

*analisi del sottosuolo mediante l'uso di microtremori (Refraction Microtremor)
finalizzata allo studio sismico nel Comune di Albino*

ESEGUITO DA PROGEA CONSULTING
dr. Ceresoli Giancarlo
Aprile 2007

PREMESSA

La tecnica di analisi del sottosuolo mediante l'uso di microtremori (Refraction Microtremor) prende origine dagli studi e dalle sperimentazioni condotte da J. Louie presso la Nevada University e fornisce una caratterizzazione semplificata di volumi relativamente ampi del sottosuolo in profili verticali 1D sino alla profondità di 100 metri.

ReMi può caratterizzare un orizzonte meno veloce che è sottostante ad uno più veloce (velocity reversal) che rappresenta una condizione non distinguibile con il metodo tradizionale della sismica a rifrazione.

In situazioni dove un terreno più "competente" è sovrapposto a una zona più debole legata a subsidenza o al collasso di materiali più deboli sottostanti o a spazi vuoti, ReMi ha la capacità di individuare la velocità delle onde S dell'orizzonte debole sottostante. E' inoltre efficace come metodo nella caratterizzazione rapida e generale del sottosuolo, specialmente se abbinata alla sismica a rifrazione, con lo scopo di definire il contatto roccia / terreno o il contrasto tra materiali più deboli / più compatti

I dati di campagna (analisi dei microtremori) possono essere acquisiti con un equipaggiamento standard di sismica a rifrazione, usando geofoni ad alta frequenza per stendimenti corti, con profondità di investigazione limitata e geofoni a bassa frequenza per applicazioni geotecniche tipiche con profondità di indagine elevata. La fonte di energia delle onde di superficie per il ReMi può essere il rumore ambientale o i semplici passi per stendimenti che indagano profondità limitate o rumore di veicoli per lunghezze maggiori. I profili ReMi si eseguono con successo in aree urbane con attività considerevole, usando il rumore ambientale come fonte di energia. Per indagini presso autostrade, il passaggio dei veicoli può servire da sorgente di energia. Le velocità delle onde S (onde di taglio), il tipico parametro misurato dei materiali geologici, sono una funzione dei moduli dei vari materiali nel profilo del sottosuolo. Le basi della teoria sono le stesse dell'analisi spettrale delle onde di superficie (SASW) e della multi analisi delle onde di superficie (MASW).

GENERALITA' SUL METODO ReMi

L'analisi e l'interpretazione ReMi viene eseguita utilizzando un software appropriato prodotto dalla Optim LLC (Reno, Nevada, USA) che tra l'altro fornisce direttamente il valore di V_{s30} e la categoria della classificazione del suolo secondo la normativa americana.

L'elaborazione del segnale consiste nell'elaborare una trasformata bidimensionale "slowness-frequency" ($p-f$) che analizza l'energia di propagazione del rumore in entrambe le direzioni della linea sismica e nel rappresentarne lo spettro di potenza su un grafico $p-f$ (fig.1/b).

In questa immagine risaltano gli andamenti che possiedono sia una spiccata coerenza di fase che una potenza significativa, ed è possibile un riconoscimento visivo delle onde di Rayleigh, che hanno carattere dispersivo, da quelle riconducibili ad altri modi e tipi di onde (onde di pressione, suono, rumore incoerente). A questo punto l'operatore, in modo arbitrario ed in base all'esperienza, esegue un picking attribuendo ad un certo numero di punti una o più slowness (p o $1/\text{velocità di fase}$) per talune frequenze. Questi valori vengono in seguito plottati su un diagramma *periodo-velocità di fase* per l'analisi della curva di dispersione (fig.1/a) e l'ottimizzazione di un modello diretto (fig. 2).

EQUIPAGGIAMENTO E PROCEDURE

Le indagini sono state eseguite in accordo con quanto descritto da Louie per sviluppare profili verticali 1D delle onde di taglio. E' stato impiegato lo stesso equipaggiamento che generalmente viene usato per la sismica a rifrazione.

Quando opportuno e/o possibile dal punto di vista logistico, vengono acquisiti entrambi i dati, onde P e onde S con la stessa stesa sismica ; in questo modo i risultati delle indagini sono complementari e servono come controllo di qualità, tarandosi a vicenda.

