratteristiche sismiche del primo sottosuolo trova una sua naturale collocazione nell'ambito del PTCP ed introduce degli elementi di approfondimento di avanguardia sino ad oggi del tutto nuovi in questi strumenti urbanistici. Lo studio è stato realizzato parallelamente alla stesura della Carta Geomorfologica provinciale, integrando, correlando e confrontando i dati stratigrafico-sedimentologici con quelli elastico-acustici. Questo tipo di approccio ha consentito di porre una base multidisciplinare nell'affrontare il problema della zonazione sismica del territorio. La rete di punti di misura è stata infatti ottimizzata in funzione della genesi deposizionale dei materiali e le stazioni di misura sono state ubicate su siti significativi propagando poi i risultati attraverso un processo di validazione pesata e di generalizzazione ad intere unità deposizionali.

Questo tipo di approccio, rispetto a quelli tradizionali, presenta un grande vantaggio che è quello di poter investigare il territorio in modo mirato, evitando quindi di produrre carte "cieche", dove l'interpolazione dei dati è governata dalla geometria della griglia di campionamento. I limiti geologici pre-elaborati sono quindi diventati una sorta di guida per l'interpretazione geofisica.

2 INQUADRAMENTO GENERALE

La provincia di Treviso occupa un'area dell'estensione approssimativa di 2500 kmq dei quali circa 1700 kmq sono rappresentati da territorio di pianura e circa 800 kmq da terreno montano e collinare (Tavola A). Il presente studio ha coperto il solo territorio di pianura che risulta costituito dai complessi deposizionali delle aste fluviali principali e cioè dei fiumi Piave, Sile e Livenza oltrechè di una serie di piccoli fiumi minori che sfociano direttamente nell'Alto Mare Adriatico.

3 COSTRUZIONE DELLA MAPPA DEI CORPI DEPOSIZIONALI OMOGENEI

La mappa dei sistemi morfo-deposizionali costituisce la base conoscitiva di partenza per la predisposizione della rete di caratterizzazione sismica, individuata da una serie di nodi (stazioni di misura del parametro V_{s30}) distribuiti sul territorio provinciale in relazione alla distribuzione dei principali corpi deposizionali. Tale operazione è stata effettuata grazie all'utilizzo di un sistema informatico GIS mediante integrazione, sovrapposizione e confronto di più livelli informativi.

La definizione dei principali corpi deposizionali relativi alle aree di pianura della provincia di Treviso è avvenuta sulla scorta delle informazioni acquisite nel corso della realizzazione della Carta Geomorfologica della Provincia di Treviso, sia nell'ambito del progetto GE03 che prevede una scala di rilevamento 1:10.000, sia nell'ambito del PTCP (Progetto GEO4 – Unità Geomorfologiche), che prevede una scala di lavoro 1:50.000.

Un contributo indispensabile e basilare è stato fornito dalla “Carta delle Unità di Paesaggio” e dai rilevamenti pedologici condotti nell'ambito del progetto “Carta dei suoli della provincia di Treviso” alla scala 1:50.000, a cura di ARPAV – Dipartimento Provinciale di Treviso, Servizio Osservatorio Suoli e Rifiuti.

La ricostruzione dell'assetto geologico è stata realizzata tenendo conto dei meccanismi deposizionali e dell'assetto paleoidrografico della pianura. È comunque importante sottolineare come tale ricostruzione sia il risultato di un insieme di numerosi dati molto dettagliati per quanto riguarda il primo sottosuolo, ma piuttosto eterogenei e lacunosi a profondità più elevate (fino ai 30 m) a causa dell'effettiva mancanza di dati geologici sperimentali. Tuttavia le attuali conoscenze sulle modalità di aggradazione della pianura trevigiana e i dati geomorfologici noti hanno consentito di ricostruire i principali corpi sedimentari e le direttrici fluviali che hanno determinato lo spaglio dei sedimenti fluviali in alta e bassa pianura.

