

P. Barsanti

C. Civelli

# [MODELLAZIONE SISMICA E STABILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE]

[quaderno di approfondimento alle Linee Guida NTC 08-Gruppo Interregionale Ordine dei Geologi]

## COMMISSIONE INTERREGIONALE NTC08

COMPONENTI	ORDINE	COMPONENTI	ORDINE
AIRALDI Paolo	LIGURIA	GALATA' Giovanni	TRENTINO ALTO ADIGE
ANGELONE Domenico	MOLISE	GARBIN Fabio	LAZIO
ANIBALDI Andrea	MARCHE	GIOVINE Vincenzo	LOMBARDIA
BARSANTI Pietro	TOSCANA	LENARDUZZI Gianni	FRIULI VENEZIA GIULIA
BONIOLI Luisella	PIEMONTE	LOMBARDI Gerardo	CAMPANIA
BORGIA Umberto	CAMPANIA	PARMEGGIANI Fabio	EMILIA ROMAGNA
BRUNALDI Raffaele	EMILIA ROMAGNA	PATERNOSTER Stefano	TRENTINO ALTO ADIGE
CADAU Giambattista	SARDEGNA	PETRINI Fabrizio	ABRUZZO
CAGALLI Andrea	VENETO	PIGNATELLI MARIO	VALLE D'AOSTA
CARBONE Raffaele	BASILICATA	PIGNOCCHI Andrea	MARCHE
CARBONELLA Rocco	EMILIA ROMAGNA	PISTIS Salvatore	SARDEGNA
CHESSA Mauro	TOSCANA	PLESCIA Vito Francesco	MOLISE
CINUS DARIO	SARDEGNA	REINA Alessandro	PUGLIA
CIVELLI Carlo	LIGURIA	RISPOLI Francesca	EMILIA ROMAGNA
DEL GENIO Vincenzo	CAMPANIA	SAVI Francesco	UMBRIA
DORDI Amedeo	LOMBARDIA	STORONI RIDOLFI Sergio	MARCHE
FAGIOLI Maria-Teresa	TOSCANA	TODARO Pietro	SICILIA
FALVO Beniamino	CALABRIA	TRONCARELLI Roberto	LAZIO
FARINA Daniele	MARCHE	TROSSERO Massimo	PIEMONTE
FASSER Giovanni	LOMBARDIA	VENISTI Nicola	VENETO
FRAGALE Francesco	CALABRIA	VERRANDO Ampelio	LIGURIA
FRANCESCHINI Marco	EMILIA ROMAGNA	ZANNINIELO Basilio	VENETO

**Responsabile Scientifico:** Eros AIELLO

**Coordinatore:** Maria-Teresa FAGIOLI

**Comitato di redazione:** Carlo CIVELLI, Francesco FRAGALE,  
Fabio GARBIN, Gerardo LOMBARDI,  
Roberto TRONCARELLI

## **PREFAZIONE**

*Alla base del lungo e prezioso lavoro che ha portato all'attesa pubblicazione di questi primi quaderni vi è la consapevolezza della comunità tecnico-scientifica di dover esercitare un necessario compito di formazione ed aggiornamento, attribuendosi un importante ruolo etico, che si traduce in un altrettanto importante ruolo sociale.*

*La preparazione di chi opera nel settore delle costruzioni, forse ancor di più in questo particolare momento, assume una valenza strategica nei confronti di istanze di sicurezza e di qualità, che nel caso delle attività progettuali si declinano con il raggiungimento di obiettivi di sicurezza dell'opera e del suo contesto e, non ultimo, con il gradimento della comunità dei cittadini.*

*Allo stesso tempo chi commissiona studi e progetti deve essere consapevole del risultato atteso, che è funzione del variare del livello di indagini e di analisi.*

*Un buon progetto non è la risultante dell'applicazione tout-court di procedure nel processo di progettazione, ma è figlio di un ordinato sviluppo delle attività, capace di minimizzare gli oneri dovuti ad errori ed a sprechi, ed è frutto di una attività in cui la sfera intellettuale e la capacità manageriale sono complementari.*

*Le attività di progettazione, con le sue analisi, i suoi approfondimenti, i suoi studi specialistici, le sue indagini, si configurano, per loro natura, in modo ben diverso rispetto ad altri processi, essendo il prodotto di azioni difficilmente standardizzabili, riconducibili alla necessità di gestire problematiche, quindi competenze sempre diverse, ed in cui la competenza e la preparazione del gruppo di progettazione e dei singoli professionisti gioca un ruolo decisivo.*

*Chi ha compiuto lo sforzo di scrivere questi quaderni ha pensato di operare soprattutto nella direzione della qualità dei professionisti del settore e dei geologi in particolare, che oggi svolgono un ruolo strategico nelle attività di progettazione, rivolgendosi ad essi non solo nelle loro funzioni di progettisti, ma anche in quelle di controllori.*

*Ai primi perché la quantità di discipline e di soggetti che concorrono oggi alla determinazione di un progetto impone una istanza di cultura tecnica generale anche da parte dei singoli specialisti, che devono poi trovare all'interno del progetto la propria matrice di qualità.*

*Ai secondi perché è nella fase di controllo che deve estrinsecarsi l'analisi qualitativa dei contenuti progettuali, in quanto le istanze di sicurezza diventano appannaggio della committenza attraverso le procedure di validazione imposte dalla legge.*

*Non è più possibile infatti demandare al cantiere la modifica di progetti inadeguati o inesatti, che non soddisfino requisiti di compatibilità, produttività, prevenzione dei rischi, sostenibilità, soddisfazione del cliente e immagine.*

*A chi ha lavorato alla stesura di questo testo va il riconoscimento della comunità geologica, di quella più ampia di area tecnica, ma anche della società civile, perché i suoi contenuti consentono di indirizzare il processo di coordinamento delle idee e le conseguenti scelte progettuali verso requisiti di fattibilità, coerenza e conformità.*

*Riconoscimento che va esteso ad un sistema ordinistico delle professioni tecniche, e dei geologi in*

*particolare, che dimostra ancora una volta di saper anteporre gli interessi della collettività a quelli di categoria.*

*Ed infine un ringraziamento sentito agli Ordini Regionali, la cui dinamicità ed il cui impegno costante nelle innumerevoli questioni che coinvolgono la categoria sono alla base del progressivo riconoscimento del ruolo centrale attribuito ai geologi, che tuttavia ancora oggi molti tardano a riconoscerli.*

**Il Presidente del Consiglio Nazionale dei Geologi**

*Gian Vito Graziano*

## INTRODUZIONE

*Le nuove Norme Tecniche sulle Costruzioni furono approvate in fretta e furia sull'onda emotiva del terremoto dell'Aquila, e scaraventate, così com'erano, con piglio decisionista, sul mondo edilizio e sulle professioni tecniche che da anni ne suggerivano gli affinamenti.*

*Nessun dubbio sulla necessità di allineare la normativa italiana agli Eurocodici, ma la frettolosa logica dell'emergenza portò a non approfondire adeguatamente più di un aspetto della progettazione edilizia; gli aspetti geologici non rimasero immuni da ciò.*

*La Commissione Interregionale degli Ordini dei Geologi, che già da tempo stava lavorando per proporre i necessari affinamenti e chiarimenti alla norma in gestazione, non si arrese e fatto tesoro di quanto già elaborato ha trasformato quel che avrebbe dovuto essere un supporto tecnico al legislatore in un vademecum per i colleghi alle prese con le carenze della norma promulgata.*

*In pieno spirito di sussidiarietà e grazie al volontariato di tanti colleghi vuoi professionisti che del mondo accademico, la Commissione Interregionale ha preparato "Le linee guida per le NTC" che furono presentate nel 2° Forum degli Ordini Regionali e del Consiglio Nazionale dei Geologi "NTC-2008 Linee Guida" (Firenze, 21 gennaio 2011). Insieme alle Linee Guida sono state presentate le prime bozze dei quaderni; elaborati tecnici prodotti per supportare i colleghi nell'applicazione di quei punti oscuri o insufficientemente dettagliati della norma.*

*A distanza di 18 mesi dal Forum questo CdRom presenta la versione definitiva di un primo gruppo di quaderni.*

*Il CdRom contiene:*

- 1. Glossario;*
- 2. Quaderno "Una metodologia per la scelta dei parametri geotecnici caratteristici";*
- 3. Quaderno "Fondazioni superficiali";*
- 3a. Esempi relativi alle fondazioni superficiali: collana "gli spilli";*
- 4. Quaderno "Muri di sostegno e strutture miste";*
- 5. Quaderno "Edifici esistenti";*
- 6. Quaderno "Costruzioni modeste, costruzioni semplici, opere minori, elementi non strutturali, opere provvisoriale, opere interne";*
- 7. Quaderno "Modellazione sismica e stabilità alla liquefazione".*

*Il Cd Rom contiene inoltre le normative regionali in materia di opere minori o modesta rilevanza (NTC 08 cap. 6.2.2) pervenute a tutto il 24 aprile 2012.*

*I quaderni con il loro contenuto di riferimenti tecnici, bibliografia ed esempi, lungi da ogni pretesa di esaustività, vogliono comunque segnalare l'avvio di un percorso virtuoso nel quale i colleghi, pongono a disposizione della categoria l'esperienza e la preparazione specifica maturata in decenni di attività professionale e di ricerca, per consentire a ciascuno di noi di affrontare ogni nuovo impegno professionale e*

*tecnico forti dell'esperienza di tutti.*

*La selezione degli argomenti trattati dai quaderni ha cercato di rispecchiare la maggioranza delle problematiche che ogni collega che opera nel comparto delle costruzioni si trova ad affrontare.*

*La Commissione ha ritenuto, inoltre, opportuno elaborare anche un Glossario per prevenire fraintendimenti e conseguenti incomprensioni derivanti da differenti interpretazioni delle tecnologie.*

*Alla produzione di questo CdRom hanno partecipato sotto la guida tecnico-scientifica del Prof. Eros Aiello colleghi di varie Regioni. A loro un ringraziamento caloroso per aver reso possibile l'iniziativa che assume un carattere di particolare rilevanza in un momento in cui subdoli ed interessati attacchi al geologo, diretti a relegarlo nel settore dell'edilizia in ruoli subalterni, segnalano la rapace miopia di certi poteri forti.*

*Se da un lato i terremoti e le catastrofi naturali segnalano l'indispensabilità dei nostri saperi di veri ed unici specialisti del sottosuolo, elaborati tecnici come quelli contenuti nel CdRom dimostrano la capacità della nostra categoria di fornire contributi stringenti e fattivi alla risoluzione di problematiche complesse.*

**Il Coordinatore della Commissione Interregionale**

*Maria-Teresa Fagioli*

<b>SOMMARIO</b> .....	2
PARTE I*: PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	4
PREMESSA.....	4
1. PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE.....	7
2. NTC 2008: DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA LOCALE MEDIANTE APPROCCIO SEMPLIFICATO.....	14
3. ALCUNE CRITICITÀ DELLE NTC 2008.....	21
1) Il Coefficiente di amplificazione stratigrafica $S_s$ .....	21
2) Definizioni delle Categorie di sottosuolo e $V_{s30}$ .....	21
La categoria A.....	21
Le categorie B, C, D.....	22
La categoria E ed i casi dubbi _ indicazioni di comportamento.....	23
4. LE ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	25
PARTE II* **: STABILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE.....	26
1. Generalità.....	26
2. Dati di base per valutare la suscettibilità' alla liquefazione.....	30
3. Stima della magnitudo attesa.....	30
4. Metodi semplificati per valutare la suscettibilità' dei terreni alla liquefazione.....	33
5. Alcune osservazioni ai contenuti delle NTC.....	38
PARTE III* : TECNICHE DI INDAGINE.....	39
1) PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE CON ONDE P ED SH (da Gruppo di Lavoro MS 2008, con modifiche).....	41
2) PROSPEZIONI DOWNHOLE (da Gruppo di Lavoro MS 2008, con modifiche).....	47
3) CONO SISMICO SCPT (PROSPEZIONE DOWNHOLE O CROSSHOLE IN FORO DI PROVA PENETROMETRICA CPT O CPTU) (da IT Programma VEL Regione Toscana, con modifiche).....	54
4) PROSPEZIONI MASW (MULTICHANNEL ANALYSIS SURFACE WAVES) (da Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana – 2011 – Foti S., con modifiche).....	55
5) MISURE DI RUMORE SISMICO AMBIENTALE A STAZIONE SINGOLA (da Gruppo di Lavoro MS 2008 e Ingegneria Sismica n. 2 - 2011, con modifiche).....	60
6) PROSPEZIONI RE.MI. (REFRACTION MICROTREMORS) (da Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana – 2010 – Franceschini A.).....	67
7) PROVE ESAC (ANTENNA SISMICA) (da: Caratterizzazione sismica esplorativa dei territori di Anghiari, Sansepolcro e Pieve Santo Stefano – Università di Siena - Albarello D. – 2005).....	69
8) OSSERVAZIONI SULL'ATTENDIBILITÀ DELLE PROVE BASATE SULLA PROPAGAZIONE DELLE ONDE SUPERFICIALI (da Ingegneria Sismica n° 2 – 2011).....	73
9) CONFRONTO TRA I PRINCIPALI METODI DI INDAGINE SISMICA.....	75
PARTE IV*: ESEMPI APPLICATIVI.....	76
I CASI CERTI.....	76
Esempio 1: Categoria di sottosuolo A.....	76
Esempio 2: Categoria di sottosuolo B.....	77
Esempio 3: Categoria di sottosuolo C.....	79
Esempio 4: Categoria di sottosuolo D.....	80
Esempio 5: Categoria di sottosuolo E.....	83

I CASI DUBBI E LA CATEGORIA S2.....	84
Esempio 6: Categoria S2 – Per approssimazione Categoria B .....	84
Esempio 7: Categoria S2 – Per approssimazione Categoria E .....	86
Esempio 8: Categoria S2 – Per approssimazione Categoria E .....	88
Esempio 9: Analisi di risposta sismica locale monodimensionale.....	91
GLOSSARIO .....	100
BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE .....	109

\* A cura di Pietro Barsanti

\*\*A cura di Carlo Civelli

## PARTE I: PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E RISPOSTA SISMICA LOCALE

### PREMESSA

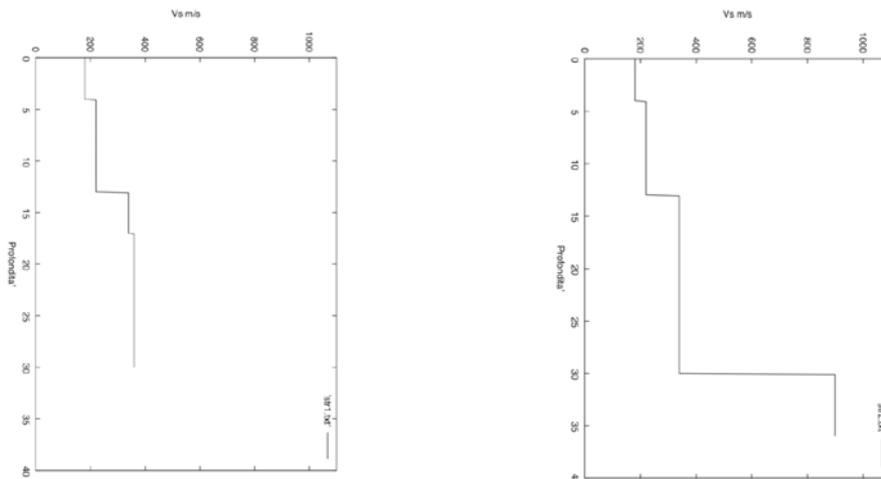
La collocazione della valutazione dell'azione sismica "ex abrupto" al § 3 delle NTC 08, ben prima quindi della definizione del "modello geologico", che avviene solo al § 6 – Progettazione Geotecnica, risente evidentemente dell'impostazione ingegneristica di tutta la normativa.

Al contrario, in assenza di studi di Microzonazione Sismica, è solo dopo aver definito il "Modello Geologico di Riferimento - M.G.R." in modo chiaro ed esaustivo, che, il progettista geologo (e solo lui), potrà decidere, in relazione sia alle condizioni geologico-stratigrafiche e strutturali sia in funzione dell'importanza del progetto:

- 1) tipologia, qualità e quantità delle indagini geotecniche e geofisiche;
- 2) se è correttamente percorribile ed utilizzabile l'approccio semplificato (basato sull'individuazione della "categorie di sottosuolo" e, purtroppo, quasi sempre utilizzato nella comune pratica professionale) o, viceversa, se è più opportuna o addirittura necessaria l'analisi di risposta sismica locale (definizione degli specifici spettri di risposta di sito e di progetto).

E' compito specifico del Geologo escludere l'approccio semplificato quando le condizioni stratigrafiche e la morfologia sepolta del bedrock indicano la possibilità che si verifichino effetti di sito bidimensionali; lo stesso quando le conoscenze geologiche fanno presumere la presenza di elevati contrasti di velocità tra copertura e bedrock anche a profondità superiori a 30 m, ovvero se indagini geognostiche e geotecniche o misure di rumore sismico ambientale abbiano evidenziato forti contrasti di consistenza e/o di velocità negli strati più superficiali (vedi gli esempi di seguito).

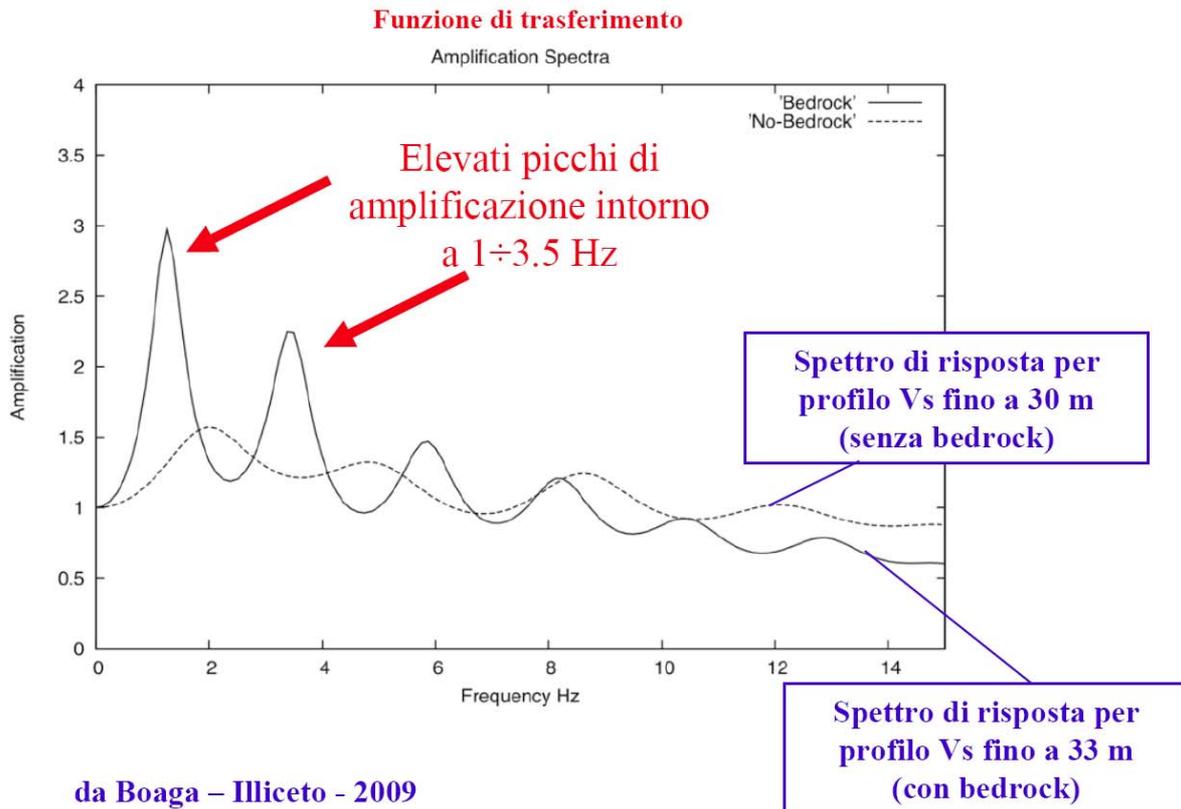
Il riferirsi esclusivamente alle  $V_{s30}$  (definita come la misure della velocità equivalente delle onde di taglio nei primi trenta metri sotto la base della fondazione) ed alle categorie di sottosuolo può risultare in taluni casi eccessivamente cautelativo, in altri può invece sottostimare notevolmente lo spettro di risposta di sito. Un tipico esempio di insufficiente indagine è quello che segue.



Da Boaga - Illiceto 2009

Nel caso a sinistra è stato ricavato il profilo di velocità  $V_s$  fino a 30 m, con velocità medie  $V_s = 200\div 300$  m/sec, nel secondo a destra fino a 35 m, individuando proprio a partire da 30 m il bedrock sismico con  $V_s = 900$  m/sec.

La funzione di trasferimento associata al profilo di velocità più profondo mette in evidenza elevati picchi di amplificazione intorno a 1 Hz ed a 3.5 Hz che non possono risaltare dal profilo fino a 30 m.



La valutazione “ragionata” della categoria di sottosuolo, così come più in generale la valutazione dell’azione sismica e la risposta sismica locale, non possono prescindere da un corretto inquadramento geologico-stratigrafico e strutturale del sito e sono quindi strettamente legate al Modello Geologico di Riferimento MGR, il quale deve innanzitutto caratterizzare il sito di indagine in funzione della presenza o meno di “coperture” e del loro spessore, dato che questo parametro è fondamentale sia nell’analisi di risposta sismica locale, sia nella valutazione semplificata attraverso le categorie di sottosuolo.

A rafforzare questo principio si deve anche considerare che per la definizione dell’Azione Sismica di progetto, introdotta al par. 3.2.2 delle NTC senza alcun riferimento al modello geologico-strutturale, si va ad interessare un “volume sismico” che nella maggioranza dei casi eccede il “volume geotecnico significativo”, sia che l’azione sismica sia valutata mediante specifiche analisi di risposta sismica locale, sia che si ricorra all’analisi semplificata, ovvero alla definizione della “categoria di sottosuolo”.

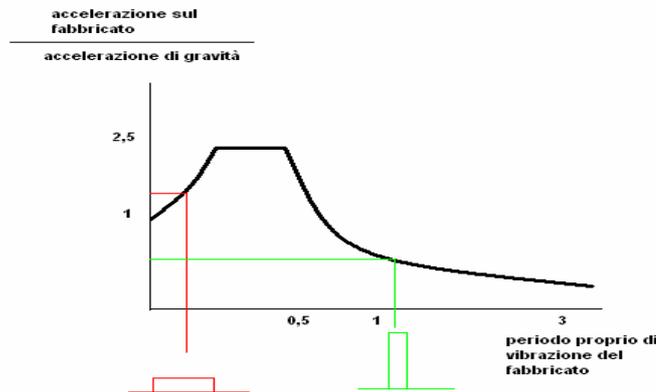
Il modello geologico è quindi propedeutico non solo alla programmazione delle indagini ma anche all’elaborazione del modello sismico e di quello geotecnico. Non a caso sia il D.M. 11.03.88, il D.M. 14/09/05 ed in ultimo il D.M. 14 Gennaio 2008 – Norme tecniche per le costruzioni - prevedono che in casi particolari le indagini di sottosuolo per quest’ultimo possano essere “ridotte od omesse”, mentre il quadro geologico di riferimento è sempre dovuto.

In mancanza di indagini di risposta sismica locale si ricorre alle categorie di sottosuolo le quali, benché spesso abbiano poco a che vedere, in quanto basate sulle  $V_{s30}$ , sia con le forme spettrali sia con i fattori di amplificazione reali attesi al sito, nondimeno condizionano fortemente la progettazione strutturale dell’opera in dipendenza dei diversi spettri di risposta associati: l’assunzione di una categoria anche presuntivamente più cautelativa in termini di accelerazione di sito porta alla definizione di uno spettro di risposta non appropriato e conseguentemente ad un non corretto dimensionamento della struttura.

A ciascuna categoria di sottosuolo è associato uno spettro di risposta ( $S_e / T$ ) che mostra la variazione in ampiezza dell’accelerazione al suolo in funzione del periodo delle vibrazioni del terreno: come anzidetto si ha “risonanza” e, quindi, particolare accentuazione dell’amplificazione, per periodo  $T = 4h/V_s$ , con  $h$  spessore della copertura e  $V_s$  velocità delle onde di taglio nella copertura; è noto che l’amplificazione massima del moto del suolo di un terreno si ha alla sua frequenza di risonanza.

Frequenza e periodo fondamentale dello strato ( $F$ ,  $T$ )

$$F = V_s/4 H \quad T = 4H/V_s$$



Schema di raffronto tra spettro normalizzato di risposta sismica del terreno e periodo proprio degli edifici

Gli edifici, a loro volta, sono caratterizzati da un periodo proprio di vibrazione che dipende essenzialmente dall'altezza degli stessi ed il loro comportamento, durante il sisma, viene assimilato a quello degli "oscillatori semplici" (pendoli); generalmente, quindi:

- fabbricati alti, snelli e flessibili, si caratterizzano per oscillazioni ampie e di più **lungo periodo**;
- fabbricati bassi, tozzi e rigidi, si caratterizzano per oscillazioni contenute e di **breve periodo**.

È facile comprendere, nell'esempio di spettro elastico normalizzato sopra riportato, che saranno i fabbricati caratterizzati da periodi propri compresi tra circa 0,2 e 0,5 sec ad essere maggiormente sollecitati dallo scuotimento sismico.

Risentimenti particolari si avranno qualora il periodo del terreno (frequenza) o comunque il periodo fondamentale (frequenza fondamentale) coincida con il periodo proprio del fabbricato (frequenza struttura), determinando, in questi casi, dannosi effetti di doppia risonanza.

Per tale ragione anche nel caso di approccio semplificato è opportuna, quando non già desumibile da studi di Microzonazione Sismica MS o dalle altre indagini sismiche finalizzate alla determinazione dello spessore della copertura ed alla misura delle  $V_s$  e  $V_{s30}$ , la stima della **frequenza fondamentale di vibrazione del terreno** mediante misure di rumore sismico ambientale a stazione singola (microtremori) procedendo a:

- misurare la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno;
- misurare (edificio esistente) o valutare (edificio in progetto) la frequenza propria dell'edificio;
- confrontare e valutare, di concerto con il progettista strutturale, se esistono problemi di risonanza, e decidere se e quali accorgimenti utilizzare per modificare il sistema di riferimento.

Attenzione tuttavia: come vedremo negli esempi della Parte IV la massima amplificazione del moto sismico corrispondente alla frequenza di risonanza "principale" del terreno può avvenire a frequenze diverse da quelle per le quali si ha la massima accelerazione, spesso al di fuori del range di frequenze di interesse per lo specifico fabbricato in studio.

Si noti che le misure di microtremori a stazione singola, come vedremo anche in alcuni esempi di seguito riportati, sono utili da un lato per verificare la presenza o meno di forti contrasti di velocità negli strati più superficiali, situazione che spesso comporta lo "sforamento" dello spettro di risposta elastico di sito rispetto agli spettri di normativa, dall'altro per estendere in profondità, possibilmente fino al bedrock sismico, il profilo di velocità  $V_s$  desunto da altre metodologie di indagine come le Downhole e Crosshole o le MASW attive, scopo per il quale sono sempre più utilizzate anche misure passive con array bidimensionali (MASW passive, ESAC etc.).

## 1. PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

La definizione della pericolosità sismica di base del territorio nazionale trae le sue origini dalla Carta delle Zone Sismogenetiche ZS9, elaborata dal Gruppo di Lavoro 2004, nella quale sono individuate le zone caratterizzate da diversi valori della Magnitudo momento massima  $M_{wmax}$ :

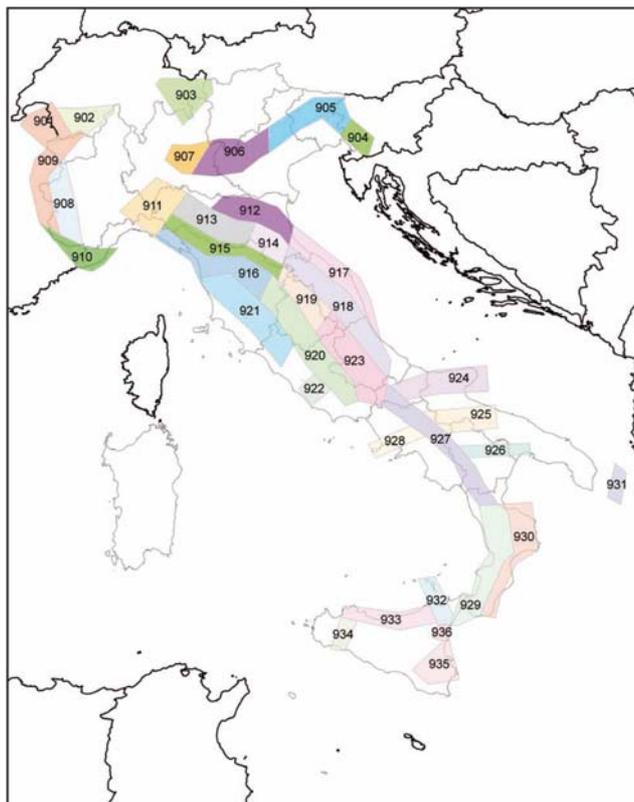
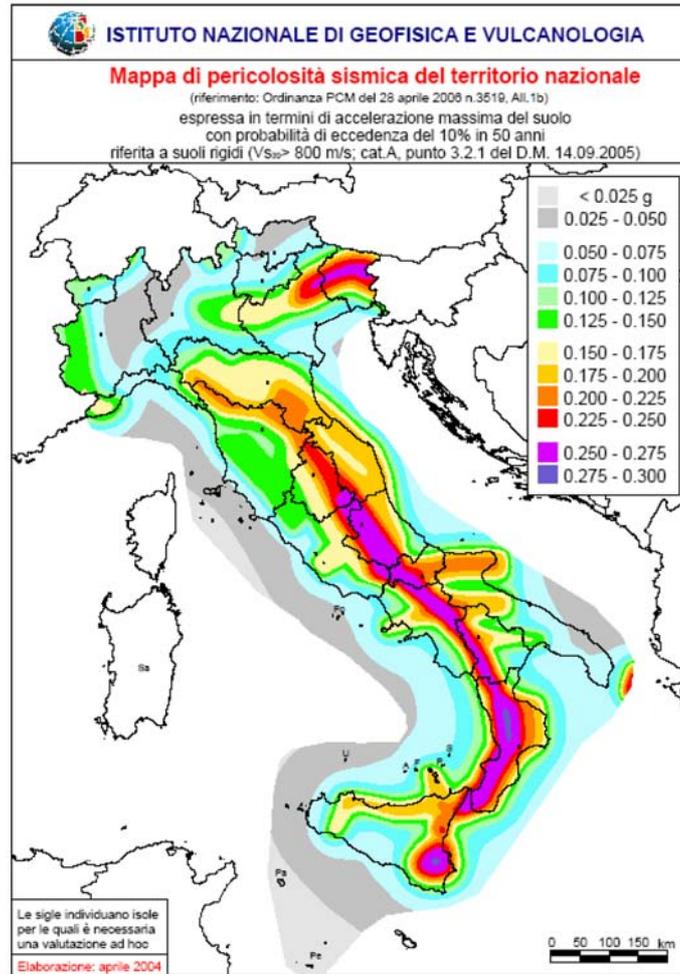


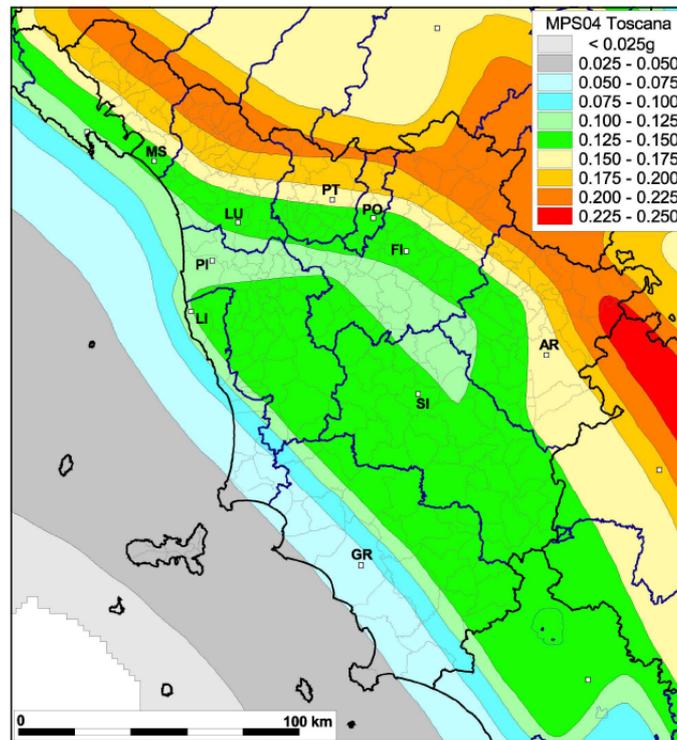
Tabella 2.8-1 – Valori di  $M_{wmax}$  per le zone sismogenetiche di ZS9 (estratto da Gruppo di lavoro, 2004)

Nome ZS	Numero ZS	$M_{wmax}$
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.83
Appennino Abruzzese, Sannio - Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

Sulla base di tale modello è stata elaborata la Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale approvata dalla Commissione Grandi Rischi del Dipartimento della Protezione Civile nella seduta del 6 aprile 2004, recepita dalla O.P.C.M. n° 3519 del 28 Aprile 2006 e divenuta infine la Mappa di riferimento prevista dal D.M. 14 Gennaio 2008 – Norme tecniche per le costruzioni.

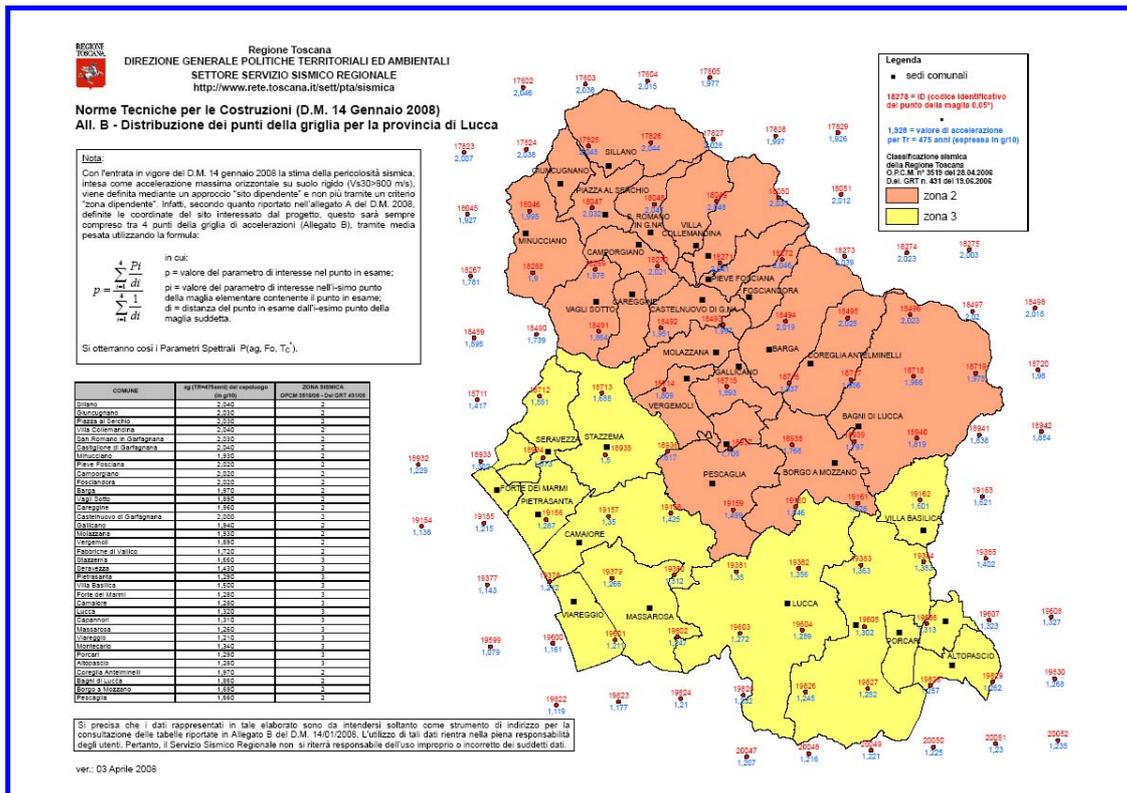


Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale



Esempio: Mapa di pericolosità sismica della Regione Toscana

Con l'entrata in vigore delle Norme tecniche per le costruzioni – D.M. 14 Gennaio 2008, la pericolosità sismica di base del territorio nazionale, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido affiorante (ovvero caratterizzato da velocità delle onde sismiche trasversali  $V_s \geq 800$  m/sec) viene ora definita mediante un approccio “sito dipendente” e non più “zona dipendente”: in altre parole, definite le coordinate del sito interessato dal progetto, questo sarà sempre compreso tra quattro dei 10751 punti della griglia di accelerazioni (calcolate per un tempo di ritorno di 475 anni) indicate nelle Mappe di Pericolosità Sismica Nazionale di cui all'Allegato B del D.M. 14 Gennaio 2008, e, tramite media pesata, ad esso competeranno valori specifici di accelerazione di base  $a_g$  e dei **parametri ( $F_o$ ,  $T_c^*$  etc.) che permettono di definire gli spettri di risposta**, ai sensi delle NTC 08, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale (categ. A).



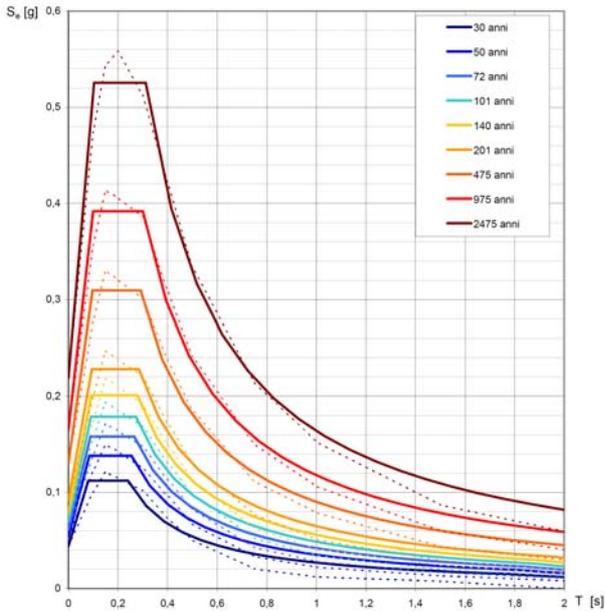
Esempio: Classificazione sismica del territorio della Provincia di Lucca e griglia delle accelerazioni

I valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_c^*$  sono indicati per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni:

**Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_c^*$  per i periodi di ritorno  $T_R$  di riferimento**

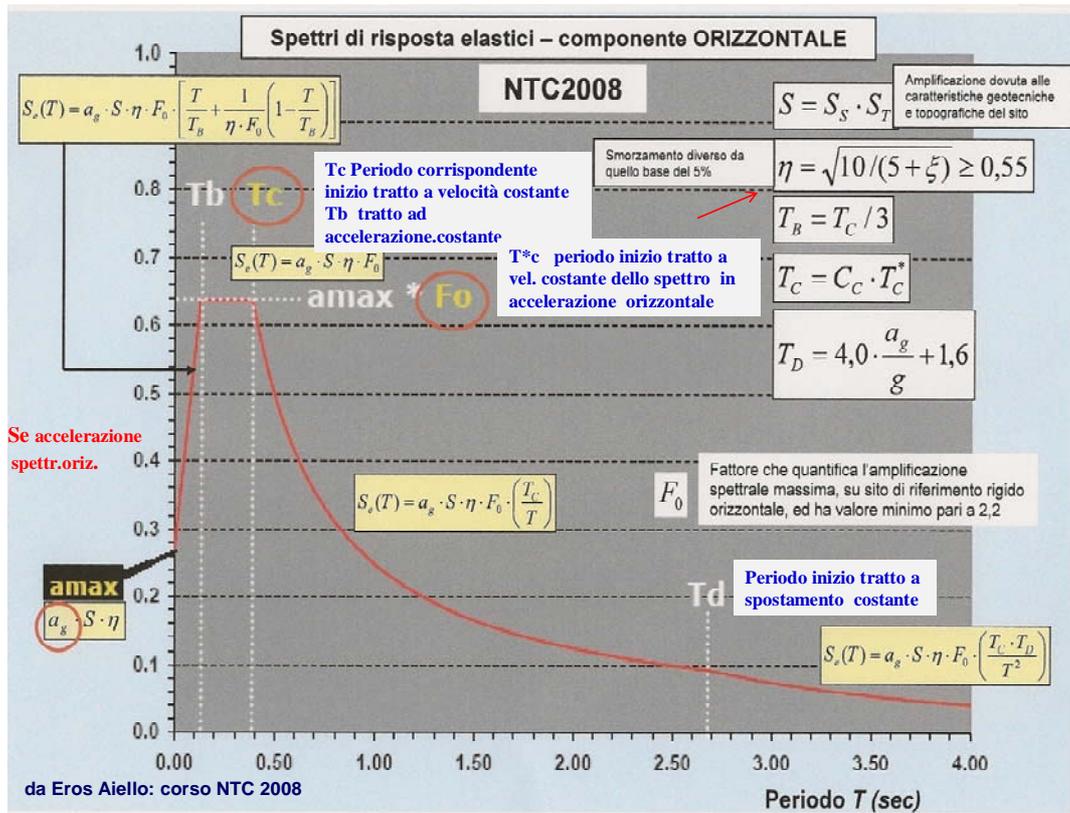
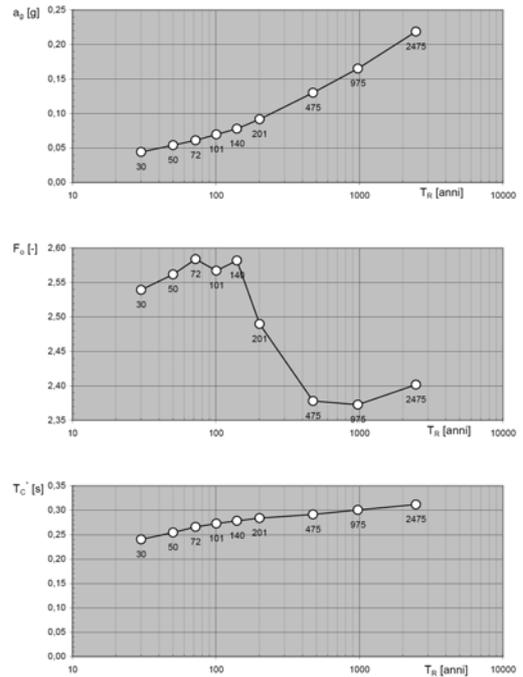
$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_c^*$ [s]
30	0,043	2,544	0,236
50	0,053	2,553	0,251
72	0,060	2,582	0,265
101	0,068	2,559	0,272
140	0,077	2,571	0,277
201	0,090	2,492	0,282
475	0,129	2,372	0,290
975	0,164	2,383	0,295
2475	0,217	2,397	0,310

Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno  $T_R$  di riferimento



NOTA:  
Con linea continua si rappresentano gli spettri di Normativa, con linea tratteggiata gli spettri del progetto S1-INGV da cui sono derivati.

Valori dei parametri  $a_g, F_0, T_C$ : variabilità col periodo di ritorno  $T_R$



Senza entrare nel dettaglio, lo spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali è definito da quattro espressioni (periodi  $T$ ,  $T_b$ ,  $T_c$ ,  $T_d$ ), ciascuna delle quali è funzione di alcuni parametri tra cui:

- $a_g$  : l'accelerazione di base (che dipende dalla collocazione del sito rispetto alla griglia di accelerazioni INGV);
- $\eta$ : il fattore di alterazione dello spettro elastico per coefficienti di smorzamento convenzionali  $\xi$  diversi dal 5%;
- $F_0$ : il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima (che dipende dalla collocazione del sito all'interno della griglia di accelerazioni);
- $T_c$ :  $C_c \times T_c^*$  il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro (in cui  $C_c$  dipende dalle condizioni sismostratigrafiche del sito - vedi in seguito le categorie di sottosuolo - e  $T_c^*$  dipende dalla collocazione del sito);
- $S$ : il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione:

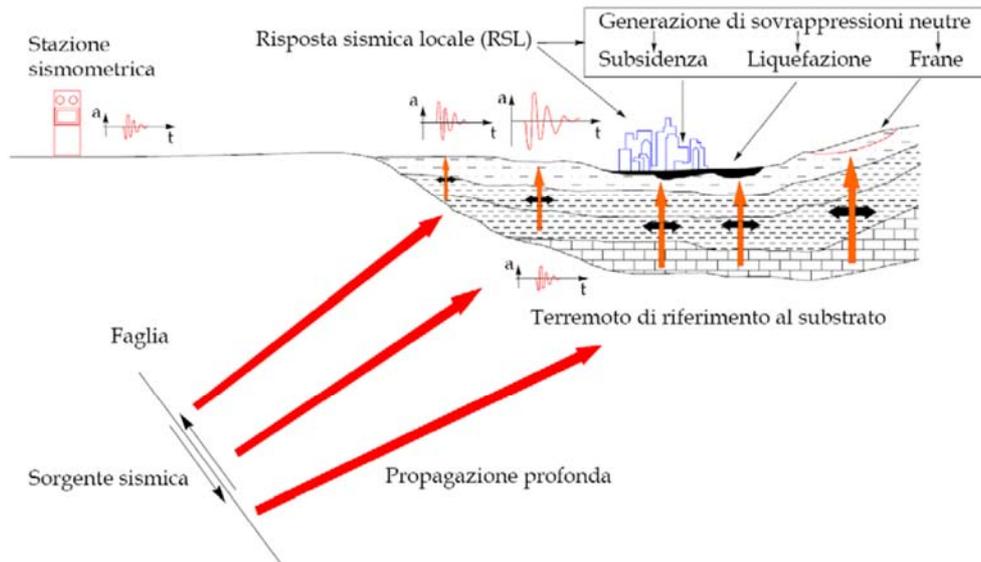
$$S = S_s * S_t \quad \text{in cui}$$

$S_s$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica (che dipende dalle condizioni sismostratigrafiche del sito = categoria di sottosuolo)

$S_t$  = coefficiente di amplificazione topografica (che dipende dalla posizione topografica del sito).

Poiché l'accelerazione di base dipende dalla collocazione del sito, ovvero dalle coordinate geografiche dello stesso, è importante che il sistema di riferimento sia l'ED50: nel caso si ricavi la posizione del sito da Google Earth o programmi similari, le cui coordinate sono riferite al sistema WGS84, è necessario convertire in coordinate ED50. Lo scostamento di circa 200 m non comporta generalmente significative differenze dei parametri associati  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$ , ma tali differenze possono divenire importanti quando il sito ricade al confine tra due maglie della griglia di accelerazioni e, particolarmente, nelle zone caratterizzate da elevati gradienti di accelerazione e qualora sia utilizzata l'interpolazione per media ponderata invece che l'interpolazione bilineare ("superficie rigata").

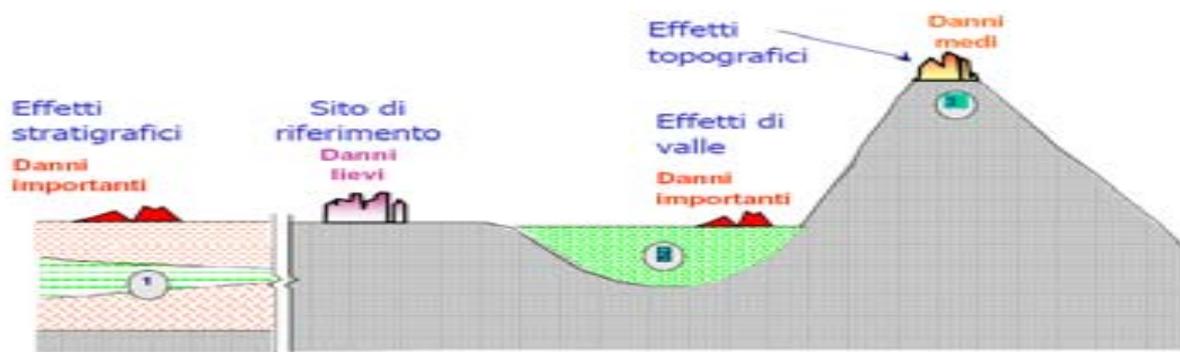
L'azione sismica così individuata viene successivamente variata, con le modalità precisate dalle NTC 08, per tener conto delle modifiche prodotte dalle **condizioni stratigrafiche locali** del sottosuolo, effettivamente presenti nel sito di costruzione e dalla **morfologia della superficie**; tali modifiche caratterizzano la **risposta sismica locale (RSL)**.



La **Risposta Sismica Locale** è l'azione sismica quale emerge in "superficie" a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, subite per effetti morfologici o subite trasmettendosi dal substrato rigido attraverso le coperture.

Le situazioni geologiche e morfologiche, in cui le condizioni locali possono portare a una modificazione del segnale sismico in arrivo al sito su roccia sono essenzialmente tre:

- i depositi costituiti da terreni stratificati di caratteristiche meccaniche diverse da quelle della roccia sottostante (effetti stratigrafici 1D);
- i depositi di valle con bordi e morfologie del substrato irregolari dove le onde sismiche possono subire fenomeni di rifrazione e riflessione con generazione all'interfaccia di onde superficiali e concentrazioni di energia (effetti di bordo 2D-3D);
- la sommità di rilievi collinari, creste, promontori costituiti da formazioni rocciose, profili di versanti, pendii, bordi di terrazzi (effetti topografici)



I diversi profili sismostratigrafici del sottosuolo, in base alle caratteristiche di spessore e di rigidità elastica (prodotto della densità per la velocità al quadrato) delle onde sismiche trasversali), possono amplificare il moto sismico in superficie rispetto a quello indotto alla loro base: il fattore moltiplicativo delle azioni sismiche orizzontali di progetto dipende cioè dalla natura, dallo spessore e soprattutto dalla velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_{sh}$  (componente orizzontale delle onde di taglio) all'interno delle coperture.

La risposta sismica locale è condizionata, oltre che da fattori morfologici, cioè dalla collocazione del sito (valle stretta, cresta, pendio etc.), soprattutto dalla natura dei depositi sollecitati dalla vibrazione sismica: questi infatti amplificano l'accelerazione massima in superficie rispetto a quella che ricevono alla loro base, agendo al contempo da filtro del moto sismico, diminuendone l'energia complessiva ma modificandone la

composizione con accentuazione di alcune frequenze e smorzamento di altre. A parità di impedenza sismica (prodotto della velocità delle onde di taglio  $V_s$  per la densità  $\rho$ ) del bedrock, l'amplificazione inoltre è tanto più elevata quanto minore è l'impedenza sismica dei terreni di copertura.

L'aumento di ampiezza di una vibrazione al passaggio da un mezzo più rigido ad uno con impedenza minore è d'altronde un fenomeno fisico ben conosciuto, regolato, limitatamente alle onde Sh, dalla relazione:

$$A_2 = A_1 \frac{2}{1 + \frac{V_2 \rho_2}{V_1 \rho_1}}$$

in cui  $A_1$  è l'ampiezza di un'onda propagantesi verticalmente da un semispazio di densità  $\rho_1$  e nel quale la velocità di propagazione delle onde di taglio Sh è  $V_1$  ad uno strato con densità  $\rho_2$  e velocità  $V_2$ .