Equipaggiamento

E' stato usato un sismografo multicanale capace di acquisire fino a 36000 campioni per canale con intervallo di campionamento da 1 a 2 ms in formato SEG2 o SEG Y. I cavi dei geofoni hanno spaziatura delle uscite di 10 metri con la possibilità di tutte le misure intermedie. I geofoni verticali con frequenza di risonanza di 4.5 Hz sono stati usati per l'analisi dei profili verticali delle onde S. Come sorgente di energia delle onde superficiali si è sfruttato il "noise" ambientale a banda larga.

Procedure ReMi

Sono state eseguite tre linee sismiche della lunghezza di **115 metri** utilizzando due cavi sismici e **24** geofoni mentre la distanza tra i geofoni è risultata essere di **5 metri**. La spaziatura geofonica rappresenta una sorta di filtro di frequenza per il segnale che può arrivare da tutte le direzioni. Pertanto è implicito che maggiore è la spaziatura minore è la frequenza del segnale utile campionabile e conseguentemente maggiore è la profondità di investigazione.

L'acquisizione dati è consistita nel campionamento dell'ambiente e/o delle onde di superficie generate (un evento di campionamento) in corrispondenza della stesa sismica per diversi secondi. I parametri di acquisizione adottati sono i seguenti : sample rate 2 m/s ; record lenght 32 s ; numero di misure acquisite = 10 (5 + 5) ; infatti si è provveduto a ruotare di 90° lo stendimento sismico (accompagnato dalla ripetizione di alcune acquisizioni).

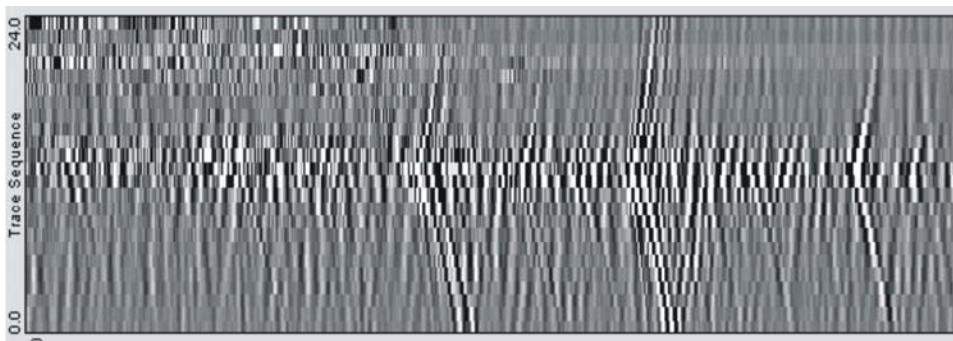
INTERPRETAZIONE

Premessa

Sebbene un controllo iniziale e preliminare di qualità dell'interpretazione dei dati ReMi può essere eseguito sul terreno, l'interpretazione completa va fatta in ufficio. I dati acquisiti in campagna sono stati trasferiti dal sismografo al personal computer, utilizzando per l'interpretazione il software SeisOpt ReMi della Optim, che è composto da due moduli.

Analisi del segnale

Nella prima fase elaborativi dei record l'interprete si è limitato ad eseguire alcuni passi obbligati quali la conversione dei file ed il preprocess semiautomatizzato che filtra ed equalizza le tracce. Inoltre sono stati introdotti alcuni parametri : la geometria utilizzata, la frequenza massima da indagare, la velocità di fase minima di partenza ed il numero di vettori "slowness" ($np=2*n$ geofoni).



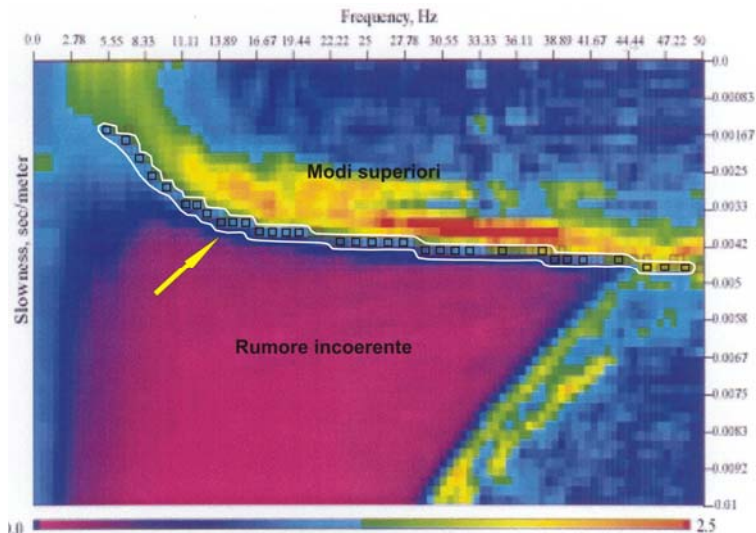
Esempio di "trace sequence"