4 METODOLOGIA SPERIMENTALE

Le tecniche di misura dei microtremiti (denominata anche degli stendimenti sismici lineari passivi) è una derivazione delle tecniche SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*) e MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) che si basano sull'elaborazione delle proprietà spettrali delle onde di superficie per la costruzione di un modello verticale di velocità di propagazione delle onde di taglio.

Il principio ispiratore della tecnica SASW e MASW è il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato. La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze. All'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la



profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore. È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una certa profondità. La velocità delle onde di taglio viene ricavata sulla base della seguente equazione:

$$V_S \approx 0.9V_{RAYLEIGH} \quad (1);$$

Il coefficiente che lega $V_{RAYLEIGH}$ a V_S presenta una scarsa variabilità al variare del rapporto di Poisson e si considera quindi che il valore di 0.9 possa essere valido nella maggior parte dei casi.

Una volta che la curva di dispersione è stata calcolata dai dati si può impiegare una tecnica di modellazione diretta (*forward modeling*) associata a tecniche di *best fitting* per stimare il profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_S).

I rilievi SASW (Stokoe et al, 1994) consistono nel fare misure di velocità di fase delle onde di superficie a varie lunghezze d'onda ed usare queste misure per calcolare la curva di dispersione del sito. In Figura 1 compare un tipico schema di un sistema di registrazione per misure SASW. Le velocità di fase sono ricavate per confronto diretto degli spettri di ampiezza e fase di ciascuna coppia di sismometri, ottenuti istantaneamente in sito tramite un oscilloscopio che esegue una trasformata veloce di Fourier.

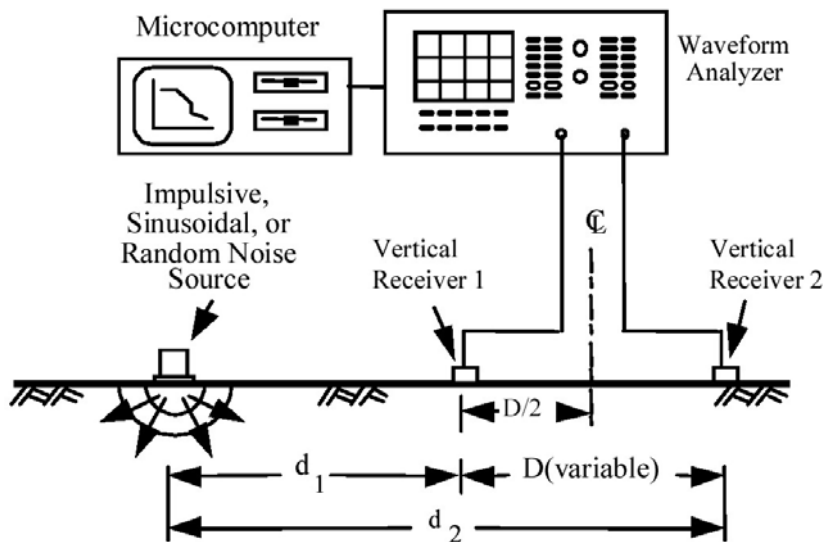


Figura 1. Tipico schema di strumentazione per misure SASW con un sistema a due canali di registrazione (tratto da Stokoe et al, 1994).

Tipiche spaziature dei ricevitori, per l'alta risoluzione, sono pari a 2, 3 e 5 m. Queste spaziature consentono di valutare il profilo di molti terreni sino alla profondità di 50-70 m.

La tecnica di rilievo MASW (Park et al., 1999) è stata sviluppata in parte per superare le difficoltà dell'applicazione dei rilievi SASW in ambienti rumorosi. La registrazione simultanea di 12 o più canali fornisce infatti una ridondanza statistica delle misure di velocità di fase migliorando la qualità del processo analitico. Il salvataggio delle tracce nel dominio temporale, previsto dal metodo, permette inoltre di analizzare in post-elaborazione le onde di Rayleigh. Mediante una particolare analisi spettrale (*overtone analysis*) è possibile diagrammare velocità di fase e frequenza. In questo dominio è possibile distinguere il modo fondamentale delle onde di superficie dal quale stimare la curva di dispersione e successivamente, mediante un processo di inversione, derivare il profilo 1-D della V_s . La ripetizione delle misure lungo un profilo a basi multiple consente di evidenziare le variazioni laterali della V_s .