Nella realtà si hanno poi amplificazioni anche maggiori dovute alla sovrapposizione degli effetti di riflessione multipla dalla superficie libera, dalla frontiera tra i due mezzi ed alle riflessioni multiple nello strato a bassa impedenza poggiate su substrato più rigido. La risonanza si ha per  $T = T_r = 4H/(nV_s)$  (con  $n = 1, 3, 5$ ;  $H$  = spessore della copertura e  $V_s$  = velocità del primo strato a bassa impedenza): pertanto in prima approssimazione, solo dal punto di vista del primo principale modo di vibrazione della copertura, si possono assumere come più soggette ad amplificazione quelle vibrazioni con lunghezza d'onda vicina a 4 volte lo spessore della copertura. L'assetto superficiale dei terreni ricoprenti il substrato roccioso controlla quindi il fenomeno della risonanza sismica per frequenze critiche, con esaltazione delle frequenze dello spettro all'interno del range di frequenze di interesse ingegneristico (0,5÷10 Hz).

Da quanto sopra esposto appare da subito evidente l'importanza di una corretta misura della velocità delle onde di taglio  $V_s$  nelle coperture e nel substrato.

## 2. NTC 2008: DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA LOCALE MEDIANTE APPROCCIO SEMPLIFICATO

Nel D.M. 14 Gennaio 2008 viene evidenziato che, "ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi" di risposta sismica locale (3.2.2. e 7.11.3): in mancanza di tali studi nelle Norme tecniche per le costruzioni si definiscono per questo aspetto cinque (A, B, C, D, E) categorie di sottosuolo a diversa rigidità sismica, caratterizzate da velocità  $V_{s30}$  (definita come velocità delle onde di taglio di un terreno omogeneo nei primi 30 metri sotto la base della fondazione equivalente a quella di un terreno stratificato di pari spessore) decrescenti o da contrasti di rigidità sismica particolari nei primi 20 m sotto la superficie del terreno (categoria E), che determinano diverse condizioni amplificative e diverse cambiamenti della forma spettrale rispetto allo spettro di risposta su suolo rigido:

- A) **Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  superiori a 800 m/sec, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, 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** con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 360 m/sec e 800 m/sec (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{spt30} > 50$  nei terreni a grana grossa e  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).
- C) **Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati, o 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  $V_{s30}$  compresi tra 180 m/sec e 360 m/sec ( $15 < N_{spt30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < cu_{30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).
- D) **Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati, o 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  $V_{s30}$  inferiori a 180 m/sec (ovvero  $N_{spt30} < 15$  nei terreni a grana grossa e  $cu_{30} < 70$  kPa nei terreni a grana fina).
- E) **Terreni dei sottosuoli tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento** (con  $V_{s30} > 800$  m/sec).

In aggiunta a queste due categorie, per le quali le norme definiscono le azioni sismiche da considerare nella progettazione, se ne definiscono altre due, per le quali sono richiesti studi speciali per la definizione dell'azione sismica da considerare:

- S1 – *Depositati di terreni caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  inferiori a 100 m/sec (ovvero  $10 < cu_{30} > 20$  kPa) che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche;*
- S2 – *Depositati di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.*

Nelle classificazioni precedenti  $V_{s30}$  è la velocità equivalente delle onde di taglio che viene calcolata con la seguente espressione:

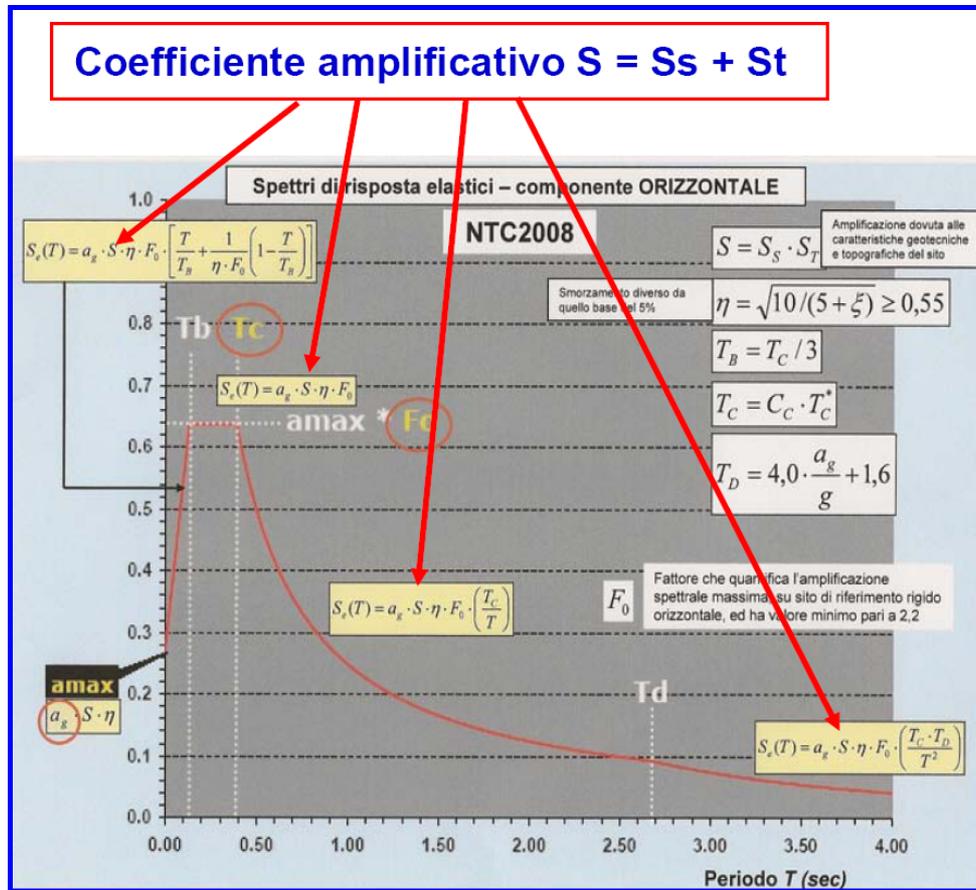
$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

TIPO DI TERRENO	PROFILO STRATIGRAFICO	PARAMETRI		
		$V_{s30}$ m/s	N <sub>SPT</sub>	$c_u$ kPa
<b>A</b>	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi	> 800		
<b>B</b>	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	< 800 > 360	> 50	> 250
<b>C</b>	Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza	< 360 > 180	< 50 > 15	< 250 > 70
<b>D</b>	Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti	< 180	< 15	< 70
<b>E</b>	Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di $V_{s30}$ simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{s30} > 800$ m/s			
<b>S1</b>	Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ( $PI > 40$ ) e contenuto di acqua	< 100		< 20 > 10
<b>S2</b>	Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti			

tabella 1: categoria dei suoli di fondazione (O.P.C.M. 3274; D.M. 14.09.05); in evidenza il parametro  $V_{s30}$

Attenzione: lo spessore di 30 metri individuato dalle norme per il calcolo dell'amplificazione stratigrafica non ha alcun fondamento scientifico rigoroso: è semplicemente mutuato dall'approccio americano basato su un gran numero di verticali indagate e di correlazioni su uno spessore di 100 piedi, pari a circa 30 m.

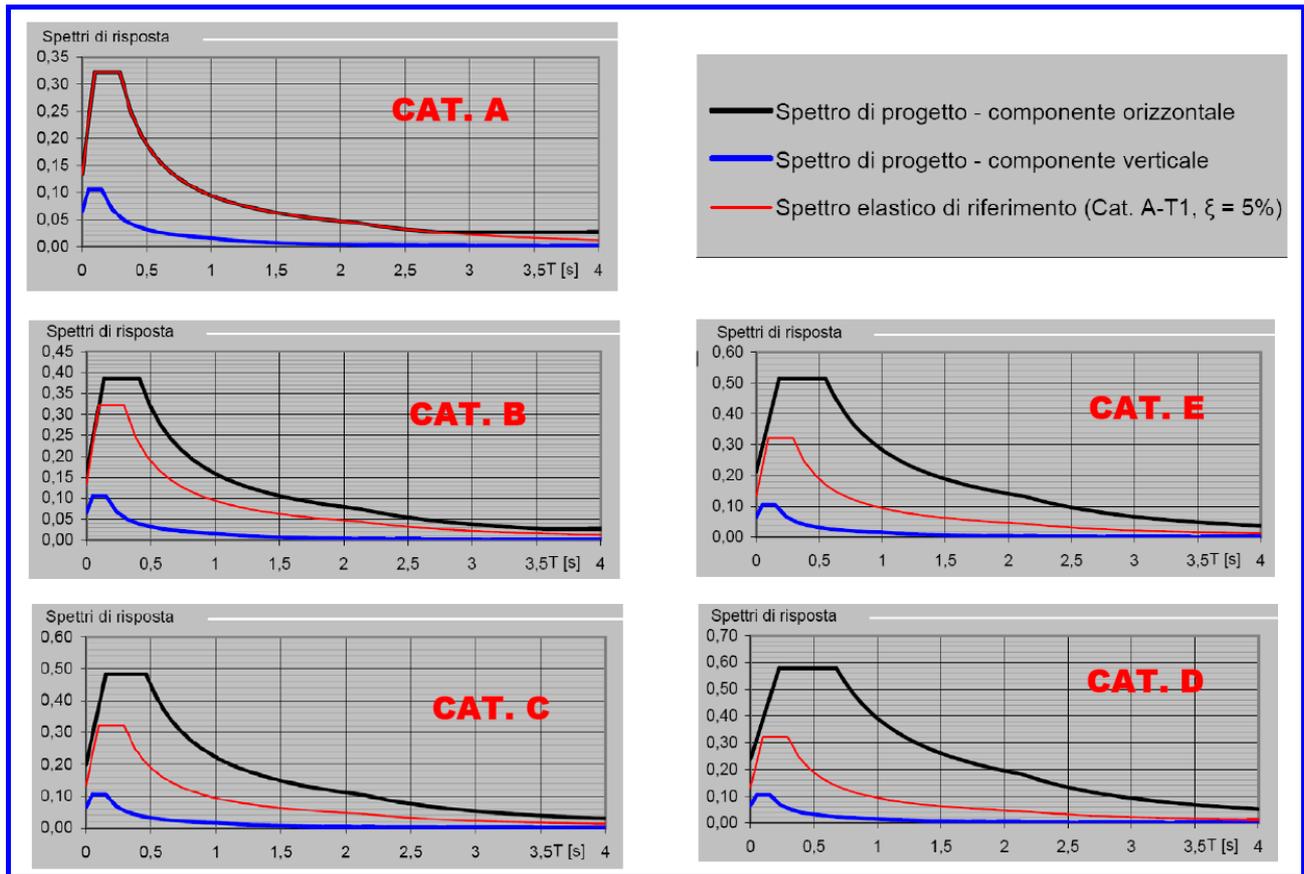
In assenza di analisi di risposta sismica locale, la forma spettrale su sottosuolo rigido di categoria A viene modificata in funzione dei coefficienti  $S_s$  (coefficiente di amplificazione stratigrafica)  $C_c$  e  $S_t$  (coefficiente di amplificazione topografica) che intervengono nel calcolo dei diversi rami dello spettro e che variano in dipendenza della categoria di sottosuolo:



## Amplificazione stratigrafica

Tabella 3.1.V – Espressioni di  $S_s$  e di  $C_c$

Categoria sottosuolo	$S_s$	$C_c$
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$



Forme spettrali per le cinque categorie di sottosuolo per un sito generico

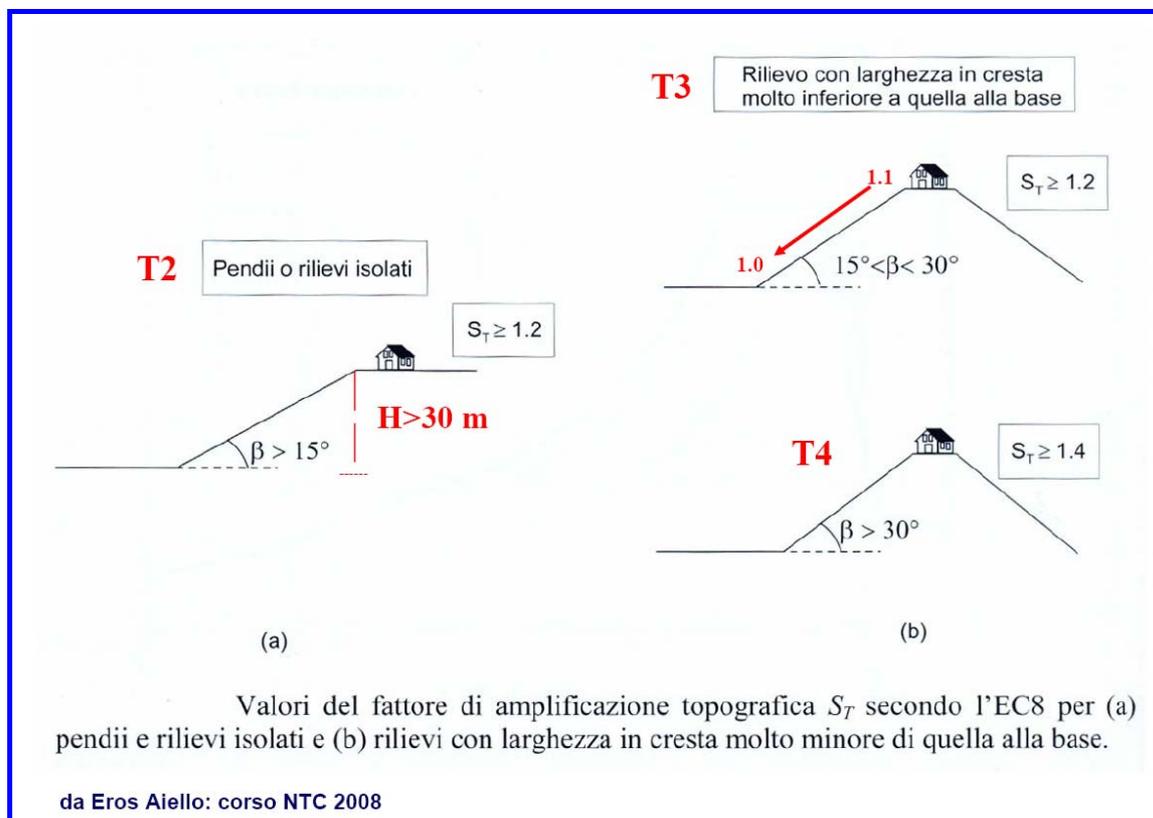
La variazione spaziale del coefficiente di amplificazione topografica è definita da un decremento lineare con l'altezza del pendio o rilievo, dalla sommità o cresta fino alla base dove  $S_T$  assume valore unitario.  $S_T$  si utilizza solo se  $H > 30$  m.

**Tabella 3.2.IV – 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 $i > 30^\circ$	

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

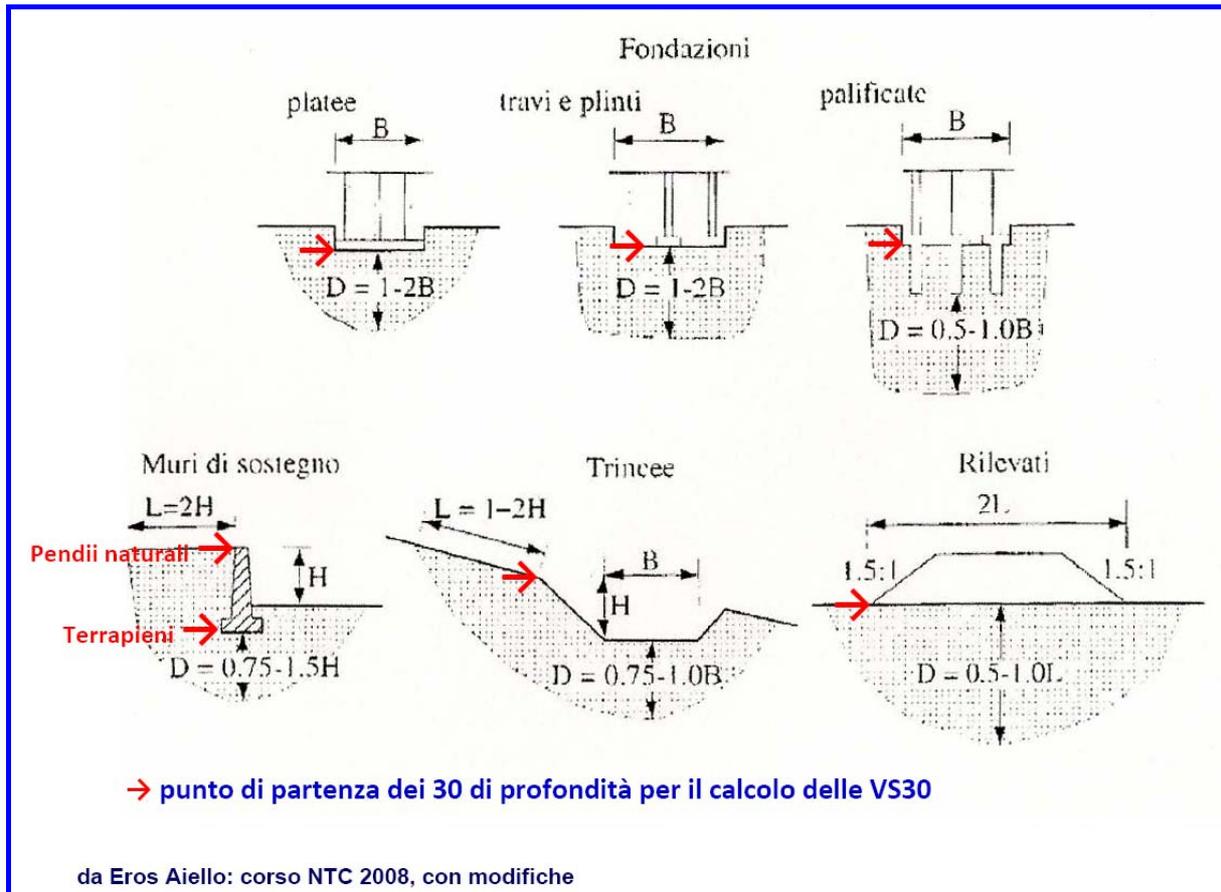


Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo (inteso come la parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso), ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s30}$  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.

Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera.

Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.



E' fortemente raccomandata la misura diretta della velocità di propagazione delle onde di taglio.

La classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s30}$  attraverso la già citata relazione:

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

$h_i$  = Spessore in metri dello strato i-esimo  
 $V_i$  = Velocità dell'onda di taglio i-esima  
 $N$  = Numero di strati

Nei casi in cui tale determinazione non sia disponibile, la classificazione può essere effettuata:

1) in base ai valori del numero equivalente di colpi della prova penetrometrica dinamica (Standard Penetration Test) NSPT30 nei terreni prevalentemente a grana grossa attraverso la relazione:

$$N_{SPT,30} = \frac{\sum_{i=1,M} h_i}{\sum_{i=1,M} \frac{h_i}{N_{SPT,i}}}$$

M numero di strati di terreni a grana grossa compresi nei primi 30 m di profondità;

2) in base ai valori della resistenza non drenata equivalente cu30 nei terreni prevalentemente a grana fina.

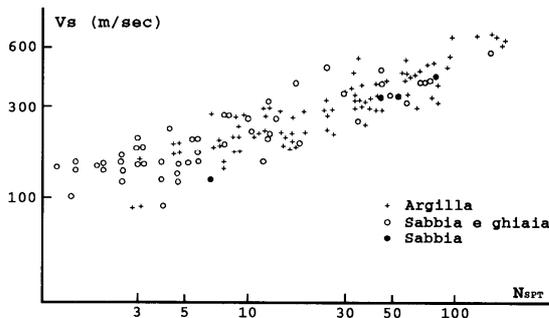
$$c_{u,30} = \frac{\sum_{i=1,K} h_i}{\sum_{i=1,K} \frac{h_i}{c_{u,i}}}$$

cu,i resistenza non drenata nell'i-esimo strato;  
K numero di strati di terreni a grana fina compresi nei primi 30 m di profondità

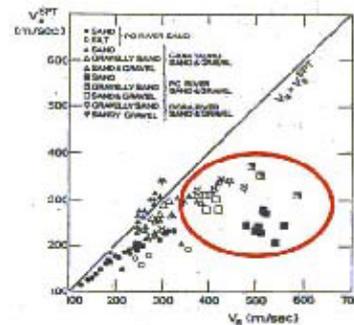
Vengono pertanto messe ambigualmente sullo stesso piano le tecniche geofisiche consolidate con correlazioni empiriche che sia la pratica professionale sia la letteratura specifica indicano come inaffidabili, particolarmente per la notevole dispersione dei valori di correlazione.

La valutazione indiretta della Vs dai valori di Nspt è fortemente fuorviante:

- non è possibile eseguire la prova SPT in tutti i tipi di terreno (SPT a rifiuto nei depositi ghiaiosi e ciottolosi);
- esiste una elevata dispersione dei valori di correlazione Nspt/Vs;
- i valori di Vs ottenuti dalla correlazione con Nspt si discostano talora eccessivamente dai valori misurati in sito con indagini geofisiche.



Relazione sperimentale tra Vs e Nspt per argille sabbie e ghiaie (da Mai e Yoshimura, 1975)



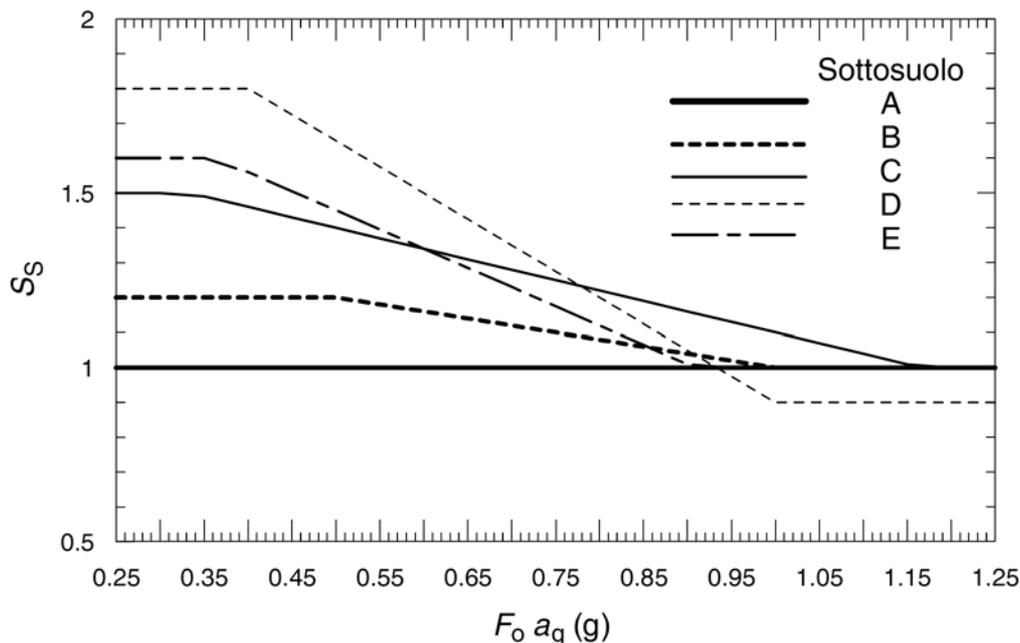
Limiti di validità della correlazione di Otha e Goto per la stima di Vs da Nspt

Per sottosuoli appartenenti alle categorie S1 ed S2 o quando si intenda aumentare il grado di accuratezza nella previsione dei fenomeni di amplificazione, è necessario predisporre specifiche analisi (di risposta sismica locale) per la definizione delle azioni sismiche, particolarmente nei casi in cui la presenza di terreni suscettibili di liquefazione e/o di argille d'elevata sensibilità possa comportare fenomeni di collasso del terreno.

### 3. ALCUNE CRITICITÀ DELLE NTC 2008

#### 1) Il Coefficiente di amplificazione stratigrafica $S_s$

La variazione del coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_s$  in funzione della pericolosità sismica di base del sito (ovvero del prodotto  $F_o \cdot a_g$ ) è illustrata nel diagramma che segue per le cinque categorie di sottosuolo:



A parità di categoria di sottosuolo, l'andamento di  $S_s$  con  $F_o \cdot a_g$  è caratterizzato da due tratti orizzontali, rispettivamente per bassi ed elevati valori di pericolosità sismica; tali tratti sono raccordati da un segmento di retta che descrive il decremento lineare di  $S_s$  con  $F_o \cdot a_g$ .

A parità di pericolosità del sito ( $F_o \cdot a_g$ ), i valori di  $S_s$  si incrementano al decrescere della rigidità del sottosuolo, passando dal sottosuolo di categoria A al sottosuolo di categoria E. In particolare, per  $F_o \cdot a_g < 0.78g$ , il sottosuolo di categoria D mostra amplificazioni maggiori delle altre categorie di sottosuolo, mentre, per  $0.78g \leq F_o \cdot a_g < 1.17g$  i fenomeni di amplificazione sono più marcati per il sottosuolo di categoria C. Per elevati livelli di pericolosità sismica del sito, caratterizzati da valori del prodotto  $F_o \cdot a_g > 0.93g$ , le accelerazioni massime su sottosuolo di categoria D sono inferiori a quelle su sottosuolo di categoria A. Si verifica cioè una deamplificazione del moto in termini di accelerazione massima.

Dunque l'amplificazione stratigrafica diminuisce all'aumentare dell'azione sismica. Se in uno stesso sito caratterizzato da uno dei tratti obliqui delle curve costruisco una civile abitazione ed un ospedale, le azioni sismiche di progetto sono diverse, poiché cambia la classe d'uso  $cu$  e la vita di riferimento  $V_r$ , con conseguente aumento delle accelerazioni  $a_g$ : si arriva all'assurdo che l'amplificazione stratigrafica  $S_s$  risulterà maggiore per la civile abitazione e minore per l'ospedale.

#### 2) Definizioni delle Categorie di sottosuolo e $V_{s30}$

##### La categoria A

La presenza di ammassi rocciosi non deve automaticamente portare a considerare la presenza di un

substrato sismico (categoria A del D.M.), poiché il substrato geologico può non corrispondere a quello sismico. Infatti alcune litologie ascrivibili al substrato geologico hanno  $V_{sh} < 800$  m/s. Ciò accade sovente in corrispondenza dei depositi flyschoidi, argillitici e, tra le litologie più competenti, prevalentemente nelle unità arenacee, ove sono frequenti orizzonti di alterazione e/o intensa fratturazione con spessori molto maggiori di 3 m. E' pertanto sempre raccomandata la verifica dello spessore dello strato di alterazione e la misura delle  $V_s$ .

Si noti inoltre che la copertura (di spessore massimo di 3 m) può essere rappresentata anche da depositi alluvionali, detritici, corpi di frana etc., non solo dal materiale di alterazione del bedrock: ciò che conta è il contrasto di rigidità sismica tra copertura e bedrock, che per un massimo di 3 m di spessore della prima determina amplificazioni per frequenze molto alte, al di fuori del range di interesse ingegneristico.

### Le categorie B, C, D

Nelle definizioni delle categorie di sottosuolo B, C, D le classificazioni relative al grado di addensamento ed alla consistenza dei terreni riferite rispettivamente al numero di colpi delle prove SPT ed al valore della coesione non drenata  $c_u$  non sono coerenti con le definizioni generalmente considerate nella letteratura geotecnica (ad esempio nelle "Raccomandazioni per la programmazione e l'esecuzione delle indagini geotecniche" - AGI ). Volendo rispettare tali classificazioni le definizioni potrebbero ad esempio modificarsi come segue:

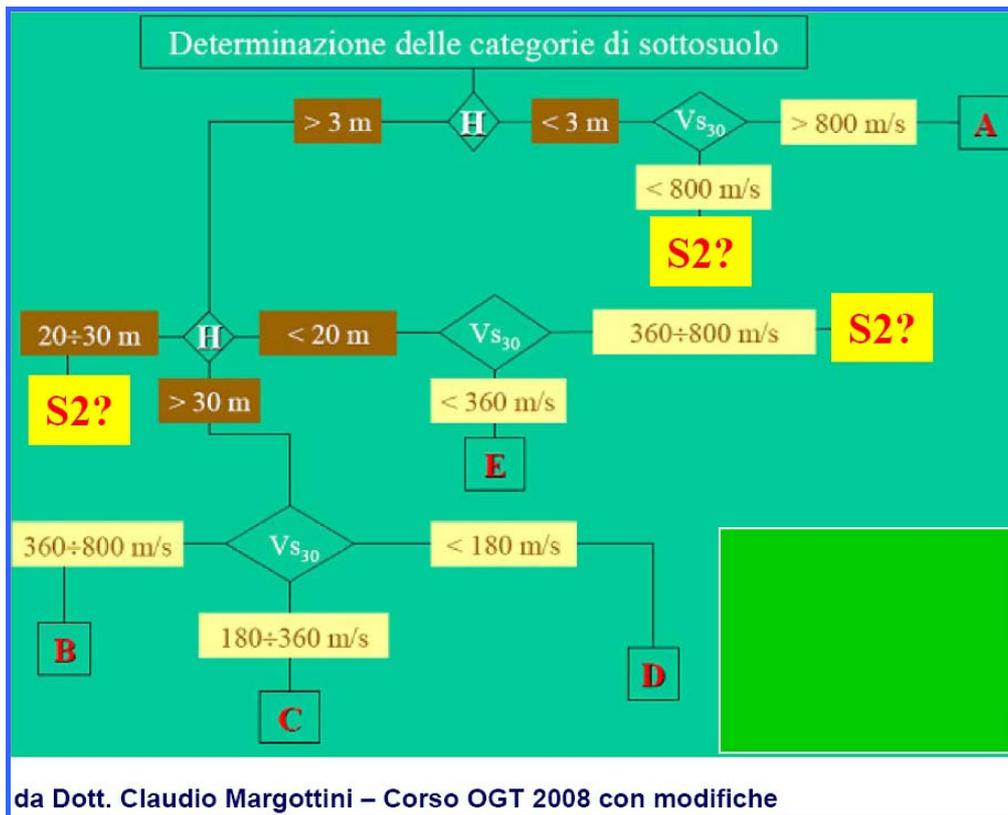
B) Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati - cementati o terreni a grana fina da molto consistenti a duri;

C) Depositi di terreni a grana grossa da mediamente addensati ad addensati, o terreni a grana fina da mediamente consistenti a consistenti;

D) Depositi di terreni a grana grossa da sciolti a mediamente addensati, o terreni a grana fina da poco consistenti a consistenti.

Nell'individuazione della categoria di sottosuolo si deve tener conto di tutte le prerogative della classe, quindi non considerare solo il valore della  $V_{s30}$ , ma anche lo spessore (maggiore di 30 m): la condizione che i terreni siano caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità, se non interpretata come condizione "in grande" escludendo le inversioni di velocità (ovvero lo scadimento delle proprietà geomeccaniche) non eccessivamente significative, porta come conseguenza, unitamente alla già citata limitazione sullo spessore minimo del deposito, che la stragrande maggioranza dei sottosuoli dovrebbero essere classificati nella categoria S2, (Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti), riproponendo quindi la necessità dell'analisi di risposta sismica locale.

D'altronde l'applicazione rigida della norma porta frequentemente a ricadere in categoria S2: un diagramma di flusso proposto da Margottini (Corso OGT 2008) ne evidenzia chiaramente le "falle":



In quest'ottica si deve anche considerare che, essendo le norme NTC prestazionali, le indagini ed i risultati si dovrebbero riferire al tipo di struttura che verrà progettato e costruito, perciò ai fini dell'amplificazione stratigrafica non ci si dovrebbe limitare ai 30 m sotto la base della fondazione, ma valutare il profilo di  $V_s$  fino al bedrock sismico o quantomeno alla profondità che corrisponde alla frequenza a cui si generano risonanze che potenzialmente rendono vulnerabili la strutture previste.

Se la frequenza minima della struttura è  $f_x$ , cui corrisponde una lunghezza d'onda  $\lambda_x$ , si dovrebbe studiare il sottosuolo almeno fino a  $\lambda/2$ . In alcuni casi questo è meno di 30 m, nella maggior parte dei casi è assai maggiore, in dipendenza della "velocità di fase" del deposito.

### La categoria E ed i casi dubbi - Indicazioni di comportamento

Premesso che la modellazione di sito rappresenta sempre l'approccio più corretto, è sempre consigliabile definire: 1) spessori e velocità della copertura; 2) velocità del substrato sismico; 3) contrasto di velocità sismica e decidere secondo la casistica che segue.

#### Caso 1) Spessore della copertura $\leq 20$ m

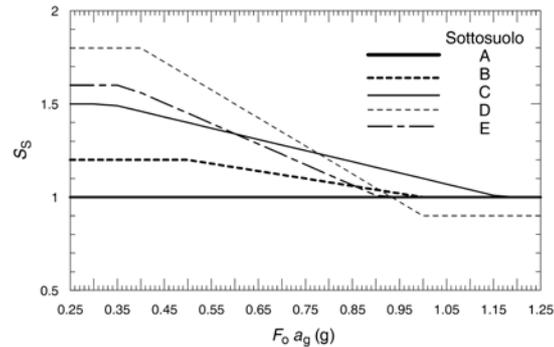
Per la categoria E appare poco cautelativo individuare nei suoli tipo C e D, aventi  $V_{s30}$  inferiori a 360 m/sec, i terreni "pericolosi", senza un riferimento specifico al contrasto di rigidità sismica tra copertura e bedrock: coperture anche più "veloci" delle categorie C e D possono risultare ugualmente pericolose in funzione di una velocità del bedrock superiore agli 800 m/sec. In quest'ottica possono risultare di grande aiuto anche le misure di rumore sismico ambientale a stazione singola.

Partendo dal presupposto che il contrasto minimo di velocità sismica per entrare in categoria di sottosuolo E vale  $V_{contr} = 800/360 \approx 2.2$ , è ragionevole assumere, in presenza di spessori della copertura  $\leq 20$  m anche con velocità superiore a 360 m/sec ma con contrasto di velocità  $V_{contr} \geq 2.2$ , categoria di sottosuolo E.

Esempio: spessore copertura 15 m, velocità copertura  $V_{sc} = 500$  m/sec, velocità bedrock  $V_{sb} = 1200$  m/sec,  $V_{contr} = 2.4$ , Categoria di sottosuolo E.

#### Caso 2) Spessore della copertura compreso tra 20 e 30 m

Poiché il coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_s$  varia in funzione di  $F_0 \cdot a_g$ , per i siti caratterizzati da valori di  $F_0 \cdot a_g > 0.6$  circa (valore oltre il quale si verificano le prime "inversioni" nel coefficiente amplificativo  $S_s$ ), nei casi di dubbia attribuzione conviene calcolare il valore di  $F_0 \cdot a_g$  per il sito di intervento ed in base a questo assumere il sottosuolo di fondazione che risulta il più cautelativo.



Si potrà inoltre tener conto dei valori del rapporto H/V delle misure di rumore sismico ambientale eseguite ad integrazione delle altre prospezioni (rifrazione, MASW etc.) assumendo per bassi contrasti (indicativamente  $H/V < 3$ ) la categoria di sottosuolo B e per contrasti più elevati (indicativamente  $H/V > 3$ ) la categoria di sottosuolo E.

Si tratta comunque di approssimazioni non previste dalla normativa, per le quali il professionista si assume completa responsabilità.

#### 4. LE ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Specifiche analisi di risposta sismica locale sono fortemente raccomandate per categorie speciali di sottosuolo (Tabella 3.2.III delle NTC), per determinati sistemi geotecnici, o se si intende aumentare il grado di accuratezza nella previsione del moto sismico in un dato sito.

Utilizzando programmi di analisi bidimensionali (Quad etc.) si può tener conto sia dell'amplificazione stratigrafica sia di quella morfologica (superficiale e/o profonda) del sito, con programmi mono-dimensionali (tipo Shake, Proshake, EERA etc.), invece, si tiene conto soltanto degli effetti stratigrafici.

Le analisi di risposta sismica locale richiedono anche un'adeguata conoscenza delle proprietà meccaniche dei terreni in condizioni cicliche, da determinare mediante specifiche indagini in sito e prove di laboratorio funzione del tipo di opera e/o intervento e della procedura di analisi adottata. In particolare, è necessaria l'esecuzione di prove in sito per la determinazione dei profili di velocità di propagazione delle onde di taglio (particolarmente prove Downhole o Crosshole), ai fini della valutazione della rigidità a bassi livelli di deformazione, mentre le prove di laboratorio sono raccomandate per la valutazione della dipendenza della rigidità e dello smorzamento dal livello deformativo, e per la determinazione, in dipendenza del legame costitutivo adottato per i terreni, dei parametri di ingresso necessari alle analisi. Un'approccio intermedio, utilizzabile per casi semplici, essenzialmente riconducibili alla Classe d'uso II delle NTC, può prevedere l'adozione di parametri di letteratura (Seed & Idriss etc.) .

Le analisi della risposta sismica locale sono effettuate utilizzando procedure di calcolo numerico in cui viene simulata la propagazione delle onde sismiche entro gli strati di terreno compresi tra il sottostante substrato rigido e il piano campagna. In generale, queste analisi richiedono le seguenti operazioni: scelta della schematizzazione geometrica del problema; definizione del modello geotecnico di sottosuolo; definizione delle azioni sismiche al substrato rigido; scelta della procedura di analisi.

La schematizzazione geometrica più semplice ai fini delle analisi è quella mono-dimensionale (1D), in cui, a prescindere dalla effettiva configurazione topografica del piano campagna, ci si riconduce allo schema di terreno, uniforme o stratificato orizzontalmente, delimitato da piano campagna orizzontale e poggiante su substrato rigido, anch'esso orizzontale. Sono assimilabili ad un substrato rigido strati di terreno molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio maggiori di 700-800 m/s. Qualora il piano campagna, o la giacitura degli strati e/o del substrato non siano facilmente riconducibili a tale schematizzazione, ad esempio per la presenza di valli, creste, rilievi, ecc., l'assunzione di un modello 1D è poco realistica. In questi casi è possibile ricorrere a schematizzazioni bi-dimensionali (2D), assumendo condizioni di deformazione piana che consentono una modellazione adeguata degli effetti della morfologia profonda e di quella superficiale del sito. Nella definizione del modello geotecnico di sottosuolo è necessario specificare, per ciascuno degli strati individuati, i parametri di ingresso all'analisi. Tale scelta è strettamente connessa al legame costitutivo del terreno scelto dal progettista.

Le azioni sismiche di ingresso sono costituite da accelerogrammi rappresentativi del moto sismico atteso su sito di riferimento rigido affiorante (sottosuolo di categoria A – affioramento roccioso o terreni molto rigidi ), sia accelerogrammi artificiali, sia naturali, sia sintetici

Per le analisi di risposta sismica locale e per le analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici, in luogo degli accelerogrammi artificiali è ammesso l'uso di accelerogrammi registrati (naturali) o di accelerogrammi sintetici, generati mediante simulazione del meccanismo di sorgente (§ 3.2.3.6 delle NTC). La scelta di accelerogrammi registrati può essere effettuata da archivi nazionali o internazionali disponibili in rete, ad esempio la banca dati accelerometrica italiana ITACA o l'European Strong-motion Database ESD, entrambe consultabili, ad esempio, attraverso il software REXEL (Iervolino ed Altri 2009), a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.

Si noti tuttavia che l'uso di accelerogrammi artificiali non è consentito sia per le analisi di risposta sismica locale, sia per le analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici, in quanto (vedi C7.11.3.1.2.2) gli accelerogrammi artificiali spettro-compatibili sono caratterizzati da contenuti in frequenza irrealistici, ovvero da una banda di frequenze irrealisticamente ampia.

## PARTE II: STABILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

### 1. Generalità

Per liquefazione di un terreno s'intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi.

I fenomeni di liquefazione interessano in genere depositi sabbiosi saturi e dipendono principalmente da: proprietà geotecniche dei terreni, caratteristiche delle vibrazioni sismiche e loro durata, genesi e storia geologica dei terreni.

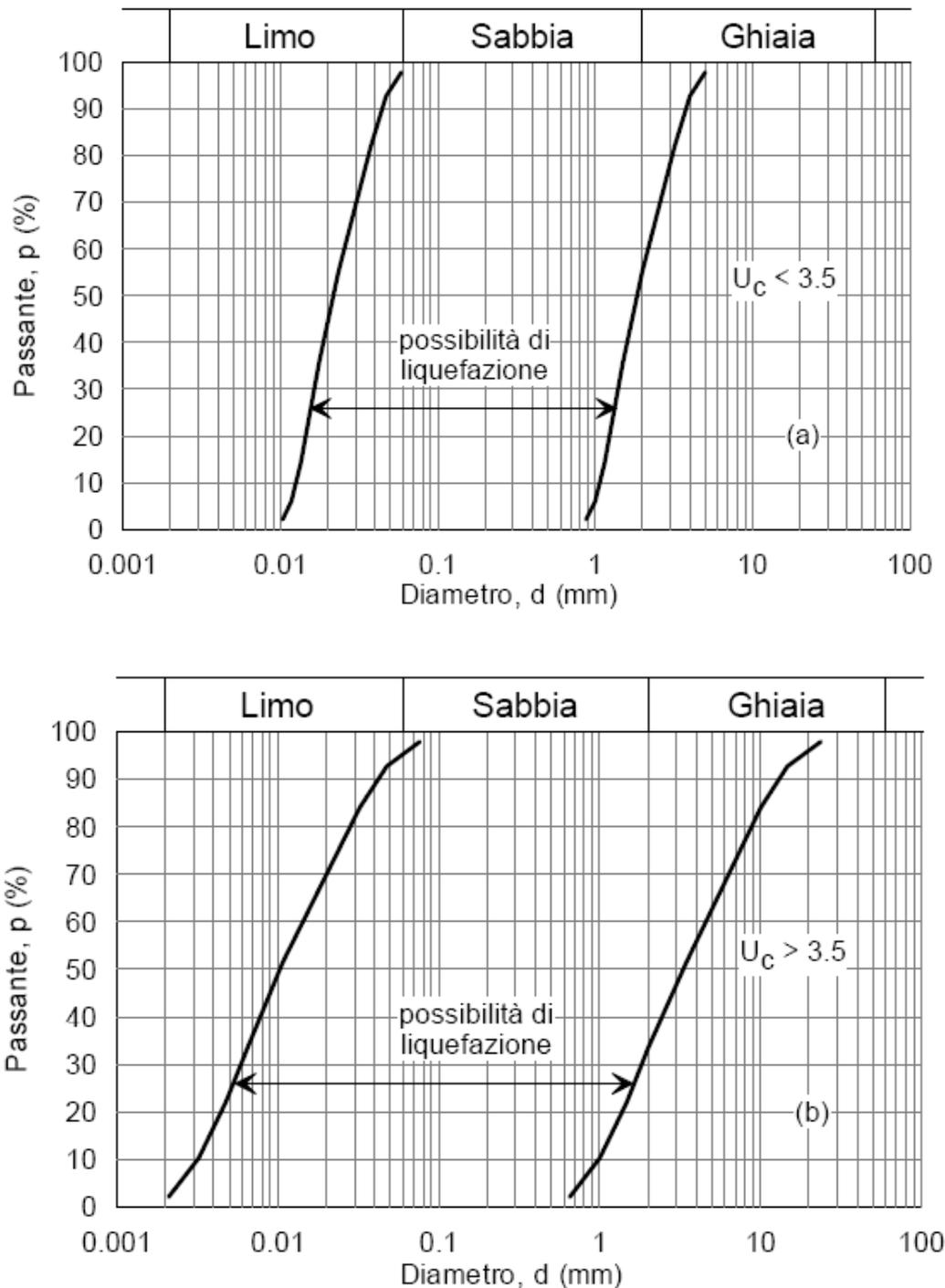
Un terreno incoerente saturo, in assenza di sollecitazioni sismiche è soggetto alla pressione litostatica, dovuta al peso dei sedimenti sovrastanti. Durante una sollecitazione sismica vengono indotte nel terreno delle sollecitazioni cicliche di taglio, dovute alla propagazione delle onde sismiche verso la superficie, mentre la pressione litostatica resta costante. Nel terreno si possono generare fenomeni di liquefazione se la scossa sismica produce un numero di cicli tale da far sì che la pressione interstiziale uguagli la pressione di confinamento. Nei depositi la pressione di confinamento aumenta con la profondità, mentre l'ampiezza dello sforzo di taglio indotto dal sisma diminuisce. La resistenza alla liquefazione quindi è maggiore con la profondità. Maggiore è la durata di un terremoto più alta è la possibilità che si arrivi (maggior numero di cicli) alla liquefazione. Inoltre, maggiore è l'ampiezza della vibrazione e della deformazione indotta e minore è il numero di cicli necessari per giungere a tale condizione.

La probabilità che un deposito raggiunga le condizioni per la liquefazione dipende anche dallo stato di addensamento, dalla composizione granulometrica, dalle condizioni di drenaggio, dalla storia delle sollecitazioni sismiche e dall'età del deposito stesso. Tanto minore è il grado di addensamento del materiale (elevato indice dei vuoti e bassa densità relativa) tanto maggiore è la probabilità che, a parità di altre condizioni, un deposito raggiunga lo stato di liquefazione.

Le NTC richiedono una verifica alla suscettibilità di liquefazione dei terreni del sito sul quale insiste la progettazione di un manufatto. Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

Prima della vera e propria verifica della suscettibilità di liquefazione, le NTC propongono una griglia di casi per i quali il sito non presenta possibilità di liquefazione dei terreni. Le NTC recitano che "La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze":

1. eventi sismici attesi di magnitudo  $M$  inferiore a 5;
2. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di  $0,1g$ ;
3. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
4. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} > 30$  oppure  $qc_{1N} > 180$  dove  $(N1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $qc_{1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
5. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3,5$ .



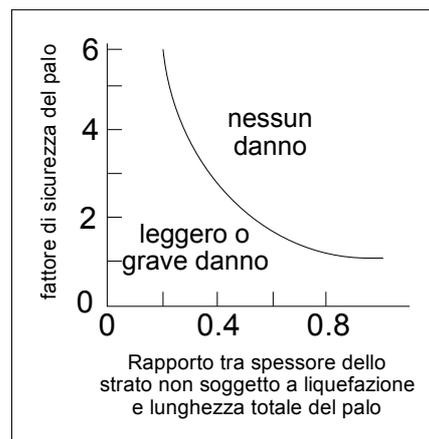
**Figura 7.11.1** – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione.

Quando nessuna delle condizioni precedenti risulti soddisfatta ed il terreno di fondazione comprenda strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda (in genere vanno considerati livelli con spessore superiore a 3 m), occorre valutare il coefficiente di sicurezza alla liquefazione alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili. Salvo utilizzare procedure di analisi avanzate, la verifica può essere effettuata con metodologie di tipo storico-empirico in cui il coefficiente di sicurezza viene definito dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione e la sollecitazione indotta dal terremoto di progetto. La resistenza alla liquefazione può essere valutata sulla base dei risultati di prove in sito o di prove cicliche di laboratorio. La sollecitazione indotta dall'azione sismica è stimata attraverso la conoscenza

dell'accelerazione massima attesa alla profondità di interesse. L'adeguatezza del margine di sicurezza nei confronti della liquefazione deve essere valutata e motivata dal progettista.”

E' inoltre importante, al di là dei risultati della verifica, valutare le conseguenze della eventuale liquefazione degli strati sabbiosi, tenendo sempre presente che:

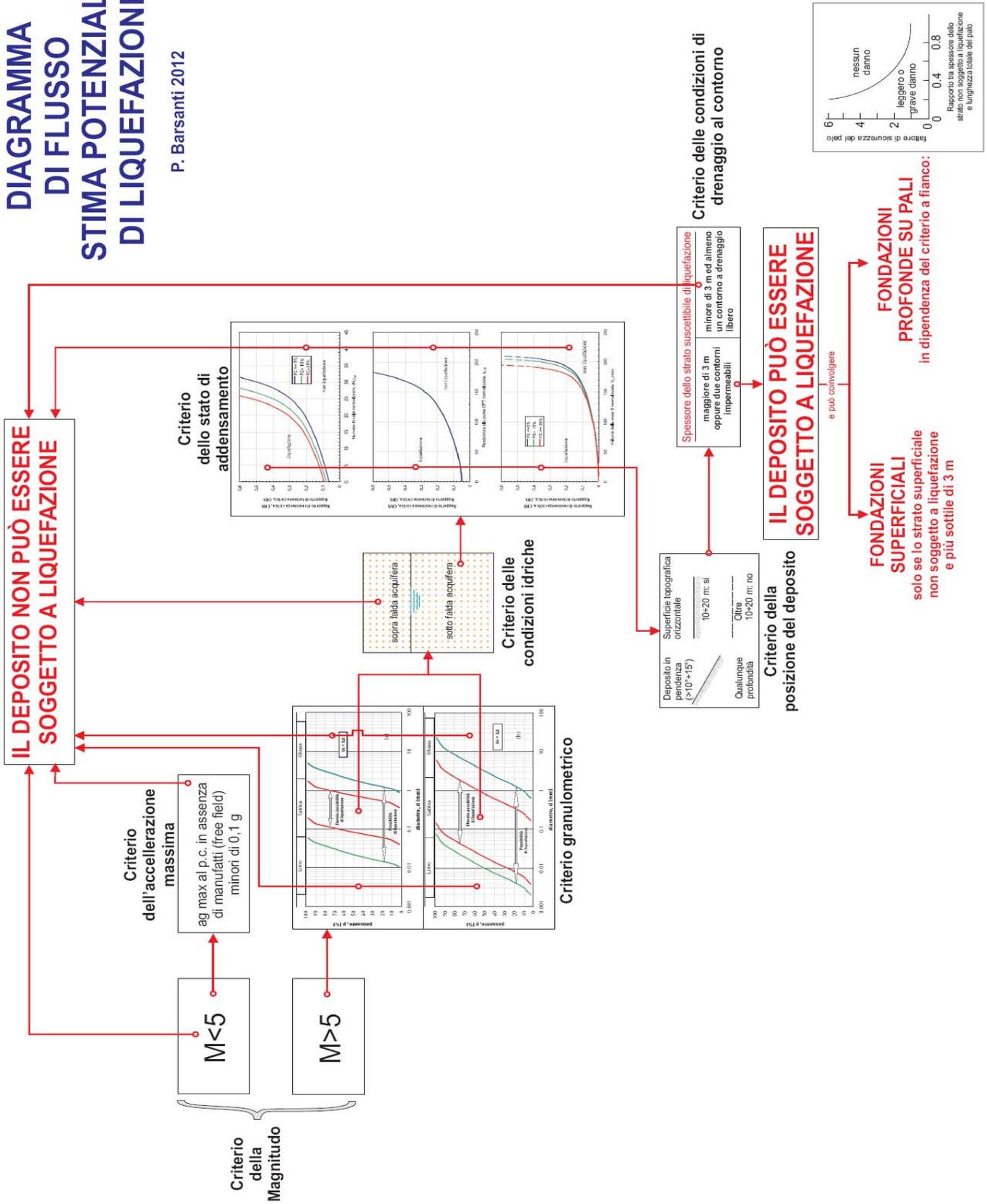
- lo strato liquefacibile deve avere spessore maggiore di 3 m oppure due contorni impermeabili;
- la liquefazione può avere effetti sulle fondazioni superficiali solo se lo strato superficiale non soggetto a liquefazione è più sottile di 3 m
- la liquefazione può avere effetti sulle fondazioni profonde in dipendenza del criterio desumibile dal seguente schema:



Nella pagina successiva si propone un diagramma di flusso per la Stima del Potenziale di liquefazione.