Gli ultimi tre parametri, opportunamente scelti, concorrono ad aumentare il dettaglio dello spettro di potenza $p-f$ ed a renderlo più adatto ad una campionatura meno ambigua della curva di dispersione.

Sostanzialmente il corretto dimensionamento dei parametri suesposti e che sono suggeriti dall'esperienza dell'interprete, ha lo scopo di diminuire il grado di incertezza e di arbitrarietà che distingue le operazioni di campionature della curva di dispersione.

Picking

Muovendosi con il puntatore del mouse sopra l'immagine $p-f$ (fig. 1/b) sono state selezionate un ragionevole numero di triplette di valori $(f,p,V_{\text{apparente}})$ ricalcando il trend visualizzato nel grafico $p-f$.



Spettro di potenza con evidenziata l'area utile per il corretto picking della velocità di fase

I criteri che si è cercato di seguire nella scelta del picking sono :

- preferibilmente selezionare solo quelle triplette contraddistinte da una buona definizione dello spettro di potenza (elevata intensità di segnale).
- si è cercato di scegliere la velocità più bassa, prossima al confine tra incoerenza propria del rumore e segnale (tonalità azzurre posizionate al contatto tra verde/giallo e blu/viola) in quanto eseguire il picking lungo l'inviluppo a velocità più bassa fornisce maggiori garanzie di campionare velocità che appartengono al modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

Modellazione delle onde di taglio

I dati selezionati dall'immagine $p-f$ sono stati plottati su un diagramma nel quale compare una curva di distorsione (fig. 1/a) calcolata a partire da un modello di V_s che è modificabile dall'interprete. Variando il numero di strati, la loro velocità e la densità, la curva di distorsione calcolata viene adattata fino a farla aderire il più possibile a quella sperimentale ottenuta con il picking.

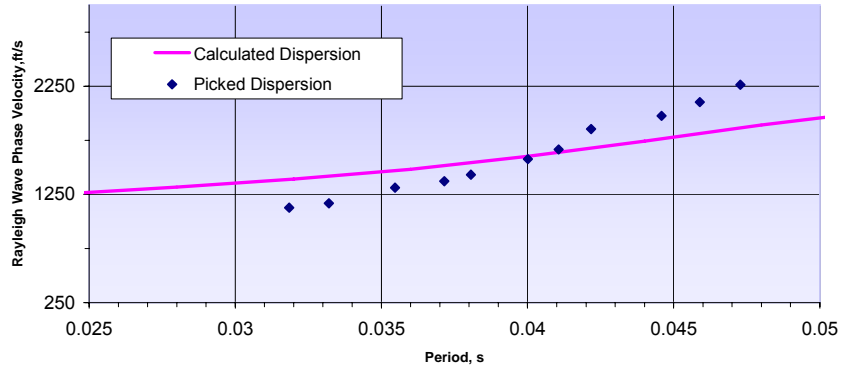
Si tratta di una modellazione diretta, monodimensionale, che può accettare inversioni di velocità con la profondità ed in cui conta molto l'esperienza del geofisico.

Si ricorda, infine, che i profili di V_s ricavati con il metodo ReMi non presentano una soluzione univoca in quanto più di un modello può fornire curve di dispersione simili tra loro e con il medesimo RMS; pertanto è fondamentale avere delle conoscenze dirette sulla stratigrafia del sottosuolo indagato.