4.1. La tecnica dei microtremori (*Refraction Microtremors – ReMi*)

La tecnica di analisi del sottosuolo mediante l'uso dei microtremori prende origine dagli studi e dalle sperimentazioni condotte da J.Louie presso la Nevada University. Il metodo combina la semplicità operativa del SASW con l'elevata risoluzione nei terreni più superficiali propria del MASW. I microtremori vengono registrati mediante uno stendimento lineare da 12 o più geofoni a bassa frequenza senza la necessità di dover operare con un sorgente attiva. I dati vengono acquisiti mediante la classica strumentazione impiegata per i rilievi a rifrazione. Generalmente si impiegano geofoni con frequenza compresa nell'intervallo 4-14 Hz e tempi di registrazione di 15-30 s. L'impiego di campionatori di elevata dinamica (i.e. superiori a 144 dB) consente poi di dimezzare la frequenza utile campionabile rispetto a quella nominale dei geofoni. È quindi teoricamente possibile registrare onde di superficie il cui contenuto in frequenza è compreso nell'intervallo tra 2 Hz e 25-30Hz. Questo intervallo, in condizioni ottimali, può consentire di stimare, con buon dettaglio, il profilo della V_s nei primi cento metri di profondità. Il rumore registrato viene convertito dal dominio x-t al dominio p - f (*slowness*-frequenza). Il parametro *slowness* (p), detto anche parametro di raggio, corrisponde all'inverso della velocità secondo la (2):

$$p \left[\frac{s}{m} \right] = \frac{1}{V_{RAYLEIGH}}; \quad (2);$$

Un esempio di spettro di potenza (p - f) delle onde di superficie (un esempio in tal senso è visibile in Figura 2).

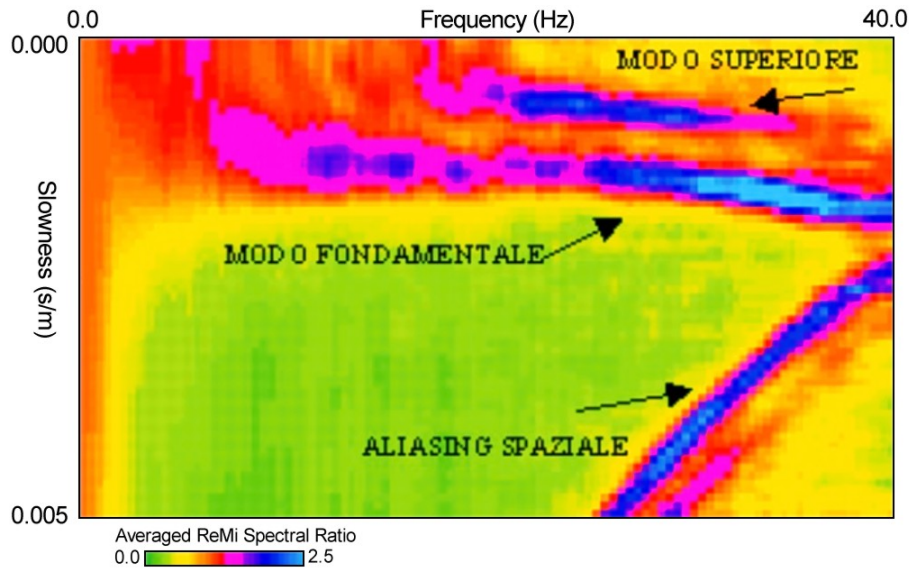


Figura 2. Tipico spettro $p-f$ di onde di Rayleigh nel quale si osservano un modo fondamentale ed una serie di modi superiori di vibrazione.