# DIAGRAMMA DI FLUSSO STIMA POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

P. Barsanti 2012



## 2. Dati di base per valutare la suscettibilità alla liquefazione

Gli “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica - Gruppo di lavoro MS 2008” riportano i seguenti suggerimenti:

Per le valutazioni della suscettibilità alla liquefazione sono indispensabili dati su:

- magnitudo degli eventi attesi;
- scuotimento in superficie (in genere, in termini di accelerazione massima del suolo, PGA);
- litostratigrafia;
- granulometria;
- profondità della falda;
- resistenza dei terreni sotto carico ciclico.

I metodi di indagine raccomandati sono i seguenti:

DATI DI BASE	METODI DI INDAGINE RACCOMANDATI
Scuotimento in superficie	Analisi di pericolosità di base e locale e/o dati strumentali
Magnitudo	Catalogo dei terremoti
Litostratigrafia	Sondaggi
Caratterizzazione granulometria e geotecnica	Prove standard di laboratorio, correlazioni con in sito (SPT e CPT), prove triassiali cicliche, prove di taglio semplice ciclico.
Idrogeologia	Indagini piezometriche
Resistenza dei terreni rispetto alla liquefazione	Prove standard di laboratorio, correlazioni con prove in sito (SPT e CPT), prove triassiali cicliche, prove di taglio semplice ciclico.

La suscettibilità del terreno alla liquefazione deve essere valutata sulla base di prove in sito (SPT e/o CPT e/o prove geofisiche in foro del tipo DH, CH e/o SCPT ) e/o di laboratorio, esplorando un numero di verticali adeguato all'importanza dell'opera e all'estensione dell'area di indagine e sufficiente ad accertare la variabilità spaziale delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche del deposito. Dovrà anche essere determinata con appropriate rilevazioni l'entità delle fluttuazioni dei livelli di falda e nelle analisi dovrà considerarsi la condizione meno cautelativa.

## 3. Stima della magnitudo attesa

Nelle verifiche di liquefazione si deve tener conto della magnitudo attesa. Qui sorge un dubbio: quale Magnitudo considerare?

Come riportato negli “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica- Gruppo di lavoro MS 2008”, un metodo semplice e in favore di sicurezza che può essere utilizzato per stimare quale sia il valore di magnitudo da considerare per il sito è il seguente:

- **Siti ricadenti in una zona sismogenetica.** Si considera la zonazione sismogenetica (ZS 9) (consultabile sul sito dell'INGV), secondo la quale la sismicità può essere distribuita in 36 zone, a ciascuna delle quali è associata una magnitudo massima  $M_{wmax}$ . Per i siti che cadono in una delle 36 zone sismogenetiche predette si assume come M il valore di  $M_{wmax}$ .

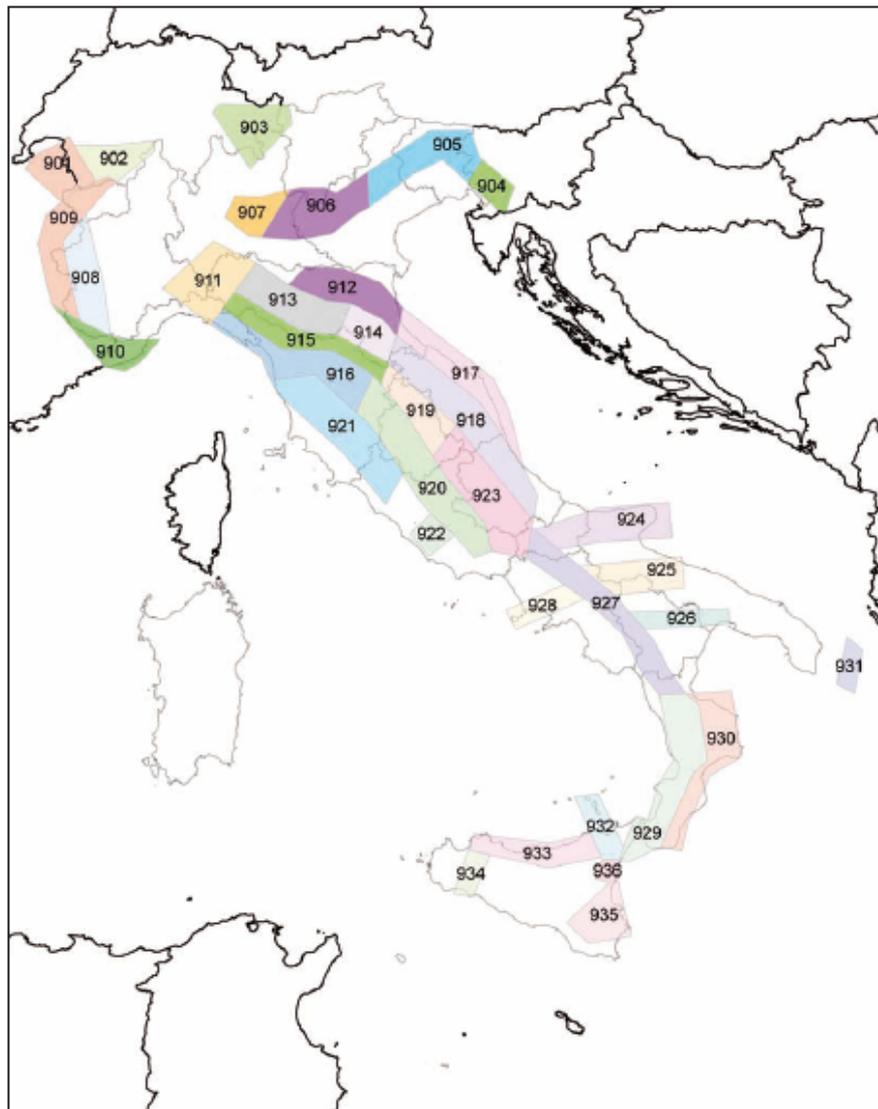


Figura 2.8-1 - Zone sismogenetiche per la mappa di pericolosità sismica di base di riferimento (Gruppo di lavoro, 2004).

Tabella 2.8-1 – Valori di  $M_{max}$  per le zone sismogenetiche di ZS9 (estratto da Gruppo di lavoro, 2004)

Nome ZS	Numero ZS	$M_{max}$
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio- Marchigiana(Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo)	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana- Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise- Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.63
Appennino Abruzzese, Sannio - Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

- **Siti non ricadenti in una zona sismogenetica.** Ai fini della verifica a liquefazione e per i siti che non ricadono in alcuna zona sismogenetica si determinano le minime distanze ( $R_i$ ) in km dalle zone sismogenetiche ( $i$ ) circostanti e si controlla per ciascuna di esse se la magnitudo  $M_i$  della zona è inferiore alla magnitudo fornita dalla relazione  $M_s = 1+3\log(R_i)$ . Se ciò accade, la verifica a liquefazione non è necessaria. Se invece è necessaria, si assume il valore di magnitudo  $M_i$  più alto fra quelli per i quali la verifica è necessaria.

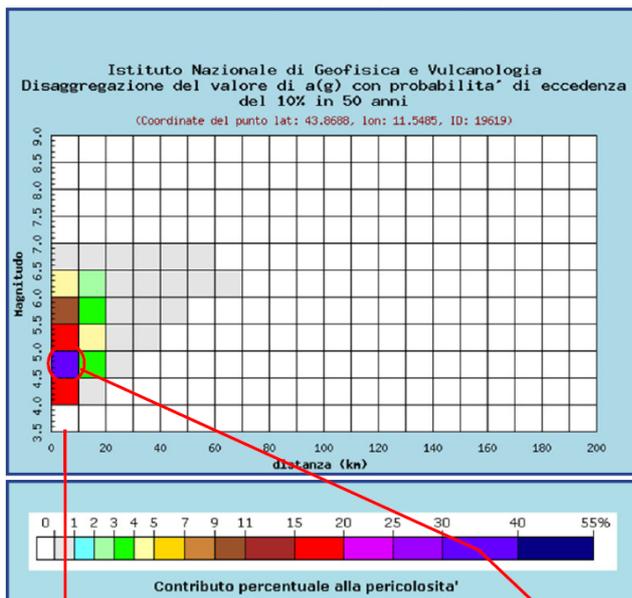
Successivamente tuttavia, sempre in “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica - Gruppo di lavoro MS 2008”, viene proposto un secondo metodo, “da usare preferibilmente per le verifiche di stabilità dei versanti”, che si basa, sempre a partire sempre dalla zonazione sismogenetica (ZS 9) sulle coppie di valori Magnitudo media - distanza M-R caratteristici di ogni sito desunti dai dati di disaggregazione della pericolosità sismica (vedi dati Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia - Gruppo di lavoro, 2004 e INGV Spallarossa e Barani, 2007), i quali permettono di valutare i contributi di diverse sorgenti sismiche alla pericolosità di un sito per determinati tempi di ritorno.

Nella tabella Comuni\_MR (nel DVD allegato agli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica) sono riportati i valori medi e modali per ciascun comune, come nell’esempio che segue:

CodStat	Comune	Dentrovicino	Mmedia	Rmedia	Mmoda	Rmoda
9048014	Empoli	D	4,78	11	4,75	5
9048015	Fiesole	D	5	13	4,75	5
9048016	Figline Valdarno	D	4,84	12	4,75	5
9048017	Firenze	D	4,97	13	4,75	5
9048018	Firenze	D	5,04	8	4,75	5
9048019	Fucecchio	D	4,81	12	4,75	5
9048020	Gambassi Terme	D	4,76	8	4,75	5
9048021	Greve in Chianti	D	4,81	12	4,75	5
9048022	Impruneta	D	4,83	12	4,75	5
9048023	Incisa in Val d'Arno	D	4,85	12	4,75	5
9048024	Lastra a Signa	D	4,83	12	4,75	5
9048025	Londa	D	5,07	7	4,75	5

*Il valore medio si ottiene come media pesata delle magnitudo, dove il peso di ciascuna è dato dal contributo che la stessa fornisce alla pericolosità.*

*Il valore modale M\* è il valore di M che fornisce il maggior contributo alla pericolosità.*



Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 43.8688, lon: 11.5485, ID: 19619)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	16.800	32.700	19.500	9.680	4.180	0.457	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.700	3.230	4.200	3.520	2.330	0.338	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.057	0.596	0.857	0.459	0.085	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.000	0.017	0.160	0.115	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.027	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.060	6.310	0.945

CodStat	Comune	Dentrovicino	Mmedia	Rmedia	Mmoda	Rmoda
9048014	Empoli	D	4,78	11	4,75	5
9048015	Fiesole	D	5	13	4,75	5
9048016	Figline Valdarno	D	4,84	12	4,75	5
9048017	Firenze	D	4,97	13	4,75	5
9048018	Firenze	D	5,04	8	4,75	5
9048019	Fucecchio	D	4,81	12	4,75	5
9048020	Gambassi Terme	D	4,76	8	4,75	5
9048021	Greve in Chianti	D	4,81	12	4,75	5
9048022	Impruneta	D	4,83	12	4,75	5
9048023	Incisa in Val d'Arno	D	4,85	12	4,75	5
9048024	Lastra a Signa	D	4,83	12	4,75	5
9048025	Londa	D	5,07	7	4,75	5

#### 4. Metodi semplificati per valutare la suscettibilità dei terreni alla liquefazione

In letteratura esistono numerosi metodi per valutare la possibile liquefazione dei terreni; i metodi semplificati si basano sul rapporto che intercorre fra le sollecitazioni di taglio che producono liquefazione e quelle indotte dal terremoto; hanno perciò bisogno di valutare i parametri relativi sia all'evento sismico sia al deposito, determinati questi ultimi privilegiando metodi basati su correlazioni della resistenza alla liquefazione con parametri desunti da prove in situ.

La resistenza del deposito alla liquefazione viene quindi valutata in termini di fattore di resistenza alla liquefazione:

$$FI = CRR/CSR$$

dove CRR (Cyclic Resistance Ratio) indica la resistenza del terreno agli sforzi di taglio ciclico e CSR (Cyclic Stress Ratio) la sollecitazione di taglio massima indotta dal sisma.

Se il fattore è  $FI > 1.25$  la liquefazione è da escludere; se è  $FI < 1.25$  è possibile che avvengano fenomeni di liquefazione.

I metodi semplificati differiscono fra loro soprattutto per il modo con cui viene ricavata CRR, la resistenza alla liquefazione.

Il parametro maggiormente utilizzato è il numero dei colpi nella prova SPT anche se oggi, con il progredire delle tecniche, si preferisce valutare il potenziale di liquefazione utilizzando prove statiche (CPT) o ancora meglio tramite prove di misurazione delle onde di taglio  $V_s$ .

I metodi CRR/CSR hanno come base la metodologia elaborata da Seed e Idriss (1982) in cui la grandezza CSR è la sequenza di sforzi di taglio indotti dal sisma, normalizzata rispetto alla tensione efficace verticale iniziale, viene schematizzata come una storia regolare di sollecitazioni pari al 65% del valore massimo attraverso la relazione:

$$CSR = T_{media} / S_{v0}' = 0,65 ag S_{v0} / S_{v0}' rd / M_{sf}$$

in cui:

$ag$  = accelerazione sismica campo libero su roccia riferita all'accelerazione di gravità;

$S_{v0}$  = pressione verticale totale alla profondità  $z$  dal p.c.;

$S_{v0}'$  = pressione verticale efficace alla profondità  $z$  dal p.c.;

$rd$  = coefficiente riduttivo dell'azione sismica che porta in conto la deformabilità del sottosuolo in funzione della profondità dal p.c., valutabile secondo il seguente schema:

$$rd = 1 - 0.00765z \text{ per } z < 9.15 \text{ m}$$

$$rd = 1.174 - 0.0267z \text{ per } 9.15 < z < 23 \text{ m}$$

$$rd = 0.774 - 0.008z \text{ per } 23 < z < 30 \text{ m}$$

$$rd = 0.5 \text{ per } z > 30 \text{ m}$$

$M_{sf}$  = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma atteso.

Le relazioni per la valutazione di CSR sono state dedotte su base empirica, dalle osservazioni del comportamento di depositi naturali durante eventi sismici con magnitudo di momento  $M$  pari a 7.5. Di conseguenza, laddove il terremoto atteso nell'area sia caratterizzato da una magnitudo diversa è necessario rivalutare la sollecitazione sismica introducendo il coeff. correttivo  $M_{sf}$  di cui sopra.

Di seguito tabella per l'individuazione del fattore correttivo (a destra):

Magnitudo	Seed H. B. & Idriss I. M. (1982)
5.5	1.43
6.0	1.32
6.5	1.19
7.0	1.08
7.5	1.00
8.0	0.94
8.5	0.89

La grandezza CRR è la resistenza agli sforzi di taglio, normalizzata rispetto alla tensione efficace verticale iniziale  $CRR = T_{ult} / S_{vo}$ , che può essere valutata attraverso gli abachi e le relazioni di seguito proposte e tratti da "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica- Gruppo di lavoro MS 2008", in funzione di parametri desunti da prove SPT, CPT e da misure della velocità delle onde di taglio  $V_s$  e corretti secondo le relazioni riportate a lato di ogni abaco.

Gli abachi forniscono una indicazione di campo, per pervenire ad un valore del fattore di sicurezza FL è possibile utilizzare le seguenti relazioni a partire dai valori normalizzati di ogni parametro:

Per prove SPT:

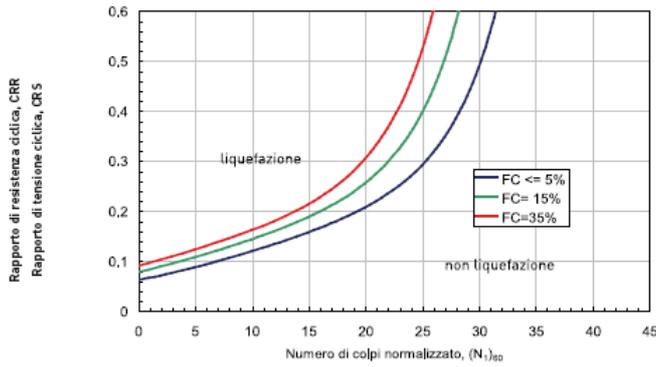
$$CRR_{N1,60} = \exp \left\{ \frac{N1,60}{14.1} + \left[ \frac{N1,60}{126} \right]^2 - \left[ \frac{N1,60}{23.6} \right]^3 + \left[ \frac{N1,60}{25.4} \right]^4 - 2.8 \right\}$$

Per prove CPT:

$$CRR = \exp \left\{ \frac{q_{c1M}}{540} + \left( \frac{q_{c1M}}{67} \right)^2 - \left( \frac{q_{c1M}}{80} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1M}}{114} \right)^4 - 3 \right\}$$

Per misure di  $V_s$ :

$$CRR_{Vs1} = \left[ 0.022 \right] \left[ \frac{Vs1}{100} \right]^2 + \left[ \frac{2.8}{215 - Vs1} \right] - \left[ \frac{1}{215} \right]$$



$$(N_1)_{60} = N_{SP7} C_N C_E C_B C_R C_S$$

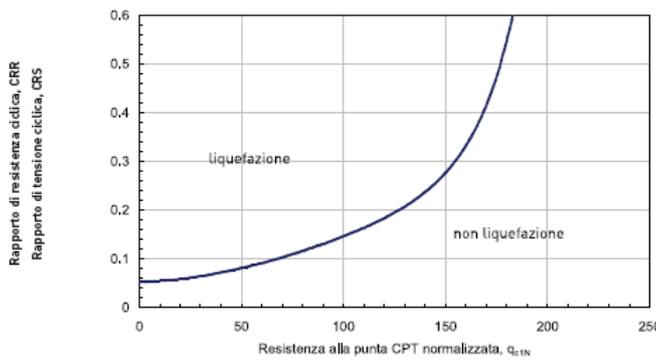
dove:

$$C_N = \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.784 - 0.0768 \sqrt{(N_1)_{60}}}$$

$C_N$  non deve superare il valore di 1,7

$p_a$  (pressione atmosferica = 100 kPa) e  $\sigma'_v$  sono espresse nelle stesse unità di misura

$$C_E C_B C_R C_S = 1$$

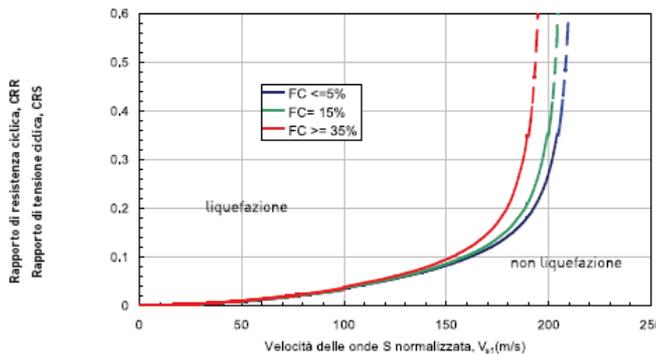


$$q_{c1N} = C_G \frac{q_c}{p_a}$$

dove:

$p_a$  (pressione atmosferica di riferimento = 100 kPa) e  $\sigma'_v$  sono espresse nelle stesse unità di misura

$$C_G = \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{1.328 - 0.294 (q_{c1N})^{0.224}}$$



$$V_{s1} = C_V V_s$$

dove:

$p_a$  (pressione atmosferica di riferimento = 100 kPa) e  $\sigma'_v$  sono espresse nelle stesse unità di misura

$$C_V = \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.25}$$

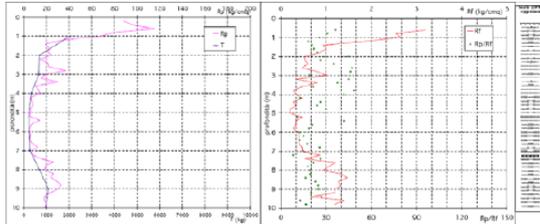
Figura 2.7-2 - Carte per la stima della resistenza normalizzata alla liquefazione CRR di un terreno sabbioso saturo in funzione della percentuale di fino FC e sulla base dei valori di  $N_{SP7}$ ,  $q_c$  e  $V_s$  corretti.

Esistono vari altri metodi semplificati di verifica della suscettibilità alla liquefazione di un terreno sulla falsariga della metodologia qui descritta, si citano a titolo di esempio:

- Chinese Building Code (1974);
- Metodo di Iwasaki et al. (1978;1984);
- Metodo di Tokimatsu e Yoshimi (1983);
- Metodo di Finn (1985);
- Metodo di Cortè (1985);
- Metodo di Robertson e Wride modificato (1997);
- Metodo di Andrus e Stokoe (1998);
- Metodi basati sull'Eurocodice 8 (ENV 1998-5).

ESEMPI DI STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

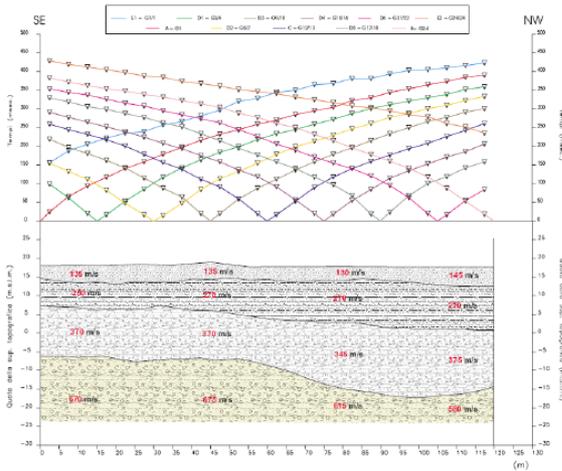
Stima del potenziale di liquefazione da Vs



Strato sabbioso limoso potenzialmente liquefacibile tra 2 e 5.5 m (falda a -2.0 m)

Magnitudo media del sito M = 5.5  
Vs minima = 130 m/sec

Metodo di Andrus e Stokoe



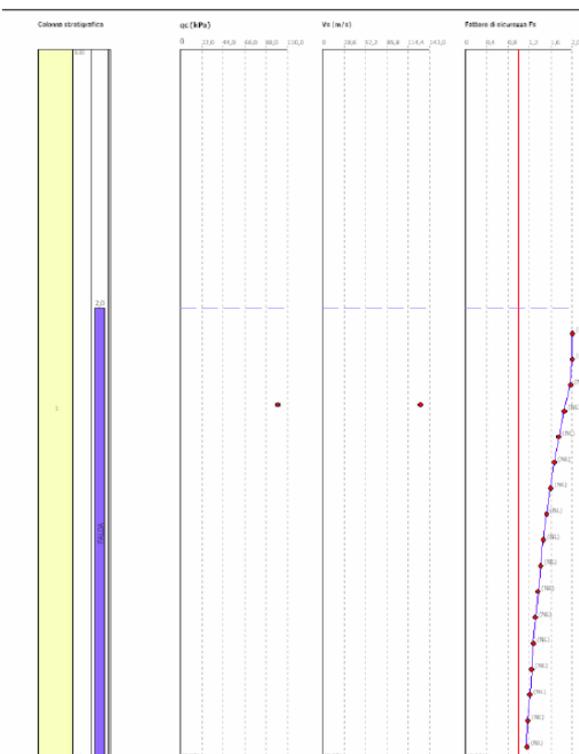
Potenziale di liquefazione

$$F_s = \frac{CCR}{CSR} \bullet MSF$$

CCR = resistenza al taglio mobilabile nello strato  
CSR = sforzo tagliante indotto dal sisma  
MSF = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma

Sforzo tagliante 
$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0'}} r_d$$

$a_{max}$  = accelerazione sismica massima  
 $g$  = accelerazione di gravità = 980.7 cm/sec<sup>2</sup>  
 $\sigma_{v0}$  = pressione litostatica totale alla profondità z dal p.c.  
 $\sigma_{v0}'$  = tensione litostatica efficace alla profondità z dal p.c.  
 $r_d$  = coefficiente funzione della profondità dal p.c.



Resistenza al taglio 
$$CCR = 0.03 \cdot \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + \frac{0.9}{V_{s1c} - V_{s1}} - \frac{0.9}{V_{s1}}$$

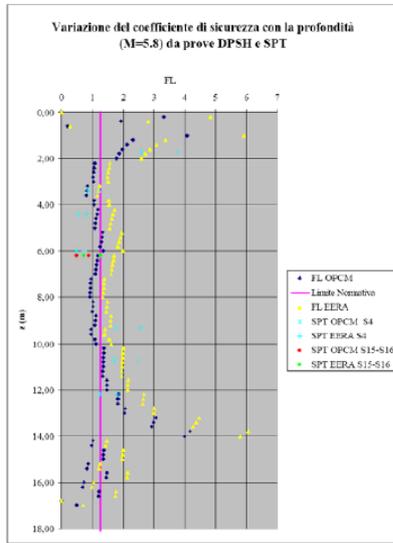
$V_{s1}$  (m/s) =  $V_s(1/\sigma_{v0}')^{0.25}$  = velocità delle onde S nello strato corretta, con  $V_s$  velocità misurata e  $\sigma_{v0}'$  (k/cm<sup>2</sup>) pressione litostatica efficace a metà strato

$V_{s1c}$  (m/sec) = valore critico delle onde S nel deposito ( $V_{s1c}$  variabile tra 200 e 220 m/sec in funzione della percentuale di fino)

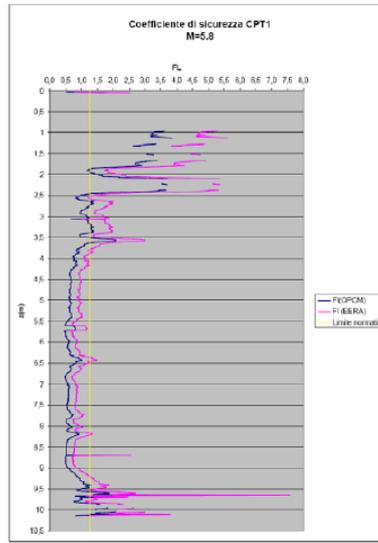
$$F_s = CCR/CSR = 1.15 > 1,$$

Deposito non liquefacibile!

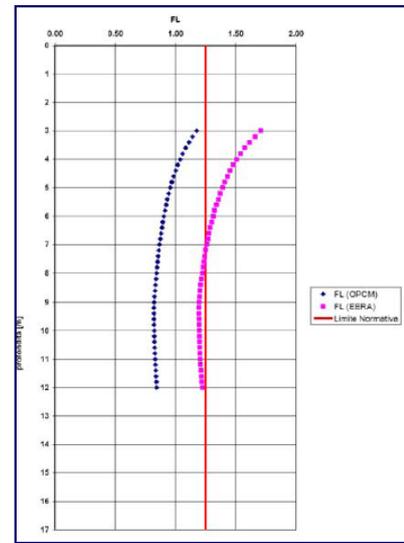
## Stima del potenziale di liquefazione da Nspt – DPSH – qc e prove di laboratorio (sito Barga)



Variation of the safety coefficient with depth (M = 5.8) from DPSH and SPT tests



Variation of the safety coefficient with depth (M = 5.8) from CPT1 tests



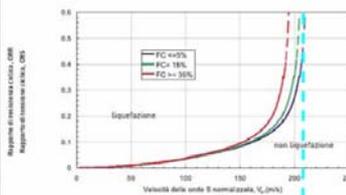
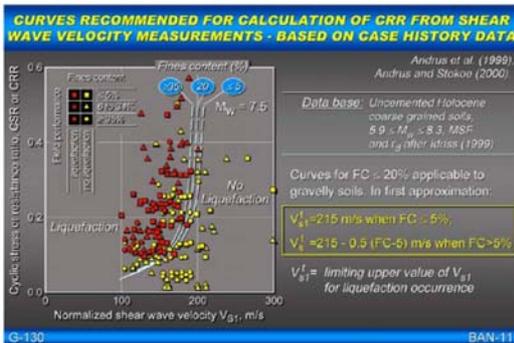
Variation of the safety coefficient with depth (M = 5.8) from laboratory tests

Da Prof. Diego Lo Presti – UNIPI: “Analisi del rischio di liquefazione in Fornaci di Barga nell’area dell’erigendo complesso scolastico – 2007”

Nota:

- 1) Il valore della Magnitudo M = 5.8 è desunto dai dati di disaggregazione della pericolosità sismica (M – R)
- 2) le stime del potenziale di liquefazione (per coefficienti di sicurezza FI = 1.25) da prove in sito sono più cautelative rispetto a quelle desunte da prove di laboratorio (taglio ciclico etc.);
- 3) è necessario tener conto che lo spessore di terreno liquefacibile è sempre minore o uguale a quello dello strato soprastante che non può liquefare.

## Stima del potenziale di liquefazione da prova SCPT in depositi sabbiosi

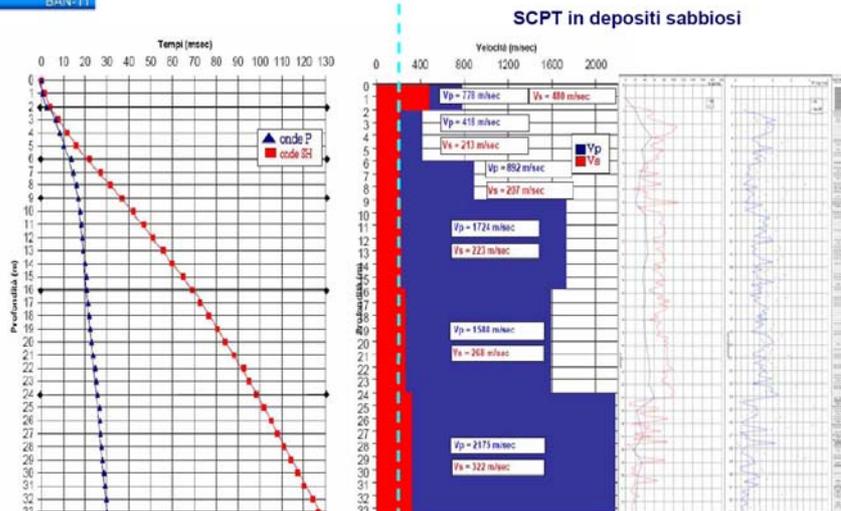


$$C_v = \left( \frac{Pa}{\sigma'v} \right)^{0.25} = 1.04$$

$$V_{S1} = V_s \times C_v = 207 \times 1.04 = 198 \text{ m/sec}$$

$$V_{S1} = C_v V_s \quad C_v = \left( \frac{Pa}{\sigma'v} \right)^{0.25}$$

Pa: pressione atmosferica (≅ 100 kPa)  
 σ'v: pressione litostatica efficace (kPa)



## 5. Alcune osservazioni ai contenuti delle NTC

La verifica della stabilità dei terreni alla liquefazione è una verifica di pericolosità del sito in funzione della risposta sismica locale ed in dipendenza delle condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche dei terreni. Tale verifica deve quindi trovare collocazione negli elaborati progettuali che trattano di “pericolosità” del sito in funzione dell’opera e non in quelli che trattano di “dimensionamento”; negli elaborati che si occupano del dimensionamento delle opere andrà trattato e progettato l’eventuale intervento di consolidamento dei terreni una volta individuata la suscettibilità alla liquefazione.

Si consiglia pertanto di valutare nella “relazione geologica”, che segue il progetto fin dalle fasi di fattibilità, la prima griglia di eventuale esclusione della necessità di verifica di suscettibilità alla liquefazione come trattato nelle NTC; se tale verifica risultasse dovuta andrà inserita nella “relazione sulla pericolosità sismica del sito”; in caso di verifica positiva gli eventuali interventi di consolidamento dei terreni o accorgimenti progettuali andranno trattati nella “relazione geotecnica” e nella “relazione tecnica relativa al dimensionamento delle fondazioni”.

Come ulteriore nota si evidenzia che quanto riportato nella Circolare Applicativa delle NTC al paragrafo C7.11.3.4 risulta condivisibile nell’affermazione “Se le verifiche semplificate sono effettuate contemporaneamente con più metodi, si deve adottare quella più cautelativa, a meno di non giustificare adeguatamente una scelta diversa.”

Mentre non risulta condivisibile l’affermazione “La sicurezza nei confronti della liquefazione deve essere effettuata utilizzando i valori caratteristici delle proprietà meccaniche dei terreni.”; come già sopra riportato la verifica alla suscettibilità di liquefazione è una analisi di pericolosità non circoscritta al volume significativo di terreno su cui insiste l’opera, ma dipendente nella sua estensione spaziale dalle condizioni stratigrafiche locali, non ha senso quindi considerare parametri caratteristici; del resto l’ampia letteratura sull’argomento in merito richiede la sola normalizzazione dei parametri.

### PARTE III: TECNICHE DI INDAGINE

Sulla tipologia delle indagini geofisiche per la misura delle Vs le NTC 2008 non danno indicazioni particolari, citando soltanto, al punto c7.11.3.1.1. della circolare esplicativa, a titolo di esempio ed in maniera non esaustiva, prove cross-hole, prove down-hole, prove Sasw, prove dilatometriche sismiche, prove penetrometriche sismiche, etc..

Invero, se interpretiamo letteralmente quanto indicato al par. 3.2.2. delle NTC 2008 (*“La misura diretta della velocità di propagazione delle onde di taglio è fortemente raccomandata”*) dovrebbero essere privilegiate quelle indagini che prevedano un minor ruolo nell'interpretazione delle misure delle velocità delle onde di taglio, quindi prove downhole o crosshole in fori di sondaggio, prove downhole in foro di prova penetrometrica (“cono sismico” SCPT) o in foro di prova dilatometrica (SDMT), ed anche prospezioni sismiche a rifrazione con onde di taglio.

Altre tecniche di più recente introduzione, basate sulla misura delle onde superficiali di Rayleigh tipo SASW, MASW, ESAC etc. o sui rapporti spettrali H/V, pur offrendo innegabili vantaggi rispetto alle tecniche più tradizionali in termini di tempo, attrezzature e logistica (e quindi di costi!), ricavano la velocità delle onde di taglio Vs mediante procedimenti di inversione e quindi forniscono, a rigore, misure indirette della velocità Vs: queste metodologie, al contrario delle altre tecniche “dirette” dove il “range di discrezionalità interpretativa” dell'interprete è più limitato, sono maggiormente condizionate dalla capacità ed esperienza di quest'ultimo e necessitano sempre, per una corretta interpretazione, di un preciso quadro sismostratigrafico di riferimento.

Una panoramica delle metodologie di indagine è contenuta negli *“Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”* – Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – 2008, che hanno “assorbito” integralmente Le *“Istruzioni Tecniche per le indagini geologiche, geofisiche, geognostiche e geotecniche”* del Programma VEL (Valutazione effetti locali) della Regione Toscana e che oggi è necessario adottare quale Standard operativo di riferimento a livello nazionale, consentendo di perseguire i seguenti obiettivi:

- 1) omogeneità delle prestazioni professionali e d'impresa;
- 2) possibilità di controllo delle indagini da parte degli Enti preposti (uffici del genio civile, uffici tecnici comunali etc.);
- 3) possibilità di implementazione dei database regionali ai fini della microzonazione sismica.

Le metodologie di indagine sono suddivisibili in due grandi categorie: tecniche di indagine attiva e passiva. Le prime permettono di determinare la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (onde P), di taglio (onde S) e/o delle onde di superficie (onde di Rayleigh, Love) generando artificialmente la perturbazione sismica (compressionale o trasversale). Le tecniche di indagine passiva, siano esse a stazione singola o ad antenna sismica (array), sfruttano la struttura del campo d'onde presenti nel terreno, ovvero il “rumore sismico ambientale” o “microtremore”.

E' importante sottolineare che mentre le misure “attive”, sia quelle che misurano direttamente le Vs, sia quelle che le ricavano mediante procedimenti di inversione, offrono un maggior dettaglio e accuratezza di misura in superficie ma difficilmente superano, salvo casi ed applicazioni particolari, i 40÷50 m di profondità, le misure “passive” tipo MASW, ESAC etc., a fronte di un dettaglio inferiore possono consentire una misura delle velocità dei depositi più profondi, fino a massimi dell'ordine di almeno 150 m.

Particolare attenzione deve essere posta nelle misure di rumore sismico ambientale a stazione singola (metodo di Nakamura o H/V): queste ultime, se effettuate in condizioni sismostratigrafiche opportune (contrasto di rigidità tra copertura e bedrock > 2.5, Parolai et Al, 2002) e secondo gli standards previsti negli *“Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”*, in SESAME 2004 e, più recentemente, in *“Ingegneria Sismica n. 2 -2011*, consentono di individuare la/e frequenza/e fondamentale/i di vibrazione del terreno e dare quindi importanti indicazioni sul fenomeno della risonanza o in alternativa sullo spessore H delle coltri (qualora si disponga di dati sufficientemente attendibili in merito alle velocità Vs delle coltri stesse): esse possono quindi costituire un supporto importante in associazione con altre tecniche di indagine (ad esempio MASW attive) e fornire dati fondamentali per la corretta impostazione dell'analisi di risposta sismica locale:

inversamente, *l'utilizzo (esclusivo) delle suddette misure per la ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo appare, allo stato attuale, confinato in un ambito sperimentale, senza fornire le garanzie scientifiche necessarie per un utilizzo applicativo dei dati acquisiti.*

E' bene comunque tener conto che tutte le metodologie soffrono di limiti intrinseci: se da un lato le tecniche basate sulla misura delle onde superficiali di Rayleigh e su procedimenti di inversione sono condizionate sia dall'esperienza e capacità dell'interprete, sia dal grado di conoscenza della situazione stratigrafica locale o più in generale del Modello Geologico di Riferimento, anche le tecniche "dirette" non sono immuni da condizionamenti: ad esempio la prospezione downhole può risultare imprecisa e poco attendibile nel tratto iniziale, per profondità corrispondenti alla distanza foro-punto di energizzazione; la sismica a rifrazione deve fare i conti con il problema dello "strato nascosto" e con le inversioni di velocità (anche se una accurata analisi GRM può mettere sull'avviso l'interprete qualora i valori di "messa a fuoco" XY calcolati si discostino dagli XY scelti); inoltre, per terreni caratterizzati da graduale incremento di velocità (tipico il caso di alcuni depositi argillosi fluviolacustri) la curvatura delle dromocrone si presta a diversi schemi interpretativi, quindi in questi casi è più opportuno ricorrere ad elaborazioni tomografiche basate su procedimenti di inversione.

Si aggiunga che non esiste una metodologia che fornisce una misura "assoluta" della velocità Vs: tutte le metodologie sono affette da errori compresi tra il 10 ed il 30% in più o meno (Mulargia et Alii): sta quindi all'esperienza, capacità e correttezza deontologica del professionista applicare la tecnica più opportuna in relazione al Modello Geologico di Riferimento ed all'importanza dell'intervento, possibilmente integrando i risultati di più metodologie al fine di ricostruire il modello sismico più attendibile possibile. Si veda anche la tavola di confronto riportata a pag. 79. Di seguito si illustrano alcune delle tecniche più usate in ambito professionale, attingendo ampiamente dalle descrizioni dei vari metodi in "Indirizzi e Criteri per la MS - 2008", "Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana - 2011" e pubblicazioni varie:

- Prospezioni sismiche a rifrazione con onde P ed Sh (da Gruppo di Lavoro MS 2008, con modifiche).
- Prospezioni downhole (da Gruppo di Lavoro MS 2008, con modifiche).
- Cono sismico (da IT Programma VEL Regione Toscana, con modifiche).
- Prove MASW (da Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana - 2011 - Foti S., con modifiche).
- Misure di rumore sismico ambientale a stazione singola (da Gruppo di Lavoro MS 2008, con modifiche).
- Prove Re.Mi. (da Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana - 2010 - Franceschini A., con modifiche).
- Prove ESAC (da: Caratterizzazione sismica esplorativa dei territori di Anghiari, Sansepolcro e Pieve Santo Stefano - Università di Siena - Albarello D. - 2005).

## 1) PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE CON ONDE P ED SH

(da Gruppo di Lavoro MS 2008, con modifiche)

Lo scopo della prova, come è noto, consiste nel determinare il profilo di rigidezza del sito tramite la misura diretta della velocità di propagazione delle onde di compressione  $V_p$  e/o di taglio polarizzate orizzontalmente  $V_{Sh}$ , secondo fasi di acquisizione differenti e determinare le geometrie sepolte (spessori e superfici di contatto) dei sismostrati individuati.

La caratterizzazione in termini di velocità di propagazione sia delle onde di compressione sia di taglio consente il computo, per ogni livello sismico individuato, dei principali moduli elasto-dinamici e del coefficiente di Poisson.

La prova trova un'ottima applicabilità con lunghezze delle linee di 96÷120 m, interasse tra i geofoni di 4÷5 metri e profondità delle coperture da esplorare dell'ordine di 30-40 m. Qualora siano necessarie maggiori profondità d'indagine si può provvedere all'organizzazione di stese sismiche a rifrazione caratterizzate da maggiore lunghezza (poiché la profondità d'investigazione è funzione della distanza tra gli scoppi estremi); per basi sismiche di elevata estensione lineare (ad esempio di 480 m) è preferibile l'utilizzo di sistemi sorgente mediante l'uso di esplosivo (utilizzato per prospezioni in onde P), ovvero caratterizzati da energia sufficiente a coprire le grandi distanze.

Le indagini sismiche a rifrazione sono particolarmente adatte qualora si vogliano ottenere profili 2D (in onde P e/o in onde Sh), quando sono attesi risultati di qualità e precisione media e quando interessano dati medi relativi ad ampi volumi di terreno, il tutto particolarmente nel caso di morfologie inclinate o accidentate della superficie topografica e/o del bedrock. Possiamo quindi considerare che l'applicazione tipica sia quella su pendio caratterizzato dalla presenza di copertura detritica su substrato roccioso.

Come è noto, si suppone che, nell'ambito della porzione di sottosuolo indagata, la distribuzione delle velocità sismiche sia crescente con la profondità; questa infatti è la condizione necessaria affinché si verifichi il fenomeno della doppia rifrazione, attraverso il quale, il treno d'onde sismico generato è in grado di essere registrato dai geofoni posti in superficie. Altrimenti, si potrà incorrere nel fenomeno cosiddetto dell'"orizzonte muto", ovvero nell'impossibilità di poter distinguere ed individuare strati con velocità di propagazione delle onde sismiche inferiori rispetto ai livelli sovrastanti.

Malgrado le limitazioni intrinseche nella metodologia ed il grado di dettaglio sicuramente inferiore rispetto alle altre tipologie di prospezione sismica, l'indagine a rifrazione consente di acquisire informazioni distribuite in un contesto bidimensionale con costi complessivi d'esecuzione contenuti.

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P e orizzontali per la generazione delle onde SH e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori rispettivamente a componente verticale ed orizzontale. Va rilevato che le onde SH dirette e rifratte costituiscono sempre un primo arrivo rispetto alle onde di superficie (nella fattispecie le onde di Love) e che per brevi stendimenti risultano sufficientemente energetiche da poter essere registrate nonostante la loro attenuazione sia maggiore perché proporzionale a  $1/r^2$  in luogo di  $1/r$  come accade per le onde di superficie ( $r$  è la distanza dal punto di energizzazione). Non esistono d'altra parte le limitazioni connesse con l'orizzontalità degli strati proprie delle tecniche di elaborazione relative alle onde superficiali.

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si compone delle seguenti parti:

- sistema sorgente (mazza, cannoncino industriale, massa battente, grave in caduta libera, esplosivo)
- sistema di ricezione (array geofonico 24÷48 canali o più)
- sistema di acquisizione dati (sismografo digitale 16-24 bit)
- trigger (sistema di sincronizzazione tra istante di energizzazione e sistema di registrazione)

I sistemi energizzanti (sia per la generazione delle onde P sia delle onde SH) devono essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali. Per la generazione in onde P, la sorgente è generalmente costituita da un grave in caduta libera (massa da 150 kg

o superiore), secondariamente se la logistica non lo consente, può essere utilizzato il cannoncino industriale (tipo “minibang” o similari) ed eventualmente la mazza sismica.



*Energizzazione in onde P con maglio da 200 kg in caduta libera e energizzazione in onde Sh con pendolo da 30 kg*

Il sistema sorgente per le onde SH è generalmente costituito da un parallelepipedo di forma tale da poter essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità con una massa pesante. E' importante che il parallelepipedo venga gravato di un carico statico addizionale (autocarro, penetro metro o semplicemente dal peso di due o più operatori) in modo che possa rimanere aderente al terreno sia al momento in cui viene colpita sia successivamente, affinché l'energia prodotta non venga in parte dispersa. Con questo dispositivo è possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio polarizzate orizzontalmente, con uniformità sia nella direzione di propagazione che nella polarizzazione e con una generazione di onde P trascurabile.

L'accoppiamento parallelepipedo-terreno deve essere per “contatto” e non per “infissione”. Un buon accoppiamento tra parallelepipedo e terreno si ottiene facilmente in terreni a granulometria fine (normalmente con dimensioni inferiori al limite superiore delle sabbie); nel caso, invece, di presenza di terreni a granulometria più grossolana sarà necessario approntare delle piazzole costituendo uno strato di materiale fine al contatto con il parallelepipedo energizzante.

Il Trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e la produzione di un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica.

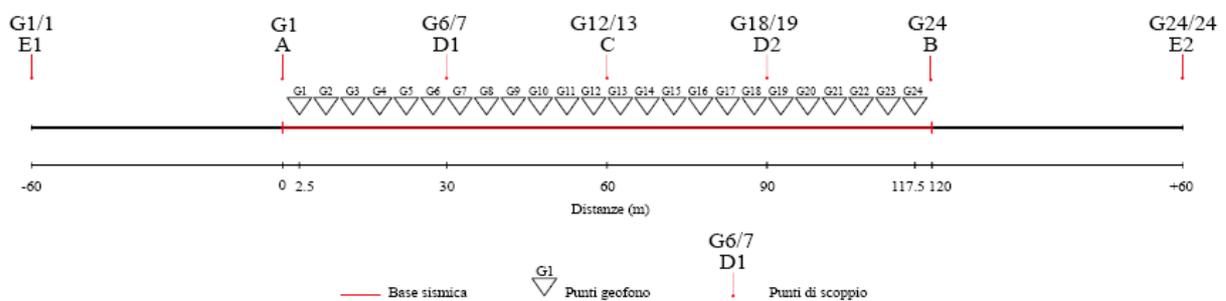
Il sistema di acquisizione è costituito da una strumentazione multicanale (24-48 canali) che deve consentire:

- **Digitalizzazione a 16-24 bit:** il segnale elettrico generato dai geofoni, generalmente trasduttori elettrodinamici, viene convertito da analogico a digitale, cioè si traduce in un valore numerico binario con una determinata risoluzione nel range di ammissibilità del segnale elettrico. Ad esempio un range di +/- 3V con una risoluzione di 16 bit permette di discriminare differenze di potenziale di  $(3 \times 2 / 65536) 0.091\text{mV}$ , 91 microVolt. Lo stesso range di tensione (+/- 3V) acquisito con un convertitore A/D a 24 bit, invece, permette di discriminare differenze di potenziale di 0.36 microVolt. Appare evidente che con un sistema a 24 bit si ha una tale estensione della dinamica della strumentazione che non è più necessario “settare” amplificatori o preamplificatori, come, invece era necessario con i vecchi sistemi ad 8 bit ed in parte anche con quelli a 16 bit

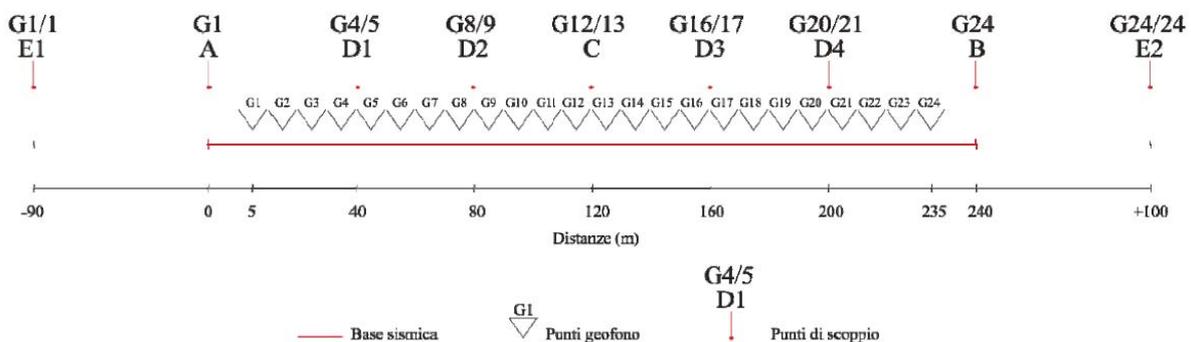
- **Sommatoria del segnale:** con i sistemi a 24 bit anche lo stacking appare inutile ... se non c'è rumore di fondo. Infatti con i sistemi a bassa dinamica lo stacking portava ad un “rinforzo” del segnale che, altrimenti risultava “a scalini”, con i nuovi sismografi lo stacking può essere utile solo per attenuare il rumore di fondo che, statisticamente dovrebbe annullarsi sommando contributi sempre con fase diversa.

- Filtraggio in acquisizione in uscita
- Inversione di polarità
- Stampa in campagna delle registrazioni
- Il sistema di ricezione consta di 24÷48 geofoni di frequenza appropriata al tipo di indagine:
- geofoni verticali, con frequenza propria di 4.5 Hz (MASW), 10Hz, 14 Hz
- geofoni orizzontali, con frequenza propria di 4.5÷10 Hz

La configurazione minima richiesta dagli “Indirizzi e criteri” è costituita da array di 24 geofoni disposti con interasse di 5 m e con un minimo di 7 registrazioni (“scoppi” o “tiri”) di cui 5 interne alla base sismica e 2 esterne (“di copertura”), secondo il seguente schema:

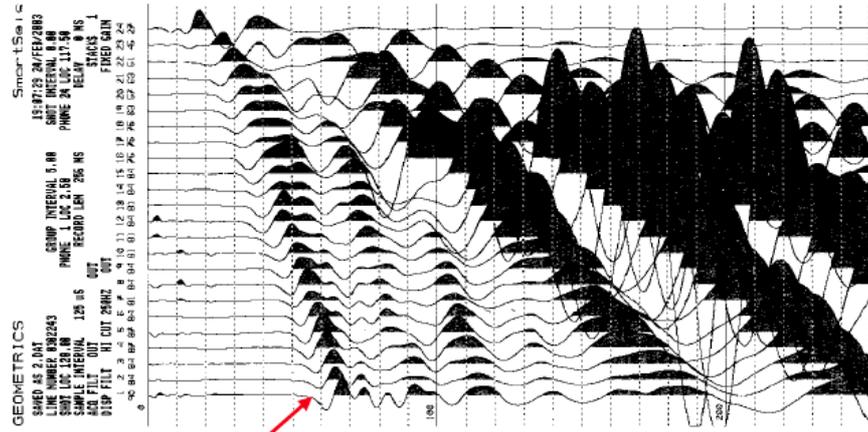


Per le linee di lunghezza pari a 240 m vengono richiesti ulteriori due scoppi per un totale complessivo di 9 scoppi.