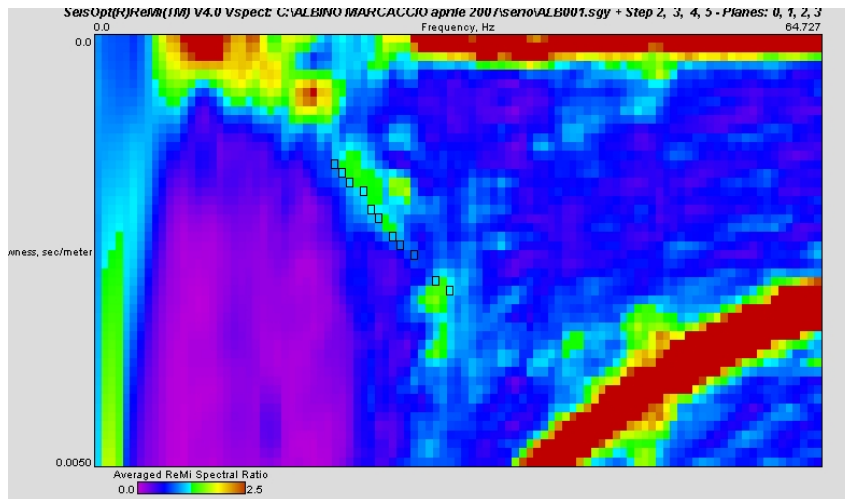
Sponda destra Serio

Supportive Illustration

Dispersion Curve Showing Picks and Fit (fig 1/a)



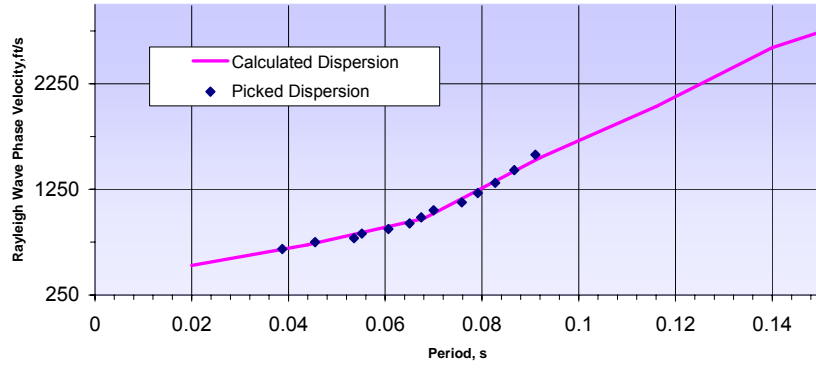
p-f Image with Dispersion Modeling Picks (fig 1/b)



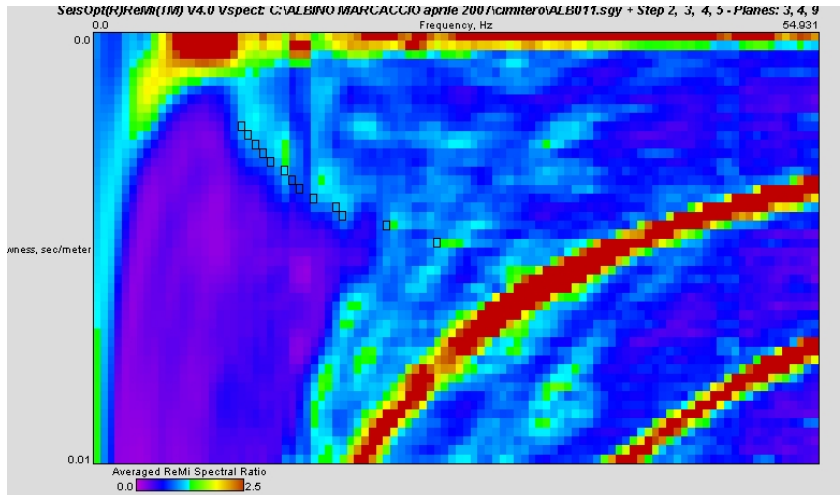
Zona cimitero

Supportive Illustration

Dispersion Curve Showing Picks and Fit (fig 1/a)



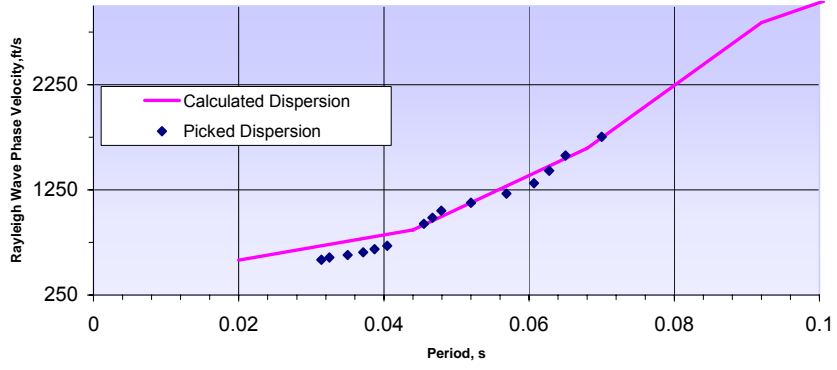
p-f Image with Dispersion Modeling Picks (fig 1/b)