Nello spettro $p-f$ (Figura 2) sono chiaramente visibili una serie di eventi che presentano elevata energia e coerenza di ampiezza e fase. In particolare si distinguono i lobi spettrali del modo fondamentale delle onde di superficie (con carattere tipicamente dispersivo) ed anche di alcuni modi superiori (onde di superficie di ordine superiore, onde di pressione, suono e rumore incoerente). In questo dominio viene stimata la curva di dispersione del modo fondamentale. Questa fase di analisi del dato è particolarmente critica in quanto vi possono essere alcuni casi nei quali i rami dei modi superiori sono più energetici di quello del modo fondamentale.

Nel caso del dato ReMi si ipotizza che la posizione della sorgente (rumore ambientale) non sia nota e quindi la velocità spettrale è di una velocità apparente. La curva di dispersione viene quindi individuata nella zona di transizione tra la massima potenza spettrale e la zona dello spettro nella quale il segnale è nullo (Figura 3).

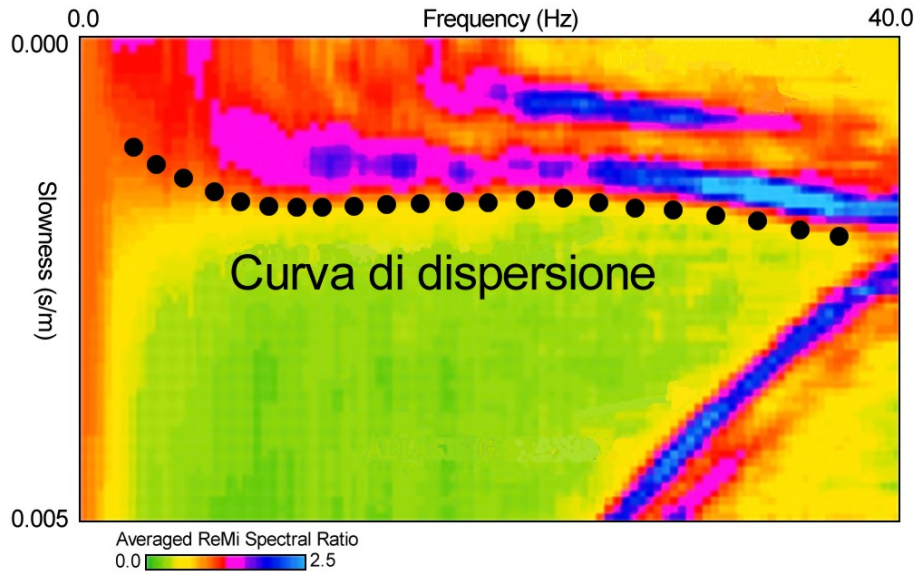


Figura 3. Esempio di determinazione (*picking*) della curva di dispersione del modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

Dopo aver individuato la curva di dispersione si procede con una tecnica di modellazione diretta e cioè si calcola la curva di dispersione teorica a partire da un modello acustico iniziale del sottosuolo (Figura 4). Il modello di sottosuolo viene quindi modificato, in termini di spessori e velocità delle onde S, sino a che la curva calcolata si sovrappone ai dati sperimentali. Lo scarto quadratico medio (errore RMS – *Root Mean Square*) tra misure sperimentali e curva calcolata è il principale indicatore di qualità del processo di modellazione. È evidente che in questo tipo di approccio solutorio non c'è univocità del risultato in quanto alla formazione del parametro fondamentale contribuiscono due variabili: lo spessore dello strato e la velocità e lo stesso valore parametrico può essere con combinazioni delle due variabili. In genere l'ambiguità viene risolta con l'ausilio di vincoli che consentano di “bloccare” una delle due variabili (disponibilità di dati stratigrafici o di altre misure geofisiche, ... etc.). Nel presente studio il problema dell'equivalenza non si pone in quanto la determinazione della V_S (come richiesto dalla normativa sismica nazionale) è stata fatta su uno spessore medio di 30 m di profondità senza la necessità di risolvere velocità alla scala del singolo strato, se non durante la fase di elaborazione. Il risultato è dato quindi dalla sommatoria dei contributi dei singoli strati secondo la (3):

$$V_S 30 = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_i}}; \quad (3);$$

dove h_i e V_i rappresentano rispettivamente lo spessore e la velocità dell' i -esimo strato.