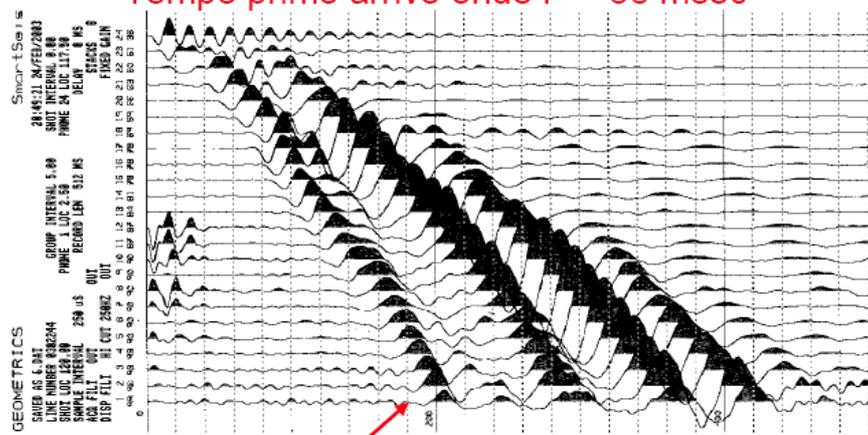
E' importante ottenere in campagna delle buone registrazioni che consentano la sicura individuazione dei primi arrivi su tutte le tracce:

ONDE P

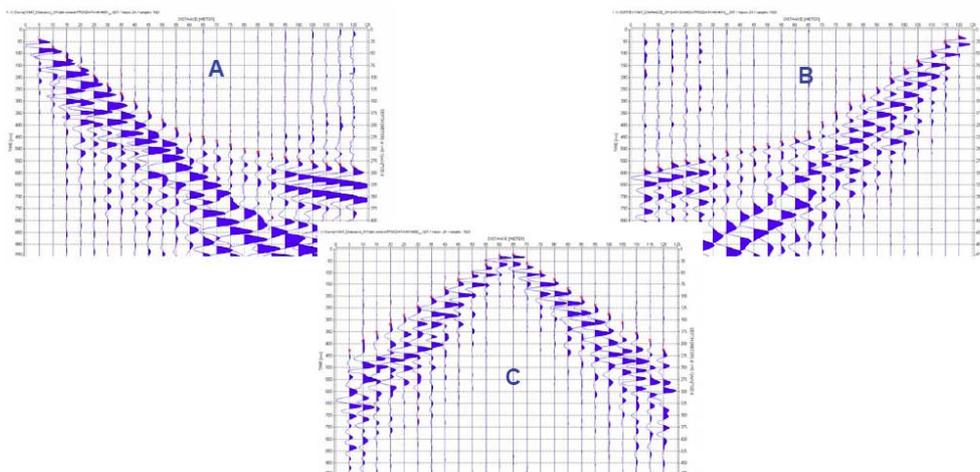
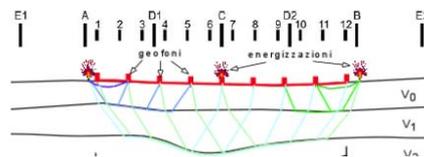


Tempo primo arrivo onde P = 58 msec

ONDE SH



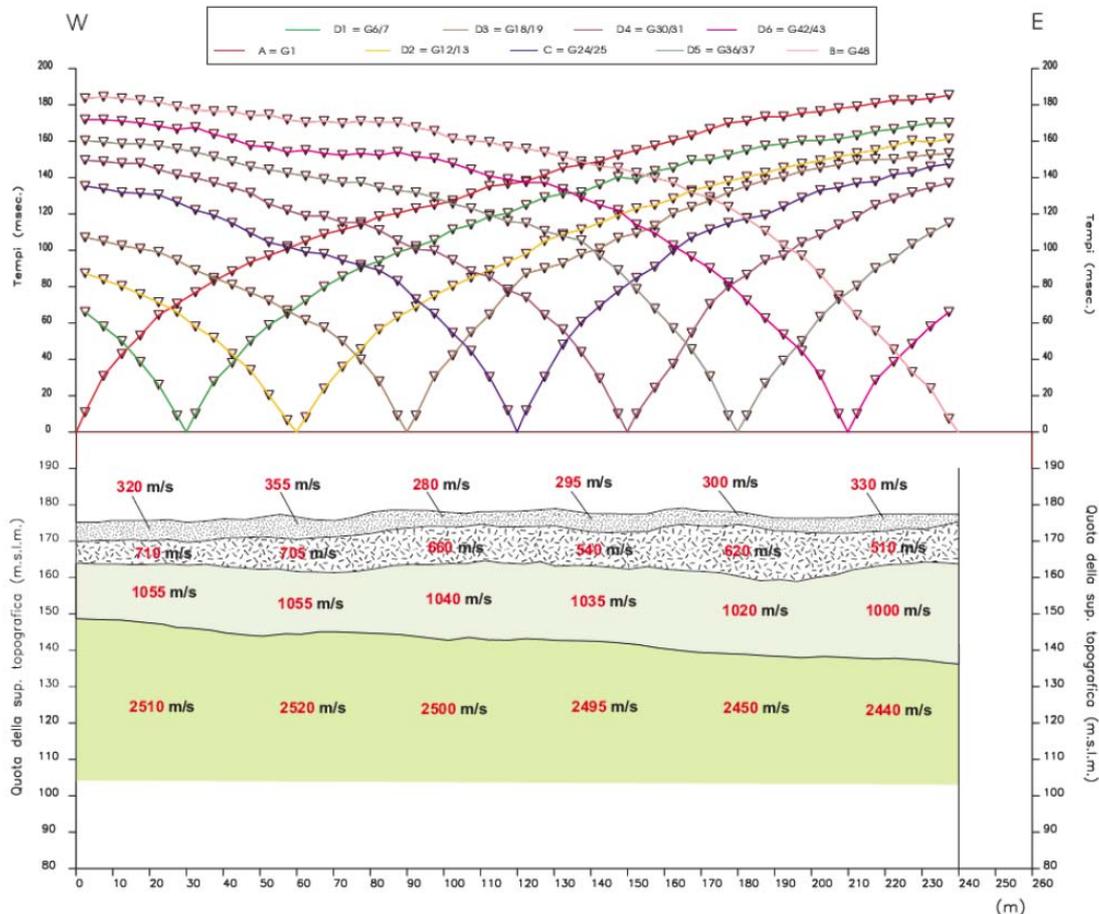
Tempo primo arrivo onde Sh = 180 msec



L'elaborazione dei dati deve essere realizzata mediante software ad elevata valenza diagnostica in grado di fornire i valori dei parametri di velocità e profondità, relativi ai rifrattori individuati, per ogni stazione geofonica

con particolare riferimento al caso di morfologie ondulate sia della superficie topografica sia dei rifrattori, come ad esempio il “metodo reciproco generalizzato GRM”.

## Elaborazione GRM (Generalized reciprocal Method)



E' particolarmente importante l'acquisizione congiunta, lungo lo stesso allineamento, sia delle onde P che delle onde Sh: in tal modo infatti si ottiene:

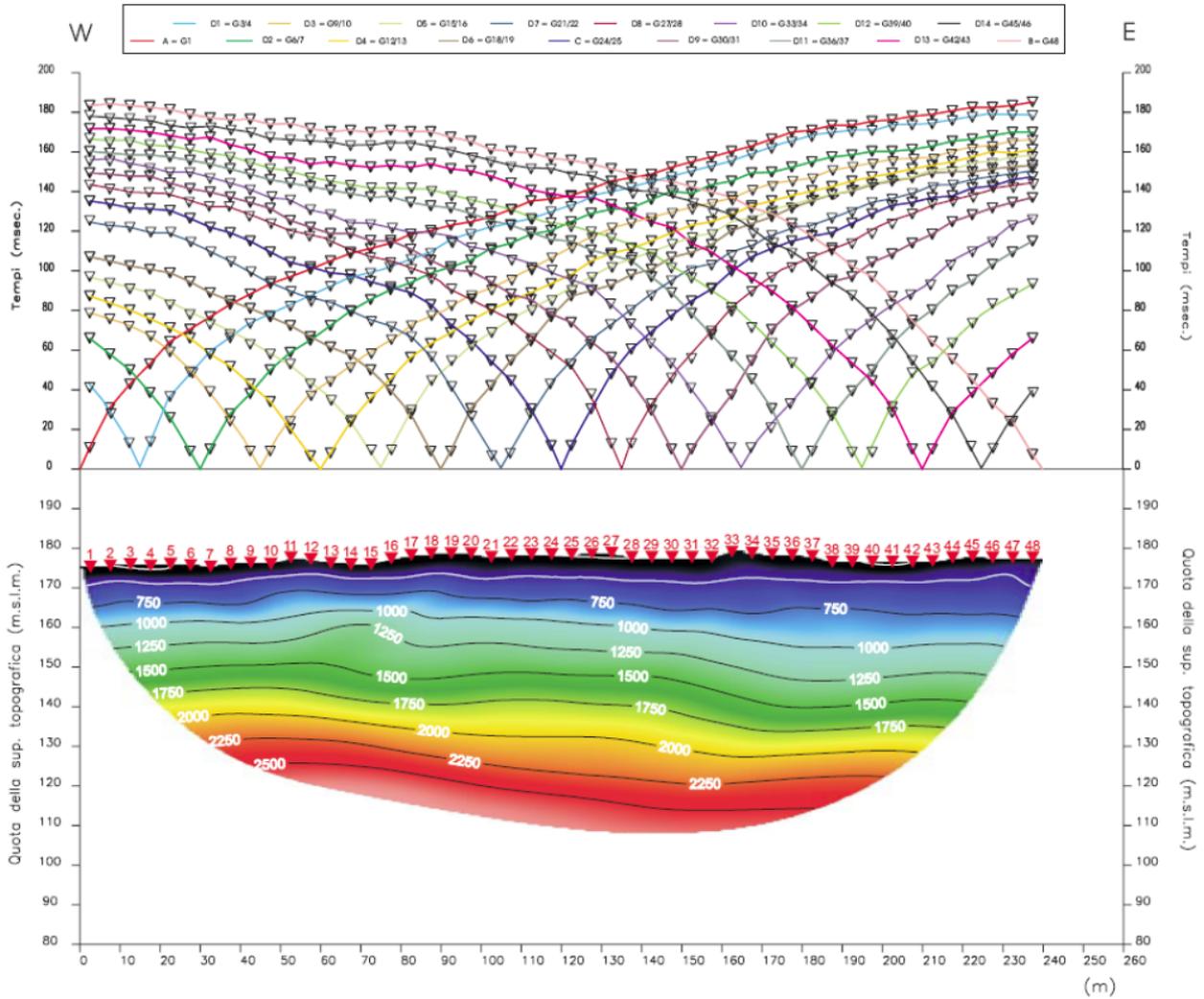
- facilitazione dell'interpretazione stratigrafica dal confronto delle dromocrone in P ed Sh;
- stima dei moduli elastici dinamici del terreno;
- presenza o meno di falda acquifera e terreni saturi.

Nei casi in cui si riscontri, a seguito del picking dei primi arrivi delle onde sismiche, una forma curvilinea delle dromocrone che possa prestarsi a diversi schemi interpretativi, è preferibile ricorrere ad un'interpretazione della prospezione sismica con tecnica tomografica.

I moderni sistemi hardware e software consentono infatti di effettuare in pochi secondi milioni di operazioni di inversione e iterazione, impensabili fino a pochi anni or sono, ottenendo una distribuzione e discretizzazione delle velocità nel sottosuolo molto più raffinata rispetto alla sismica a rifrazione tradizionale.

Al contrario, quando le dromocrone presentano tratti a diversa inclinazione con “ginocchi” netti e ben definiti, l'elaborazione tomografica non appare opportuna: essa può addirittura condurre a stime errate dello spessore delle coperture e dell'andamento del bedrock ai fini della valutazione dell'azione sismica, sia nel caso di approccio semplificato (categorie di sottosuolo), sia nel caso di Analisi di Risposta Sismica Locale.

## Elaborazione tomografica (Rayfract etc.)



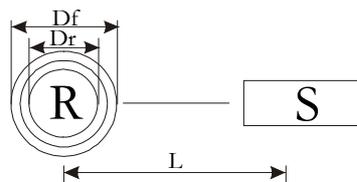
## 2) PROSPEZIONI DOWNHOLE (da Gruppo di Lavoro MS 2008, con modifiche)

Il metodo Down-hole rappresenta una delle più accurate misure sismiche per la determinazione delle proprietà fisico-meccaniche dinamiche dei terreni. Lo scopo della prova consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde P) e di taglio (onde S), misurando il tempo che esse impiegano nel tragitto tra la sorgente, posta in superficie, ed i ricevitori posti all'interno di fori di sondaggi, considerando nota la distanza sorgente-ricevitori

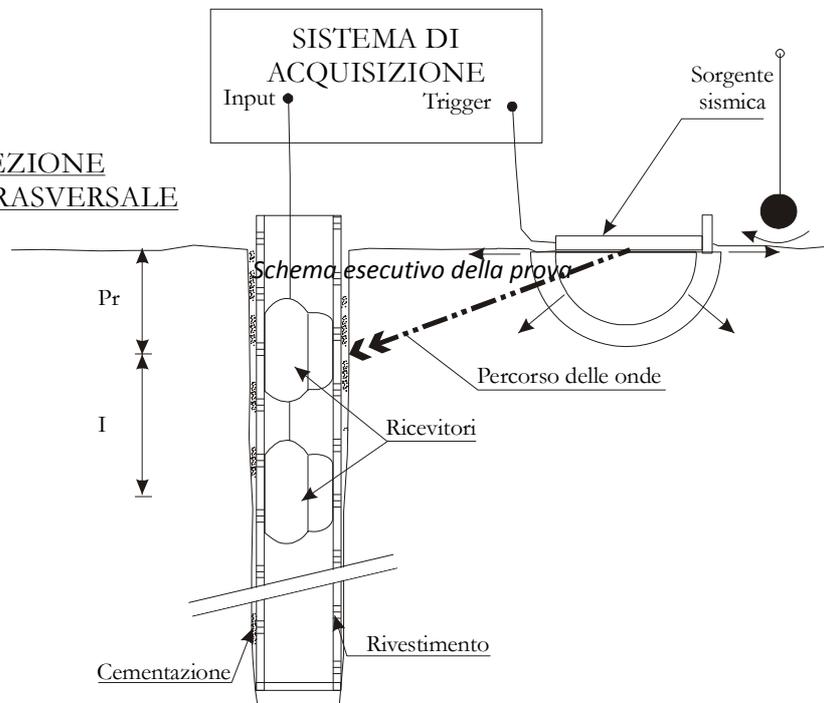
La prova Down-hole si rende necessaria quando la profondità delle coperture da esplorare sono superiori alla decina di metri e quando si richiedano dei risultati di qualità e precisione da media a buona.

È opportuno spingere la prova fino ad incontrare il bedrock sismico attraversandolo per uno spessore significativo, es. almeno 5 metri, tenendo comunque presente che in taluni contesti geologici l'affidabilità della prova con tecniche di interpretazione convenzionali oltre i 40 m di profondità è generalmente scarsa, l'energia generata dalla sorgente potrebbe non essere sufficiente all'univoca individuazione dei primi arrivi. In altri contesti, invece, si è verificata la fattibilità di indagini Down-hole fino ed oltre la profondità di 80 m dal piano campagna. Si suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo. Qualora queste caratteristiche non siano verificate è necessario operare con più punti di energizzazione.

### PLANIMETRIA



### SEZIONE TRASVERSALE



La prova consiste nel produrre, sulla superficie del terreno, sollecitazioni verticali (per la generazione di onde di compressione P) ed orizzontali (per onde di taglio polarizzate orizzontalmente Sh) mediante una sorgente meccanica, e nel registrare l'istante di primo arrivo del treno d'onde ad un sistema composto almeno da una coppia di geofoni tridimensionali, alloggiati a profondità note nel foro di sondaggio appositamente strumentato.

Conosciuta la distanza tra sorgente e ricevitori e determinato il tempo di propagazione, è possibile stimare in maniera accurata la distribuzione delle velocità sismiche (P ed Sh) in corrispondenza della verticale di misura.

L'esecuzione della prova Down-hole deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale viene realizzato il foro in cui alloggiare i ricevitori e vengono preparati gli strumenti di energizzazione e di registrazione.

Per quanto riguarda la realizzazione del foro di sondaggio, durante la fase di perforazione, ogni cura deve essere posta per ridurre al minimo il disturbo sulle pareti e nelle zone di terreno circostanti il foro. La perforazione deve essere eseguita a rotazione ed è opportuno sostenere le pareti con tubazione di rivestimento o con fango bentonitico. Successivamente il foro deve essere attrezzato con una tubazione in materiale ad alta impedenza alle vibrazioni, preferibilmente in ABS o PvC, possibilmente muniti di guide inclinometriche per facilitare l'orientazione dei geofoni in foro, di spessore maggiore o uguale a 3.0 mm, lunghezza minima degli spezzoni di 3 metri, assemblati mediante filettatura a vite ed eventuali manicotti di giunzione e muniti di tappi di testa e fondo foro.

Infine il foro deve essere cementato in corrispondenza dello spazio anulare compreso tra le pareti e il tubo di rivestimento. La cementazione deve essere eseguita dal basso in modo da garantire la continuità del contatto terreno tubazione e di portare in superficie il fango e i detriti eventualmente presenti (normativa ASTM). La miscela da utilizzare per la cementazione, in linea di massima, è costituita da una malta a ritiro controllato (acqua + cemento + bentonite), in particolare per la parte del foro che penetra nella roccia si consiglia il cemento di Portland convenzionale di densità pari a  $2.2 \text{ mg/m}^3$ , mentre per la parte a contatto con terreni, sabbie e ghiaie si sceglie una miscela con una densità prossima a quella del terreno circostante (da  $1.8 \text{ mg/m}^3$  a  $1.9 \text{ mg/m}^3$ ), ottenuta mescolando 450 g di cemento di Portland, 450 g di bentonite a 2.8 kg di acqua. La pressione di iniezione non deve essere superiore a 2 atm (normativa ASTM). E' buona norma attendere almeno una settimana tra il completamento della cementazione e l'esecuzione della prospezione.

In maniera analoga a quanto avviene per le prospezioni sismiche a rifrazione, l'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si compone delle seguenti parti:

- sistema energizzante;
- sistema di ricezione;
- trigger;
- sistema di acquisizione dati.

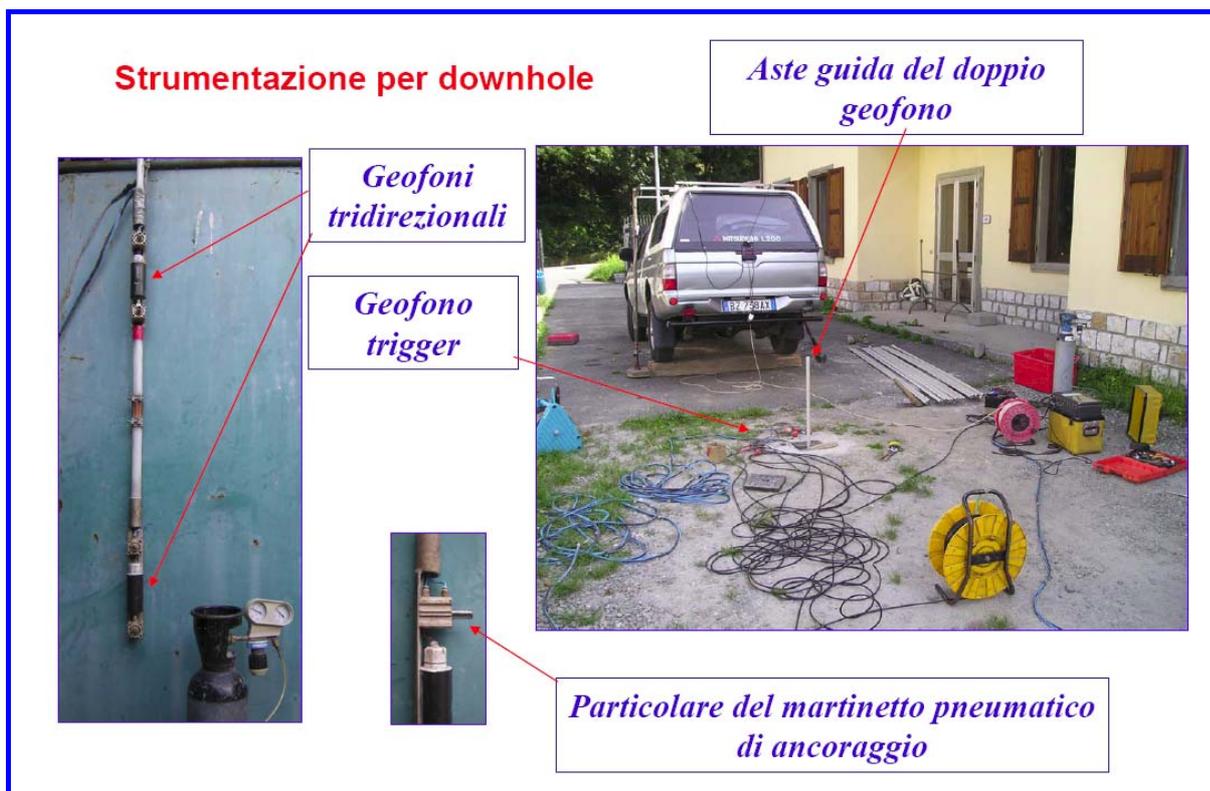
I sistemi energizzanti (sia per la generazione delle onde P sia delle onde Sh) devono essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali, ovvero con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani orizzontali (ed eventualmente anche verticali). In pratica sono gli stessi che si utilizzano per le prospezioni sismiche a rifrazione ed a queste si rimanda per una descrizione più accurata.

Il punto di energizzazione verrà posto ad una distanza dal foro tale da poter considerare rettilinei i raggi sismici dal punto stesso alle varie posizioni del geofono e contemporaneamente minimizzare la generazione delle onde di tubo o di Stonely nel tubo.

Tale distanza, in genere compresa tra un minimo di 3 m ed un massimo di 5 m, andrà misurata accuratamente. Il punto di energizzazione deve essere mantenuto fisso durante tutta la prova in un foro.

Il sistema di ricezione si deve comporre di due (o più) ricevitori, ciascuno dei quali è costituito da un trasduttore di velocità orientato secondo le componenti di una terna cartesiana ortonormale e collocati

all'interno di un unico contenitore (preferibilmente di forma cilindrica) di lunghezza non superiore ai 450 mm, in modo che uno dei tre trasduttori sia orientato secondo la lunghezza del contenitore (trasduttore verticale) e gli altri ad esso perpendicolari (trasduttori orizzontali). È essenziale che uno dei due sensori orizzontali di ogni ricevitore venga orientato parallelamente alla direzione di generazione delle onde Sh. I trasduttori devono possedere appropriate caratteristiche di frequenza e sensibilità tali da potere ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente. La risposta in frequenza dei trasduttori non deve variare più del 5% su un campo di frequenze compreso tra metà e due volte la frequenza predominante del treno d'onde che si propaga all'interno del mezzo. I ricevitori devono essere collegati, secondo la loro lunghezza, in modo di mantenere costante la distanza verticale (compresa tra 1 e 3 m) e l'orientazione relativa (in modo che i trasduttori orizzontali siano paralleli e concordi a due a due) e in modo tale da potere anche controllare dalla superficie l'orientazione assoluta.



All'estensione tipica di prova downhole: distanza foro – energizzazione m 3, doppio geofono mod. Ambrogeo con martinetti pneumatici di ancoraggio ed aste guida, sismografo Geometrics Smartseis S 24

Bisogna porre particolare attenzione al fatto che i sistemi previsti per mantenere costanti le distanze e per garantire l'isorientazione dei geofoni non trasportino vibrazioni e non producano interazione sismica tra i due sensori. È necessario adottare un adeguato sistema di ancoraggio per garantire un buon accoppiamento in foro tra i ricevitori e le pareti di rivestimento.

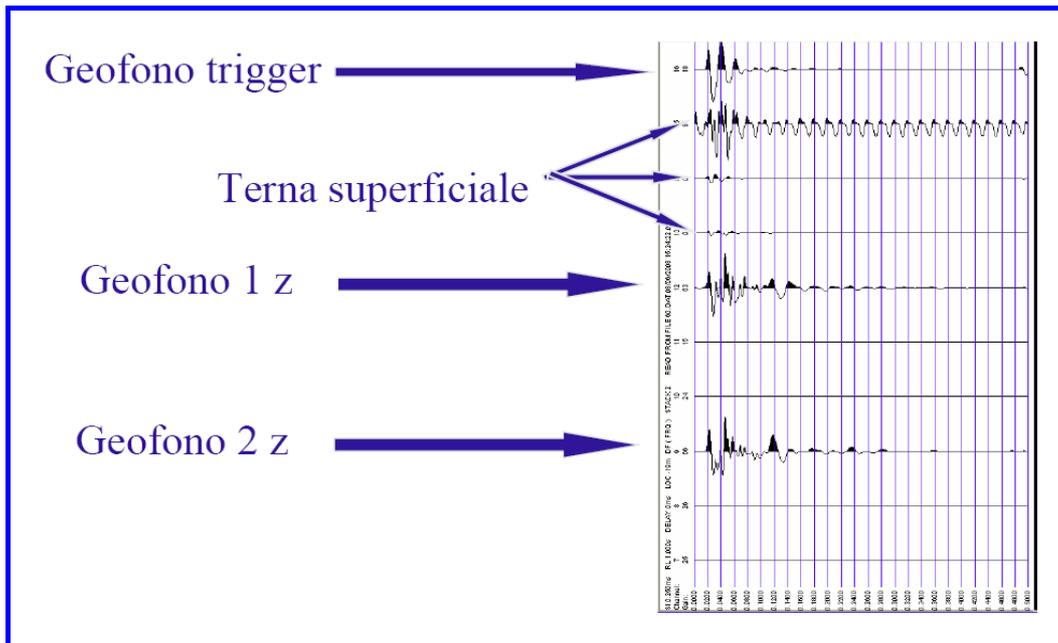
Poiché si debbono ricavare onde Sh, per l'ottenimento di una buona qualità dei dati, si debbono produrre alla sorgente due onde di polarità opposta energizzando in opposte direzioni e sommare le registrazioni di ogni singolo ricevitore, in modo da individuare meglio l'istante di primo arrivo (metodo cross-over). Pertanto è necessaria una strumentazione che preveda la funzione "inversione di polarità".

Ai canali in registrazione, oltre ai sensori nel sondaggio va aggiunto un canale costituito da un geofono (o da una terna di geofoni qualora si voglia valutare anche l'attenuazione del segnale con la profondità) collocato a testa pozzo. La registrazione di questo canale, per ogni battuta effettuata, ha la funzione essenziale di controllare la costanza dell'istante di trigger per tutte le energizzazioni, parametro molto importante per via

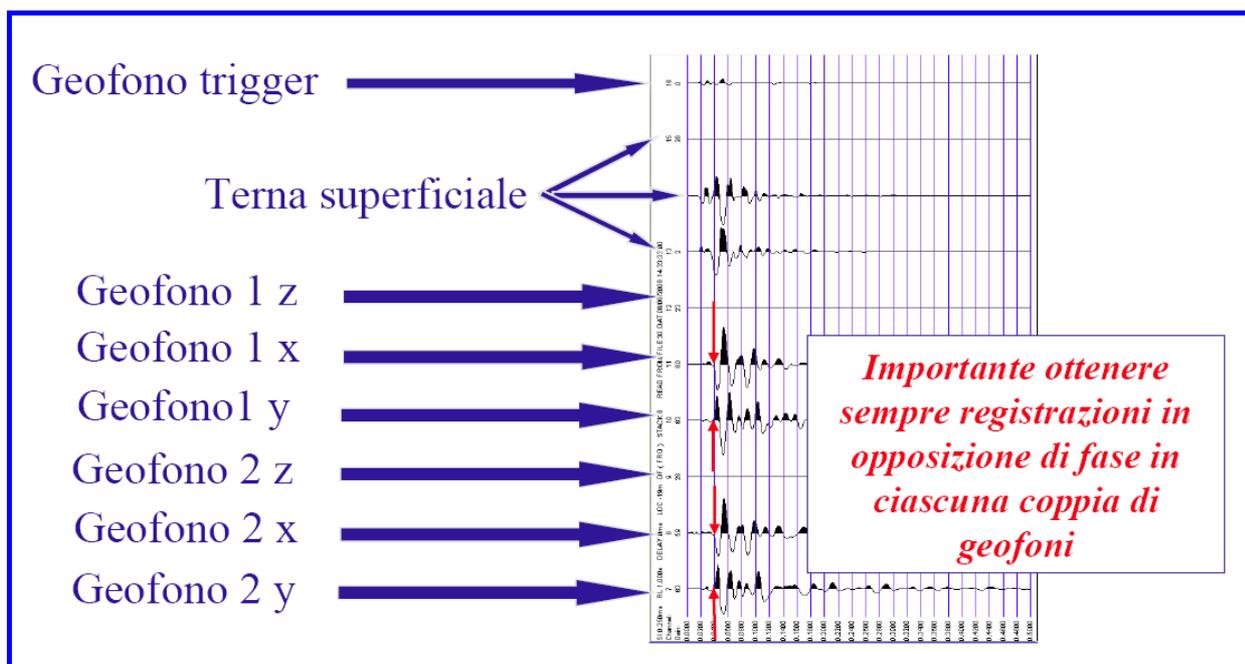
delle differenze molto piccole dei tempi di arrivo per le varie profondità.

Questo tipo di prova è poco sensibile alla deviazione dell'asse del foro dalla verticale, per cui non si rendono necessari controlli di verticalità.

Prima dell'inizio della prospezione vera e propria è opportuno eseguire alcune misure preliminari per individuare l'orientazione ottimale della coppia di ricevitori e di massimizzare l'ampiezza di ricezione ai ricevitori. Le registrazioni delle onde Sh devono sempre risultare in opposizione di fase in modo da avere la certezza di registrare arrivi relativi ad onde di taglio.



Esempio di registrazione in onde P



Esempio di registrazione in onde Sh

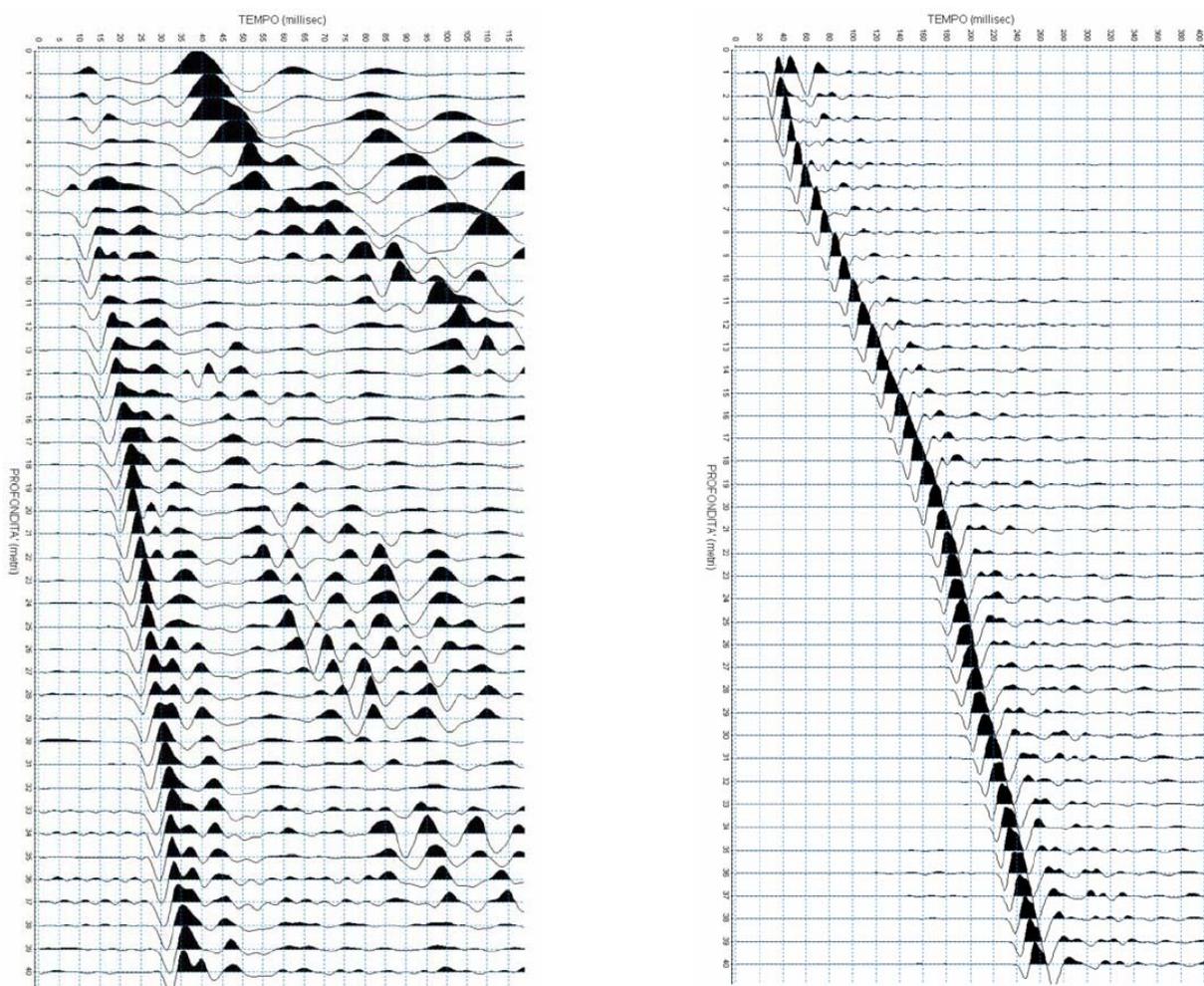
Il tempo di registrazione deve essere almeno pari a 0.5 s. Si consiglia tuttavia di estenderlo ad 1 s. Tale esigenza deriva dalla possibilità di utilizzare i dataset sismici acquisiti in assetto Down-hole per estensioni delle indagini attraverso differenti modalità interpretative, come la tecnica sperimentale VSP (vertical Seismic Profiling).

L'intervallo minimo di registrazione è di un metro, mentre per particolari fini (ad esempio per individuare inversioni di velocità in strati di piccolo spessore) si può ridurre a 40-50 cm: la scelta del numero e posizione delle misure deve tenere comunque conto della stratigrafia rilevata durante l'esecuzione del sondaggio, per ottimizzare la caratterizzazione in velocità delle formazioni presenti.

Per determinare il tempo di arrivo delle onde P ed Sh ai ricevitori, va in ogni caso utilizzata un'analisi visuale delle registrazioni delle vibrazioni rilevate dai trasduttori del ricevitore confrontate con il segnale di trigger ( $t_0$ ) o inizio registrazione. Per facilitare il riconoscimento delle fasi, oltre ad un'analisi per singola profondità va costruita una sezione film complessiva, con il montaggio delle registrazioni P ed Sh alle varie profondità mediante uno dei software commerciali disponibili (Windsism, Visual Sunt, Reflex etc.)

In linea di massima, il criterio di elaborazione dati si articola nelle seguenti fasi:

- picking dei primi arrivi;
- misura dei tempi di ricezione dei primi impulsi rilevati ( $t$ ), corretti rispetto allo "zero" di trigger;
- calcolo dei tempi verticali ( $t^*$ ).



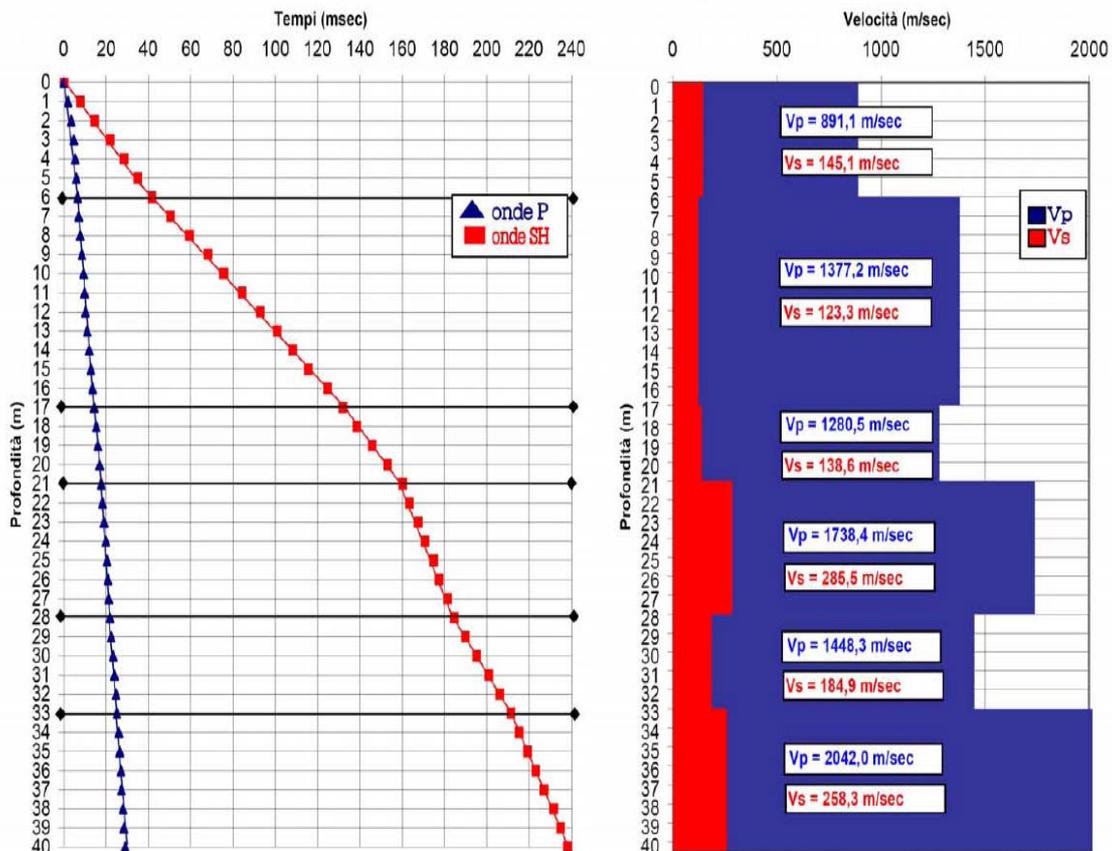
Prova downhole prof. m 40: assemblaggio di registrazioni onde P (a dx) ed onde Sh (a sx)

Il percorso delle onde sismiche dovrebbe essere verticale dalla sorgente al ricevitore, per cui l'energizzazione dovrebbe essere fatta il più vicino possibile al pozzo; questa necessità si scontra, comunque, con l'esigenza di allontanare la sorgente dal boccaforo per far in modo che i primi arrivi registrati nel sismogramma non siano dovuti al percorso fatto lungo la cementazione del foro alla velocità del cemento (rifrazione sul casing). La distanza sorgente-boccaforo va valutata caso per caso anche in relazione alla quantità di cemento utilizzata. Se, infatti, la quantità di boiaccia è più del doppio dell'interspazio foro-tubo, essa va aumentata. In genere tale distanza non è maggiore di tre metri, considerando anche il fatto che all'aumentare di questa aumenta la possibilità di avere primi arrivi rifratti e non diretti. I dati possono essere attendibili quando la profondità del geofono  $z$  è maggiore della distanza boccaforo-punto energizzante  $R$ . Poiché le onde sismiche prodotte dalla sorgente non si propagano esattamente in direzione verticale rispetto ai ricevitori, data la posizione della sorgente, è necessario correggere i tempi di arrivo stimati per tenere conto dell'inclinazione del percorso effettivo.

Indicata con  $z$  la profondità del ricevitore, con  $d$  la distanza effettiva tra sorgente e ricevitore e con  $R$  la distanza superficiale tra sorgente e centro del foro, con  $t$  il tempo determinato dalle tracce di registrazione, il tempo corretto  $t^*$  risulta:

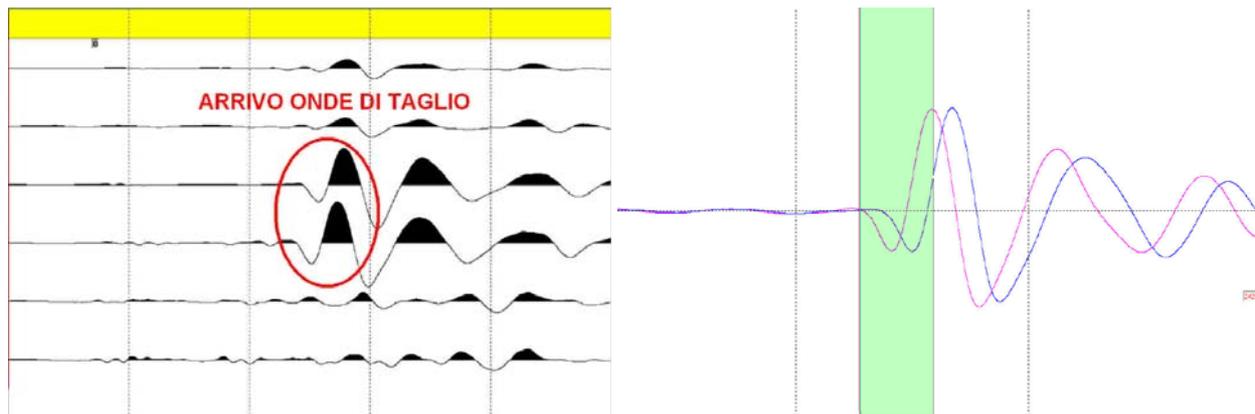
$$t^* = \frac{z}{d} \cdot t = \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \cdot t$$

Dividendo la profondità a cui viene collocato il ricevitore per il tempo corretto si ricavano i valori di velocità per ciascuno dei ricevitori, in corrispondenza di ciascuna delle profondità considerate. Le velocità dei vari strati sono quindi determinate con la funzione di regressione lineare relativa a ciascuno degli intervalli rettilinei del diagramma tempi di arrivo-profondità (dromocrone, a sx nella figura sottostante, relativa all'elaborazione dei dati alla pag. precedente): le velocità sono inoltre plottate in apposito diagramma in funzione della profondità (velocità intervallari, a dx nella figura sottostante):



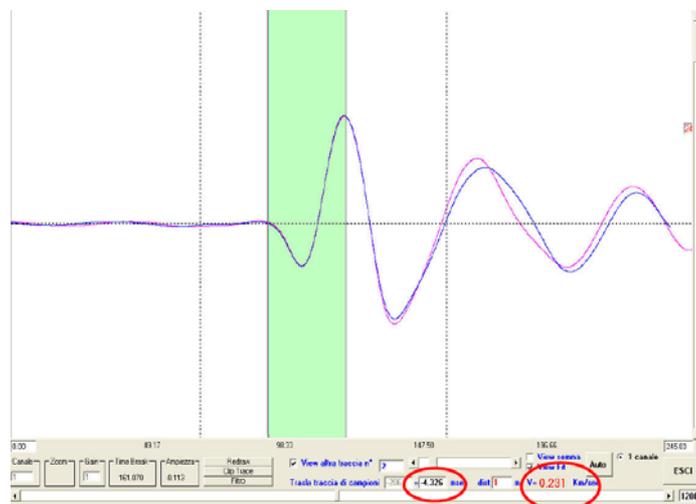
Profondità da m a m	Vp	Vs	Vp/Vs	Rapporto Poisson	Densità Gamma (kg/dmc)	Modulo di taglio G (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo di Young E (kg/cm <sup>2</sup> )
0-6	891,1	145,1	6,1	0,49	1,75	376	1.117
6-17	1.377,2	123,3	11,2	0,50	1,75	271	811
17-21	1.280,5	138,6	9,2	0,49	1,80	353	1.053
21-28	1.738,4	285,5	6,1	0,49	2,00	1.662	4.941
28-33	1.448,3	184,9	7,8	0,49	1,95	679	2.026
33-40	2.042,0	258,3	7,9	0,49	2,05	1.394	4.158

È anche possibile ricavare le velocità (limitando quest'operazione alla definizione di intervalli caratterizzati da basse velocità di propagazione delle onde sismiche e spessori limitati a qualche metro e quindi difficilmente identificabili nel diagramma spazio-tempo) dividendo la differenza dei tempi di arrivo tra due profondità corrispondenti a due ricevitori collegati rigidamente e i tempi di arrivo rilevati per una singola battuta (non c'è possibilità di errore di trigger: in questo caso le velocità si definiscono **velocità d'intervallo**), come nell'esempio che segue:



Registrazioni onde Sh

Assemblaggio tracce



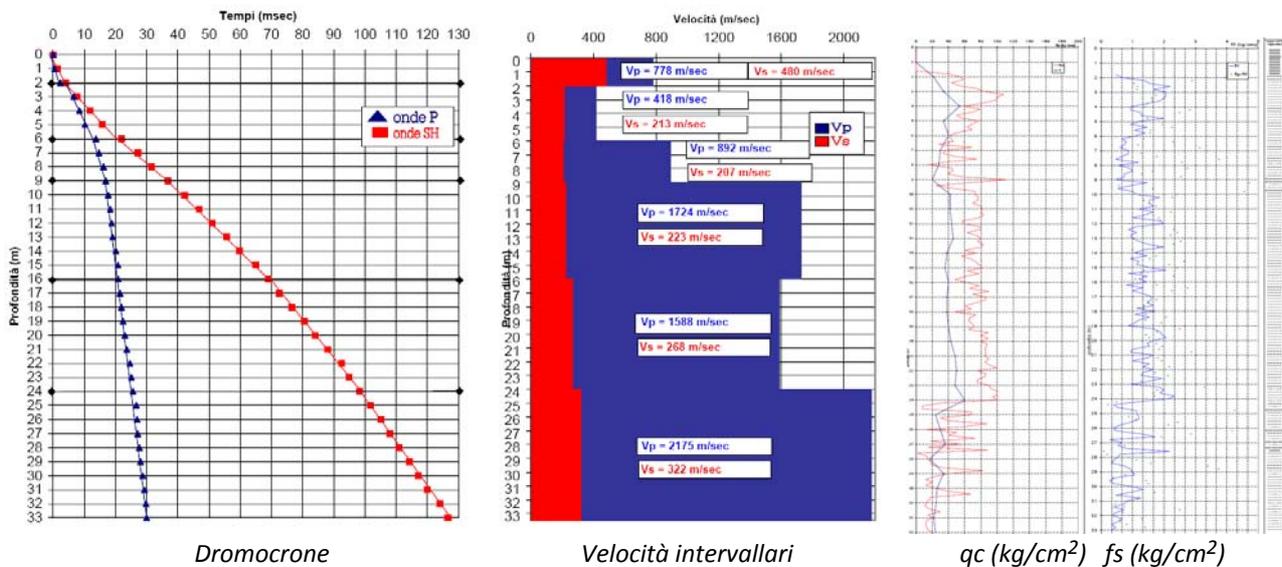
Sovrapposizione tracce, calcolo del  $\Delta$  tempi e della velocità Vs - Da G. Pulelli - 2010

**3) CONO SISMICO SCPT (PROSPEZIONE DOWNHOLE O CROSSHOLE IN FORO DI PROVA PENETROMETRICA CPT O CPTU) (da IT Programma VEL Regione Toscana, con modifiche)**

Lo scopo della prova consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde P) e di taglio (onde S), calcolandone il tempo ad esse necessario per spostarsi tra due o più punti (sorgente e ricevitori) di cui è nota la distanza. La prova del cono sismico si applica quando la profondità delle coperture da esplorare sono superiori alla decina di metri ed è raccomandabile soprattutto quando i risultati da ottenere devono essere di qualità e precisione da medie a buone e non si vuole ricorrere a delle indagini eccessivamente costose.

I limiti applicativi dell'indagine sono sostanzialmente i medesimi di una prova CPT o CPTU standard, ovvero impossibilità di attraversare livelli eccessivamente consistenti, addensati o cementati, a granulometria grossolana (ghiaie, ciottoli), oltre ovviamente ai materiali rocciosi: il vantaggio principale è quello di poter correlare il profilo continuo di resistenza (qc) con il profilo di velocità.

La prova può essere condotta secondo la procedura down-hole precedentemente descritta o secondo la procedura cross-hole, in entrambi i casi viene utilizzato un penetrometro a punta conica, sulla quale viene installato un geofono, che può essere così condotto all'interno del terreno alle profondità desiderate, senza l'esecuzione e la preparazione preliminare di uno o più fori. A seconda che la sorgente venga posizionata sulla superficie del deposito da investigare o venga condotta alla medesima profondità del ricevitore, utilizzando sempre un penetrometro a punta conica che proceda nel terreno parallelamente al penetrometro su cui è installato il ricevitore, la prova SCPT sarà rispettivamente del tipo down-hole o cross-hole.



**4) PROSPEZIONI MASW (MULTICHANNEL ANALYSIS SURFACE WAVES)** (da *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana – 2011 – S. Foti, con modifiche*)

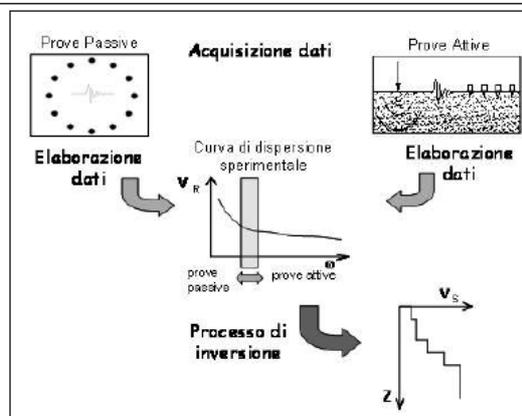
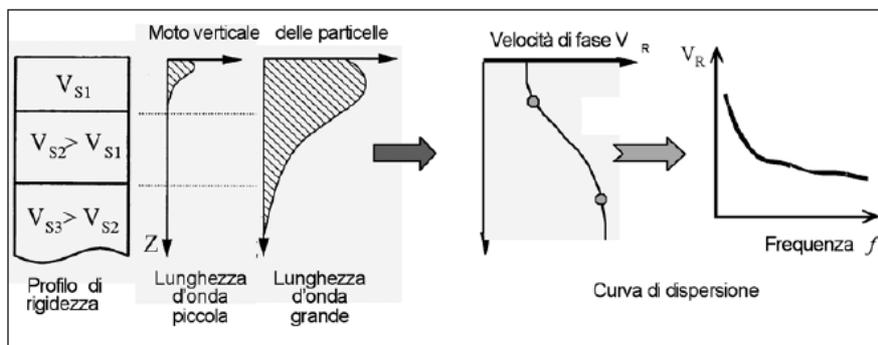
Le prove non invasive basate sulla propagazione di onde di superficie per la stima del profilo di  $v_s$  hanno trovato negli ultimi anni grande diffusione grazie ai ridotti tempi di acquisizione in sito. Il numero di acronimi utilizzati per individuare le prove basate sulla propagazione di onde superficiali (SASW, MASW, SWM, Re.Mi., SSRM, CSW, etc.) porta talvolta confusione nel settore, nonostante i principi di base siano sostanzialmente gli stessi ed i vari metodi si differenzino solo per le modalità di acquisizione e le tecniche di elaborazione dei dati sperimentali.

Correntemente, le prove attive vengono effettuate utilizzando prevalentemente approcci multistazione, che risultano robusti ed efficienti (Foti, 2005).

In un mezzo eterogeneo avente rigidità variabile con la profondità si manifesta il fenomeno della dispersione geometrica, per cui la velocità di fase con cui si propagano le onde superficiali è funzione della frequenza.

Da un punto di vista fisico questo fenomeno può essere spiegato considerando che onde armoniche di diversa frequenza sono caratterizzate da una diversa lunghezza d'onda e conseguentemente interessano strati superficiali di diversa profondità e pertanto volumi di terreno aventi diverse caratteristiche meccaniche e, dunque, diversa velocità di propagazione.

La relazione che lega la velocità di fase delle onde di Rayleigh ( $v_R$ ) alla frequenza  $f$  viene usualmente definita curva di dispersione e rappresenta l'elemento centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni. Infatti la curva di dispersione è funzione delle proprietà fisico-meccaniche e geometriche del mezzo e, posto di riuscire a stimarla sperimentalmente, può essere utilizzata per la soluzione di un problema inverso avente come obiettivo la stima dei parametri di modello per il terreno. Nelle applicazioni è però necessario tenere in conto che, da un punto di vista matematico, la propagazione può essere rappresentata come un fenomeno multimodale e quindi si avranno in generale diverse curve di dispersione.