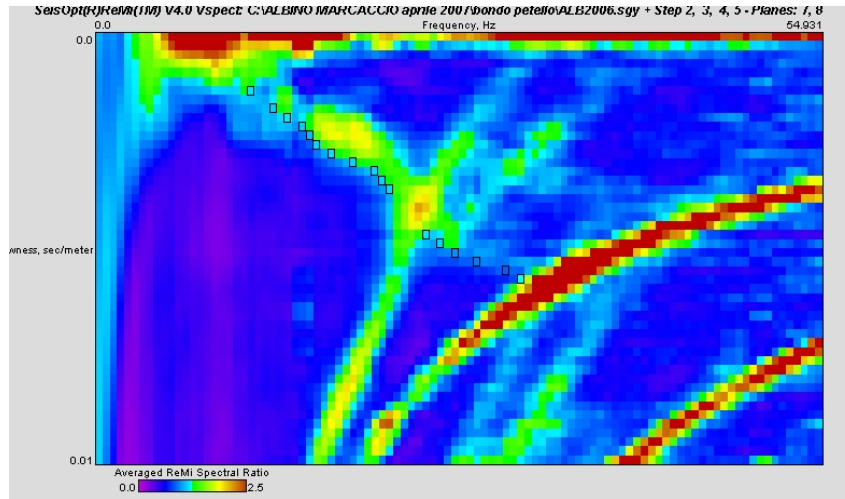
Località Bondo Pestello

Supportive Illustration

Dispersion Curve Showing Picks and Fit (fig. 1/a)



p-f Image with Dispersion Modeling Picks (fig. 1/b)



Modello diretto

Nelle fig. 2 "Vs model" vengono diagrammati gli andamenti delle onde di taglio e di compressione secondo un rapporto profondità/velocità. In questo modo è possibile ricostruire un modello del terreno che, sostanzialmente, si traduce in una successione stratigrafica. L'analisi del sottosuolo mediante le tecniche che utilizzano le onde di superficie consente di evidenziare, (dove presenti) al contrario di quanto avviene con la rifrazione, le inversioni di velocità consentendo così di "esacerbare" situazioni anomale e delicate dal punto di vista prettamente geotecnico (strati più lenti al di sotto di strati più veloci e quindi ad elevata rigidità). E' da sottolineare comunque che questo tipo di interpretazione non presenta una soluzione unica, pertanto è importante avere delle conoscenze dirette sulla stratigrafia del sottosuolo indagato. Nel caso specifico, in mancanza di dati stratigrafici è possibile trarre solo alcune considerazioni di massima.

In sintesi:

- località Bondo Petello e "zona Cimitero Comunale" : a partire da una profondità compresa tra oltre 6 - 11 metri, con ogni probabilità, è stato intercettato un materiale piuttosto compatto ascrivibile al conglomerato.
- Sponda destra fiume Serio : al di sotto di un primo orizzonte a medio bassa densità (depositi alluvionali) con letto a circa 8 metri, dovrebbero attestarsi materiali più fini e compatti

Sponda destra Serio

	Density	Shear/Compression Velocities		
1.575 m	2.0 g/cc	247.315 m/s	428.35 m/s	ratio: 1.732
	2.0 g/cc	499.441 m/s	865.031 m/s	ratio: 1.732
7.875 m	2.0 g/cc	746.085 m/s	1292.219 m/s	ratio: 1.732
	2.0 g/cc	861.186 m/s	1491.574 m/s	ratio: 1.732
13.425 m	2.0 g/cc	998.21 m/s	1728.9 m/s	ratio: 1.732
	2.0 g/cc			
30.0 m	2.0 g/cc			