Nella formulazione della $V_S 30$ una eventuale stima errata di spessore e/o velocità di uno strato viene forzatamente compensata nella stima di velocità e spessore in un altro segmento della colonna acustico-stratigrafica.

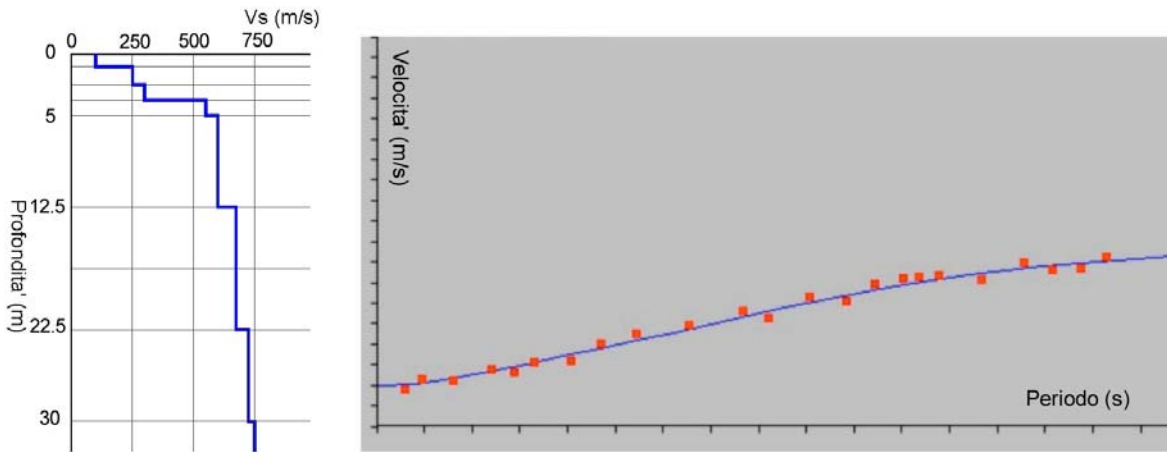


Figura 4. Esempio di modellazione 1D della V_s . Modello geometrico-acustico del sottosuolo (a sinistra). Confronto tra dati sperimentali (circoli rossi) e curva teorica (linea continua in blu) calcolata dal modello (a destra).

5 ACQUISIZIONE DEI DATI SISMICI

Come già anticipato l'acquisizione dei dati è stata progettata sulla base delle informazioni geologiche e geomorfologiche disponibili ed anche di alcune prove pilota effettuate in alcuni siti ritenuti particolarmente significativi. In particolare la distribuzione spaziale dei siti è stata definita secondo criteri legati alla genesi deposizionale mentre le geometrie ed i parametri di acquisizione sono stati definiti dopo aver valutato le condizioni di rumorosità dei siti campione.

5.1. Strumentazione e rete di misura

Per l'acquisizione dei dati sono stati impiegati due sismografi a 24 canali: un sistema DMT Compact ed un sistema ABEM Ras24. Per l'ascolto del campo d'onda sono invece stati utilizzati dei geofoni OYO GEOSPACE a frequenza naturale di 4.5 Hz. Gli amplificatori sismici scelti per le misure hanno una precisione di 24 bit nella conversione A/D risultando quindi dotati di una dinamica sufficiente per campionare il rumore sino a frequenze di 2.0-2.5 Hz (che consente di ottenere informazioni ben al di sotto della profondità di misura di progetto).