Il processo di caratterizzazione può essere schematicamente sintetizzato nel diagramma di flusso riportato in figura. Utilizzando un insieme di ricevitori posti sul piano campagna vengono acquisiti dei segnali sismici

relativi ad una perturbazione che si propaga lungo la superficie libera. L'analisi dei segnali acquisiti consente una stima della curva di dispersione caratteristica del sito in oggetto, che viene successivamente utilizzata per un processo di inversione fornendo come risultato finale il profilo verticale della velocità delle onde di taglio nel terreno e quindi una stima del modulo di taglio a piccole deformazioni in funzione della profondità.

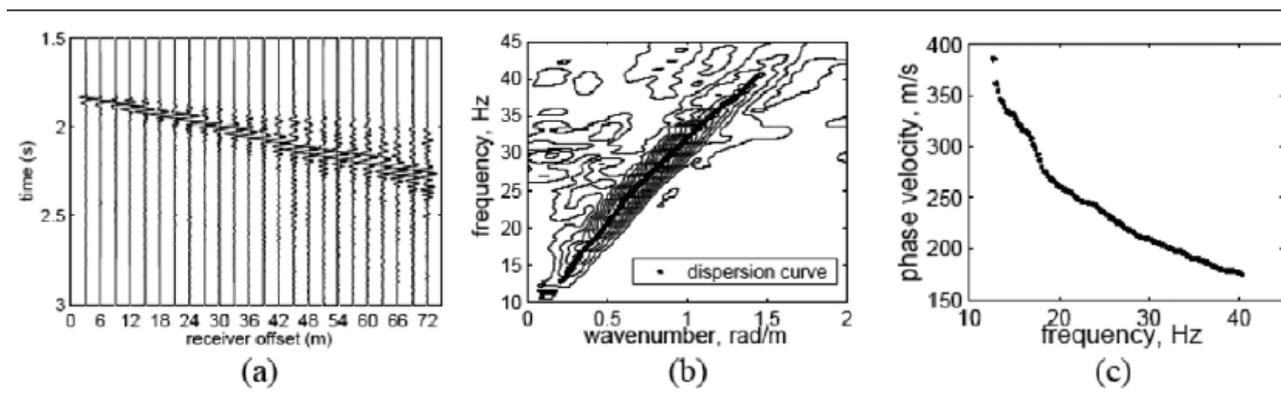
La curva di dispersione sperimentale può essere ottenuta utilizzando diversi approcci che si differenziano per modalità di acquisizione del dato sperimentale e per tecniche di analisi dello stesso.

Per quanto riguarda le prove attive, l'utilizzo di tecniche basate sull'analisi di più segnali relativi ad una stesa di ricevitori allineati con la sorgente (Nolet e Panza, 1976; McMechan e Yedlin, 1981; Gabriels et al., 1987; Park et al., 1999), consente una stima rapida e robusta della curva di dispersione. Questa rappresenta attualmente la modalità di prova più diffusa e viene spesso indicata con l'acronimo MASW (Multistation Analysis of Surface Waves; Park et al., 1999).

La perturbazione, generata a mezzo di una sorgente impulsiva o armonica con frequenza variabile, viene rilevata secondo uno schema di acquisizione a più ricevitori. L'analisi viene effettuata trasformando i segnali dal dominio spazio-tempo in cui sono stati acquisiti in un dominio alternativo, in cui sia possibile ottenere informazioni riguardanti la natura dispersiva del deposito in oggetto.

Due metodologie, differenti da un punto di vista formale, ma equivalenti ai fini del risultato finale, possono essere utilizzate: una nel dominio frequenza-numero d'onda (Nolet e Panza, 1976; Gabriels et al., 1987; Zywicki, 1999), l'altra nel dominio frequenza-lentezza o frequenza velocità di fase (McMechan e Yedlin, 1981; Park et al., 1999).

In entrambi i casi è possibile dimostrare che le curve di dispersione sono associate ai massimi degli spettri nei rispettivi domini. In virtù della presenza di diversi modi di propagazione, le informazioni ottenute dall'analisi spettrale sono differenti a seconda dei parametri meccanici e geometrici del deposito. Per determinate condizioni stratigrafiche (es. rigidità crescente con la profondità in assenza di forti contrasti) si ha il predominio del modo fondamentale e quindi le informazioni ottenute riguardano proprio tale modo. In generale però le informazioni ottenute sono invece relative sia al modo fondamentale sia ai modi superiori. Inoltre nelle condizioni di prova usuali, la risoluzione spettrale non è sufficiente per una chiara identificazione dei singoli modi di propagazione ed è pertanto necessario fare riferimento ad una curva di dispersione apparente (Foti, 2005).



Le informazioni sperimentali riguardanti la curva di dispersione sono infine utilizzate per la caratterizzazione del terreno, risolvendo un problema matematico inverso. Il modello usualmente considerato è quello di mezzo elastico lineare a strati omogenei ed isotropi. I parametri necessari a descrivere pienamente tale modello sono: due costanti elastiche, lo spessore e la densità di ciascuno strato. La natura monodimensionale del modello in oggetto rende implicita l'ipotesi che gli strati siano piani e tra loro paralleli, ipotesi che deve pertanto essere in linea di massima soddisfatta dal deposito di terreno per garantire la significatività del risultato finale.

Nella soluzione del problema inverso usualmente vengono adottate alcune semplificazioni, al fine di ridurre il

numero di incognite presenti ed alleviare i problemi di non unicità della soluzione. Sulla base di una serie di analisi parametriche (Nazarian, 1984) è stato dimostrato che il numero di Poisson e la densità dei singoli strati rivestono un ruolo marginale. Pertanto il processo di inversione viene effettuato considerando come incognite solo la velocità delle onde di taglio e lo spessore di ciascuno strato ed assegnando a priori i valori di densità e numero di Poisson.

Nella scelta di tali valori è però necessario tenere in debito conto la presenza della falda, che comporta una brusca variazione nel valore del numero di Poisson (Foti e Strobbia, 2002). Il processo di inversione può essere affrontato con approcci deterministici o stocastici. Nel primo caso si utilizzano tipicamente processi iterativi: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, ed eventualmente delle informazioni a priori riguardo la stratigrafia, il problema diretto viene risolto diverse volte variando i parametri che definiscono il modello fino al raggiungimento del miglior accordo tra la curva di dispersione simulata e quella sperimentale. Usualmente algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati vengono utilizzati per automatizzare la procedura. Con l'utilizzo di metodi di inversione stocastici, quale ad esempio il metodo Monte Carlo, è possibile limitare il rischio di convergenza del processo su minimi locali della funzione di misfit. Infine è importante ricordare che la caratterizzazione basata sulla propagazione delle onde superficiali richiede la soluzione di un problema matematico inverso, pertanto la soluzione non è univoca in quanto possono presentarsi diverse combinazioni dei parametri di modello (spessori e velocità di taglio degli strati) che sono associati a curve di dispersione numeriche simili tra loro e sostanzialmente equidistanti dalla curva di dispersione sperimentale. Questa problematica, detta equivalenza, si presenta per tutti i metodi che richiedono la soluzione di problemi inversi. Nel caso delle prove MASW utilizzate per studi di risposta sismica locale, le conseguenze della non unicità della soluzione sono relativamente modeste (Foti et al., 2009),

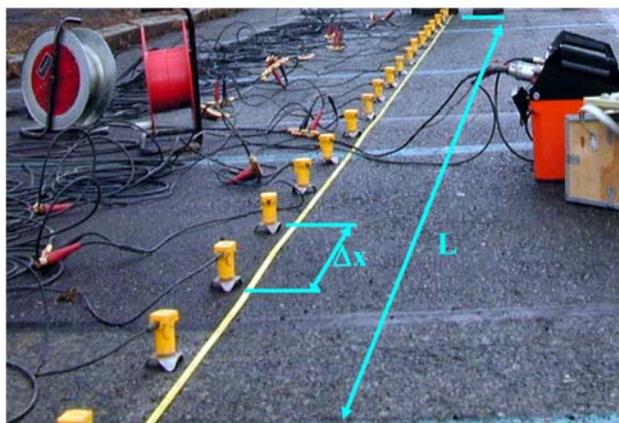
Tali conseguenze possono invece essere significative se le prove MASW sono utilizzate per la determinazione della  $V_{s30}$  o comunque di un profilo di velocità delle Vs a fini progettuali secondo NTC 2008: in questi casi è indispensabile che l'interpretazione sia basata su un preciso quadro stratigrafico e/o sismostratigrafico di riferimento.

Le profondità di esplorazione del sottosuolo massima ( $Z$ ) e minima ( $z$ ) che si possono raggiungere con questo tipo di indagine sono legate rispettivamente alla lunghezza dello stendimento ( $L$ ) e all'interdistanza geofonica ( $\Delta x$ ). In prima approssimazione  $L \approx Z \approx \lambda_{\max}$  e  $z \approx \Delta x \approx \lambda_{\min}$ , dove  $\lambda_{\max}$  è la lunghezza d'onda massima misurata (corrispondente alla minima frequenza) e  $\lambda_{\min}$  è la lunghezza d'onda minima (massima frequenza).

Per piccole profondità possono essere sufficienti stendimenti a 12 geofoni con  $\Delta x = 0.5\div 1.0$  m ed energizzazione con la classica mazza.

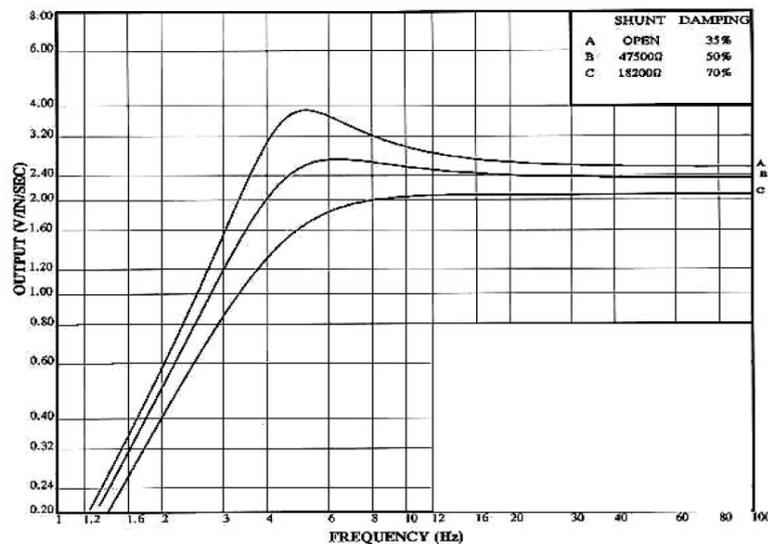
Al contrario, per raggiungere le profondità richieste dalla normativa (30 m o più), sono necessari stendimenti più lunghi, di almeno 48÷60 m con sistemi di registrazione a 24÷48 canali.

A differenza delle prospezioni sismiche che utilizzano le onde di volume, nelle tecniche che utilizzavano le onde superficiali di Rayleigh non è necessario un accoppiamento perfetto tra geofoni e terreno, ma è sufficiente il semplice appoggio (vedi foto).



La durata della registrazione è di 2÷4 sec con frequenza di campionamento di 0.5÷1.0 msec.

Per caratterizzare in profondità occorrono basse frequenze senza eccessivo abbattimento delle ampiezze e senza distorsione della fase: occorrono quindi **geofoni a bassa frequenza** (es. 4,5 Hz o inferiori).



Nelle prospezioni MASW attiva, inoltre, è particolarmente importante **l'uso di una sorgente di energia idonea a generare onde a bassa frequenza** con  $\lambda$  paragonabili alla lunghezza dello stendimento, ossia alla profondità massima che vogliamo investigare. E' fondamentale, inoltre, adottare una distanza intergeofonica piccola (preferibilmente non superiore a 2 metri) in modo da avere informazioni anche sulle porzioni di terreno più superficiali.

E' bene precisare che non esiste una geometria di acquisizione "fissa", poiché questa dipende dalle singole caratteristiche fisiche di ciascun sito indagato. Tenuto conto della regola generale circa il passo dei geofoni e la lunghezza dello stendimento, è sempre consigliabile eseguire più registrazioni con offset crescenti da entrambi gli estremi dell'array per verificare uno dei requisiti fondamentali dalla tecnica MASW, ovvero il modello a strati pianparalleli, come ad esempio:

- Shot 1: a distanza dal primo ed ultimo geofono pari a  $dx$  (distanza tra geofoni).
- Shot 2: a distanza dal primo ed ultimo geofono pari alla semilunghezza  $L/2$  dello stendimento.
- Shot 3: a distanza dal primo ed ultimo geofono intermedia tra lo Shot 1 e lo Shot 3.

Per  $Z = \lambda_{max}/2$  (dove  $Z$  è la profondità massima di indagine e  $\lambda_{max} = V_{fase}/F_{min}$  è la lunghezza d'onda massima misurata) in terreni lenti, tipicamente ricadenti nelle categorie di sottosuolo di fondazione C o D, appare improbabile, utilizzando come fonte di energia la classica mazza da 10 Kg, misurare  $\lambda_{max}$  superiori a 30-45 metri ( $V_{fase} = 150-230$  m/sec con  $F_{min}$  di 5-6 Hz). Le profondità di indagine raggiunte quindi, nella migliore delle ipotesi, superano di poco i 20 metri. Una fonte di energia a maggiore impatto, ad esempio una massa battente da 200÷250 kg o superiore, può generare frequenze più basse rispetto alla mazza da 10 kg, consentendo di misurare  $\lambda_{max}$  maggiori e quindi di raggiungere profondità di indagine superiori.

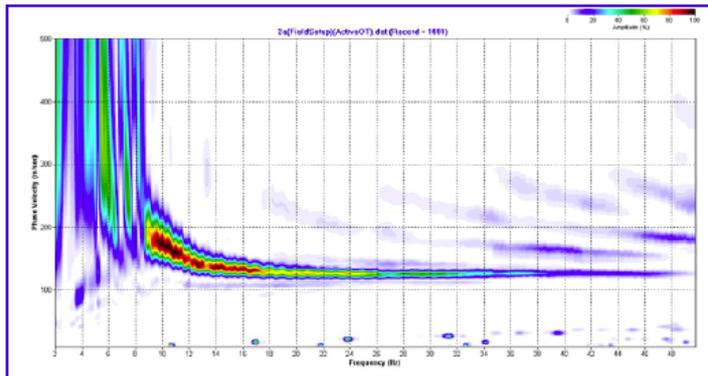
L'uso di sorgenti energetiche più efficienti consente inoltre di superare uno dei limiti tipici della metodologia MASW: infatti in presenza di contrasti di velocità elevati (ad esempio uno strato di limo sciolto su uno strato di ghiaia addensata) l'energia prodotta da una sorgente poco energetica rimane intrappolata nello strato a bassa velocità non riuscendo ad "illuminare" gli strati sottostanti.

Sono improponibili interpretazioni di MASW attive che si spingono a 80÷100 m con lunghezza dello stendimento  $L = 48$  m (o anche inferiore) ed energia fornita da mazza 10 kg.

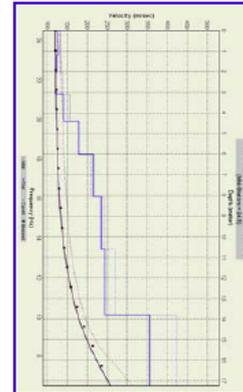
Per tale ragione si ritiene indispensabile che negli elaborati delle prove sia sempre allegata, oltre ai dati relativi alla strumentazione utilizzata, alla geometria del sistema di acquisizione ed al profilo delle Vs, la curva di dispersione sovrapposta allo spettro delle ampiezze delle onde registrate nel campo velocità di fase – frequenza o nel campo numero d’onda – frequenza.

Si veda il confronto che segue:

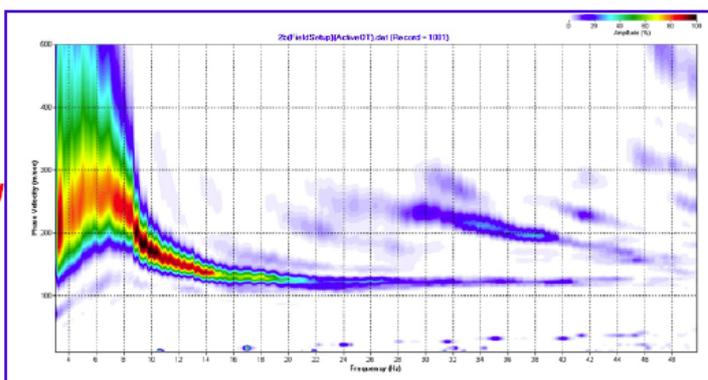
**Confronto MASW  $L = 48 M$   $i = 1 m$  in depositi sabbiosi costieri (categoria C)**



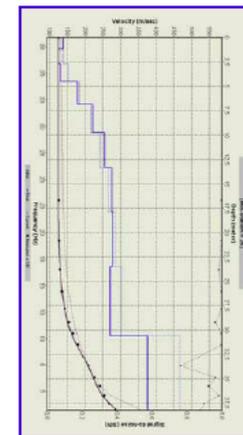
*Mazza 10 kg: frequenza minima 9 Hz*



*Massima prof. raggiunta 17 m*



*Maglio 200 kg: frequenza minima 4÷5 Hz*



*Massima prof. raggiunta 38 m*

## 5) MISURE DI RUMORE SISMICO AMBIENTALE A STAZIONE SINGOLA *(da Gruppo di Lavoro MS 2008 e Ingegneria Sismica n. 2 - 2011, con modifiche)*

Il metodo dei rapporti spettrali ("metodo di Nakamura" o metodo HVSR da Horizontal to Vertical Spectral Ratios o semplicemente H/V) è basato sullo studio dei valori medi del rapporto di ampiezza fra le componenti spettrali del rumore sismico misurate sul piano orizzontale e verticale. In particolare, oggetto di analisi è la cosiddetta "funzione H/V" che rappresenta i rapporti spettrali medi in funzione della frequenza di vibrazione.

L'idea di base è quella secondo cui il rapporto H/V consente in media di eliminare il ruolo delle variazioni di intensità delle sorgenti nel corso della registrazione mettendo in evidenza il ruolo della struttura. Sperimentalmente si vede che in presenza di sorgenti uniformemente distribuite, la forma della funzione (e in particolare la posizione dei suoi valori massimi) risulta con buona approssimazione stabile nel tempo e fortemente correlata con le caratteristiche del sottosuolo al di sotto del sito di misura. In particolare, in presenza di forti variazioni nel profilo di velocità delle onde s nel sottosuolo (legate per esempio alla transizione fra sedimenti soffici e basamento rigido), la funzione H/V mostra dei massimi marcati in corrispondenza della frequenza di risonanza  $F_r$  relativa a quella configurazione strutturale (con  $F_r$  circa uguale al rapporto fra la velocità media delle onde s fino alla profondità del salto di velocità e il quadruplo di questa profondità).

Si osserva anche una certa correlazione (fortemente non lineare) fra l'entità della variazione di velocità responsabile del fenomeno di risonanza e l'ampiezza del massimo della funzione H/V (maggiore è il contrasto di impedenza sismica, maggiore è l'entità del massimo). Perché la misura di rumore sia utilizzabile per l'applicazione della tecnica H/V a fini geognostici è necessario che:

- la sensibilità dell'apparato di misura nel campo delle frequenze di interesse (solitamente 0.5-10 Hz) sia adeguata alla bassa entità del segnale;
- venga garantito un campionamento statisticamente rappresentativo del campo medio di rumore;
- la misura sia effettuata in presenza di un campo di rumore diffuso.

Mentre la prima condizione richiede solo l'uso di strumentazione adeguata, le altre due dipendono dalla specifica situazione sperimentale e come tali possono essere valutate solo a posteriori. Le indicazioni che seguono hanno lo scopo di creare le condizioni perché tutte queste condizioni siano soddisfatte al meglio.

### **La strumentazione**

Dal punto di vista sperimentale, la metodologia H/V richiede l'esecuzione di misure di rumore mediante un sistema di acquisizione tri-direzionale. Sensori di tipo velocimetrico sono da preferirsi a sensori di tipo accelerometrico data la scarsa sensibilità di questi ultimi. Dato che la metodologia è basata sui soli rapporti di ampiezza spettrale, l'impiego di sensori con uguali caratteristiche e con una ragionevole linearità nella funzione di risposta per le tre componenti rende non necessaria la correzione strumentale del segnale in fase di post-processing. Per questo stesso motivo, non risulta necessario ricorrere a sensori velocimetrici caratterizzati da una frequenza propria molto bassa (1 Hz o meno). Peraltro, l'uso di quest'ultimo genere di sensori richiede spesso tempi di installazione relativamente lunghi (la stabilizzazione dell'apparato di misura richiede in alcuni casi tempi dell'ordine delle ore) che risultano incompatibili con un uso estensivo della metodologia. Di maggiore importanza risulta invece la disponibilità di un apparato di registrazione dotato di grande dinamica (dell'ordine dei 24 bit equivalenti) con basso rumore elettronico. Per la registrazione del segnale non è richiesta una grande capacità di memoria: infatti frequenze di campionamento comprese fra i 128 e i 512 Hz per durate dell'ordine delle decine di minuti sono sufficienti per garantire un campionamento adeguato del campo di rumore delle misure adeguate per frequenze inferiori ai 10 Hz. La sincronizzazione delle misure (per esempio mediante segnale Gps) non è necessaria.

### ***Il posizionamento sul terreno***

Dati i bassi livelli di ampiezza del segnale registrato, ogni possibile elemento di disturbo va eliminato. In questo senso, tutte le eventuali parti mobili della strumentazione (es. cavi di collegamento, sistemi di registrazione su disco rigido, ecc.) vanno eliminate o messe in condizione di non perturbare le misure. Inoltre, per evitare l'effetto del vento sulla strumentazione, la sua sezione d'urto va minimizzata (se necessario anche interrando i sensori in presenza di un forte vento al suolo). Per lo stesso motivo va evitato il più possibile il contatto dei sensori con elementi mobili presenti sul terreno (fili d'erba, ecc.) o comunque di fattori che agiscono direttamente sul sistema di sensori (pioggia).

Un elemento essenziale per le misure H/V è la realizzazione di un buon accoppiamento dello strumento con il suolo. Laddove possibile, i sensori andrebbero saldamente ancorati (per infissione) al terreno libero dopo l'eliminazione di possibili elementi di disturbo (erba, ciottoli, ecc.). In presenza di suolo rigido, la distanza dei sensori dal suolo deve essere minimizzata per evitare movimenti relativi fra l'apparato e il terreno. Infine situazioni di scarsa stabilità del suolo (sabbia o ghiaia) vanno accuratamente evitate.

Allo scopo di fornire una corretta interpretazione delle misure, la posizione dello strumento andrebbe documentata (es. fotograficamente), annotando anche le condizioni ambientali della misura (pioggia sottile, vento forte, ecc.). Dato che obiettivo è la caratterizzazione del campo d'onde diffuso, la presenza di sorgenti di rumore dominanti va, laddove possibile, eliminata. In particolare, va evitato l'effetto di potenziali sorgenti "colorate" (ovvero capaci di generare segnali in una specifica banda di frequenze) poste vicini al sito di misura. Oltre a eventuali automobili con il motore acceso, possibili sorgenti di questo tipo possono essere alberi o edifici sollecitati dal vento. In questi ultimi casi, una regola empirica generale è quella di posizionare i sensori a una distanza pari all'altezza dell'albero o dell'edificio più vicino. La loro presenza va comunque annotata. Annotare l'orientamento dei sensori orizzontali secondo le direzioni dello spazio può essere utile in fase di post-processing per la identificazione di eventuali fenomeni di direzionali (es. dovuti alla presenza di sorgenti dominanti) capaci di condizionare la qualità della misura.

La durata della misura dell'ordine dei 20 minuti è solitamente adeguata a garantire un sufficiente campionamento statistico del segnale nell'ambito delle frequenze di maggiore interesse (all'incirca nell'intervallo 0.5-10 Hz). Durate proporzionalmente maggiori (dell'ordine di 60 minuti) sono necessarie in presenza di campi di rumore assai deboli o se si intende studiare il segnale nel campo delle basse frequenze ( $< 0.5$  Hz). Le condizioni meteorologiche, a parte le interazioni dirette sullo strumento (pioggia, ecc.) possono giocare un ruolo importante nella struttura del campo d'onda del rumore. In generale, la presenza di perturbazioni atmosferiche su scala regionale, soprattutto nei bacini marini, può favorire la maggiore energizzazione del campo di rumore soprattutto in bassa frequenza ( $< 0.5$  Hz) e quindi risultare in misure H/V più affidabili.

### ***Determinazione della funzione H/V a partire dalle misure sperimentali***

Esistono vari protocolli di analisi numerica per la determinazione della funzione H/V a partire dalle misure sperimentali. Elemento importante del protocollo prescelto è la possibilità di fornire, oltre al valore del rapporto spettrale medio, anche una stima del relativo intervallo di confidenza. Inoltre deve essere in grado di fornire alcuni diagnostici utili per la verifica delle condizioni di validità della misura. In particolare, deve fornire indicazioni relative alla eventuale presenza di sorgenti "dominanti" remote o fenomeni di deriva strumentale dovute a variazioni di assetto (es. piccoli cedimenti del terreno). Senza entrare nei dettagli delle singole procedure, è utile definire alcuni elementi chiave. Solitamente, il segnale misurato viene preliminarmente segmentato in una serie di finestre temporali di uguale durata (con o senza sovrapposizione). su ciascuna di queste finestre viene stimato lo spettro di ampiezza del segnale nelle tre componenti. In questa fase risulta importante la scelta del sistema di lisciamento (smoothing) adottato per la determinazione dello spettro (forma e dimensioni della finestra di lisciamento). Questa parte della procedura va chiaramente esplicitata in fase di documentazione finale in quanto condiziona fortemente la forma finale della funzione H/V soprattutto nella parte in bassa frequenza. Lo spettro relativo alla componente orizzontale viene ottenuto effettuando la media (solitamente geometrica) delle due componenti spettrali del rumore sul piano orizzontale. la combinazione delle stime ottenute nelle diverse finestre temporali viene poi utilizzata

per costruire la funzione H/V finale e stimare il relativo intervallo di confidenza.

In particolare, la funzione H/V può essere ottenuta in due modi diversi. Nel primo, questa corrisponde alla media dei valori delle funzioni H/V calcolate in ogni finestra temporale, nel secondo, la funzione H/V è calcolata a partire dal rapporto fra gli spettri ottenuti come media di quelli relativi alle singole sorgenti. Anche questa scelta può in alcuni casi modificare significativamente la forma della funzione H/V risultante e va quindi dichiarata esplicitamente nella documentazione.

### La qualità della misura H/V

Nel corso della misura non è possibile sapere se le condizioni necessarie al funzionamento della procedura a fini geognostici (campo d'onde diffuso) si sono realizzate o meno. Oltre alla stima della curva H/V, risulta quindi utile valutare l'eventuale presenza di fenomeni direzionali (eterogeneità del campo di rumore) e la stabilità nel tempo della funzione H/V durante la misura (stazionarietà). In presenza di un campo di rumore diffuso il valore della funzione H/V non deve cambiare nel tempo o al variare della direzione. Al contrario, la presenza di sorgenti dominanti o il cattivo posizionamento dello strumento (basculamento) si manifesta come una variazione direzionale e/o temporale dei rapporti H/V.

Sperimentalmente, l'analisi di qualità della misura può essere effettuata confrontando le ampiezze spettrali medie del rumore misurato lungo le due componenti orizzontali, oppure calcolare diversi valori della funzione H/V di volta in volta proiettando lungo direzioni differenti le ampiezze spettrali ottenute sul piano orizzontale (Figura 3.1-6). La stazionarietà nel tempo, invece, può essere valutata rappresentando in funzione del tempo le funzioni H/V ottenute nelle diverse finestre temporali considerate (Figura 3.1-6). La presenza di marcate eterogeneità azimutali e/o di variazioni temporali nelle caratteristiche del campo misurato (Figura 3.1-7) possono indicare la presenza di fenomeni capaci di invalidare le ipotesi di base della procedura. In questi casi la misura andrebbe ripetuta fino a ottenere condizioni sperimentali ritenute soddisfacenti.

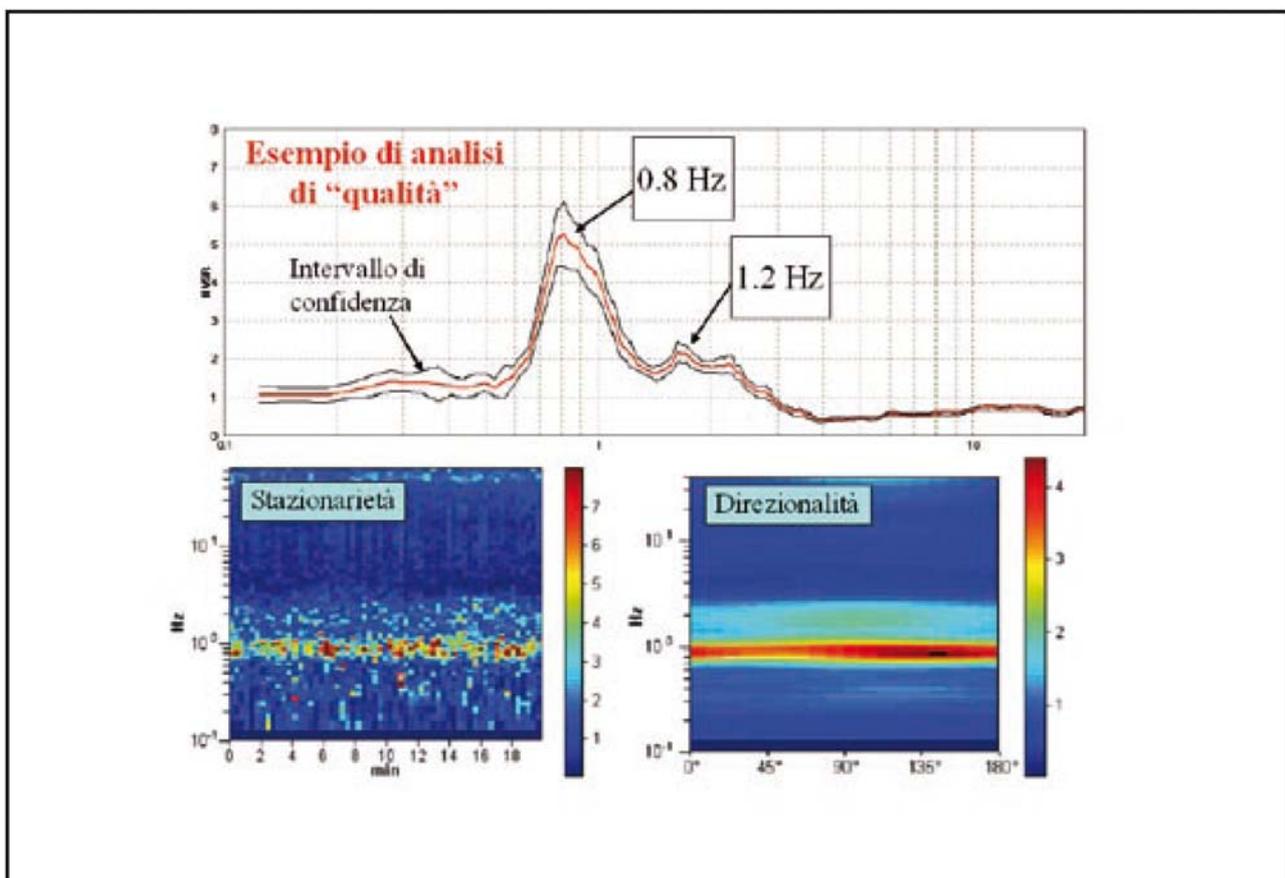


Figura 3.1-6 – Risultati delle analisi di rumore sismico relative a una corretta misura  $H/V$ . In alto sono riportati i valori del rapporto spettrale  $H/V$  in funzione della frequenza con il relativo intervallo di confidenza al 95%. Sono anche indicati i valori delle frequenze corrispondenti ai massimi della funzione  $H/V$ . In basso a sinistra è riportato l'andamento nel tempo (ascissa) dei valori  $H/V$  (colori) in funzione della frequenza (ordinata): il grafico ha lo scopo di valutare la stabilità nel tempo della curva  $H/V$ . In basso a destra sono invece riportati i valori della funzione  $H/V$  (colore) in funzione della frequenza (in ordinata) al variare della direzione del segnale (ascissa): il grafico serve a valutare la direzionalità del segnale registrato.

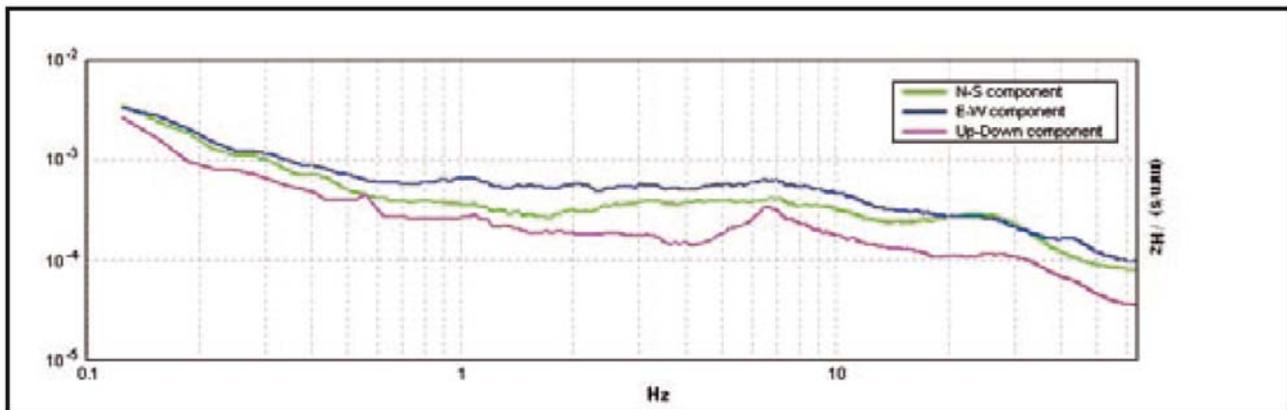


Figura 3.1-7 – Risultati di una non corretta misura  $H/V$ . Si vede come esistano differenze marcate fra gli andamenti dei due spettri relativi al rumore misurato lungo le due componenti orizzontali.

Un altro importante effetto di disturbo è quello associato alla presenza di intense sorgenti di rumore elettromagnetico (apparati radar, motori elettrici, impianti industriali, ecc.). la presenza di queste sorgenti viene messa in evidenza da massimi spettrali molto ben definiti su tutte e tre le componenti del segnale. Un esempio di questo genere di problema è mostrato in Figura 3.1-8. In situazioni di questo tipo, la banda di frequenza interessata dal rumore elettromagnetico non va considerata nella fase di interpretazione del segnale. Un altro aspetto importante riguarda l'affidabilità e la chiarezza del massimo della funzione  $H/V$ . Questo tipo di analisi serve a eliminare massimi apparenti della funzione  $H/V$ , la cui presenza è frutto della cattiva qualità statistica della misura piuttosto che di un genuino fenomeno fisico. Alcuni criteri in proposito sono stati determinati nell'ambito del progetto europeo Sesame. Per esempio, nella pratica corrente, un massimo viene giudicato rappresentativo di possibili effetti di risonanza se la sua ampiezza risulta almeno pari a 2, anche tenendo conto del relativo intervallo di confidenza. In realtà, questi criteri hanno un carattere convenzionale e non possono essere né considerati esaustivi né determinanti. nei casi più ambigui, piuttosto che fidarsi ciecamente di questi criteri è più utile una valutazione diretta della ripetibilità della misura, ripetendola in momenti differenti o in posizioni vicine (entro una decina di metri).

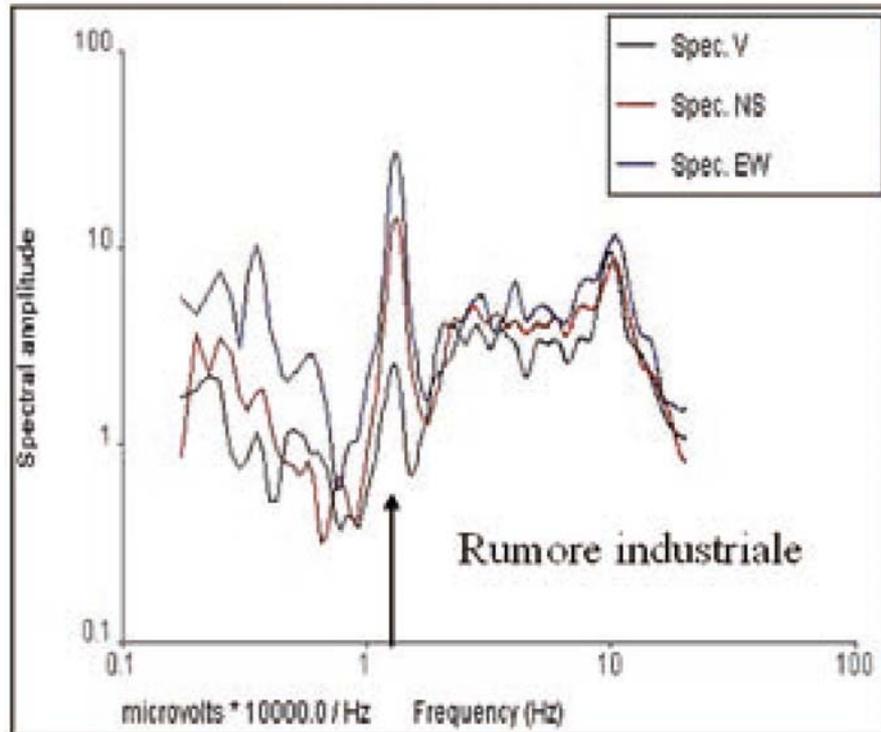


Figura 3.1-8 – Effetto della presenza di rumore elettromagnetico nelle misure di rumore sismico ambientale.

**I criteri SESAME (2004)**

<p><b>Criteri per una curva H/V affidabile</b> [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]</p>	$f_0 > 10 / L_w$ $n_c(f_0) > 200$ $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$
<p><b>Criteri per un picco H/V chiaro</b> [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]</p>	<p>Esiste <math>f^-</math> in <math>[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) &lt; A_0 / 2</math>                  Esiste <math>f^+</math> in <math>[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) &lt; A_0 / 2</math>  <math>A_0 &gt; 2</math>  <math>f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%</math>  <math>\sigma_f &lt; \epsilon(f_0)</math>  <math>\sigma_A(f_0) &lt; \theta(f_0)</math> </p>

$L_w$ $n_w$ $n_c = L_w n_w f_0$ $f$ $f_0$ $\sigma_f$ $\epsilon(f_0)$ $A_0$ $A_{H/V}(f)$ $f^-$ $f^+$ $\sigma_A(f)$ $\sigma_{\log H/V}(f)$ $\theta(f_0)$	lunghezza della finestra numero di finestre usate nell'analisi numero di cicli significativi frequenza attuale frequenza del picco H/V deviazione standard della frequenza del picco H/V valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \epsilon(f_0)$ ampiezza media della curva H/V alla frequenza $f_0$ ampiezza media della curva H/V alla frequenza $f$ frequenza tra $f_0/4$ e $f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ frequenza tra $f_0$ e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ deviazione standard di $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$ valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$
---	--

Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\epsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 $f_0$	0.2 $f_0$	0.15 $f_0$	0.10 $f_0$	0.05 $f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

**Classificazione delle misure H/V**

Obiettivo della classificazione è fornire una indicazione immediata circa la qualità delle singole misure H/V, con lo scopo di aiutare gli operatori nella fase interpretativa e nel confronto con altri dati osservati. Questo tipo di classificazione trova il suo principale impiego nella redazione delle mappe delle indagini relative al livello 1 della microzonazione sismica. I criteri proposti sono più rigidi di quelli di SESAME in quanto includono elementi di giudizio non contemplati in precedenza, quali:

1. durata complessiva della registrazione che deve essere tale da produrre stime "robuste" del campo medio delle vibrazioni ambientali
2. stazionarietà temporale dei rapporti spettrali
3. isotropia del segnale in termini dei rapporti spettrali
4. assenza di rumore elettromagnetico
5. andamento complessivo della curva H/V Si confrontano misure ottenute con spettri lisciati con una finestra triangolare al 5% della frequenza centrale. Valori maggiori dell'ampiezza della finestra di lisciamento possono essere utilizzati per migliorare la leggibilità della curva in fase di interpretazione.

Vengono proposte tre classi di qualità:

Classe A: H/V affidabile e interpretabile: può essere utilizzata anche da sola

1. La forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura (stazionarietà)
2. Le variazioni azimuthali di ampiezza non superano il 30% del massimo (isotropia)
3. Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse (assenza di disturbi)
4. I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale (plausibilità fisica)
5. I criteri di SESAME per una curva H/V attendibile (primi 3 criteri) sono verificati (robustezza statistica)
6. la misura è durata almeno 15/20 minuti (durata)

ECCEZIONE: misure effettuate su roccia integra affiorante o in zone alluvionali fini con basamento sismico molto profondo (tipicamente > 1 km) possono non mostrare alcun picco statisticamente significativo della curva H/V nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico, a causa dell'assenza di contrasti di impedenza sufficientemente marcati. In questi casi, in cui la curva H/V apparirà piatta e con ampiezza circa pari a 1, il criterio 5 risulterà non verificato anche se la misura è di fatto attendibile. In questo solo caso la misura può ricadere nella classe A ma si consiglia di ripetere la misura per confermare l'effettiva assenza di massimi significativi.

Classe B: curva H/V sospetta (da "interpretare"): va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze

1. Almeno una delle condizioni della classe A non è soddisfatta, a condizione che non si rientri nell'ECCEZIONE citata per la Classe A

Classe C: curva H/V scadente e di difficile interpretazione: non va utilizzata

1. Misura di tipo B nella quale la curva H/V mostra una ampiezza crescente al diminuire della frequenza (deriva), indice di un movimento dello strumento durante la misura
2. misura di tipo B nella quale si evidenzia la presenza di rumore elettromagnetico nell'intervallo di frequenze di potenziale interesse

I criteri delineati sopra non riguardano l'interpretazione in chiave geologico-stratigrafica della curva, per la quale sono richiesti ulteriori criteri (per esempio i criteri SESAME per la "chiarezza" del picco).

Per le sole Classi A e B si possono pertanto definire due sottoclassi delle classi precedenti, ossia: Tipo 1. Presenta almeno un picco "chiaro" secondo i criteri di SESAME: possibile risonanza

Tipo 2. Non presenta picchi "chiaro" nell'intervallo di frequenze di interesse: assenza di risonanza

## 6) PROSPEZIONI RE.MI. (REFRACTION MICROTREMORS) - (da *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana – 2010 – Franceschini A.*)

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 e si basa sull'analisi delle onde di superficie ed in particolare delle onde di Rayleigh. Si basa su due concetti fondamentali; il primo è che una comune attrezzatura adatta ad effettuare sismica a rifrazione può campionare onde di superficie con frequenza anche inferiore ai 2 Hz e il secondo che una trasformata bidimensionale slowness-frequenza (p-f) consente di individuare e separare le onde di Rayleigh da altri tipi di onde e consentire quindi la determinazione della loro velocità di fase.

Di queste onde (Rayleigh), che hanno carattere dispersivo, viene analizzata la velocità di propagazione lungo stendimenti sismici e valutata la relativa lunghezza d'onda e slowness (o inverso di velocità).

Il loro carattere dispersivo determina il fatto che le onde con maggiore frequenza attraversano i livelli di terreno più superficiali mentre quelle con frequenza inferiore attraversano i livelli inferiori e ciò consente di determinare un profilo di velocità 1-D che mostra l'andamento delle velocità  $V_s$  con la profondità.

L'analisi dei microtremori viene effettuata utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione (a geofono singolo) disposta sul terreno con array lineare, da 12 a 48 geofoni; per ottenere una buona risoluzione in termini di frequenza, oltre ad utilizzare geofoni con bassa frequenza di risonanza (4 -14 Hz raccomandati), è indispensabile allungare il tempo di registrazione (15 – 30 s) rispetto alla sismica a rifrazione tradizionale.

L'uso di un sismografo digitale con elevata dinamica consente di dimezzare la frequenza utile campionabile rispetto a quella nominale dei geofoni impiegati. Si possono così registrare onde di superficie il cui contenuto in frequenza copre un range da 25 – 30 Hz fino a 2 Hz che, in condizioni ottimali, offre una dettagliata ricostruzione dell'andamento delle  $V_s$  relativamente ai primi cento metri di profondità. L'elaborazione del segnale consiste nell'operare una trasformata bidimensionale slowness-frequenza (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.2.13).

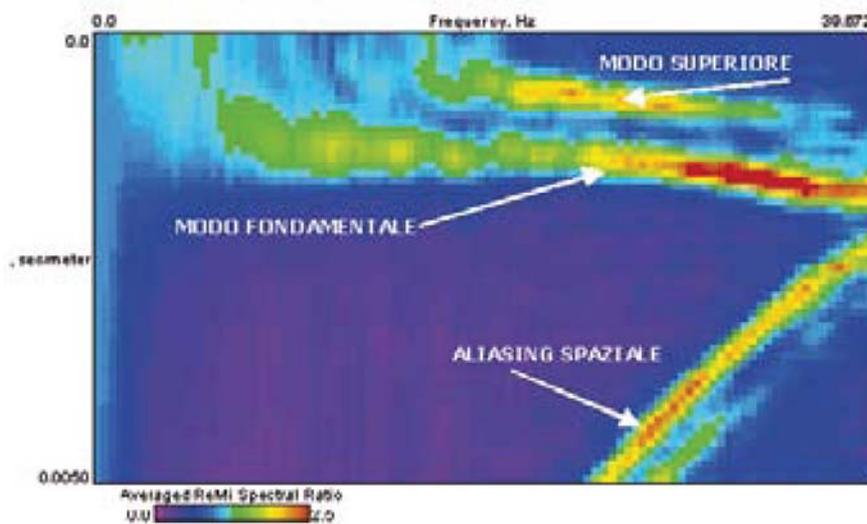


Fig. 2.13 → Esempio di spettro di potenza p-f.

Nell'immagine di figura 2.13 risaltano gli andamenti che possiedono sia una spiccata coerenza di fase sia una potenza significativa, ed è possibile un riconoscimento visivo delle onde di Rayleigh, che avendo carattere dispersivo mostrano un caratteristico andamento (slope), distinguibile da quelli riconducibili ad altri modi e tipi di onde (onde di Rayleigh di ordine superiore, onde di pressione, suono e rumore incoerente).

Picking. A questo punto l'operatore, in maniera arbitraria ed in base all'esperienza, esegue un picking attribuendo ad un certo numero di punti una o più slowness (p o 1/velocità di fase) per alcune frequenze. La

scelta del picking è condizionata da alcune regole che possono essere riassunte nei seguenti punti:

- è consigliabile selezionare esclusivamente le situazioni contraddistinte da una buona definizione dello spettro di potenza, e cioè quello che è contraddistinto da elevata coerenza e intensità di segnale;
- a parità di frequenza la velocità scelta non deve essere quella coincidente con il picco massimo di intensità del segnale, come accade nel MASW dove la sorgente energetica è in linea con lo stendimento, bensì quella più bassa prossima al confine tra incoerenza propria del rumore e segnale; questo accorgimento è motivato dal fatto che i microtremori, per definizione, non provengono da un'unica sorgente definita e fissa e che l'energia del rumore che attraversa obliquamente lo stendimento appare nell'immagine p-f con una velocità apparente ( $V_a$ ) più elevata di quella reale ( $V_r$ ) osservabile in linea. Supponendo che l'energia dei microtremori provenga da tutte le direzioni in maniera uguale, più del 40% presenterà una  $V_a$  di poco inferiore a 125%  $V_r$  e sarà inglobata nel picco massimo di intensità, mentre l'energia restante copre progressivamente l'intervallo tra  $V_a$  e  $V_r$  fino a che non viene raggiunta l'eguaglianza lungo l'inviluppo che delimita velocità inferiori situato tra la zona a massima potenza ed il rumore. Inoltre 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. Per minimizzare l'errore è auspicabile associare alla prova in array monodimensionale una misura di rumore a stazione singola per determinare la direzione prevalente del rumore, al fine di porre lo stendimento in direzione parallela ad essa.
- È buona norma evitare le inversioni di velocità di fase, a meno che non siano palesi, per intervalli di frequenza relativamente elevati: gli ordini superiori (modi) delle onde di Rayleigh possono presentare un'intensità dello spettro paragonabile a quella del modo primario e indurre in errore sovrastimando la velocità degli orizzonti più superficiali (Fig.2.13)

Modellazione delle onde di taglio

Tali valori vengono in seguito plottati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello diretto, che è modificabile dall'interprete, variando il numero di strati, la loro velocità e la densità la curva di dispersione 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 il peso che deriva dall'abilità e dall'esperienza del geofisico. I profili di  $V_s$  ricavati con questa metodologia non presentano una soluzione univoca e cioè più di un modello può fornire curve di dispersione simili tra loro e con il medesimo RMS (Fig. 2.14).

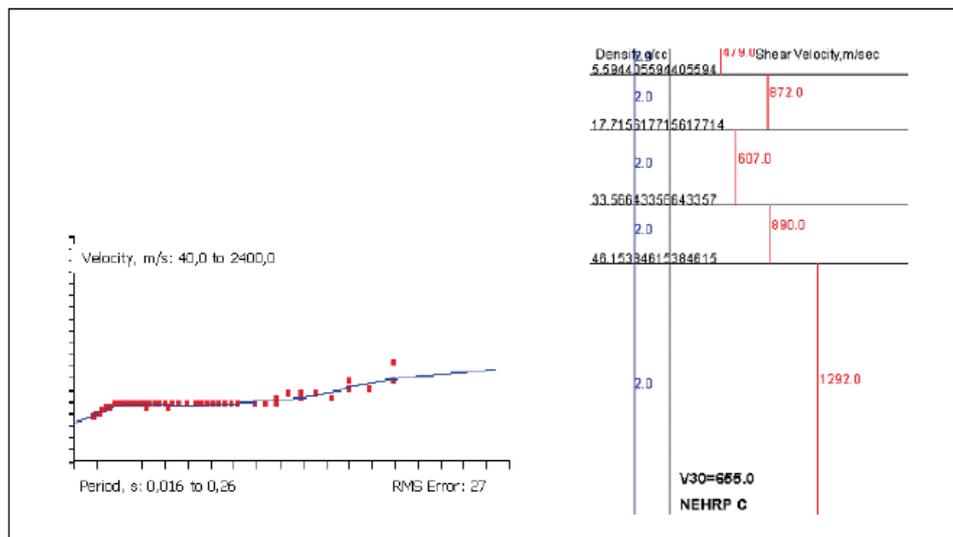


Fig. 2.14 → Modellizzazione diretta interattiva: curva di dispersione calcolata (blu) e picking (puntinato rosso) a sinistra e modello del profilo  $V_s$ /profondità a destra.

**7) PROVE ESAC (ANTENNA SISMICA)** (da: *Caratterizzazione sismica esplorativa dei territori di Anghiari, Sansepolcro e Pieve Santo Stefano – Università di Siena - Albarello D. – 2005*)

Si tratta di una procedura sperimentale per la determinazione del profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo a partire da misure di vibrazioni ambientali condotte con gruppi di sensori sismici distribuiti alla superficie del volume crostale da indagare (antenna sismica o seismic array). In particolare, la procedura è finalizzata alla determinazione delle velocità di propagazione delle onde superficiali presenti nel campo delle vibrazioni ambientali alle varie frequenze di vibrazione (“curve di dispersione”). Questa informazione verrà poi utilizzata all’interno di una procedura di inversione per dedurre il profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo nell’ipotesi che questo sia costituito da una pila di strati orizzontali sovrapposti ed omogenei al loro interno.