Fig. 2/1

Zona cimitero

	Density	Shear/Compression Velocities		
1.776 m	2.0 g/cc	166.049 m/s	287.597 m/s	ratio: 1.732
	2.0 g/cc	230.588 m/s	399.379 m/s	ratio: 1.732
3.99 m	2.0 g/cc	342.688 m/s	593.535 m/s	ratio: 1.732
	2.0 g/cc	357.393 m/s	619.005 m/s	ratio: 1.732
11.177 m	2.0 g/cc	1179.466 m/s	2042.836 m/s	ratio: 1.732
	2.0 g/cc			
30.0 m	2.0 g/cc			

Fig. 2/2

Località Bondo Petello

	Density	Shear/Compression Velocities		
1.575 m	2.0 g/cc	176.063 m/s	304.94 m/s	ratio: 1.732
	2.0 g/cc	236.353 m/s	409.364 m/s	ratio: 1.732
4.575 m				
6.075 m	2.0 g/cc	658.389 m/s	1140.33 m/s	ratio: 1.732
	2.0 g/cc	970.805 m/s	1681.435 m/s	ratio: 1.732
10.275 m				
	2.0 g/cc	1036.577 m/s	1795.352 m/s	ratio: 1.732
19.575 m				
	2.0 g/cc	1348.993 m/s	2336.456 m/s	ratio: 1.732
30.0 m				

Fig. 2/3

CALCOLO DELLE “V_{s30}” (velocità di taglio nell’ambito dei primi trenta metri di sottosuolo)

L’applicazione del software SeisOpt ReMi Version 3.0 consente di calcolare attraverso la determinazione della “Dispersion Curve” , il valore delle velocità di taglio (Vs) nell’ambito dei primi 30 o più metri investigati.

Sulla base di quanto sopra esposto, si è provveduto al calcolo delle V_{s30} mediante la seguente espressione:

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

dove :

h_i = spessore in metri dello strato i-esimo per un totale di N strati presenti nei primi 30 metri di sottosuolo

V_i = velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio g < 10⁻⁶) dello strato i-esimo per un totale di N strati presenti nei primi 30 metri di sottosuolo

N = numero strati nell’ambito dei primi 30 metri di sottosuolo

Dallo sviluppo del calcolo si ottiene un valore di V_{s30} pari a :

sponda destra Serio V_{s30} = 709,9 m/s

zona cimitero V_{s30} = 527,9 m/s

località Bondo Petello V_{s30} = 834,1 m/s

L’Ordinanza n° 3274 del marzo 2003 della Presidenza del Consiglio dei Ministri: “ **Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche**

per le costruzioni in zona sismica ” aggiorna la normativa sismica in vigore, con l'attribuzione alle diverse località del territorio nazionale un valore di scuotimento sismico di riferimento, espresso in termini di incremento dell'accelerazione al suolo. Inoltre tale Ordinanza propone l'adozione di un sistema di caratterizzazione geofisica e geotecnica del profilo stratigrafico del suolo, mediante cinque (A – B – C – D – E) tipologie di suoli (più altri due speciali S_1 e S_2), da individuare i relazione ai parametri di velocità delle onde di taglio mediate sui primi 30 metri di terreno (V_{s30}).

Le classi di cui sopra sono definite da parametri indicati nel EC8 (euro codice 8) e più specificatamente : velocità delle onde S, numero dei colpi della prova SPT, coesione non drenata.

Il valore delle V_{s30} calcolati precedentemente, per le località “sponda Serio” e “zona cimitero” corrispondono alla **B** : “*Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o di argille molto consistenti con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 e 800 m/s, (ovvero resistenza penetrometrica NSPT > 50, o coesione non drenata $c_u > 250$ KPa).*”, mentre per la “località Bondo Petello” corrispondono alla **A**: “*Formazioni litoidi o terreni omogenei caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 metri.*”

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA CAMPAGNA GEOFISICA REMI



PIANO SISMICO DI ALBINO: INDAGINI REMI - STAZIONE 1 PISTA CICLABILE PRESSO IL FIUME SERIO



PIANO SISMICO DI ALBINO: INDAGINI REMI - STAZIONE 2 CIMITERO DI ALBINO



PIANO SISMICO DI ALBINO: INDAGINI REMI - STESURA DEI CAVI CON I GEOFONI



PIANO SISMICO DI ALBINO: STAZIONE DI BONDO PETELLO



PIANO SISMICO DI ALBINO: INDAGINI REMI - ACQUISITORE



PIANO SISMICO DI ALBINO: INDAGINI REMI - ACCOPPIAMENTO GEOFONI TERRENO