La spaziatura intergeofonica è stata impostata a 3.0 m ed in corrispondenza di ciascuna stesa sono state acquisite 10 sessioni di registrazione della durata di 30 s. Questo ha consentito di ottenere una discreta rappresentatività statistica circa il rumore sismico di ciascun sito. La qualità dei dati è stata controllata in tempo reale e tutte quelle registrazioni nelle quali era visibile una sorgente di rumore polarizzato sono state ri-acquisite. Solo in pochi casi è stato necessario ruotare lo stendimento di 90 gradi per evitare le sorgenti polarizzate.

Le coordinate plano-altimetriche di tutte le stazioni di misura sono state misurate avvalendosi di un dispositivo GPS (*Global Positioning System*) palmare. I valori, rilevati nativamente nel sistema di riferimento WGS84, sono stati convertiti nel sistema di riferimento Gauss-Boaga (datum: Roma, 1940) utilizzando una serie di punti di riferimento.

Le misure di rumore sono state effettuate su un totale di 253 siti (Tavola B) distribuiti su una griglia a maglia irregolare ed ottimizzata secondo i criteri descritti al paragrafo 3.

6 ELABORAZIONE DEI DATI

I dati sono stati elaborati con i programmi SIS Vista, CSM-CWP Seismic Unix, SEISOPT ReMi e GEOSTUDI ASTIER Swan. I primi due codici sono stati impiegati per le conversioni di formato e la riformattazione dell'*header* binario mentre i secondi due hanno consentito di effettuare l'elaborazione *strictu sensu* e cioè di calcolare gli spettri, di identificare le curve di dispersione e di costruire il modello di velocità 1D per ciascun sito investigato.

Le dieci registrazioni, originariamente acquisite in formato SEG-2, sono state prima singolarmente convertite nel formato SEG-Y e poi nel formato SU. In questo formato, che consente un più diretto accesso alle informazioni dell'*header* si è proceduto all'azzeramento di tutti i parametri geometrici presenti nel file ed alla rinumerazione delle tracce. A questo punto le 10 registrazioni sono state aggregate in un unico file e convertite in uscita nel formato standard internazionale SEG-Y con valori numerici memorizzati nel formato IBM float a 32 bit.

L'elaborazione numerica delle registrazioni si è articolata sostanzialmente in due fasi.

Nella prima fase, per ciascun sito, sono stati calcolati gli spettri $p-f$ di tutte le sessioni di misura per valutare quello di migliore qualità da utilizzare per la stima della curva di dispersione. In alcuni casi, qualora vi fossero delle incertezze sulla qualità dello spettro, gli spettri migliori sono stati sommati per costruire uno spettro medio.

In una seconda fase si è proceduto alla modellizzazione acustica 1D del sottosuolo per la stima del parametro V_{s30} seconda la tecnica del *best fitting* già descritta al paragrafo 4.1.

Per ciascun sito è stata quindi costruita una scheda digitale in formato MS ACCESS nella quale è visibile lo spettro $p-f$ e sono state poi riportate una serie di informazioni relative alle modalità di acquisizione del dato ed alla geometria dello stendimento. Le schede del rilievo, estratte in forma semplificata dalla base dati MS ACCESS, sono allegate al presente rapporto.

I dati registrati sono risultati, nel complesso, di buona qualità e solo in pochi casi vi sono state delle incertezze circa la determinazione dello spettro del modo fondamentale di vibrazione delle onde di Rayleigh.

I valori di velocità di V_{s30} , così determinati e relativi alla totalità dei siti, investigati sono stati quindi consolidati su una griglia regolare, con maglia quadrata di 1 km di apertura, con l'ausilio di un algoritmo



di rete neurale. L'applicazione di questo tipo di algoritmo ha consentito di valutare anche i parametri geologici superando, nella costruzione della mappa di sintesi, il processo di pura interpolazione spaziale del dato sismico. In particolare per ciascun nodo della griglia sono stati valutati la geologia del sito e la qualità ed i valori numerici degli spettri delle stazioni di misura circostanti.