È importante pertanto distinguere fra la procedura ESAC in senso stretto, ovvero la parte della procedura finalizzata alla determinazione delle curve di dispersione rappresentative delle modalità di propagazione delle onde superficiali nell’area di interesse, dalle procedure di inversione per dedurre il profilo di velocità. Queste ultime, infatti, sono comuni ad altre procedure indirette per la stima del profilo di velocità delle onde S a partire dalle velocità di propagazione delle onde Superficiali siano queste generate artificialmente (tecnica SASW ovvero Surface Waves Spectral Analysis o tecnica MASW ovvero Multichannel Analysis of Surface Waves) o già presenti nel campo di rumore (p.es., Re.Mi. ovvero Refraction Microtremor).

Il metodo ESAC (Extended Spectral AutoCorrelation method) è frutto di una idea sviluppata inizialmente da Aki (1957). Secondo Aki, il campo d’onda delle vibrazioni ambientali possa essere rappresentato come la com-binazione lineare di onde piane di diverse frequenze e con fase ed ampiezza casuale che si muovono sul piano orizzontale e che provengono da direzioni differenti. Aki dimostrò che, sebbene ogni serie temporale dedotta dalla registrazione di questo campo d’onde in un punto abbia un carattere stocastico, due registrazioni effettuate in punti diversi mostrino delle “somiglianze” (in senso statistico) e che da queste sia possibile dedurre informazioni sulle velocità di fase delle diverse onde misurate nelle due posizioni. Queste “somiglianze” sono rivelate dall’andamento della funzione di correlazione  $\phi_{ij}(v)$  definita dalla relazione:

$$\phi_{ij}(v) = \frac{\int_0^T u_i(v,t) u_j(v,t) dt}{\sqrt{\left[ \int_0^T u_i^2(v,t) dt \right] \left[ \int_0^T u_j^2(v,t) dt \right]}}$$

dove  $u_i(v,t)$  è l’ampiezza della vibrazione ambientale misurata nel punto  $i$ -mo alla frequenza  $v$  nell’istante  $t$  e  $T$  è la durata della registrazione. Dato che la stima della correlazione fra le due serie di registrazioni è effettuata senza tenere conto di alcuno sfasamento temporale, la funzione  $\phi$  è detta di autocorrelazione. Aki dimostrò che sotto condizioni molto generali (in particolare che le onde siano tutte fra loro indipendenti e che le direzioni di provenienza siano distribuite con probabilità uniforme attorno ai due sensori) la funzione di autocorrelazione relativa alla componente verticale delle vibrazioni misurate in due posizioni dipende sola dalla loro distanza relativa  $r_{ij}$  e può essere espressa nella forma

$$\phi_{ij}(v, r_{ij}) = J_0 \left( \frac{2\pi v}{c(v)} r_{ij} \right)$$

[2] dove  $c(v)$  è la velocità di fase delle onde piane che hanno investito i due sensori alla frequenza di vibrazione  $v$  e  $J_0$  è la funzione  $\phi_0$  Bessel di ordine zero. Dato che questa funzione ha una forma nota, la relazione [2] può essere utilizzata per risalire dalla funzione di autocorrelazione  $\phi$  alle velocità di fase  $c$ , una volta nota la distanza  $r$  fra i sensori. L’elemento di base della procedura è quindi il calcolo della funzione di autocorrelazione  $\phi(v, \Delta r)$ . Nella sua forma originale, questa richiedeva il filtraggio “passa banda” delle registrazioni attorno alla frequenza  $v$  e il calcolo numerico degli integrali [1] a partire dalle serie filtrate. In modo assai più efficiente, la funzione di autocorrelazione alle diverse frequenze può essere stimata dagli spettri di ampiezza (o velocità) dei segnali registrati ai due sensori posti alla distanza relativa  $r_{ij}$ . Infatti si

dimostra (p.es., B ath, 1974) l'esistenza di una corrispondenza diretta fra la funzione di correlazione [1] e gli spettri complessi  $f_i(v)$  ed  $f_j(v)$  dei segnali registrati alle posizioni i-ma e j-ma. Si ha, infatti che

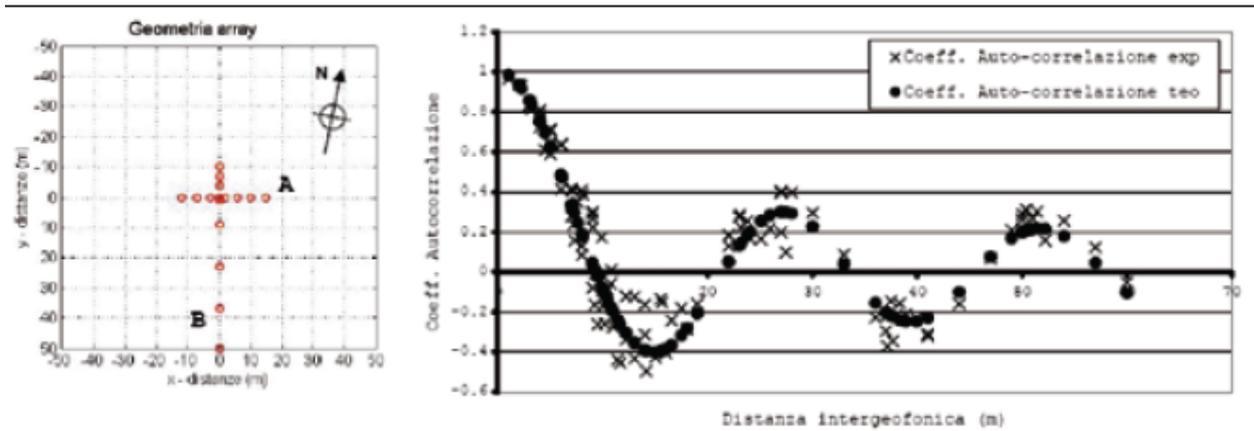
$$\phi_{ij}(v) = \frac{\text{Re}[F_i(v)F_j^*(v)]}{\sqrt{[F_i(v)F_i^*(v)][F_j(v)F_j^*(v)]}}$$

dove l'asterisco indica il complesso coniugato e Re indica la parte reale. In pratica, la formulazione [3] mette in evidenza che la funzione di autocorrelazione, in quanto espressione del cosiddetto cross-spettro (al numeratore della [3])   proporzionale alle differenze di fase fra i segnali registrati nelle due posizioni. Quindi, come peraltro atteso, l'informazione di base utilizzata per la stima della velocit  di fase   (indirettamente tramite la funzione di autocorrelazione  $\phi$ ) la misura dello sfasamento medio osservato fra le registrazioni nelle due posizioni i-ma e j-ma. La risoluzione del metodo in termini di precisione nella determinazione della velocit   $c(v)$ , sar  tanto maggiore quanto maggiore sar  la sua capacit  di risolvere le differenze di fase fra le registrazioni.

Si dimostra (Zhang et al., 2004) che l'incertezza la precisione  $\delta c$  con cui   possibile definire la velocit  di fase  $c$  a partire dalla [2]  

$$\delta c \approx \frac{1}{\tau} \frac{c^2}{\Delta r}$$

dove  $\tau$    la frequenza di campionamento del segnale nelle due posizioni che distano fra loro di  $\Delta r$ . In pratica, per garantire una buona accuratezza delle misure per un certo intervallo di velocit ,   necessario, a parit  di modalit  di campionamento, scegliere una opportuna distanza fra i sensori. Maggiore   la velocit  attesa, maggiore sar  la distanza tra i sensori necessaria a determinarla. La relazione [3] pu  essere utilizzata in due modi. Nel primo (metodo SPAC), si dispongono di pi  sensori in varie direzioni ad una distanza  $\Delta r$  da un sensore centrale. L'uso di pi  sensori posti alla stessa distanza per-mette di effettuare diverse stime della stessa funzione di autocorrelazione. La media di queste ultime viene poi utilizzata nella [2]. Il principale problema della procedura SPAC   la necessit  di condurre misure di rumore variando le distanza  $\Delta r$  (e quindi spostando i sensori) allo scopo di ottenere misure soddisfacenti per le diverse possibili velocit  di fase (eq. [2]). Nel secondo metodo (ESAC), i sensori vengono distribuiti sul terreno a varie distanze gli uni dagli altri in con-figurazioni pi  o meno ordinate (p.es., Ohori et al., 2002). Per una data frequenza, vengono calcolate le diverse funzioni di autocorrelazione per tutte le distanze relative alle diverse coppie di sensori. La velocit  di fase, in questo caso, viene determinata utilizzando la [2] in modo da riprodurre al meglio l'andamento osservato della funzione di correlazione in funzione della distanza  $\Delta r$  (Fig. 2.2). La ricerca della velocit  ottimale ad ogni frequenza viene effettuata mediante una ricerca griglia (Parolai et al., 2006). Il metodo ESAC richiede quindi la misura sincronizzata di un numero relativamente elevato di sensori (16 o pi ) che per  devono essere dislocati sul terreno una sola volta. Questo metodo risulta quindi di pi  agevole applicazione rispetto allo SPAC, quando si dispone di strumentazione multicanale e quando le distanze massime coperte sono dell'ordine del centinaio di metri al massimo. La procedura SPAC risulta invece efficace quando, per l'entit  delle distanze di interesse,   necessario ricorrere a misure condotte su strumenti separati (sismografi). Queste distanze sono funzione della lunghezza d'onda  $\lambda=c(v)/v$  da utilizzare che a sua volta dipende dalle profondit  di esplorazione richie-ste. In generale, si ha che le lunghezze d'onda massime esplorabili sono dell'ordine di  $2\Delta r$  cui corrispondono profondit  di esplorazione dell'ordine di  $\Delta r$ .



L'esito finale di questo tipo di misura è una curva che rappresenta l'andamento delle velocità di fase c in funzione della frequenza di vibrazione v. Se si assume che il campo d'onde delle vibrazioni ambientali sia dominato dalle onde superficiali, la curva c(v) dedotta da misure della componente verticale del moto del suolo, corrisponde alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh relative al moto fondamentale. In presenza di modi di vibrazione differenti, la relazione [2] va modificata nella forma:

$$\phi_v(v, r_{ij}) = \sum_{n=1}^M \frac{P_n(v)}{P(v)} J_0\left(\frac{2\pi v}{c_n(v)} r_{ij}\right)$$

[5] c<sub>n</sub>(v) è la velocità di fase del modo n-mo che alla frequenza v ha una potenza spettrale P<sub>n</sub>(v) e P(v) è la potenza spettrale complessiva alla stessa frequenza. A partire dalla [5] è possibile definire una velocità di fase "effettiva" come la velocità di fase equivalente ad un'onda piana che si propaga lungo la direzione che congiunge i due sensori posti nelle posizioni i-ma e j-ma (Arai e Tokimatsu, 2004). In quest'ultimo caso, infatti, la [2] assume la semplice forma:

$$\phi_v(v, r_{ij}) = \cos\left(\frac{2\pi v}{c(v)} r_{ij}\right)$$

Uguagliando la [5] e la [6] è possibile ricavare una velocità "effettiva" c<sub>e</sub>(v), dalla relazione:

$$c_e(v, r_{ij}) = \frac{2\pi v r_{ij}}{\cos^{-1}\left[\sum_{n=1}^M \frac{P_n(v)}{P(v)} J_0\left(\frac{2\pi v}{c_n(v)} r_{ij}\right)\right]}$$

che rappresenta una sorta di media delle velocità di propagazione associate ai diversi modi di vibrazione, pesate in modo proporzionale alle relative potenze spettrali. Questo implica che il metodo ESAC permette la determinazione della velocità di fase effettiva delle onde di Rayleigh che coincide con la velocità di fase del modo fondamentale solo se i modi superiori hanno potenze trascurabili alle frequenze di interesse.

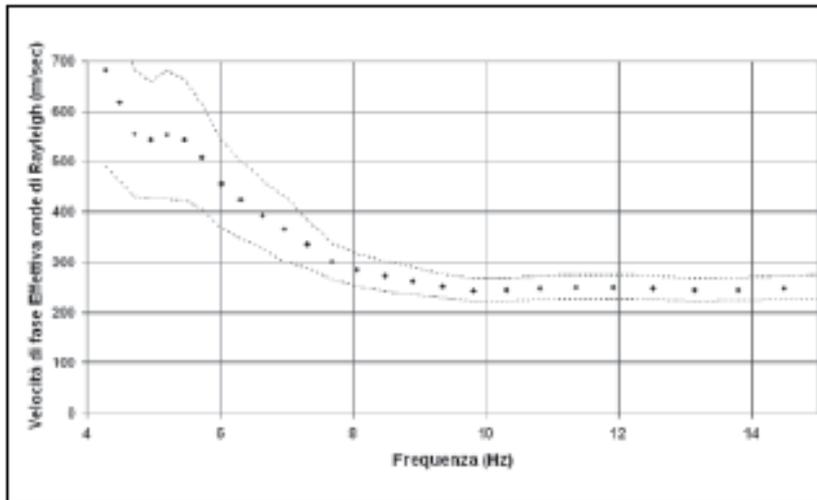


Fig. 2.3 → Velocità di fase Effettiva dedotta con la metodologia ESAC. I punti indicano i valori stimati mentre le curve tratteggiate rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% per queste stime DOVE

Un codice di calcolo per la determinazione della curva di dispersione effettiva con il metodo ESAC a partire da misure di rumore condotte su un insieme di sensori verticali (array) può essere scaricata liberamente dal sito WEB "<http://nato.gfz.hr>" (Fig. 2.3). La curva di dispersione effettiva ottenuta dalla procedura ESAC può quindi essere invertita per la stima del profilo di velocità delle onde S. Come si è detto, queste procedure non si differenziano da quelle richieste per la determinazione del profilo di velocità delle onde S dalle misure di onde di superficie (SASW, MASW, Re.Mi.). L'unica differenza riguarda la procedura necessaria alla modellazione diretta della curva dispersione. Infatti, nel caso di tecniche attive è necessario calcolare le curve modali, mentre nel caso dell'ESAC è necessario determinare la curva effettiva corrispondente. Una procedura utile in quest'ultimo caso è stata per esempio sviluppata da Arai e Tokimatsu (2004) e generalizzata da Lunedei e Albarello (2009). L'uso della curva effettiva invece di quella modale può risultare meno vincolante per il profilo di velocità in quanto non distingue fra le diverse modalità di propagazione. Tuttavia fornisce risultati più robusti in quanto meno sensibili a possibili errori di interpretazione spesso presenti nella attribuzione delle velocità di fase ai vari modi di propagazione (p.es., Zhang e Chan, 2003). Non esistono invece differenze sostanziali per quanto riguarda la procedura di inversione vera e propria, ovvero il metodo per l'adattamento della curva teorica a quella osservata variando opportunamente il profilo di velocità del sottosuolo. A questo scopo sono stati proposti varie procedure più o meno generali (p.es., Xia et al., 1999; Arai e Tokimatsu, 2005; Parolai et al., 2005, 2006; Picozzi e Albarello, 2007) che sono utilizzate anche nell'ambito delle più comuni analisi MASW e SASW.

## 8) OSSERVAZIONI SULL'ATTENDIBILITÀ DELLE PROVE BASATE SULLA PROPAGAZIONE DELLE ONDE SUPERFICIALI (da *Ingegneria Sismica* n° 2 – 2011)

Le prove basate su onde di superficie (SWM) vengono indicate con una varietà di acronimi (SASW, MASW, SSRM, CSW, ReMi, ESAC, SPAC, etc.) associati alle specifiche modalità di prova e di elaborazione dei segnali con cui viene ricavata la curva di dispersione della velocità delle onde R, a partire da dati sperimentali di sismica attiva o passiva. Il principio di base è comunque comune a tutte le tecniche, e soprattutto risulta molto significativo il peso dell'approccio utilizzato per la soluzione del problema inverso, che consente una stima del profilo medio di VS a partire dalla curva di dispersione sperimentale. Proprio in virtù delle variegate modalità di acquisizione ed elaborazione, risulta difficile stabilire degli standard di esecuzione; tuttavia è possibile fissare alcuni punti chiave per un controllo di qualità (Foti, 2008):

- il dato sperimentale deve essere acquisito con strumentazione adeguata in relazione agli obiettivi della campagna di indagine. In particolare, ove necessario, dovrebbero essere utilizzati sensori a frequenza naturale inferiore a 5 Hz;
- le dimensioni degli stendimenti di misura devono essere adeguate in relazione alle profondità di indagine, obiettivo della campagna di caratterizzazione. In prima approssimazione, nelle prove attive la distanza massima tra i ricevitori deve essere pari circa al doppio della profondità d'indagine desiderata; per le prove passive, la profondità d'indagine è al massimo circa il doppio della massima apertura della rete di ricevitori;
- nelle prove attive, l'esecuzione in più direzioni o in versi opposti lungo lo stesso allineamento (ossia con sorgente posizionata ai due estremi opposti) può consentire una verifica sommaria dell'ipotesi di conformazione del sottosuolo a strati piani e paralleli sulla base del confronto tra le diverse curve di dispersione ottenute; quando tale verifica non è soddisfatta, i dati hanno una significatività limitata e potrebbero richiedere delle correzioni;
- la valutazione delle curve di dispersione deve essere fatta con una qualche cautela, per evitare errori provocati dall'eventuale presenza di modi di vibrazione superiori al primo;
- la corrispondenza tra curva di dispersione sperimentale e curva di dispersione numerica relativa all'ultima iterazione del processo di inversione, minimizzando gli scarti, deve essere adeguata per tutto il campo di frequenza per il quale sono disponibili informazioni sperimentali;
- le profondità di indagine devono essere congruenti con l'informazione sperimentale effettivamente disponibile. In particolare, la massima profondità di indagine è circa pari alla metà della massima lunghezza d'onda disponibile ( $\lambda_{\max}=VR/f_{\min}$ ), mentre non è possibile differenziare strati superficiali per profondità minore di circa la metà della minima lunghezza d'onda disponibile ( $\lambda_{\min}=VR/f_{\max}$ );
- trattandosi di un problema inverso, la parametrizzazione del modello di riferimento deve essere adeguata rispetto all'informazione effettivamente disponibile. In particolare è necessario tenere presente che la risoluzione è necessariamente maggiore in prossimità della superficie, mentre diminuisce in profondità. Per tutte le prove geofisiche di superficie, è necessario tenere conto dei problemi di non unicità della soluzione.

È quindi opportuna una valutazione esplicita delle conseguenze dei problemi di equivalenza.

Nelle prove basate sulla propagazione delle onde superficiali, i problemi di equivalenza (non-unicità della soluzione) comportano incertezze sui singoli parametri di modello (es. spessore e velocità del singolo strato, posizione di interfacce) mentre l'incertezza è minore su parametri integrali (ad es.  $V_{S30}$ , Fig. 2). L'incertezza legata ai problemi di non unicità della soluzione può essere mitigata con l'integrazione delle informazioni relative alle diverse prove (es. inversioni congiunte con sismica a rifrazione, rapporti spettrali H/V, tomografie elettriche ERT) ed un utilizzo delle informazioni a priori quali ad esempio stratigrafie dai fori di sondaggio. In relazione agli specifici metodi, vengono riportate alcune considerazioni: SASW (metodo a 2 stazioni): poco utilizzato in Italia, necessita di particolare attenzione per problemi di unwrapping della fase nell'elaborazione; ReMi: problemi di potenziale sovrastima (per problemi di orientamento sorgente) e scarsa oggettività del picking che viene effettuato manualmente e può essere condizionato dalla sensibilità dell'operatore, anche a causa delle precedentemente citate incertezze di presenza di modi superiori al primo. È altamente consigliabile l'uso congiunto con prove attive (MASW) anche in considerazione dell'onere molto limitato dell'acquisizione congiunta. Poiché il setup di prova è lo stesso, è sufficiente l'energizzazione anche con

sorgenti di potenza modesta per ottenere informazioni aggiuntive che possono estendere l'intervallo di frequenze utili e fornire una validazione sul tratto comune.

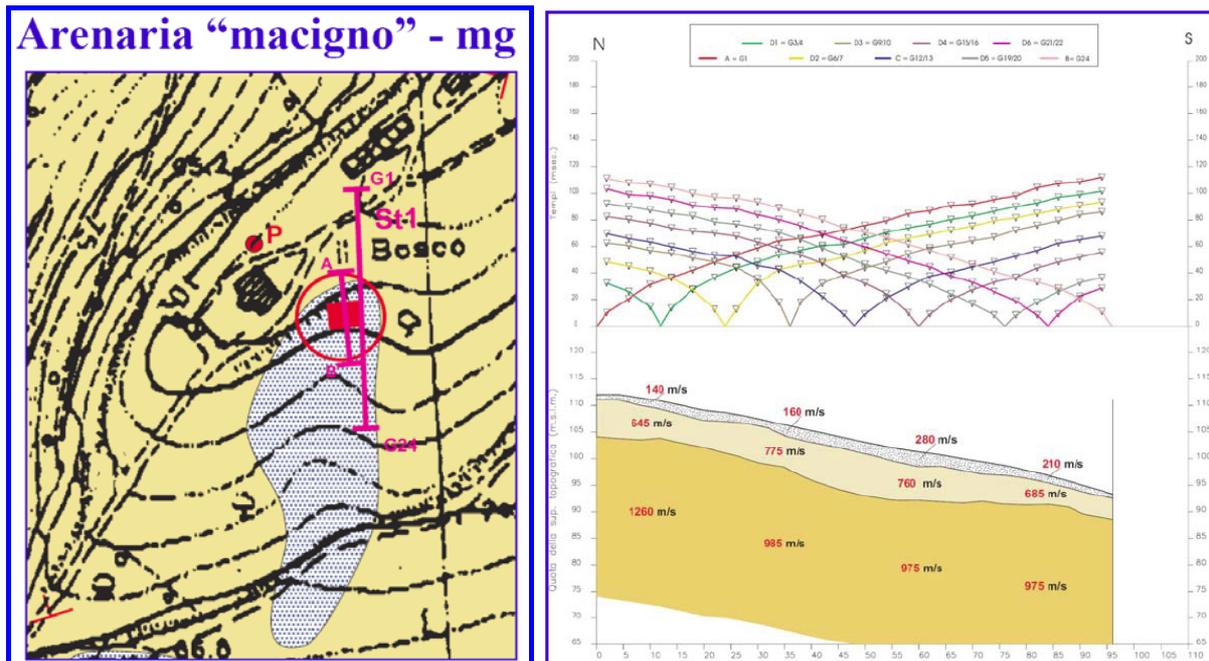


## PARTE IV: ESEMPI APPLICATIVI

I CASI CERTI**Esempio 1: Categoria di sottosuolo A**

Caso di intervento edilizio di Classe II secondo NTC 2008 con vita di riferimento  $V_r = 50$  anni, su **versante costituito da arenaria "macigno"** con debole copertura detritica.

Per la definizione dell'assetto sismostratigrafico e della "categoria di sottosuolo" è stata ritenuta ottimale una prospezione sismica a rifrazione con onde P ed Sh a 24 geofoni con interasse  $i = 4$  m (lunghezza ml 96).



Prospezione sismica a rifrazione (onde Sh)

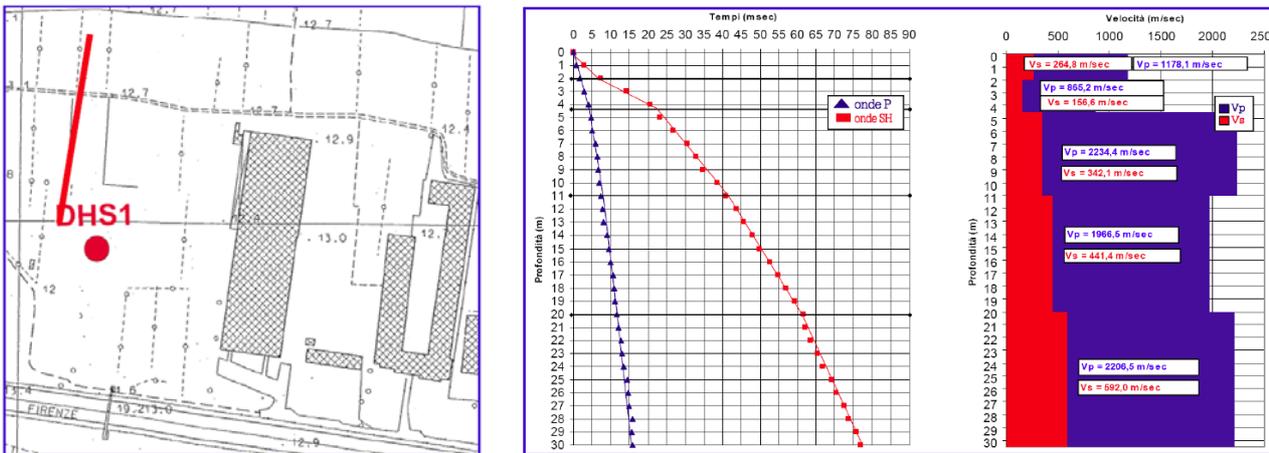
Lo spessore della copertura, anche attraverso indagini dirette (prove penetrometriche, saggi con escavatore) è stato accertato inferiore a 3 m. La velocità del substrato arenaceo (in questo caso substrato geologico e sismico) cresce rapidamente da 650÷750 m/sec a 975÷1260: ne consegue una Categoria di sottosuolo A, senza necessità di calcolare la  $V_{s30}$ :

**Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  superiori a 800 m/sec, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.

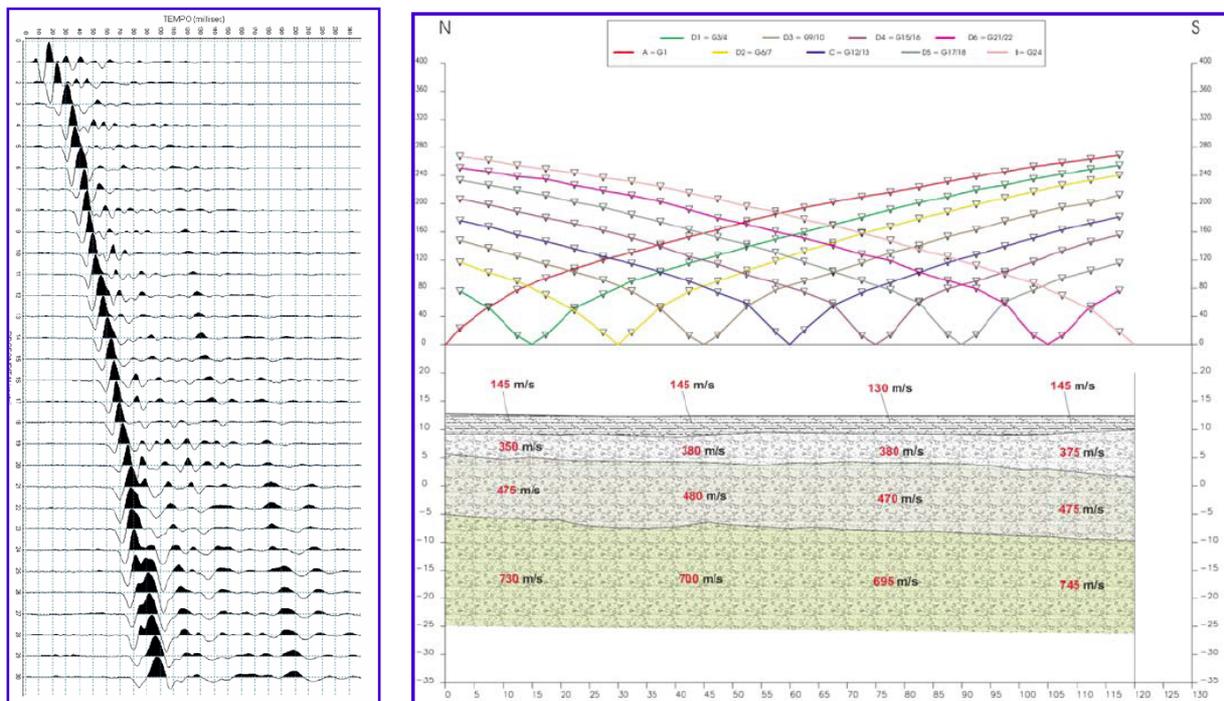
**Esempio 2: Categoria di sottosuolo B**

Caso di fabbricato industriale di Classe II secondo NTC 2008 con vita di riferimento  $V_r = 50$  anni ubicato su **pianura alluvionale** caratterizzata da alluvioni recenti per spessori di 30÷50 m sovrastanti depositi di origine fluviolacustre. Il bedrock geologico e sismico si trova a profondità superiori ai 150÷200 m.

Per la definizione dell'assetto sismostratigrafico e della "categoria di sottosuolo" è stata ritenuta ottimale, in relazione all'importanza dell'intervento ed alla natura del sottosuolo, una prospezione sismica in foro tipo downhole (DHS1) (peraltro obbligatoria in forza della Legge Regionale Toscana) integrata da una prospezione sismica a rifrazione con onde P ed Sh a 24 geofoni con interasse  $i = 5$  m (lunghezza ml 120) al fine di estendere il dato monodimensionale della DH all'insieme dei terreni interessati dalla costruzione.



Prospezione downhole



DH: Regrazioni onde Sh

Prospezione sismica a rifrazione (onde Sh)

La  $V_{s30}$  ricavata dalla sismica a rifrazione (per incastro  $D = 2.0$  m della fondazione) risulta  $V_{s30} = 430\div450$  m/sec, quella ricavata dalla prospezione downhole risulta  $V_{s30} = 390$  m/sec. Si riscontra quindi una buona

corrispondenza tra i due metodi, in assenza di significative inversioni di velocità negli strati alluvionali.

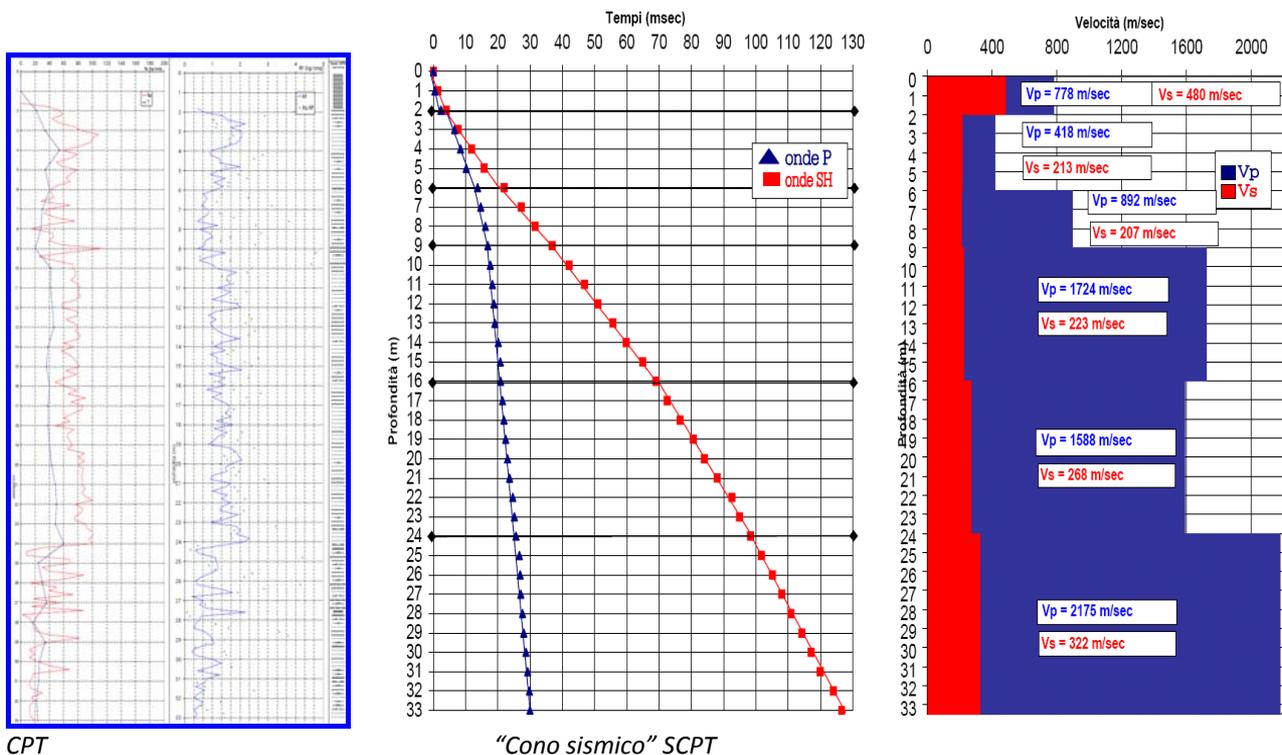
La categoria di sottosuolo, verificata l'assenza di inversioni di velocità ed il graduale miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni con la profondità, è certamente la **Categoria B**:

***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  $V_{s30}$  compresi tra 360 m/sec e 800 m/sec (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{spt30} > 50$  nei terreni a grana grossa e  $c_{u30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).***

**Esempio 3: Categoria di sottosuolo C**

Caso di fabbricato civile (parcheeggio multipiano fuori terra) di Classe II secondo NTC 2008 con vita di riferimento  $V_r = 50$  anni ubicato su **pianura costiera costituita da depositi prevalentemente sabbiosi** di grande spessore: il bedrock geologico e sismico si trova a profondità superiori ai 1500÷2000 m.

Per la definizione dell'assetto sismostratigrafico e della "categoria di sottosuolo" è stata ritenuta ottimale, in relazione all'importanza dell'intervento ed alla natura sabbiosa del sottosuolo, una prospezione sismica in foro di prova penetrometrica tipo downhole (SCPT).



CPT

"Cono sismico" SCPT

La  $V_{s30}$  ricavata dalla prospezione downhole SCPT, per profondità di appoggio della fondazione a platea  $D = 1.0$  m, risulta  $V_{s30} = 254$  m/sec.

La categoria di sottosuolo, verificata l'assenza di inversioni di velocità ed il graduale miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni con la profondità, è certamente la **Categoria C**:

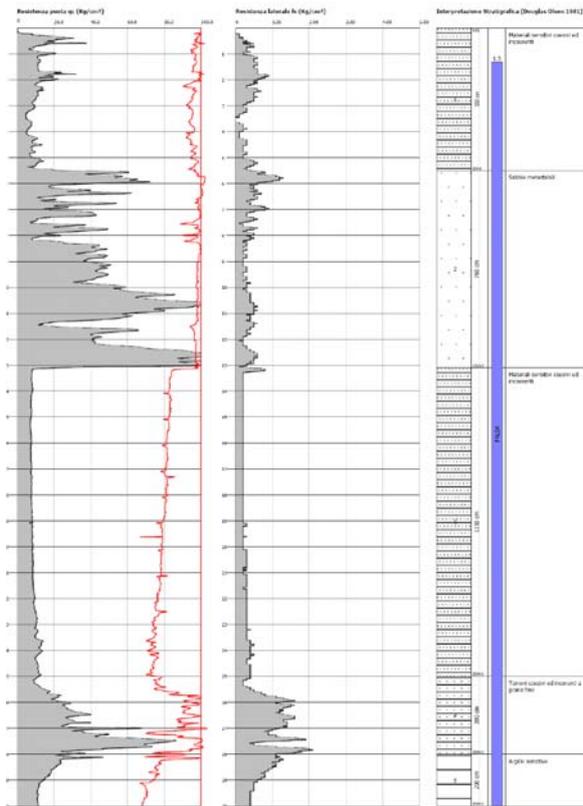
**Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati, o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 m/sec e 360 m/sec ( $15 < N_{spt30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < cu_{30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).**

**Esempio 4: Categoria di sottosuolo D**

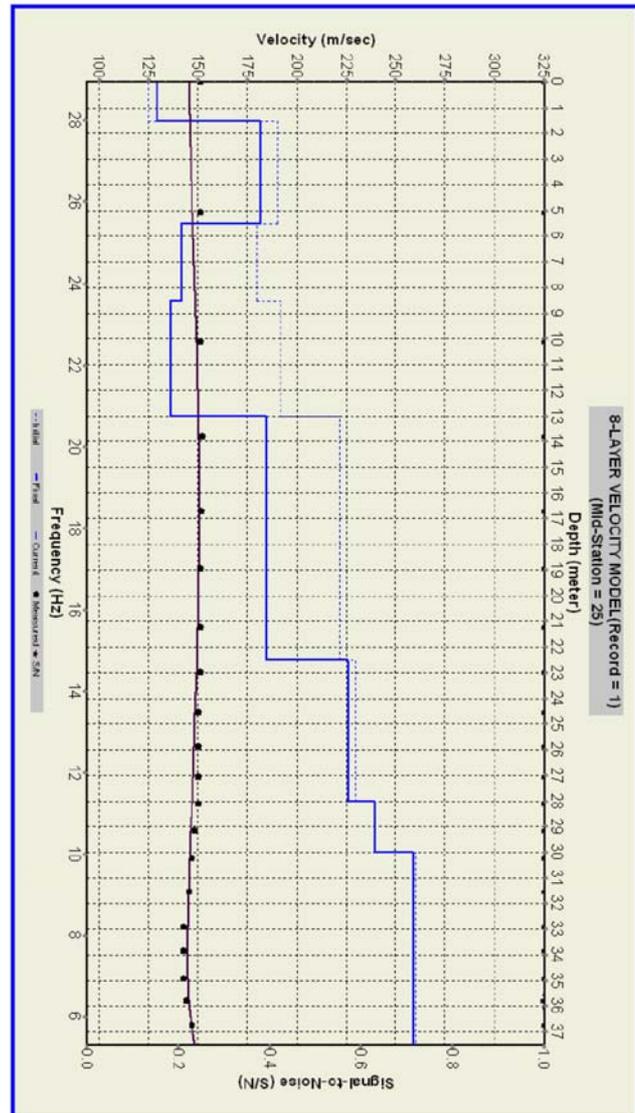
Caso di fabbricato pubblico di Classe II secondo NTC 2008 con vita di riferimento  $V_r = 75$  anni ubicato su pianura alluvionale costituita da depositi prevalentemente argillosi di grande spessore.

Per la definizione dell'assetto sismostratigrafico e della "categoria di sottosuolo" è stata ritenuta ottimale una prospezione sismica con onde superficiali di Rayleigh tipo MASW a 48 canali con interasse  $i = 1$  m, integrata da una prospezione sismica a rifrazione con onde P ed Sh a 24 geofoni con interasse  $i = 5$  m (lunghezza ml 120) al fine di estendere il dato monodimensionale della MASW all'insieme dei terreni interessati dalla costruzione.

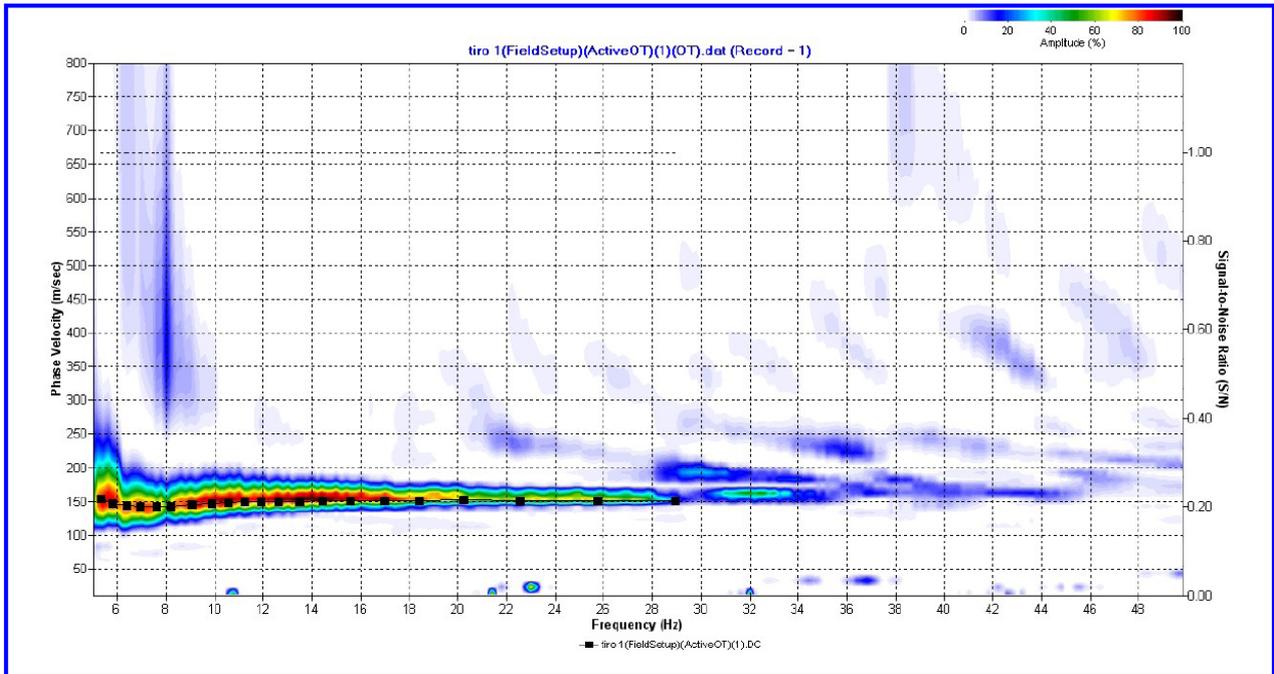
La prospezione MASW è stata tarata sui risultati di una prova penetrometrica statica CPTU.



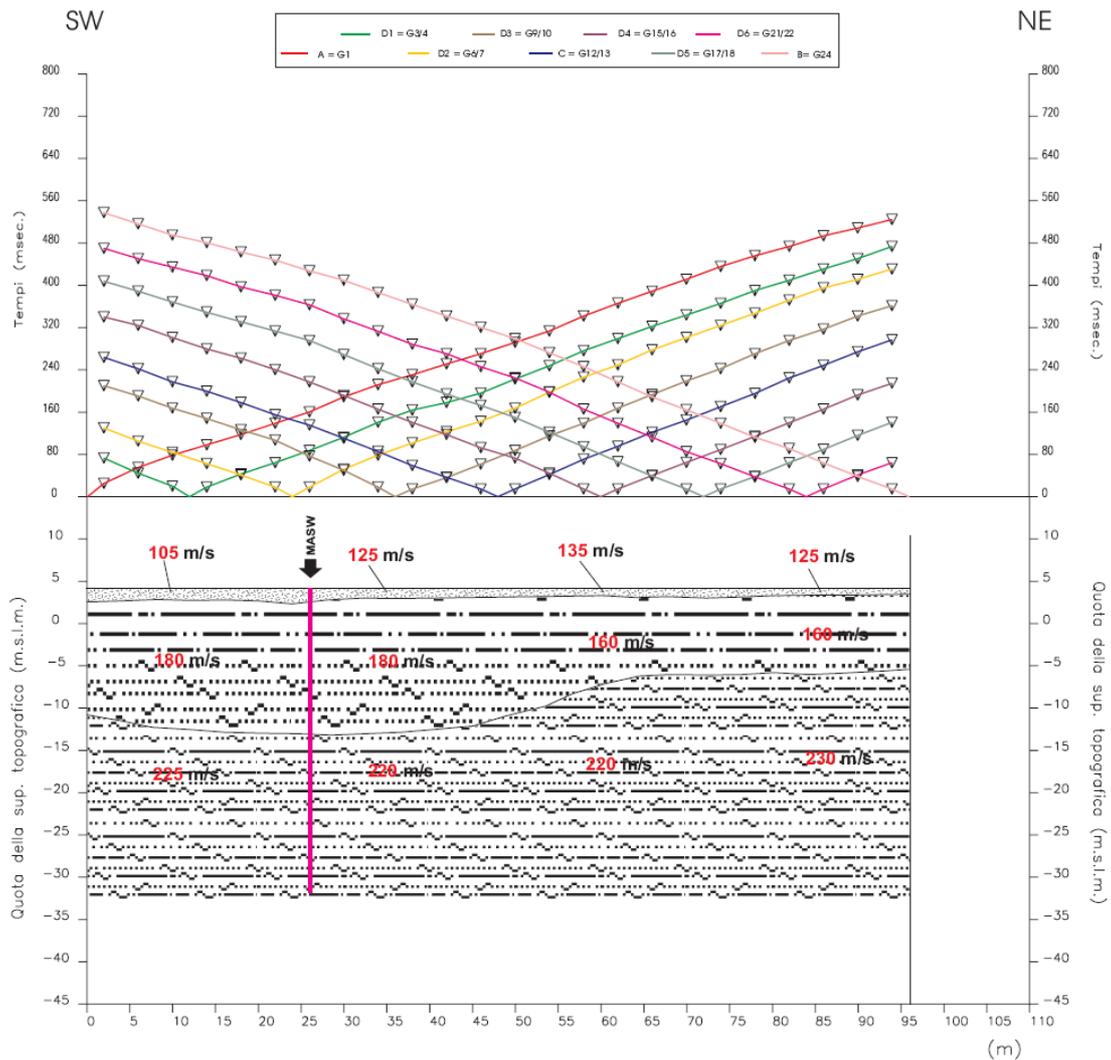
CPTU  $q_c$  (kg/cm<sup>2</sup>)  $f_s$  (kg/cm<sup>2</sup>)



Profilo di velocità MASW



MASW: Spettro delle ampiezze nel campo velocità di fase/frequenza e curva di dispersione



Prospezione sismica a rifrazione con onde Sh

La  $V_{s30}$  ricavata dalla MASW (per incastro  $D = 1.5$  m della fondazione) risulta  $V_{s30} = 153$  m/sec, quella ricavata dalla sismica a rifrazione in onde Sh risulta  $V_{s30} = 152$  m/sec. Si riscontra quindi un'ottima corrispondenza tra i due metodi, in assenza di significative inversioni di velocità negli strati alluvionali.

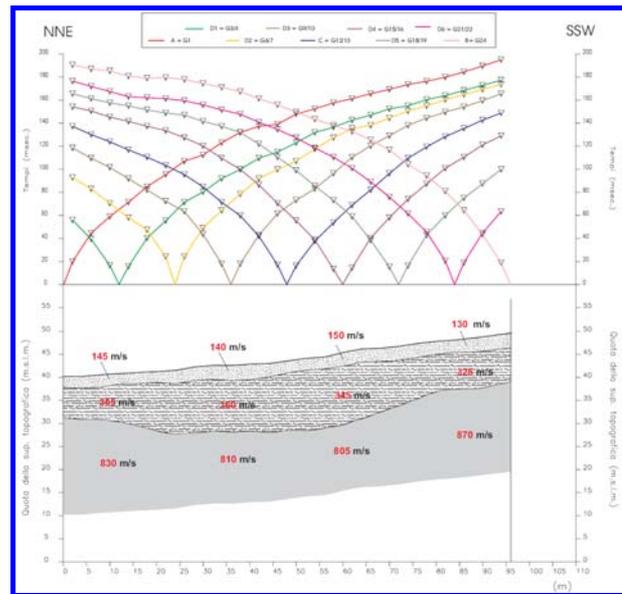
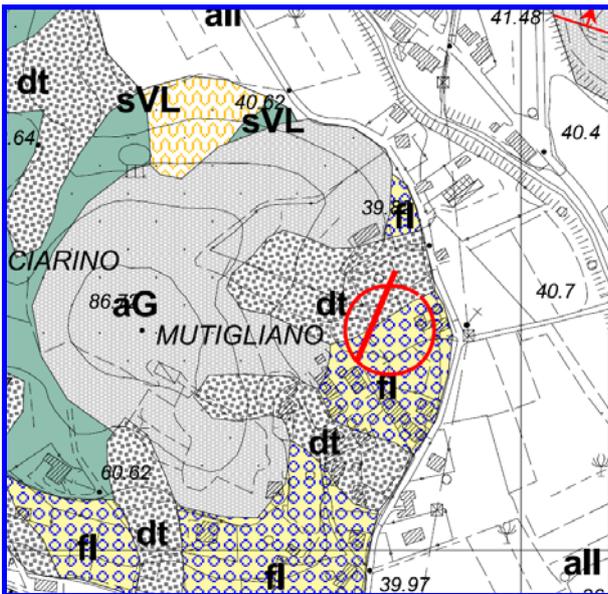
La categoria di sottosuolo, verificata l'assenza di significative inversioni di velocità ed il graduale miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni con la profondità, è certamente la **Categoria D**:

***Depositi di di terreni a grana grossa scarsamente addensati, o 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  $V_{s30}$  inferiori a 180 m/sec (ovvero  $N_{spt30} < 15$  nei terreni a grana grossa e  $cu_{30} < 70$  kPa nei terreni a grana fina).***

**Esempio 5: Categoria di sottosuolo E**

Caso di intervento edilizio di Classe II secondo NTC 2008 con vita di riferimento  $V_r = 50$  anni, su versante costituito da arenarie del Gottero (aG) con copertura detritica (dt) e di depositi argillosi fluviolacustri (fl).

Per la definizione dell'assetto sismostratigrafico e della "categoria di sottosuolo" è stata ritenuta ottimale una prospezione sismica a rifrazione con onde P ed Sh a 24 geofoni con interasse  $i = 4$  m (lunghezza ml 96). I risultati sono stati inoltre tarati su quelli di alcune prove penetrometriche CPT eseguite nello stesso contesto di indagini.



Prospezione sismica a rifrazione con onde Sh

La prospezione sismica ha individuato spessori della copertura detritica e fluviolacustre compresi tra 11 e 15 m, con velocità variabili tra minimi di 130 e massimi di 360÷365 m/sec, mentre al bedrock delle arenarie del Gottero competono velocità anche se di poco, superiori a 800 m/sec. La categoria di sottosuolo, verificato lo spessore della copertura inferiore a 20 m e la velocità della stessa mediamente inferiore a 360 m/sec, consente l'attribuzione certa alla **categoria di sottosuolo E**:

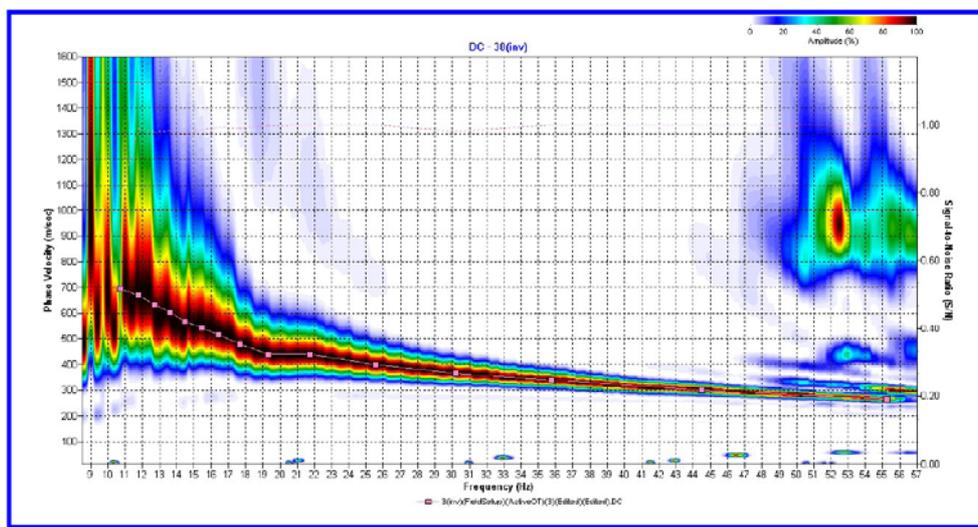
**Terreni dei sottosuoli tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con  $V_{s30} > 800$  m/sec).**

**ICASI DUBBI E LA CATEGORIA S2**

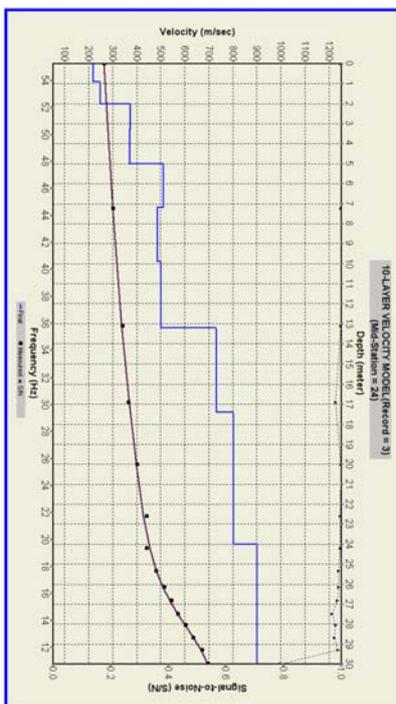
**Esempio 6: Categoria S2 – Per approssimazione Categoria B**

Caso di intervento edilizio industriale (tettoia e volumi tecnici) di Classe II secondo NTC 2008 con vita di riferimento  $V_r = 50$  anni, su **depositi alluvionali prevalentemente ghiaioso-ciottolosi sovrastanti il bedrock fratturato** (Successione Toscana Non Metamorfica: Marne a Posidonomya o Calcari selciferi inferiori).