Questo tipo di approccio, in una futura fase di ri-elaborazione del dato, qualora si rendessero disponibili altre informazioni geologiche, potrà anche essere "raffinato" con l'introduzione di una ulteriore serie di coefficienti di "pesatura" del dato sismico.

7 RISULTATI E DISCUSSIONE

Le misure di velocità effettuate nel territorio della provincia di Treviso hanno consentito di ottenere una serie di informazioni sul campo di velocità delle onde S nei primi 30 m di profondità (Tavola C). Dall'analisi dei dati si osserva una discreta differenziazione dei valori della V_S che scende dagli oltre 550 m/s nei depositi ghiaiosi di alta pianura a valori dell'ordine di 200-250 m/s nei terreni a prevalente granulometria fine della bassa pianura trevisana.

La geologia, per lo meno dei corpi deposizionali più importanti esercita un forte controllo sulla distribuzione del campo di velocità.

Per quanto riguarda l'alta pianura si osserva una correlazione quasi diretta tra la presenza del materasso ghiaioso e valori molto elevati della V_S (Figura 5). In alcuni siti la V_S supera anche i 550 m/s come ad esempio nella zona compresa tra Treviso e Montebelluna. Questi valori di velocità, particolarmente elevati, possono anche essere dovuti a locali fenomeni di cementazione delle ghiaie come già osservato in altre aree della pianura veneta.

In bassa pianura, nei terreni a prevalente granulometria fine, si osserva una considerevole riduzione dei valori della V_S (Figura 6) che comunque non scende mai al di sotto dei 200 m/s. In bassa pianura risulta particolarmente interessante un saliente positivo di velocità (con valori di V_S compresi tra 350 m/s e 400 m/s) che si allunga verso sud lungo l'asse Oderzo-Chiarano-Cessalto. Allo stato attuale delle conoscenze geofisiche è prematuro effettuare una rigorosa correlazione tra geologia e V_S si può comunque ragionevolmente ipotizzare che lungo questo asse abbia agito un corso d'acqua con energia sufficiente elevata per costruire un deposito a prevalente granulometria grossolane sino in vicinanza della costa adriatica.

Un secondo saliente, questa volta di tipo negativo, risale invece, parallelamente al precedente, verso nord-ovest, attraversando i comuni di Motta di Livenza, Mansuè, Fontanelle e Codogne. Anche in questo caso senza forzature geologiche si può ipotizzare che questa struttura a bassa velocità sia in qualche modo legata ad un corpo sedimentario a prevalente granulometria fine costruito da un corso d'acqua di bassa energia e privo di bacino montano come potrebbe essere il Fiume Livenza.

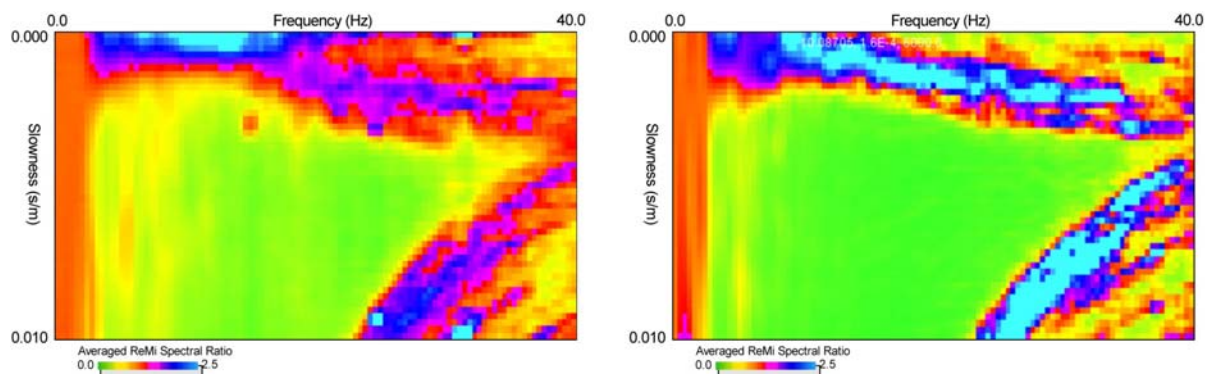


Figura 5. Esempio di spettri p-f relativi ai depositi ghiaiosi di alta pianura. Siti 001 (a sinistra) e 002 (a destra) acquisiti nel comune di Santa Lucia di Piave. Si osservi come la curva spettrale sia spostata verso la parte alta della scala della *slowness*.

Da un punto di vista normativo (ai sensi della classificazione dell'O.P.C.M. 3274/2003) e quindi relativamente alle problematiche urbanistiche, ingegneristiche e geotecniche il territorio risulta appartenere a due sole zone: la zona B e la zona C.

Nella zona B rientrano tutti quei siti nei quali i valori di V_S risultano compresi nell'intervallo 360-800 m/s mentre la zona C classifica i siti con valori di V_S ricadenti nell'intervallo 180-360 m/s.

Nel settore occidentale della provincia il limite tra le due zone attraversa, con andamento sud-ovest/nord-est, i comuni di Preganziol, Casier, San Biagio di Callalta, Salgareda, Chiarano e Caessalto. Lo stesso limite, nel settore orientale, si presenta più articolato e risale verso nord-ovest attraversando i comuni di Oderzo, Fontanelle, Codognè, Gaiarine e Portobuffolè.

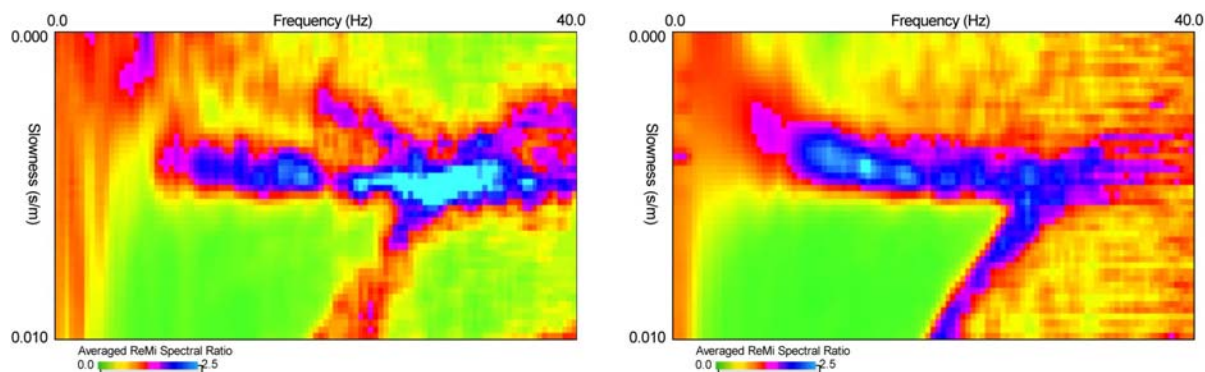


Figura 6. Esempio di spettri p-f relativi ai depositi limo-argillosi di bassa pianura. Siti 157 (a sinistra) e 208 (a destra) acquisiti rispettivamente nel comune di Monastier e di Mogliano Veneto. Si osservi come la curva spettrale sia spostata verso la parte centrale della scala della *slowness*.

Si ricorda infine che il presente studio è stato condotto per le sole finalità pianificatorie del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale e che la scala di studio, come pure la rete di misura, hanno un



carattere regionale con la principale finalità di caratterizzazione, da un punto di vista sismico, dei principali corpi deposizionali che costituiscono il suolo ed il sottosuolo del territorio provinciale. Lo studio, come pure la mappa di sintesi della V_s30 hanno quindi una valenza generale e devono servire solamente come guida per un corretto approfondimento delle conoscenze locali. Le indagini di legge, previste per le singole opere di ingegneria civile, da effettuare *in situ*, non devono in nessun modo essere sostituite dal presente documento.