Considerata la tipologia dell'intervento e la logistica locale, per la definizione dell'assetto sismostratigrafico e della "categoria di sottosuolo" (per appoggio della fondazione a  $- 2.0$  m) è stata ritenuta sufficiente una prospezione sismica con onde superficiali di Rayleigh tipo MASW a 48 canali con interasse  $i = 1$  m, tarata sui risultati di alcune prove penetrometriche statico-dinamiche pesanti e delle stratigrafie dei pozzi per acqua dell'azienda, integrata da misure di rumore sismico ambientale a stazione singola.



MASW: Spettro delle ampiezze nel campo velocità di fase/frequenza e curva di dispersione



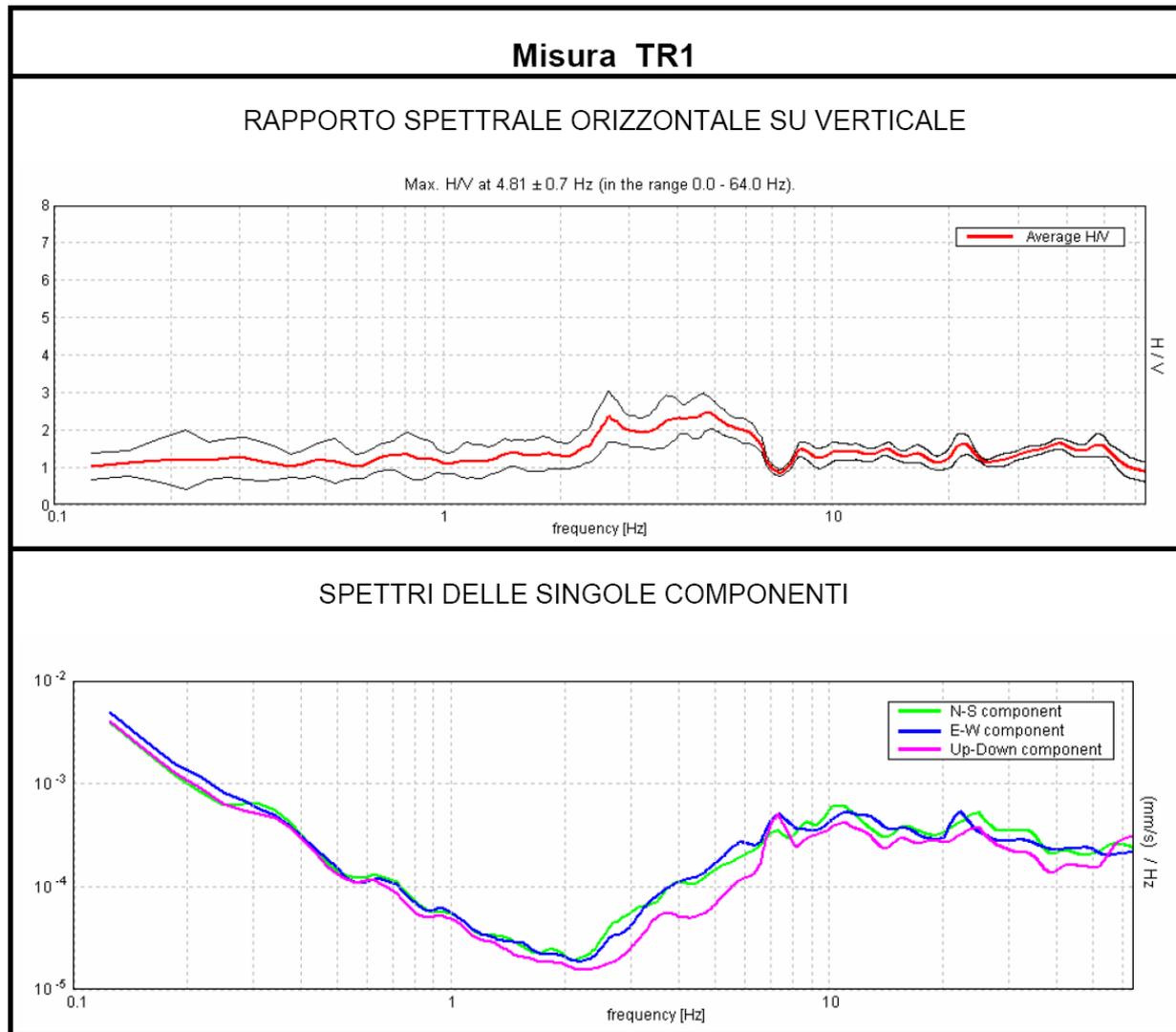
La sismostratigrafia desunta dalle indagini è la seguente:

- 0 - 2 m: limi sabbiosi  $V_s$  media = 230 m/sec
- 2 – 5 m: sabbie e ghiaie  $V_s = 380$  m/sec
- 5 – 13 m: ghiaie e ciottoli  $V_s = 500$  m/sec
- 13 – 17.5 m: ghiaie e ciottoli molto addensati/cementati e/o bedrock fratturato  $V_s = 730$  m/sec
- 17,5 – 24 m: ghiaie e ciottoli molto addensati/cementati e/o bedrock fratturato  $V_s = 800$  m/sec
- 24 – 30 m: bedrock fratturato  $V_s = 900$  m/sec

La situazione sismostratigrafica ricostruita risulta pertanto ambigua: è presente un bedrock sismico ( $V_s = 800$  m/sec) posto a profondità di 13 m c.a, al di sotto di una copertura alluvionale caratterizzata da velocità media delle onde di taglio  $V_s = 535$  m/sec: questa situazione non è riconducibile alla categoria di sottosuolo B, data la presenza del bedrock sismico a profondità inferiori a 30 m, né alla categoria E, in considerazione della velocità  $V_s$  della copertura che eccede i 360 m/sec (velocità limite per la categoria di sottosuolo C).

A rigore quindi la situazione sismostratigrafica ricade nella categoria di sottosuolo **S2** per la quale è necessaria l'analisi di risposta sismica locale specifica - RSL. Trattandosi tuttavia di modesto intervento, tale da non giustificare i costi di un'analisi di risposta sismica locale, si è optato per la **Categoria di sottosuolo B**, sulla base della considerazione che il rapporto tra velocità del bedrock e velocità media della copertura risultava  $V_{sbed}/V_{scop} = 800/535 = 1,45 < 2,2$ , quindi inferiore al rapporto minimo considerato nella definizione della Categoria di sottosuolo E.

Tale scelta è stata inoltre suffragata dalle misure di rumore sismico ambientale a stazione singola eseguite contestualmente, che, a parte alcuni disturbi causati dall'attività industriale, non hanno evidenziato picchi significativi del rapporto H/V.

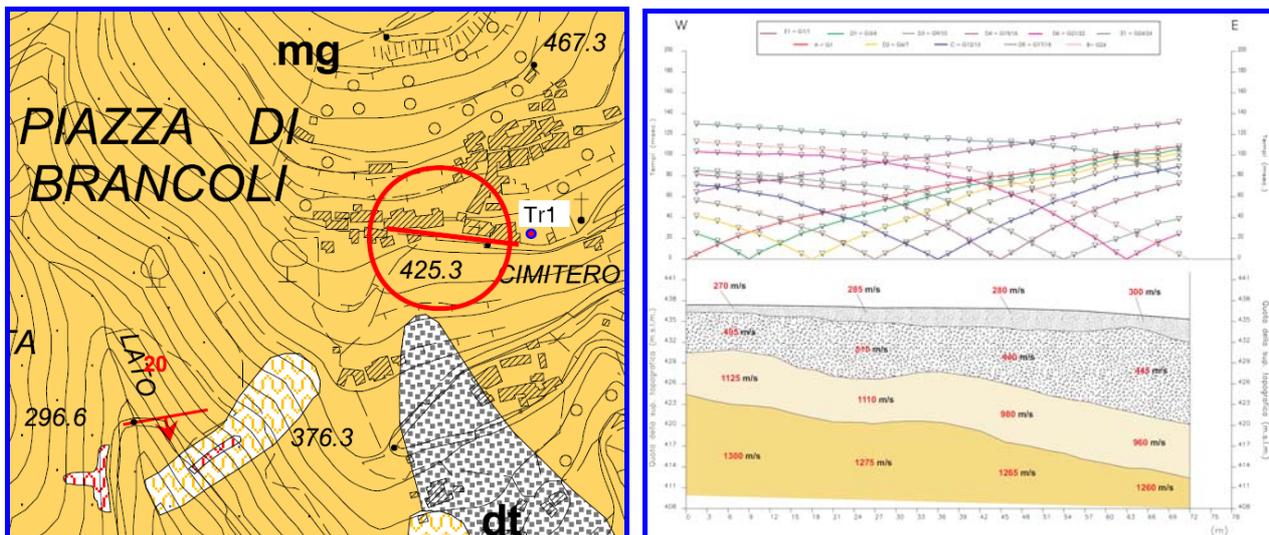


È appena il caso di ricordare che si tratta comunque di un'approssimazione non prevista dalla normativa, della quale il professionista si assume completa responsabilità.

**Esempio 7: Categoria S2 – Per approssimazione Categoria E**

Caso di intervento di consolidamento di muro di sostegno su versante costituito da **arenaria macigno (mg)** e sovrastante copertura detritica e di alterazione.

Per la definizione dell'assetto sismostratigrafico e della "categoria di sottosuolo" è stata ritenuta ottimale una prospezione sismica a rifrazione con onde P ed Sh a 24 geofoni con interasse  $i = 3$  m (lunghezza ml 72). I risultati sono stati inoltre tarati sulla stratigrafia di un sondaggio a carotaggio continuo eseguito nello stesso contesto di indagini.

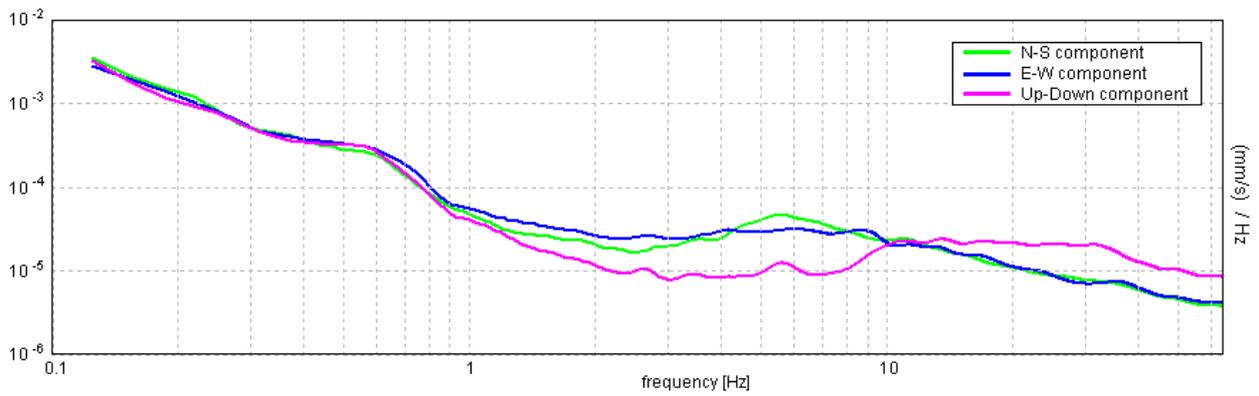
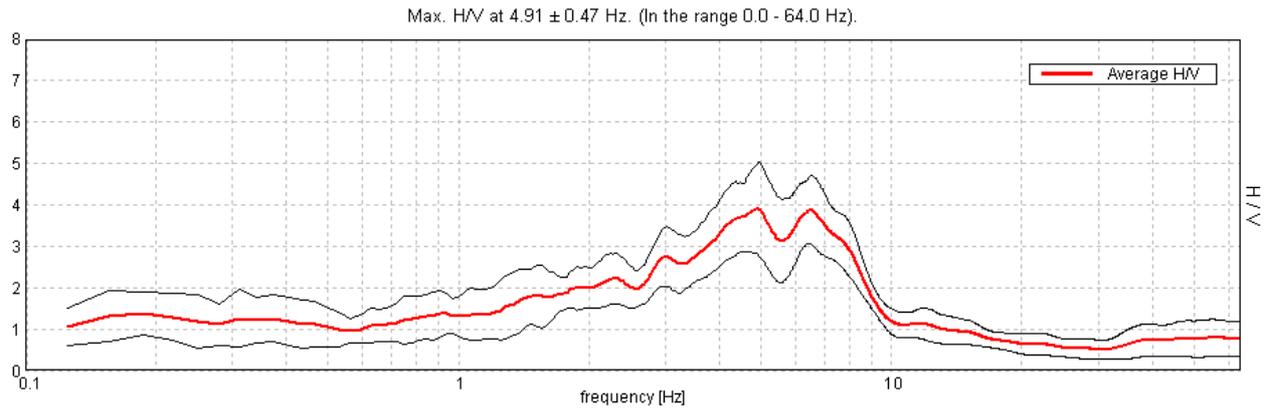


Prospezione sismica a rifrazione con onde Sh

La situazione sismostratigrafica ricostruita è risultata ambigua: è presente il bedrock dell'**arenaria macigno (mg)** molto rigido sismicamente ( $V_s = 960 \div 1300$  m/sec) posto a profondità di  $6 \div 15$  m, al di sotto di una copertura detritica caratterizzata da velocità  $V_s$  variabili tra 270 e 510 m/sec: questa situazione non è riconducibile alla categoria di sottosuolo B, data la presenza del bedrock sismico a profondità inferiori a 30 m, né alla categoria E, in considerazione della velocità  $V_s$  della copertura che eccede i 360 m/sec (velocità limite per la categoria di sottosuolo C).

A rigore quindi la situazione sismostratigrafica ricade nella categoria di sottosuolo **S2** per la quale è necessaria l'analisi di risposta sismica locale specifica - RSL. Trattandosi tuttavia di modesto intervento, tale da non giustificare i costi di un'analisi di risposta sismica locale, si è optato per la **Categoria di sottosuolo E**, sulla base della considerazione che il rapporto minimo tra velocità del bedrock e velocità media della copertura risultava  $V_{sbed}/V_{scoop} = 415/960 = 2,3 > 2,2$ , quindi superiore al rapporto minimo considerato nella definizione della Categoria di sottosuolo E.

Tale scelta è inoltre suffragata da una misura di rumore sismico ambientale a stazione singola Tr1, eseguita successivamente, che ha evidenziato un picco del rapporto  $H/V \approx 4$  intorno alla frequenza di 5 Hz: tale picco potrebbe essere anche superiore, a causa della netta inversione di velocità superficiale causata dall'effettuazione della misura su asfalto o lastricato rigido, ben evidenziata dalla maggiore ampiezza, alle frequenze maggiori di  $12 \div 15$  Hz, della componente verticale rispetto alle componenti orizzontali. Si noti inoltre, a parte il disturbo a 5.5 Hz, come il picco sia "scalinato" ad evidenziare una sequenza di contrasti di velocità come peraltro rilevato dalla sismica a rifrazione.

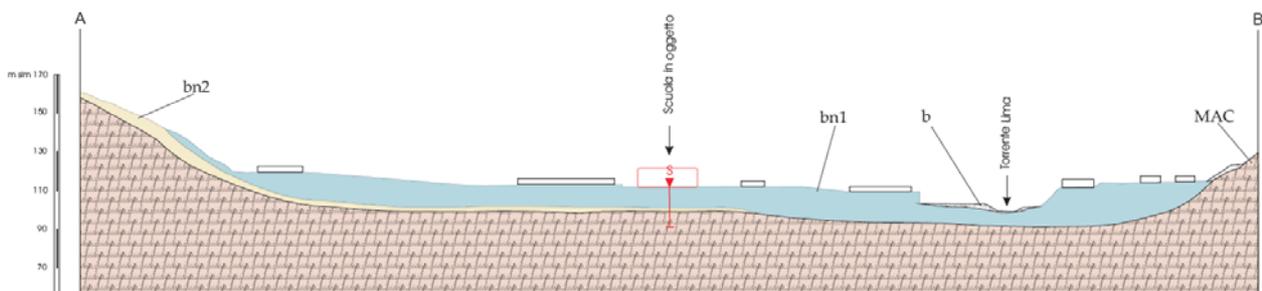
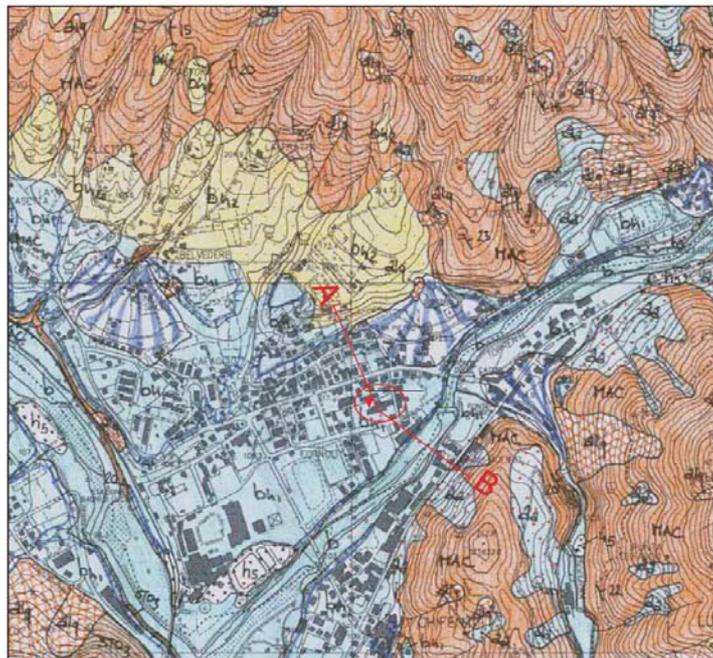


Anche in questo caso si sottolinea che si tratta comunque di un'approssimazione non prevista dalla normativa, della quale il professionista si assume completa responsabilità.

**Esempio 8: Categoria S2 – Per approssimazione Categoria E**

Caso di intervento edilizio pubblico (verifica sismica edificio scolastico esistente) di Classe III secondo NTC 2008 con vita di riferimento  $V_r = 75$  anni, su **depositi alluvionali prevalentemente ghiaioso-ciottolosi sovrastanti il bedrock sano** (Successione Toscana Non Metamorfica: arenaria macigno - mac).

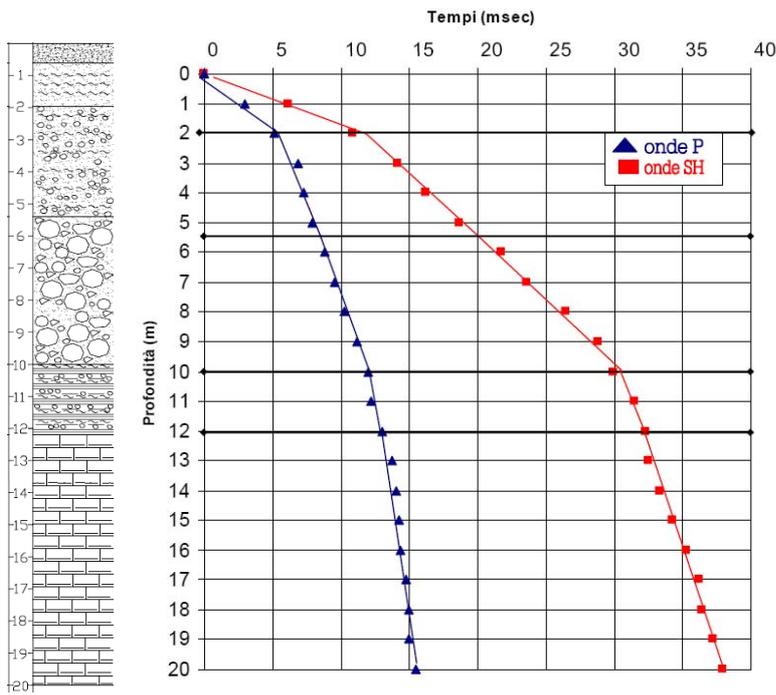
Per la definizione dell'assetto sismostratigrafico e della "categoria di sottosuolo" si è fatto riferimento alle indagini eseguite nell'ambito del programma VEL (Valutazione effetti Locali) della Regione Toscana prima dell'entrata in vigore delle NTC 2008, consistite in un sondaggio a carotaggio continuo della profondità di 20 m con relativa prospezione Downhole ed in una prospezione sismica a rifrazione con onde P ed Sh a 24 geofoni con interasse  $i = 5$  m (lunghezza ml 120). Successivamente sono state realizzate misure di rumore sismico ambientale a stazione singola.



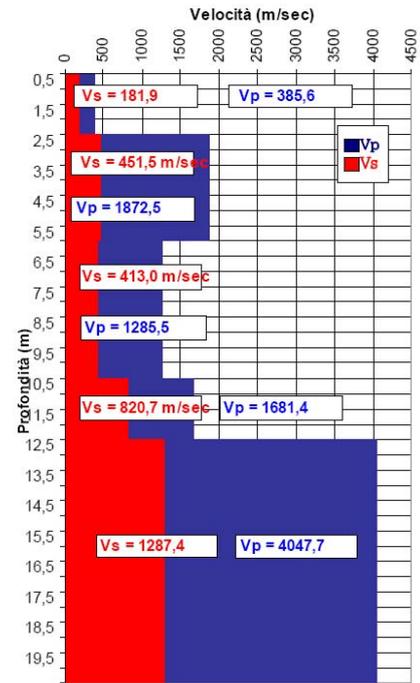
La situazione sismostratigrafica ricostruita sulla base delle indagini riportate alla pagina seguente è risultata ambigua: è presente il bedrock dell'**arenaria macigno (mg)** molto rigido sismicamente ( $V_s = 1200\div 1500$  m/sec) posto a debole profondità, circa  $10\div 12$  m sotto la superficie del terreno, sottostante una copertura alluvionale caratterizzata da velocità  $V_s$  intorno a 430 m/sec: questa situazione non è riconducibile alla categoria di sottosuolo B, data la presenza del bedrock sismico a profondità inferiori a 30 m, né alla categoria E, in considerazione della velocità  $V_s$  della copertura che eccede i 360 m/sec (velocità limite per la categoria di sottosuolo C). A rigore quindi la situazione sismostratigrafica ricade nella categoria di sottosuolo **S2** per la quale è necessaria l'analisi specifica.

Comune: Bagni di Lucca - LU Località: Scuola Elementare

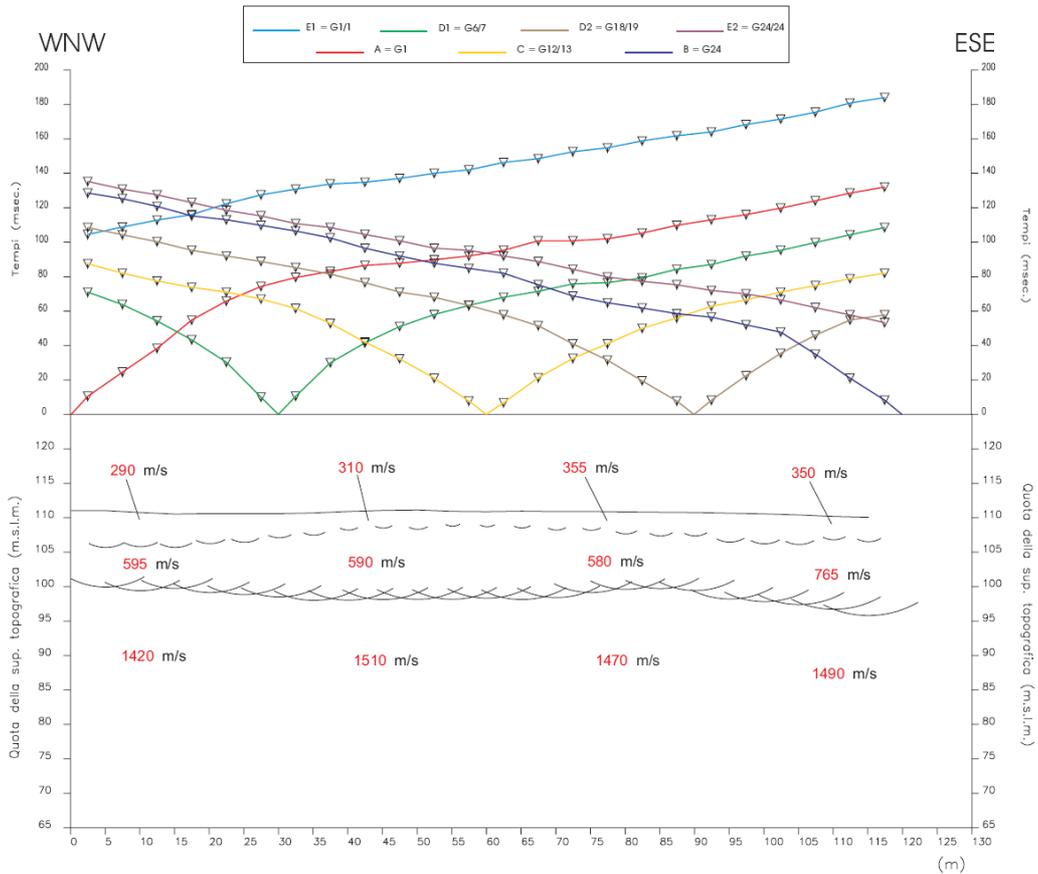
Sondaggio S3



stratigrafia sondaggio



prospezione downhole

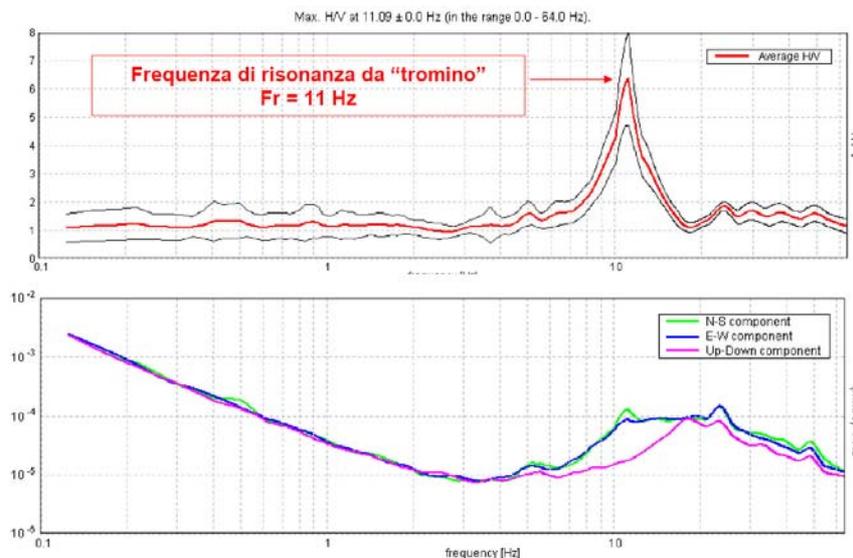


prospezione sismica a rifrazione con onde Sh

La situazione è stata pertanto valutata sia con l'approccio semplificato delle categorie di sottosuolo, sia con l'approccio rigoroso dell'Analisi di risposta sismica locale.

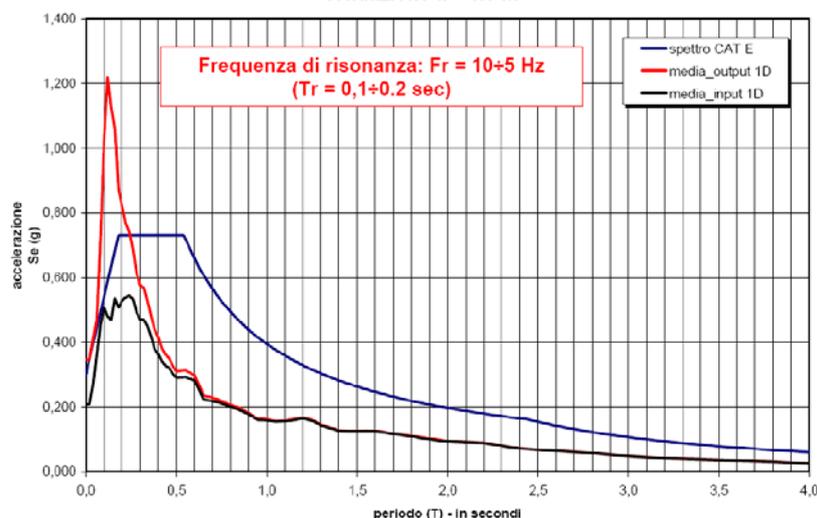
Approccio semplificato: si è optato per la **Categoria di sottosuolo E**, sulla base della considerazione che il rapporto tra velocità del bedrock e velocità media della copertura risultava  $V_{sbed}/V_{scop} = 1280/415 = 3 \gg 2,2$ , quindi superiore al rapporto minimo considerato nella definizione della Categoria di sottosuolo E.

Tale scelta è inoltre suffragata da una misura di rumore sismico ambientale a stazione singola Tr1, eseguita successivamente, che ha evidenziato un picco del rapporto H/V  $\approx 6,5$  intorno alla frequenza di 10 Hz: tale frequenza di risonanza corrisponde a quella desumibile in prima istanza dai risultati delle prospezioni dirette, attraverso la relazione  $Fr = Vs / 4H = 415/4 \times 10 = 10,4$  Hz.



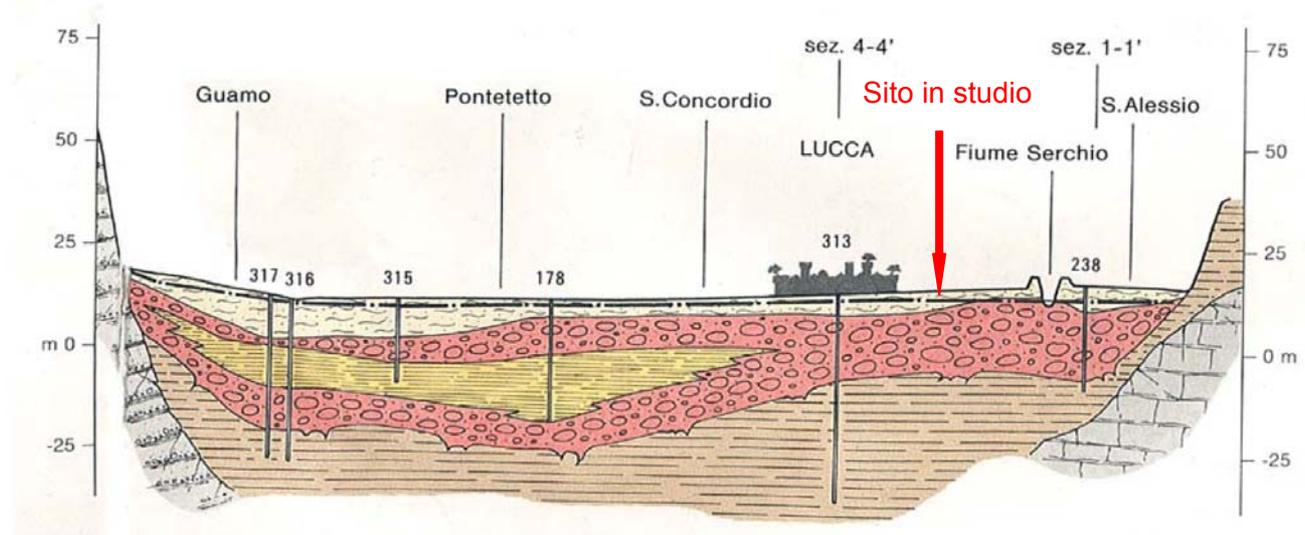
L'approccio rigoroso ha fornito lo spettro di risposta "ad hoc" calcolato con il programma Proshake e riportato di seguito: esso risulta complessivamente meno "impegnativo" dello spettro di normativa tipo E, salvo l'elevato picco di accelerazione intorno al periodo di 0.12 sec, corrispondenti ad una frequenza di circa 8-9 Hz. Ovverosia, la progettazione può risultare eccessivamente cautelativa (ed onerosa) se la frequenza propria della struttura supera gli 8-9 Hz, inversamente risulta fortemente sottostimata l'amplificazione. Nel caso specifico quindi, in relazione alla frequenza propria del fabbricato > 9 Hz (fabbricato a 2 piani), l'assunzione di una categoria di sottosuolo E può ritenersi adeguata e cautelativa.

Spettro elastico output per piano di fondazione a - 1.5 m



**Esempio 9: Analisi di risposta sismica locale monodimensionale**

Caso di intervento edilizio pubblico (verifica sismica edificio scolastico esistente) di Classe III secondo NTC 2008 con vita di riferimento  $V_r = 75$  anni.



Sezione geologica schematica Nord-Sud della Pianura di Lucca (da Nardi – Nolledi – Rossi: *Geologia ed idrogeologia della Piana di Lucca -1987*) non in scala

Il modello geologico di riferimento MGR (vedi sezione sovrastante) individua una copertura di grande spessore costituita da depositi alluvionali recenti e depositi fluviolacustri plio-pleistocenici; un sondaggio eseguito dall'AGIP negli anni '60 in loc. Pontetetto individuò il bedrock carbonatico a circa 350 m di profondità. La collocazione del sito in area di pianura molto distante dai bordi e l'assetto sub orizzontale dei depositi autorizza l'approccio di analisi numerica monodimensionale.

Il bedrock geologico e sismico, ovvero caratterizzato da velocità delle onde di taglio  $V_s \geq 800$  m/sec, è costituito dalle Successioni di tipo Ligure s.l. (Flysch ad Elmintoidi, Arenarie del Gottero etc.). Tuttavia, secondo le indagini di sismica passiva eseguite appositamente, già a partire da circa 93 m e quindi da 133 m di profondità si incontrano materiali caratterizzati da  $V_s$  elevate e prossime alla velocità limite di 800 m/sec (rispettivamente  $V_s = 730 \div 790$  m/sec), dubitativamente riferibili sia ai depositi fluviolacustri sabbioso-conglomeratici molto sovraconsolidati o cementati, sia al bedrock geologico del Flysch ad Elmintoidi o delle Arenarie del Gottero, molto alterato e fratturato.

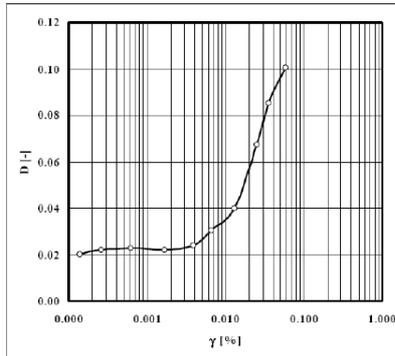
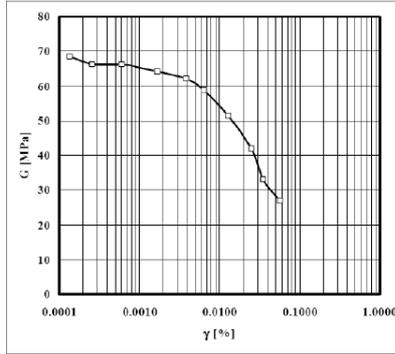
La collocazione del sito in area di pianura molto distante dai bordi e l'assetto sub orizzontale dei depositi autorizza l'analisi numerica monodimensionale.

Per la definizione dell'assetto sismo stratigrafico del sito sono state eseguite le seguenti indagini:

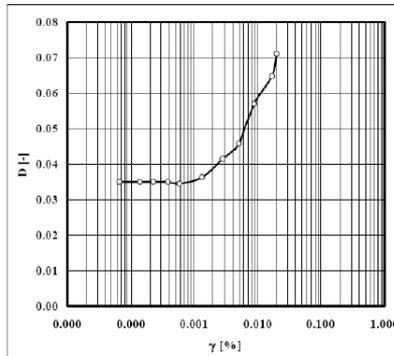
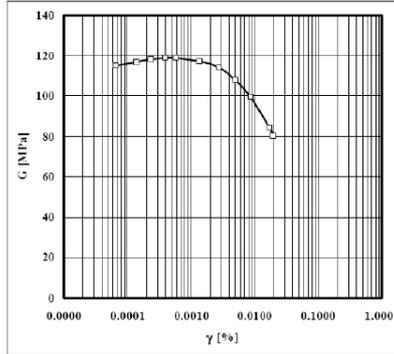
- 1) n° 1 sondaggio a carotaggio continuo della profondità di ml 50;
- 2) Analisi di laboratorio su n° 5 campioni, statiche (5) e dinamiche (2)
- 3) N° 1 prospezione downhole nel foro di sondaggio mediante onde dirette
- 4) analisi multicanale delle onde superficiali (MASW) con tecnica sia attiva sia passiva
- 5) misure del rumore sismico ambientale a stazione singola H/V
- 6) misure della frequenza fondamentale di vibrazione dell'edificio.



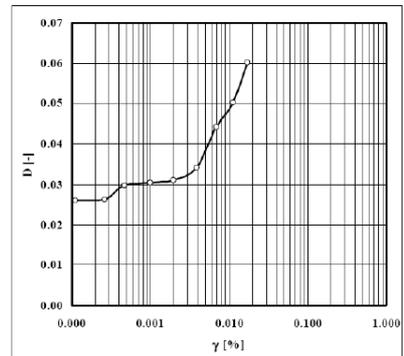
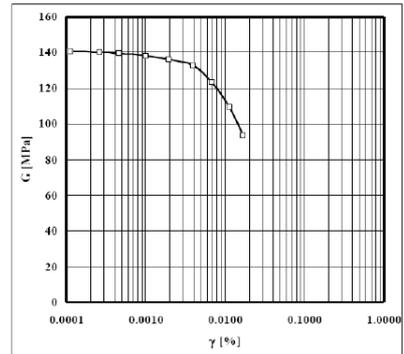
Campione S1C1 m 2.0÷2.5



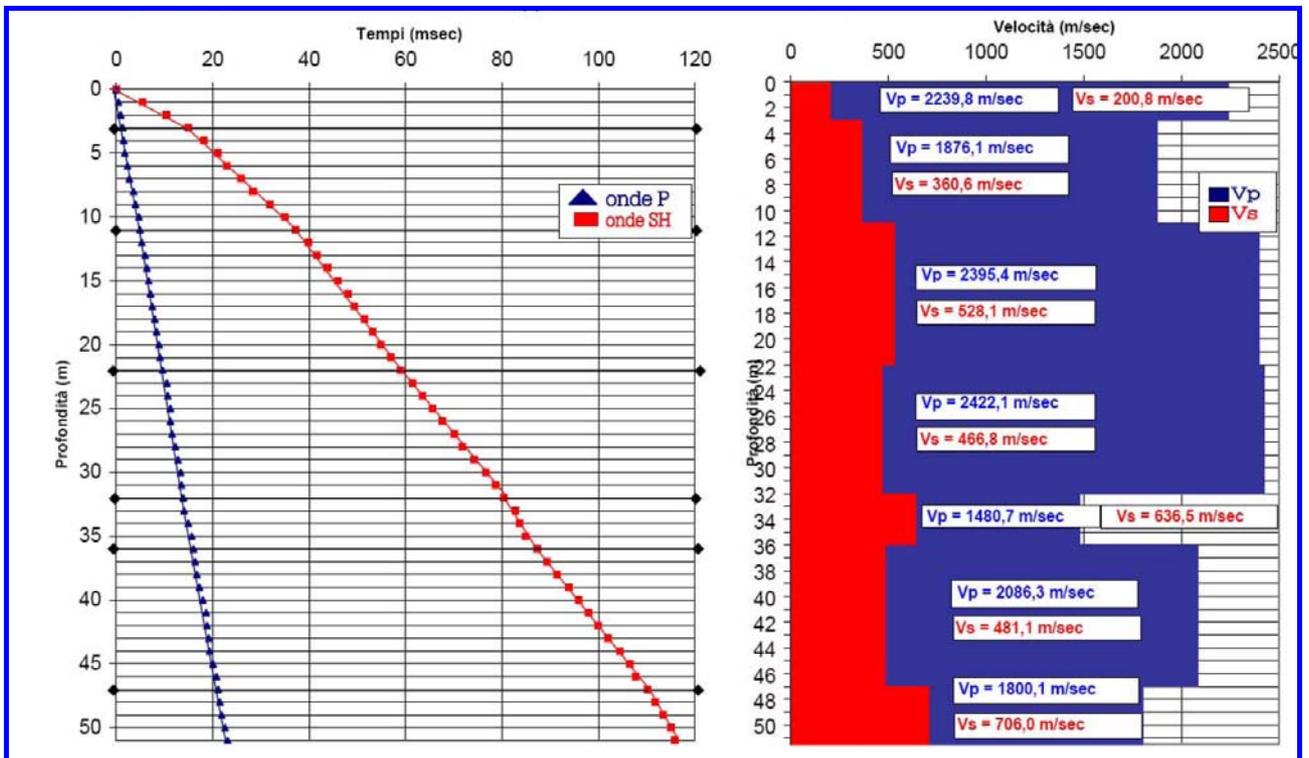
Campione S1C3 m 30.7÷31.20



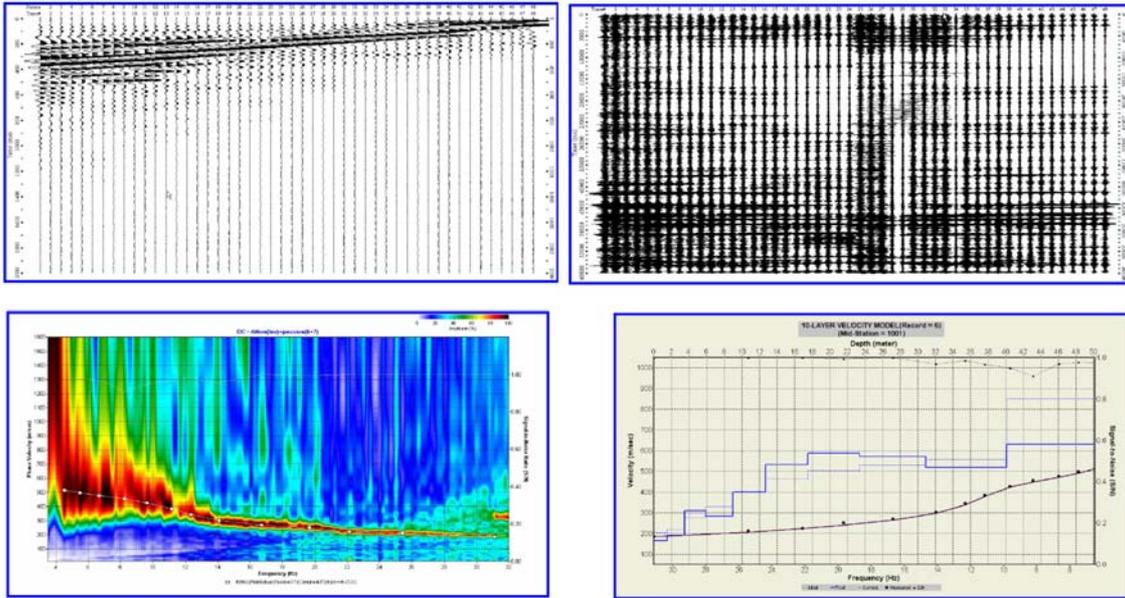
Campione S1C5 m 45.0÷45.5



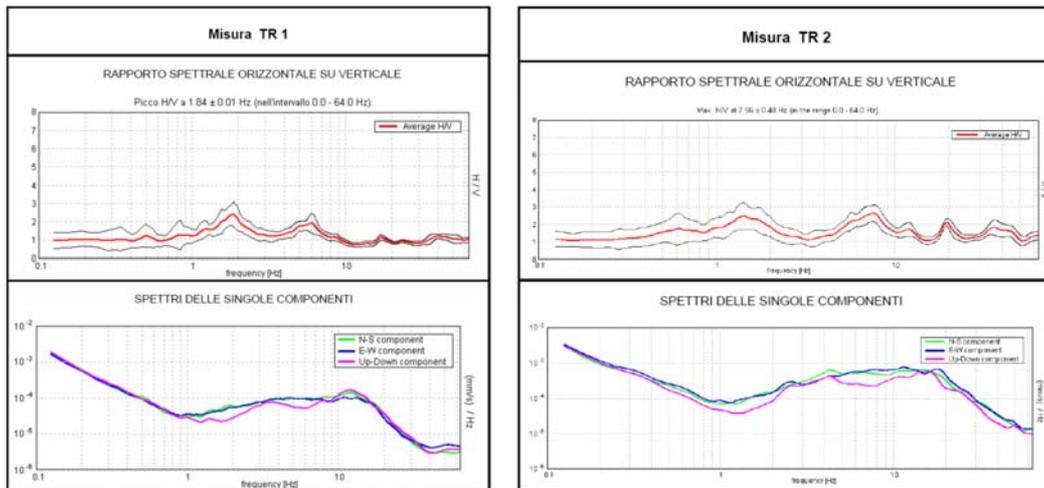
Prove di Colonna Risonante



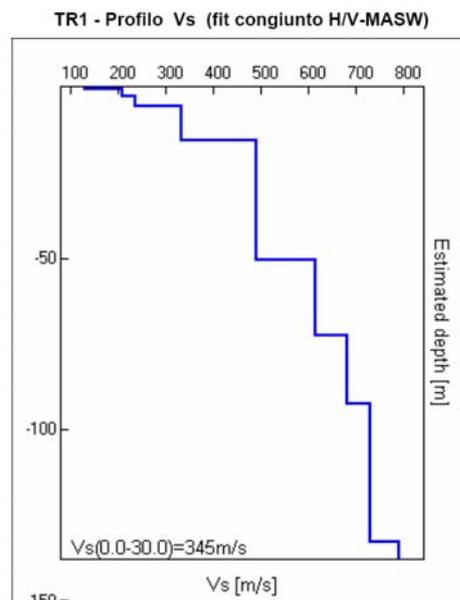
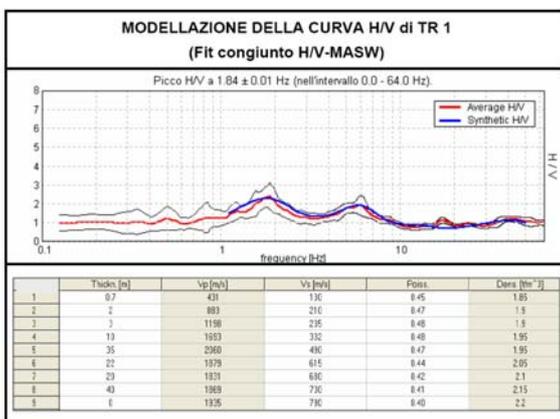
Prospezione downhole



Masw attiva + passiva



Misure di rumore sismico ambientale a stazione singola



Le analisi sono state effettuate in riferimento ai seguenti step, di seguito illustrati:

- 1) Determinazione dell'accelerazione massima di riferimento;
- 2) Scelta dei 7 terremoti sismo-compatibili da utilizzare come input nelle analisi;
- 3) Definizione del profilo sismostratigrafico del sito di progetto;
- 4) Realizzazione delle analisi di risposta sismica locale e relativa rappresentazione dei risultati.

La scelta dei 7 terremoti di input necessari per lo svolgimento delle analisi di risposta sismica locale è stata effettuata coerentemente con quanto prescritto ai Cap. 3.2.3.6 e 7.3.5 delle NTC 14/01/2008. È stato utilizzato il programma REXEL v 3.0 beta (Iervolino et al., 2010), in grado di fornire sulla base della definizione dello spettro di risposta del sito e delle sue caratteristiche sismologiche una serie di combinazioni, ognuna delle quali caratterizzata da 7 accelerogrammi naturali spettro-compatibili.

Per il sito in oggetto, definite le coordinate geografiche, le scelte progettuali (vita nominale  $V_n$  e coefficiente d'uso  $C_u$  pari rispettivamente a 50 anni e 1,5 con conseguente Vita di riferimento  $V_r = 75$  anni) ed il range di Magnitudo e Distanza più probabili (fig.1) sulla base delle analisi di disaggregazione fornite dal Progetto S1 dell'INGV (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>), sono state ricavate 100 combinazioni sismo-compatibili con lo spettro di risposta del sito.

Tra queste è stata scelta la combinazione recante il minore scarto medio (fig. 2), i cui sette accelerogrammi, adeguatamente scalati sulla base dell'accelerazione massima stimata per l'intervento in esame (pari a 0.148 g per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita e 0.061 g per lo Stato Limite di Danno) sono rappresentati in fig. 3. Si tratta di accelerogrammi naturali, presenti nella banca dati European Strong-motion Database (ESD).

Definiti i 7 moti di input sismico, si è provveduto mediante codice di calcolo ProShake 1.12 all'esecuzione delle analisi monodimensionali.

Il programma calcola la risposta associata alla propagazione verticale di onde S su modelli monodimensionali.

Il codice di calcolo Proshake1.12 rappresenta l'evoluzione dei programmi SHAKE85 (Schnabel et alii, 1972) e SHAKE91 (Idriss & Sun, 1992), utilizzando un'interfaccia semplificata che consente un utilizzo molto più agevole e veloce, rispetto alle precedenti versioni, scritte in linguaggio Fortran.

La sismostratigrafia utilizzata nell'analisi è riportata alla pagina seguente.

I valori delle curve dinamiche G-G0 (decadimento del modulo di taglio) e D (smorzamento) sono state dedotte dall'esecuzione di analisi dinamiche di laboratorio ad hoc, che hanno interessato un campione relativo ai limi sabbiosi (sismostrato 1) e due campioni riferibili ai sismostrati 4 e 6 (di natura sabbiosa). Per i rimanenti sismostrati si è proceduto in due differenti maniere: laddove le caratteristiche sismostratigrafiche erano comparabili con un livello in cui erano presenti curve dinamiche si è proceduto all'attribuzione delle stesse anche al livello in oggetto (ad esempio per il sismostrato 5); nei rimanenti casi (come ad esempio per i livelli ghiaiosi non campionabili) sono state utilizzate curve dinamiche desunte da letteratura.

Sismostrato	Prof. (m)	Vs (m/s)	Densità Gamma (kg/dmc)	Natura terreno
1	0 – 3	201	2.07	Limo sabbioso
2	3-11	361	2.05	Ghiaia
3	11-22	528	2.10	Ghiaia
4	22-32	467	2.00	Sabbia limosa
5	32-36	636	2.05	Sabbia limosa
6	36-47	481	2.15	Sabbia limosa
7	47-73	615	2.15	Sabbia
8	73-93	680	2.30	Sabbia
9	93-133	730	2.30	Sabbia
10	>133	790	2.30	Sabbia (substrato sismico)

*Successione sismo stratigrafica derivante dalla somma delle indagini eseguite ed utilizzata nella modellazione numerica monodimensionale*

Si è proceduto ad eseguire una specifica analisi, differenziando le diverse profondità di posa delle fondazioni delle differenti opere, sia considerando lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) sia lo Stato Limite di danno (SLD).

GRAFICO - DISAGGREGAZIONE

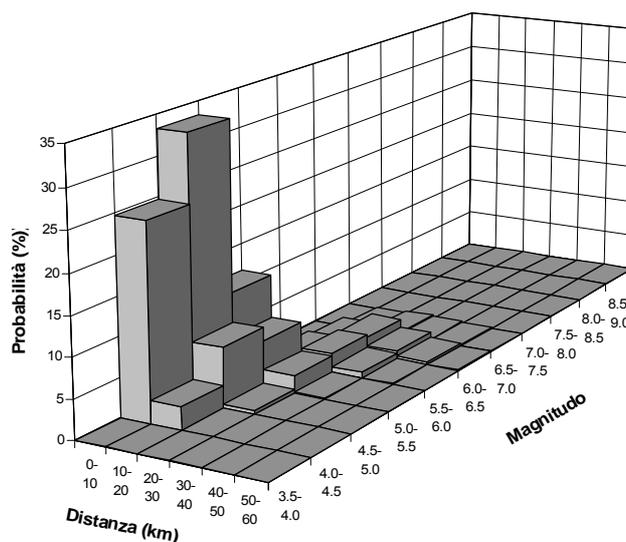


Fig. 1 – Grafico disaggregazione pericolosità sismica

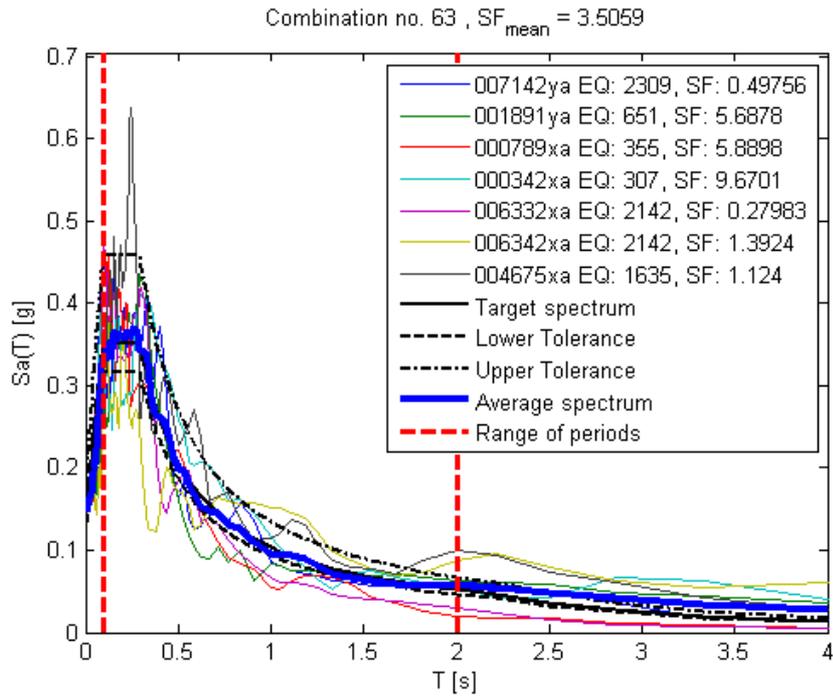


Fig. 2 –Spettro medio di input

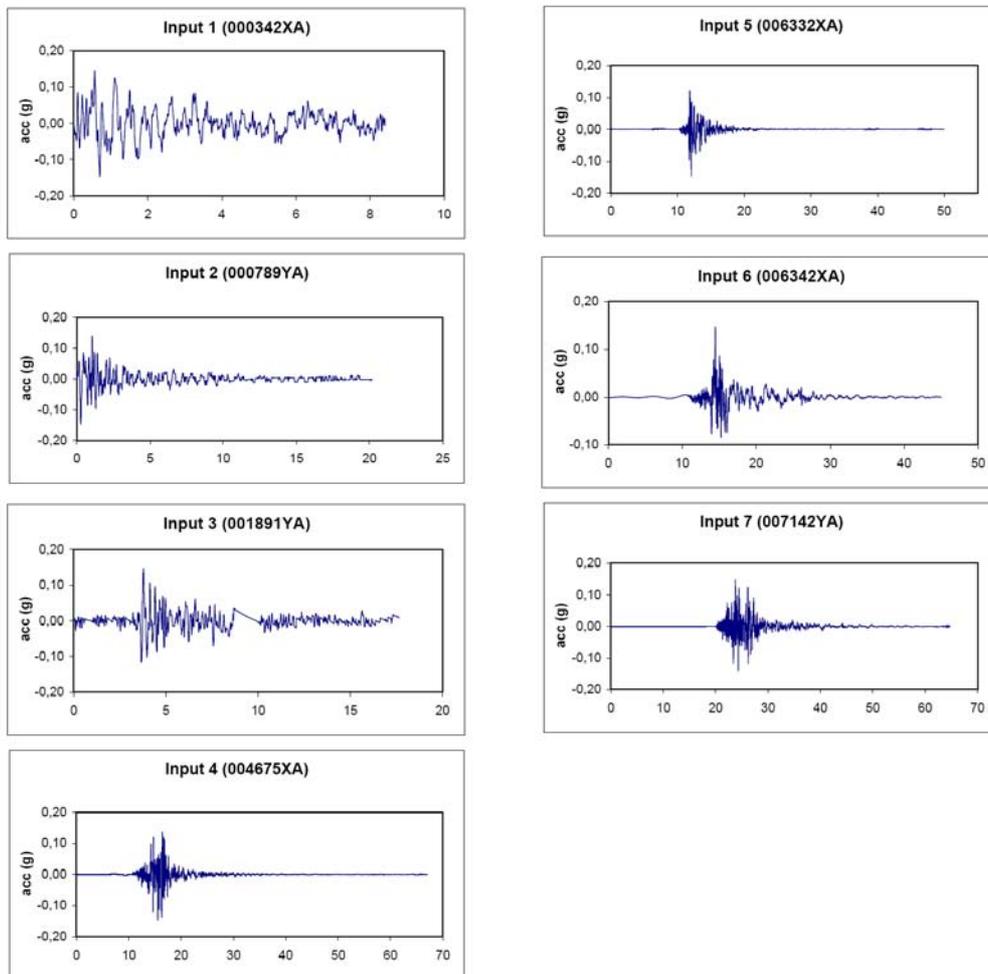


Fig. 3 – Accelerogrammi di input

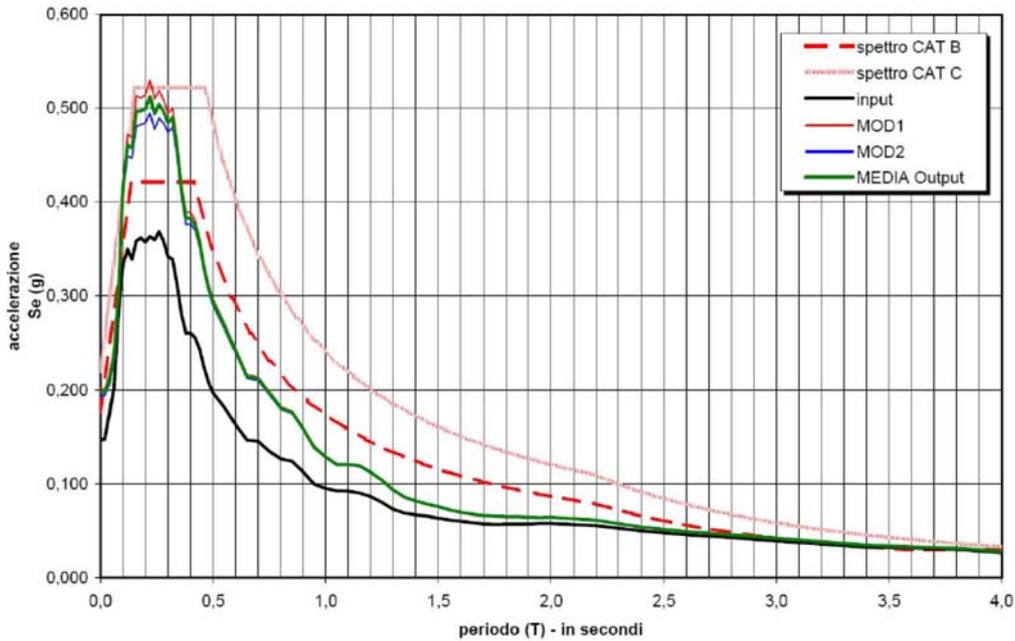


Fig. 4 – Spettri elastici SLV

In fig. 4 è illustrato il risultato relativo allo spettro di risposta elastico delle analisi di risposta sismica locale in funzione di diverse profondità del piano di posa della fondazione (MOD1 e MOD2). In figura è riportato anche lo spettro semplificato di normativa che per il sito in esame è quello relativo alla categoria B. Dal confronto tra analisi ad hoc ed approccio semplificato di normativa si può evincere come le analisi ad hoc eccedano sempre lo spettro di normativa, in maniera quantitativamente non trascurabile e per intervalli di periodo ricadenti nel range di “maggior pericolosità ingegneristica”.

In fig. 5 è mostrato il risultato dell’approfondimento di analisi eseguito per individuare i sismostrati responsabili dell’amplificazione.

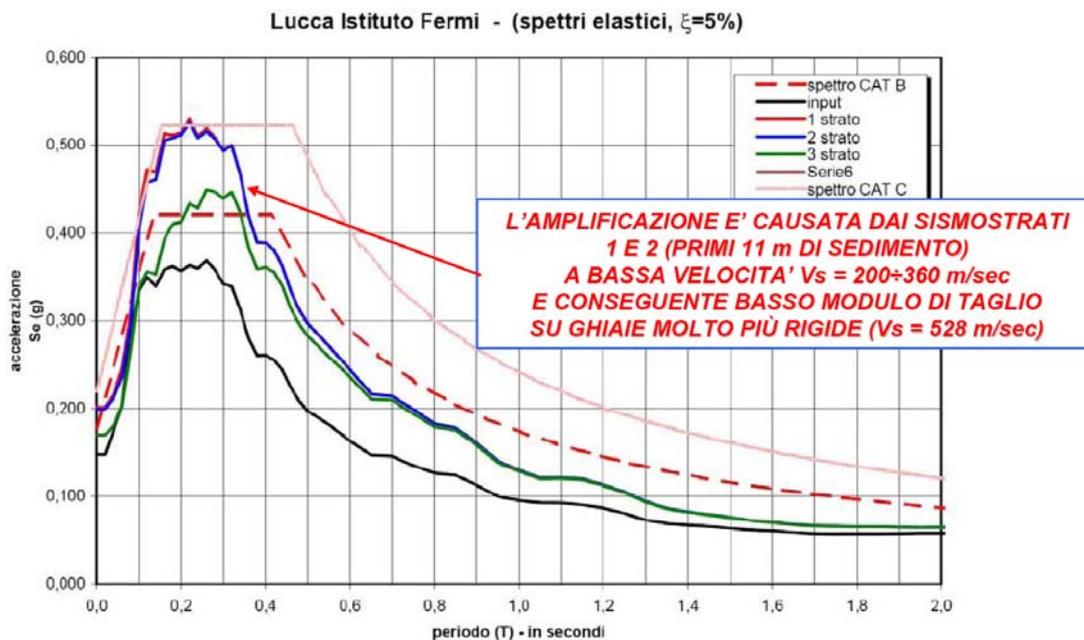


Fig. 5 – Spettri elastici SLV - approfondimento

La figura 6 illustra i risultati delle medesime analisi per lo Stato Limite di Danno (SLD).

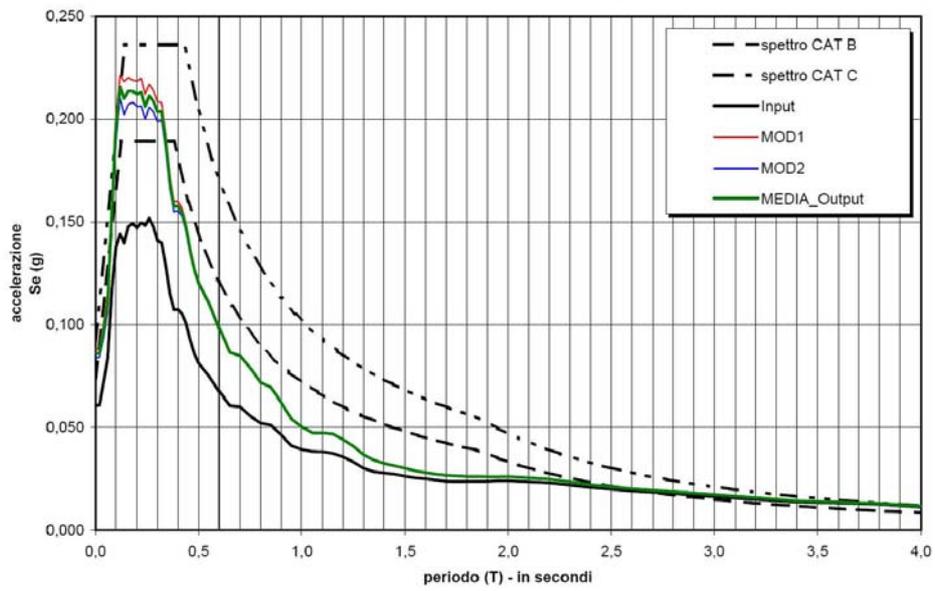


Fig. 6 – Spettri elastici SLD

## GLOSSARIO

(da Gruppo di Lavoro MS 2008 - Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica - con modifiche)

**Accelerogramma:** Grafico dell'andamento dell'accelerazione del suolo nel tempo dovuta al passaggio delle onde sismiche.

**Amplificazione locale:** modificazione in ampiezza, frequenza e durata dello scuotimento sismico dovuta alle specifiche condizioni lito-stratigrafiche e morfologiche di un sito. si può quantificare mediante il rapporto tra il moto sismico alla superficie del sito e quello che si osserverebbe per lo stesso evento sismico su un ipotetico affioramento di roccia rigida con morfologia orizzontale. se questo rapporto è maggiore di 1, si parla di amplificazione locale.

**Array (antenna sismica):** disposizione ordinata, secondo opportune geometrie, di sismometri o geofoni, i cui dati confluiscono in modo sincrono in un'unità centrale di acquisizione dati.

**Attenuazione:** diminuzione di ampiezza del segnale sismico all'allontanarsi dalla sorgente. l'attenuazione è causata dalla dissipazione geometrica dell'energia delle onde sismiche (ovvero dalla diminuzione di densità di energia all'aumentare delle dimensioni del fronte d'onda) e dall'assorbimento (ovvero dalle proprietà anelastiche dei materiali).

**Bedrock:** roccia compatta, rigida, non alterata, in affioramento o alla base di rocce/terreni meno rigidi o di sedimenti sciolti. Usato comunemente dai geologi per riferirsi a qualsiasi roccia/terreno diagenizzato/consolidato che non ha subito i processi meteorici di alterazione e deformazioni tettoniche pervasive.

**Bedrock sismico:** sequenza litostratigrafica caratterizzata da una velocità delle onde di taglio  $V_s$  maggiore o uguale a 800 m/s.

**Coefficiente di Poisson:** esprime il rapporto tra la contrazione laterale percentuale e l'estensione longitudinale percentuale di un materiale soggetto a tensione.

**Cono sismico:** tecnica di indagine analoga alla prova down-Hole in cui un sensore triassiale è spinto direttamente nel terreno tramite un penetrometro, invece che calato in un sondaggio rivestito. Ha il vantaggio del contatto diretto sensore-terreno e l'assenza dei disturbi dovuti alla perforazione del sondaggio e al condizionamento dello stesso; gli svan-taggi sono legati ai problemi di penetrazione del sensore analogamente alle prove penetrometriche.

**Convoluzione:** operazione matematica che permette di modificare lo spettro di Fourier di un segnale a seguito dell'applicazione di un filtro o della propagazione in uno specifico sistema (per esempio un segnale sismico che attraversa una sequenza di strati con caratteristiche meccaniche differenti).

**CPT (Cone Penetration Test):** prova penetrometrica statica eseguita infiggendo nel terreno, con un martinetto meccanico o idraulico, secondo modalità standardizzate, una punta conica posta all'estremità di una colonna di aste. nella prova, la forza imposta per spingere o guidare (infiggere) a velocità costante un cono d'acciaio di dimensioni standard in un terreno è usata come misura di alcune proprietà del terreno. Il cono standard ha un'apertura apicale di  $60^\circ$  e un'area della punta di  $10 \text{ cm}^2$ . Il penetrometro è inserito a una velocità di  $2 \text{ cm/s}$ . I risultati sono esplicitati come resistenza alla punta  $q_c$  e resistenza laterale  $f_s$ , i quali possono essere correlati alla coesione non drenata  $c_u$  o all'angolo di attrito del terreno.

**Crosshole:** prova sismica eseguita realizzando due o più fori (di solito a pochi metri di distanza) in cui si installa una sorgente di impulsi verticali e uno o più ricevitori (geofoni). note le distanze che le onde percorrono e misurati i tempi di primo arrivo e/o le ampiezze delle onde elastiche, si possono calcolare le velocità delle onde sismiche ( $V_s$ ,  $V_p$ ) e possono essere determinati i parametri elastici della roccia/terreno. a seconda del metodo applicato, si ottiene o un valore medio integrale per la zona studiata, o una tomografia sismica del terreno.

**CRR (Cyclic Resistance Ratio):** rapporto tra la resistenza a liquefazione di uno strato a una determinata profondità e la tensione verticale efficace litostatica a quella profondità.

**CSR (Cyclic Stress Ratio):** rapporto tra lo sforzo di taglio indotto dal sisma a una determinata profondità e la tensione verticale efficace litostatica a quella profondità. può essere determinato dal prodotto di:  $\sigma_{vo}/\sigma'_{vo}$  per  $a_{max}/g$  per rd, con rd fattore di riduzione della sollecitazione che diminuisce con l'aumento della profondità, g accelerazione di gravità, e  $a_{max}$  accelerazione massima attesa.

**Curva di dispersione:** distribuzione della velocità di fase delle onde superficiali (Rayleigh o Love) in funzione della frequenza.

**Deconvoluzione (filtrazione inversa):** processo finalizzato al miglioramento della qualità del segnale, equalizzando le ampiezze, attenuando le multiple, ripristinando il contenuto alle alte frequenze ecc.. Queste operazioni sono indirizzate sostanzialmente al ripristino del segnale con gli effetti di filtraggio causato dal percorso nel sottosuolo. costituisce operazione inversa della convoluzione. può essere utilizzata per determinare la natura del filtro o la natura del segnale in ingresso. Ad esempio, se si conosce la forma esatta del moto sismico in profondità e in superficie, si possono deconvolvere i dati per determinare le proprietà di filtro degli strati di terreno attraverso cui il moto sismico è passato.

**Deformazione (Strain):** Variazione percentuale in lunghezza, forma, o volume di un corpo sottoposto a variazioni di stato tensionale.

**Degradazione ciclica:** riduzione di rigidità di un terreno al crescere del numero di cicli di carico applicati in condizioni non drenate. È particolarmente significativa in terreni coesivi teneri.

**Densificazione:** Fenomeno di addensamento di un terreno granulare, più o meno repentino, a seguito di sollecitazione sismica.

**Densità assoluta:** massa dell'unità di volume di un terreno.

**Densità relativa:** esprime numericamente il grado di compattezza di un terreno sabbioso.

**Dilatometro sismico (SDMT):** attrezzatura per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$ , combinando una lama standard della prova DMT con un modulo sismico. La prova è concettualmente simile alla prova con cono sismico.

**Disaggregazione (della pericolosità sismica):** tecnica numerica che permette, in uno studio di pericolosità sismica con metodo probabilistico, di individuare le coppie magnitudo-distanza che maggiormente condizionano la pericolosità sismica del sito.

**Discontinuità sismiche:** superfici o strati sottili posti all'interno del profilo litostratigrafico in studio, attraverso i quali si verificano nette variazioni di velocità delle onde sismiche che corrispondono a zone di brusca variazione delle proprietà elastiche delle rocce.

**DMT (Dilatometer Marchetti Test):** Il dilatometro piatto consiste in una lama di acciaio inossidabile dotata, su una faccia, di una sottile membrana metallica espandibile, che, in condizioni di riposo, è alla pari con la superficie circostante. la lama viene spinta staticamente nel terreno mediante un penetrometro o mediante una sonda zavorrata. La lama è collegata, mediante un cavetto pneumatico, a una centralina in superficie; il cavetto passa attraverso le aste penetrometriche. A intervalli di 20 cm la penetrazione è sospesa e gas in pressione viene inviato alla punta. Vengono letti:

$p_0$  pressione alla quale la membrana inizia a espandersi contro il terreno;

$p_1$  pressione alla quale la deformazione al centro della membrana ha raggiunto 1 mm.

**Down-Hole:** prova sismica in foro di sondaggio in cui una fonte sismica è disposta in superficie in prossimità della bocca di un pozzo e due o più geofoni vengono disposti a profondità stabilite all'interno del pozzo. I dati ottenuti da un'indagine sono i tempi di percorrenza delle onde di taglio e di compressione dalla sorgente ai geofoni. Questo metodo è usato comunemente per determinare la velocità delle onde di taglio e di compressione al variare della profondità.

**Dromocrone:** curve tempo - distanza in cui in un asse è riportato il tempo a partire da un tempo  $t_0$  di riferimento e nell'altro i primi arrivi delle onde elastiche analizzate.

**Effetti locali (o di sito):** effetti dovuti al comportamento del terreno in caso di evento sismico per la presenza di particolari condizioni lito-stratigrafiche e morfologiche che determinano amplificazioni locali e fenomeni di instabilità del terreno (instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci, cedimenti differenziali, ecc.).

**Elasticità:** comportamento meccanico dei materiali caratterizzati da una relazione lineare fra sforzi e deformazioni. nei materiali elastici la deformazione indotta a seguito di una sollecitazione imposta viene completamente recuperata quando quest'ultima viene rimossa.

**Epicentro:** punto della superficie terrestre situato sulla verticale condotta dall'ipocentro.

**ESAC (Extended Spatial Autocorrelation):** Misura sismica passiva in array con geometria arbitraria. Si tratta di un'estensione del metodo proposto da Aki nel 1957 ed è basata sull'analisi del coefficiente di correlazione spaziale delle registrazioni di microtremore.

**Fase:** stato in cui in un dato istante si trova un sistema caratterizzato da un moto periodico. se un punto di un corpo è investito da un'onda sismica, la fase è, in un dato istante, l'ampiezza dello scostamento del punto rispetto alla posizione di riposo. due parti del corpo che, a causa della sollecitazione sismica, nello stesso istante si trovano nel medesimo stato sono detti "in fase".

**Fourier (analisi di):** operazione matematica che permette di rappresentare un andamento temporale continuo (per esempio, una registrazione del movimento al suolo) come una somma di funzioni elementari periodiche (componenti spettrali) ciascuna caratterizzata univocamente da una terna di valori: frequenza, ampiezza e fase.

**Frequenza:** numero di oscillazioni che un sistema in moto periodico compie nell'unità di tempo.

**Frequenza fondamentale:** frequenza più bassa alla quale un particolare sistema elastico vibra liberamente, quando non è influenzato da forze esterne o da smorzamento. Il reciproco del periodo fondamentale.

**Fronte d'onda:** superficie o linea di inviluppo di punti in fase di un sistema elastico investito da una perturbazione sismica.

**Funzione di trasferimento:** funzione complessa della frequenza che rappresenta in particolare il rapporto fra lo spettro di Fourier del moto sismico alla superficie di un terreno e quello relativo al basamento roccioso. Più in generale descrive l'amplificazione dell'input sismico nell'attraversamento dei terreni. Il modulo della funzione di trasferimento è denominato funzione di amplificazione.

**Geofono:** sensore atto a rilevare le vibrazioni del suolo (onde sismiche).

**Gutenberg-Richter (legge di):** relazione tra la magnitudo dei terremoti e la frequenza con cui avvengono. La distribuzione degli eventi in funzione della dimensione segue una semplice legge di potenza: rappresentando in un grafico il logaritmo del numero di eventi in funzione della magnitudo o intensità si osserva un andamento lineare. Nei risultati sperimentali, il b-value (la pendenza della retta di regressione) è caratteristico dell'area in studio.

**Housner (intensità di):** Intensità di un terremoto, misurata attraverso l'area sottesa (nel campo di periodi compresi tra 0,1 e 2,5 secondi) dal suo spettro di velocità. storicamente è riferita a uno spettro relativo a uno smorzamento pari al 20% di quello critico. È ritenuto essere un parametro correlato al potenziale distruttivo del terremoto. per le applicazioni di microzonazione, spesso si utilizza lo spettro di pseudovelocità riferito a uno smorzamento del 5%.

**Impedenza sismica:** prodotto della densità del terreno per la velocità delle onde sismiche. Varia fra strati differenti di terreno ed è comunemente indicata con  $z$ . Il contrasto di impedenza sismica fra strati di roccia adiacenti influisce sulle modalità di propagazione dell'energia sismica da un mezzo all'altro.

**Intensità macrosismica:** Valore numerico ordinale assegnato in base alla descrizione degli effetti del terremoto sulle persone, sugli oggetti, sulle costruzioni e sull'ambiente. In pratica corrisponde alla scelta di uno scenario di effetti rappresentativo della situazione osservata. la scelta riguarda un numero finito di possibili scenari (12 nelle scale moderne) caratterizzati da un livello crescente di severità. non si tratta quindi di una misura in senso stretto, ma di una classificazione fatta secondo una scala empirica qualitativa. esistono diverse collezioni di scenari ciascuna delle quali rappresenta una diversa scala macrosismica

(mercalli-cancani-sieberg o mcs, mercalli modificata o mm, medvedev-Karnik-sponheuer o msK, european macroseismic scale o ems, ecc.). poiché nella sua definizione si prende in esame la percentuale di edifici danneggiati o distrutti e il comportamento di gruppi di persone, essa è sempre rappresentativa di un'area più o meno estesa (un paese, una cittadina, un quartiere) e quindi non può essere un dato puntuale (ad esempio relativo a una singola struttura). In alcune scale moderne (msK, ems) sono stati introdotti elementi informativi che hanno lo scopo di rendere la stima di intensità macrosismica indipendente dal livello di esposizione e dalla vulnerabilità delle strutture nell'area colpita.

**Input sismico:** moto sismico ipotizzato alla base della struttura geologico-morfologica di un sito e del quale si intendono valutare i possibili effetti di amplificazione sismica.

**Ipocentro:** È il punto in cui si immagina che la rottura che genera un terremoto abbia origine. Più verosimilmente l'ipocentro non è un punto ma una regione dello spazio di dimensioni finite. la sua posizione è determinata dai tempi di arrivo delle prime onde p e s.

**Liquefazione:** fenomeno per cui, in conseguenza dell'applicazione di azioni dinamiche quali le azioni sismiche agenti in condizioni non drenate, un terreno perde la propria resistenza al taglio. la causa sta nell'incremento delle pressioni interstiziali che segue alla sollecitazione dinamica: l'incremento, sommato al valore iniziale della pressione interstiziale, arriva a uguagliare il valore delle tensioni normali applicate determinando l'annullamento delle tensioni efficaci e dunque della resistenza. sono particolarmente suscettibili di liquefazione dinamica i depositi superficiali di terreni granulari sciolti sotto falda.

**Litostratigrafia:** descrizione di una successione geometrica di rocce, nella quale si distinguono degli intervalli differenti tra loro solo per la natura delle rocce che li formano, a prescindere dalla presenza di associazioni fossilifere (base della biostratigrafia) o dall'età delle rocce (base della cronostratigrafia).

**Lunghezza d'onda:** distanza tra punti consecutivi che si trovano nella stessa fase.

**Magnitudo:** Grandezza che definisce le dimensioni di un terremoto, è correlabile con l'energia liberata sotto forma di onde sismiche durante un terremoto. Viene calcolata a partire dall'ampiezza o dalla durata del sismo-gramma. la magnitudo è un valore logaritmico che venne definito originariamente da Richter nel 1935. Un incremento di una unità di magnitudo (ad esempio da 4.6 a 5.6) corrisponde a un incremento dell'ampiezza sul sismogramma di 10 volte e a circa un aumento di 30 volte dell'energia rilasciata. non esiste né un limite inferiore, né un limite superiore del valore calcolato. Tranne in casi particolari, i terremoti di magnitudo inferiore a 2.5 non sono avvertiti dalla popolazione. Esistono diverse scale di magnitudo. la magnitudo Richter, detta anche magnitudo locale (ml), si esprime attraverso il logaritmo decimale del rapporto fra l'ampiezza registrata da un parti colare strumento, il pendolo torsionale Wood-anderson, e una ampiezza di riferimento. la magnitudo Richter può essere calcolata solo per terremoti che avvengono a distanza minore di 600 km dalla stazione che ha registrato l'evento. per supplire alla limitazione sulla distanza posta dalla definizione della magnitudo Richter, per misurare terremoti avvenuti a più di 600 km sono state introdotte altre scale di magnitudo. tra queste scale si possono ricordare le magnitudo di Volume (mb) usate e basate sull'uso delle onde di volume (body waves, generalmente le onde s). Un'altra magnitudo è la magnitudo superficiale (ms), calcolata sulle onde superficiali. al fine di calcolare la magnitudo di terremoti piccoli o moderati a distanza locale o regionale è stata introdotta la magnitudo di durata (md), il cui calcolo è basato sulla misura della durata del sismogramma; il concetto di base è quello di ritenere a ragione che maggiore è la magnitudo di un evento, maggiore sarà la durata della registrazione. per i terremoti più intensi si utilizza la magnitudo del momento sismico (mw) che si esprime in scala logaritmica a partire dal momento sismico (cioè il prodotto dell'area della frattura per lo spostamento della faglia per la resistenza massima alla rottura della roccia). la scala mw è stata definita in maniera tale da coincidere con la scala Richter per i terremoti inferiori a magnitudo 6-7.

**MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves):** tecnica che prevede la generazione delle onde di superficie da una sorgente a impulso (martello) o da una sorgente vibratoria sinusoidale allineata con i ricevitori (in genere 24) equidistanti (interasse 1 metro) che viene progressivamente allontanata. Lo scopo della prova MASW consiste nel determinare il profilo di rigidezza del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh ( $V_r$ ) e un successivo processo di inversione, attraverso il quale viene fornita una stima indiretta della distribuzione delle  $V_s$ .

**Microtremori** : rumore sismico ambientale, caratterizzato da oscillazioni di piccola ampiezza, provocate da sorgenti naturali o antropiche (onde del mare, vento, piccoli movimenti terrestri, traffico ecc.). la maggior parte degli autori ritiene che i microtremori siano costituiti da onde di Rayleigh.

**Microzonazione sismica:** Valutazione della pericolosità sismica locale attraverso l'individuazione di zone del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo. In sostanza la microzonazione sismica individua e caratterizza le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale del moto sismico e le zone suscettibili di instabilità.

**Modulo di taglio:** rapporto tra sollecitazione e deformazione di taglio di un materiale/terreno.

**Modulo di Young:** modulo di elasticità longitudinale. Esprime il rapporto tra tensione e deformazione in condizioni monoassiali.

**Momento sismico:** caratterizzazione della sorgente di un terremoto in termini di dimensioni e orientazione della faglia di origine, entità dello scorrimento medio sul piano di faglia e della rigidità del mezzo in cui la faglia si trova, dato dal prodotto del modulo di rigidità per l'area di frattura per la dislocazione media (spostamento tra i due lati della faglia).

**Nakamura (tecnica di):** tecnica di analisi dei microtremori finalizzata alla determinazione della frequenza naturale di vibrazione di una data struttura sedimentaria. È basata sulla stima del rapporto fra l'ampiezza spettrale del microtremore misurato sul piano orizzontale e quello misurato nella direzione verticale. per questo motivo la tecnica di Nakamura assume anche la denominazione di HVSR dall'acronimo inglese Horizontal to Vertical Spectral Ratios. tale tecnica si basa su tre assunzioni fondamentali:

- i microtremori sono originati da sorgenti locali superficiali, il contributo delle sorgenti profonde è trascurabile;
- l'amplificazione è dovuta alla propagazione delle onde all'interno di un singolo strato soffici superficiale situato su di un semispazio rigido;
- la componente verticale del moto non è soggetta a fenomeni di amplificazione.

**Notch (filtri di):** In geofisica, filtri a reiezione di banda: è una combinazione di filtri che attenua fortemente i segnali che si trovano all'interno di una banda ristretta, lasciando invece inalterati i segnali che sono al di fuori.

**Onde P:** Onde sismiche longitudinali o di compressione e dilatazione; la vibrazione si sviluppa nella stessa direzione di propagazione delle onde. sono dette anche "primae" perché raggiungono per prime l'epicentro.

**Onde S:** Onde sismiche trasversali (o di taglio): la vibrazione avviene perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda sismica. sono dette anche dette "secundae" perché raggiungono per seconde l'epicentro.

**Onde SV, SH:** onde di taglio polarizzate sul piano verticale (SV) od orizzontale (SH).

**Onde superficiali (di Love e di Rayleigh):** particolari onde sismiche associate a una perturbazione che si propaga lungo la superficie della terra. sono in genere frutto della combinazione di onde P e S e si propagano poco più lentamente di queste ultime. dato che l'energia associata alle onde superficiali è vincolata al propagarsi alla superficie della terra, queste si attenuano meno delle altre fasi sismiche (per esempio le fasi p e s che si propagano anche all'interno della terra) con la distanza; pertanto le onde superficiali tendono a dominare i sismogrammi dei telesismi. le onde superficiali (onde di Rayleigh) sono presenti anche nelle code delle registrazioni di sismica a rifrazione e possono essere utilizzate per lo studio delle stratificazioni più superficiali tramite tecniche MASW e SASW.

**Oscillatore:** nell'ingegneria sismica, l'oscillatore è soggetto a un moto impresso al vincolo e spesso viene utilizzato per rappresentare in modo semplificato il comportamento dominante di una struttura. Un sismografo è un oscillatore di questo tipo.

**Pericolosità sismica:** stima quantitativa dello scuotimento del terreno dovuto a un evento sismico, in una determinata area. La pericolosità sismica può essere analizzata con metodi deterministici, assumendo un determinato terremoto di riferimento, o con metodi probabilistici, nei quali le incertezze dovute alla

grandezza, alla localizzazione e al tempo di occorrenza del terremoto sono esplicitamente considerati. tale stima include le analisi di pericolosità sismica di base e di pericolosità sismica locale.

**Pericolosità sismica di base:** componente della pericolosità sismica dovuta alle caratteristiche sismologiche dell'area (tipo, dimensioni e profondità delle sorgenti sismiche, energia e frequenza dei terremoti). la pericolosità sismica di base calcola (generalmente in maniera probabilistica), per una certa regione e in un determinato periodo di tempo, i valori di parametri corrispondenti a prefissate probabilità di eccedenza. Tali parametri (velocità, accelerazione, intensità, ordinate spettrali) descrivono lo scuotimento prodotto dal terremoto in condizioni di suolo rigido e senza irregolarità morfologiche (terremoto di riferimento). la scala di studio è solitamente regionale. Una delle finalità di questi studi è la classificazione sismica a vasta scala del territorio, finalizzata alla programmazione delle attività di prevenzione e alla pianificazione dell'emergenza. costituisce una base per la definizione del terremoto di riferimento per studi di microzonazione sismica.

**Pericolosità sismica locale:** componente della pericolosità sismica dovuta alle caratteristiche locali (litostratigrafiche e morfologiche, v. anche effetti locali). Lo studio della pericolosità sismica locale è condotto a scala di dettaglio partendo dai risultati degli studi di pericolosità sismica di base (terremoto di riferimento) e analizzando i caratteri geologici, geomorfologici geotecnici e geofisici del sito; permette di definire le amplificazioni locali e la possibilità di accadimento di fenomeni di instabilità del terreno. Il prodotto più importante di questo genere di studi è la carta di microzonazione sismica.

**Periodo.** È la durata di una oscillazione di un sistema sottoposto a un moto periodico. È il reciproco della frequenza.

**Periodo fondamentale:** Inverso della Frequenza fondamentale.

**Periodo di ritorno:** Intervallo di tempo che mediamente intercorre tra due terremoti di data magnitudo. nel caso di valutazioni pro-babilistiche della pericolosità, assumendo l'indipendenza temporale tra eventi sismici, si può affermare che a un dato periodo di ritorno corrisponde una assegnata probabilità di eccedenza in un dato intervallo temporale (ad esempio il periodo di ritorno di 475 anni equivale a una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni).

**Periodo sismico o sequenza sismica:** serie di terremoti localizzati nella stessa area, in un definito intervallo temporale, che seguono (aftershocks) o precedono (foreshocks) un evento di magnitudo maggiore detto mainshock.

**PGA (Peak Ground Acceleration):** Ampiezza massima, in valore assoluto, della storia temporale dell'accelerazione del suolo (registrata o calcolata).

**Picking:** procedura di identificazione dei tempi di arrivo delle fasi sismiche nei segnali registrati.

**Poisson (modulo):** esprime il rapporto tra la deformazione trasversale e assiale di un corpo sollecitato assialmente e libero di dilatarsi. tipici valori del modulo di Poisson per limi e sabbie sono compresi tra 0.2 e 0.4 rispettivamente per materiali sciolti e addensati; per le argille sature esso varia tra 0.4 e 0.5. Il valore massimo teorico per un'argilla satura sollecitata in condizioni non drenate (deformazioni volumetriche nulle) è pari a 0.5.

**Pretriggering:** procedura della fase di acquisizione dati, in cui l'inizio registrazione viene anticipato di una definita quantità di tempo rispetto al momento di trigger, che coincide con l'energizzazione.

**Primo arrivo:** primo segnale, tra quelli registrati, che può essere attribuito all'onda sismica che si propaga dalla sorgente.

**Probabilità di eccedenza:** probabilità che un certo parametro di scuotimento del suolo in una zona possa essere oltrepassato in un arco temporale specificato.

**Profilo di velocità:** descrive l'andamento della velocità delle onde sismiche in funzione della profondità.

**Raggio sismico:** linea immaginaria lungo la quale si propaga una frazione dell'energia tra sportata dalle onde sismiche.

**Rapporti spettrali (tecnica dei):** tecnica che permette di differenziare e caratterizzare la risposta sismica locale tramite registrazioni di forti/piccoli terremoti. la tecnica si basa sull'assunzione che lo spettro di un segnale sismico registrato a un sito è formato dal contributo di un termine di sorgente, uno di propagazione e uno di sito. Valutare gli effetti di sito a partire da una registrazione significa calcolare il termine di sito separandolo dagli altri termini, relativi alla sorgente e al percorso, che possono essere considerati uguali per due siti di registrazione. di conseguenza il rapporto spettrale tra le registrazioni ottenute nel sito in esame e le corrispondenti registrazioni dello stesso evento sismico ottenute nel sito di riferimento (bedrock) fornirà direttamente una stima della funzione di amplificazione cercata.

**Rapporto segnale-rumore:** confronto fra l'ampiezza del segnale sismico e l'ampiezza del disturbo causato sia dagli strumenti sismici, sia da cause non sismiche.

**RE.MI (Refraction Microtremors):** tecnica di analisi passiva (microtremori) del sottosuolo sviluppata dalla Nevada University, basata sull'analisi delle onde di superficie ed in particolare delle onde di Rayleigh. L'analisi dei microtremori viene effettuata utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione disposta sul terreno con array lineare, da 12 a 48 geofoni.

**Rigidità di una roccia:** rapporto tra sollecitazione e deformazione.

**Rigidità iniziale:** rigidità a ridotti o nulli livelli di deformazione.

**Rischio sismico:** probabilità che si verifichi o che venga superato un certo livello di danno o di perdita in termini economico-sociali in un prefissato intervallo di tempo ed in una data area, a causa di un evento sismico.

**Risonanza:** Fenomeno caratteristico della dinamica che si verifica quando la frequenza fondamentale di un corpo è prossima alle frequenze caratteristiche dell'eccitazione a cui esso è sottoposto. In tali condizioni e in assenza di smorzamento l'ampiezza del moto tende a crescere indefinitamente.

**Rumore:** perturbazioni naturali o artificiali incoerenti causate da una varietà di fattori e di sorgenti distribuite. si distinguono solitamente fra rumore di fondo ambientale e rumore strumentale. Il primo è dovuto a fonti naturali (onde dell'oceano e vento, acque di ruscellamento, migrazioni di animali, movimenti glaciali, ecc.) e/o artificiali (traffico, macchinari, ecc.), mentre il rumore (interno) strumentale può essere dovuto al rumore "della luce intermittente" dei componenti elettronici e/o dei movimenti molecolari browniani nei componenti meccanici.

**SASW (Spectral Analysis of Surface Waves):** metodo che consente di ricavare il profilo delle onde S con la profondità relativa a un determinato sito in maniera indiretta, utilizzando una sorgente meccanica e più ricevitori, disposti in superficie. la prova, nella sua configurazione tradizionale, prevede l'utilizzo di una sorgente e due (o più fino a quattro) ricevitori di sposti in superficie, allineati ed equidistanti, con la sorgente da una parte rispetto ai ricevitori.

**Scala di intensità macrosismica:** scala per la valutazione degli effetti dei terremoti su ambiente, persone, cose e costruzioni in una data zona. la scala d'intensità più comunemente usata in Italia è la scala Mercalli Cancani Sieberg (MCS). recentemente è stata definita anche una scala macrosismica europea (EMS).

**Scala Richter:** scala che misura la magnitudo di un terremoto.

**Sismica a rifrazione:** Tecnica di indagine geofisica che utilizza la determinazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche di volume (P ed S) per la ricostruzione della successione sismostratigrafica del sottosuolo. La tecnica si basa sulla misura dei tempi di primo arrivo delle onde P ed S generate in superficie tramite un allineamento di geofoni, da 12 a 48 o più.

**Sismogramma:** registrazione della scuotimento sismico (terremoto). Solitamente indica l'andamento nel tempo della velocità di spostamento del suolo.

**Smorzamento (Damping Ratio):** si definisce rapporto di smorzamento il rapporto tra il coefficiente di smorzamento ( $c$ ) e il coefficiente di smorzamento critico ( $c_0$ )  $D = c/c_0$ . Lo smorzamento critico è quel valore dello smorzamento per il quale il moto libero non è oscillatorio. Esprime la capacità di un materiale o di una struttura di dissipare l'energia che lo attraversa. Se la sollecitazione ha un carattere oscillatorio, è espresso come il rapporto fra la quantità di energia  $\Delta W$  che il sistema dissipa in una singola oscillazione e l'energia

elastica massima  $W$  associata alla stessa oscillazione. Tradizionalmente assume la forma:  $D = \Delta W/4\pi W$ .

**Spettro a probabilità uniforme:** spettro di pseudoaccelerazione o di pseudovelocità o di spostamento, derivato da un'analisi di pericolosità sismica di base con metodologie probabilistiche, i cui punti hanno tutti la stessa probabilità di accadimento.

**Spettro di Fourier:** esprime, in funzione della frequenza, la variazione delle ampiezze delle singole armoniche ricavate dall'analisi di Fourier di una storia temporale.

**Spettro di potenza:** spettro che relaziona la potenza (energia nell'unità di tempo) e le frequenze di un evento.

**Spettro di risposta:** curva che mostra la risposta massima di un insieme di oscillatori semplici armonici, smorzati di frequenze naturali differenti a una particolare registrazione dell'accelerazione al suolo di un terremoto. Gli spettri di risposta possono mostrare l'accelerazione, la pseudovelocità o lo spostamento relativo dell'oscillatore in funzione della frequenza (dell'oscillatore) propria per vari livelli di smorzamento. nelle applicazioni ingegneristiche frequente mente si rappresenta lo spettro di pseudo accelerazione, che è abbastanza vicino a quello di accelerazione e consente di stimare correttamente gli spostamenti relativi della struttura rispetto alla base, quindi le sollecitazioni.

**Spettro di velocità:** nelle tecniche di indagine sismica che utilizzano le onde superficiali (di Rayleigh o Love) visualizza l'ampiezza del segnale registrato in funzione della frequenza e della velocità di fase (spettri nel dominio  $f - v$ ) o in funzione della frequenza e del numero d'onda (spettri nel dominio  $f - k$ ): esso deriva dalla trasformazione matematica dei dati acquisiti in campagna nel dominio spazio-tempo.

**SPT (Standard Penetration Test):** prova penetrometrica dinamica eseguita facendo penetrare nel terreno, sotto i colpi di un maglio, un campionario posto sul fondo di un foro trivellato. le caratteristiche delle apparecchiature e le modalità di esecuzione della prova sono standardizzate. Il numero di colpi ( $N_{SPT}$ ) necessari per infiggere il campionario per 30.5 cm (1 piede) viene assunto come misura della resistenza alla penetrazione del terreno. È una prova significativa in terreni incoerenti dalla quale si possono trarre, tramite correlazioni empiriche, lo stato di addensamento e i parametri di resistenza al taglio dei terreni.

**Stack (stacking):** elaborazione di una registrazione sismica consistente nell'addizionare tracce ottenute da energizzazioni in sequenza, allo scopo di ridurre il rumore di fondo e migliorare la qualità complessiva del segnale.

**Taglio torsionale ciclico (prova di):** prova nella quale si realizzano condizioni di taglio semplice su provini cilindrici imponendo, dopo una fase di consolidazione in condizioni isotrope o anisotrope, una coppia torcente variabile nel tempo con legge periodica e a velocità ridotta in modo da potere trascurare gli effetti inerziali.

**Tempo di arrivo:** tempo di registrazione di una particolare fase sismica rilevata da una stazione.

**Terremoto di riferimento:** in uno studio di microzonazione sismica è il moto rispetto al quale si calcolano i fattori di amplificazione.

**Terreni di copertura:** coltre costituita da sedimenti sciolti o roccia alterata, di spessore in genere da pochi metri a decine di metri, che ricopre una roccia compatta non alterata (substrato).

**Time history:** andamento nel tempo di grandezze (accelerazione, velocità o spostamento) che descrivono il movimento del suolo. Vedi anche accelerogramma.

**Trigger:** dispositivo che consente l'inizio dell'acquisizione dati nel momento esatto della generazione del segnale usato per la prospezione. la precisione del sistema di trigger va assicurata particolarmente quando i tempi di percorso da acquisire sono brevi, come ad esempio in una prova cross-Hole.

**Up-Hole (prova di):** Indagine geofisica analoga alla prova down-Hole, con la differenza che la sorgente meccanica è ubicata nel foro e i ricevitori sismici in superficie.

**VSP (Vertical Seismic Profiling):** tecnica di indagine finalizzata alla definizione dei diversi campi d'onda ( $p$  e  $s$  dirette, onde di tubo, fasi riflesse) tramite il posizionamento di sensori in un foro e l'energizzazione lungo allineamenti radiali rispetto a bocca foro.

$V_{s30}$  Velocità equivalente delle onde di taglio nei primi 30 metri di sottosuolo. È definita come il rapporto tra 30 e la sommatoria dei rapporti tra lo spessore dello strato  $i$ -esimo e la corrispondente velocità  $s$ .

**BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE**

- AA. VV. (2007)** – Istruzioni Tecniche per le indagini geologico – tecniche, le indagini geofisiche e geotecniche, statiche e dinamiche, per la valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana. Servizio sismico – Regione Toscana.
- AA. VV. (2011)** - Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* – Anno XXVIII, n.2, 2011.
- Albarelo D. & Castellaro S. (2011)** - Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. Supplemento alla rivista *Ingegneria sismica* Anno XXVIII, n. 2-2011, 32-62.
- Albarelo D., Cesi C., Eulilli V., Guerrini F., Lunedei E., Paolucci E., Puzzilli L.M. (2010)** - The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the 26th April, 2009 L'Aquila (Italy) earthquake. *Boll. Geofis.Teor. Appl.*, 52 (3).
- Andrus R. D., Stokoe K. H., II (2000)** "Liquefaction resistance of soil from shear wave velocity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, n. 11, pp. 1015-1025
- Bardet J.P., Ichii K. & Linn C.H. (2000)** – *EERA, A computer program for Equivalent Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits*. University of Southern California.
- Barsanti P., D'Intinosante V., Ferrini M. & Signanini P. (2000)** – Note sulla sismica a rifrazione con onde di taglio per la caratterizzazione sismica dei terreni. Atti del XIX Convegno Nazionale GNGTS, Roma.
- Boaga J. & Iliceto V. (2009)** – Metodologie per la definizione di modelli di vs del sottosuolo e loro influenza nella risposta sismica di sito. Atti del workshop in geofisica, Mus. Civ. Rovereto. 11 Dicembre 2009
- Bramerini, F., Di Pasquale, G., Naso, G. & Severino, M. (2008)**. – Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica. Vol. 1 (Parti I e II) e Vol. 2 (Parte III). Dipartimento Protezione Civile, Conferenza Regioni e Province Autonome.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2009a)** – Vs30 estimates using constrained H/V measurements. *Boll. Seism. Soc. Am.*, 99, 761-773.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2009b)** – The effect of velocity inversion on H/V. *Pure Appl. Geophys.*, 166, 567-592.
- Chinese Building Code (1974)** "Earthquake resistant design code for industrial and civil buildings", TJ11-74, China Build. Publ. House, Pechino
- Crespellani T., Nardi R., Simoncini C. (1988)** "La liquefazione del terreno in condizioni sismiche" Zanichelli
- Gasparini M. & Signanini P. (1983)** – Il metodo "down-hole" per la misura delle onde sismiche delle terre. *Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia*, n°4,35-37.
- Gruppo di lavoro MS (2008)** - Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Dvd.
- Idriss I.M. & Sun J.I. (1992)** – **SHAKE91**: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. User's Guide, University of California, Davis, California, 13 pp.
- Idriss, I. M. e Boulanger, R.W. (2004)** - Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes, *Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE* pp 32 – 56
- Iervolino I., Galasso C. & Cosenza E. (2010)** - **REXEL**: computer aided record selection for codebased seismic structural analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8:339-362.
- Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S. Yasuda S. Sato H. (1982)** "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods" III Int. Conf. On Microzon., San Francisco
- Kottke Albert R. & Rathje Ellen M. (2008)** – Technical Manual for Strata - PEER 2008/10
- Kramer S.L. (1996)** - *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, pp. 652.
- Lanzo G. & Silvestri F. (1999)** – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius.

- Mucciarelli M. & Gallipoli M.R. (2011)** – A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. *Boll Geofis. Teorica Appl.*, 42, 255-266.
- Nakamura Y. (1989)** - A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst.*, 30, 25–30.
- Nogoshi M. & Igarashi T. (1970)** – On the propagation characteristics of microtremor. *J. Seism. Soc. Japan*, 23, 264-280.
- NTC2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni.** Decreto 14 gennaio 2008 del Ministero delle Infrastrutture. Supplemento Ordinario della G.U. n. 29 del 4.02.2008
- Palmer D. (2001)** – Imaging refractors with the convolution section. *Geophysics* 66, 1582-1589.
- Rainone M.L., Signanini P. & D’Intinosante V. (2003)** – Metodi geofisici integrati per la ricostruzione del sottosuolo e per la caratterizzazione dinamica dei terreni negli studi di microzonazione sismica: l’esempio di Pieve Fosciana (LU). *Quaderni di Geologia Applicata*, 10 (1). pp. 75-88.
- Rainone M.L., Signanini P., Pizzica F., Madonna R., Torrese P. D’Intinosante V. & Ferrini M. (2007)** – Applicabilità delle tecniche di sismica a rifrazione in onde SH per la valutazione della risposta sismica locale. XII Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Pisa 10-14 giugno 2007.
- Schnabel P.B., Lysmer J. & Seed H.B. (1972)** – **SHAKE**: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. (1982)** - Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute.
- SESAME Project (2004)** - Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements processing and interpretation, WP12, deliverable no.D23.12.
- Vessia N., Venisti N. (2011)**: Liquefaction damage potential for seismic hazard evaluation in urbanized areas. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31 (2011) 1094–1105.