

**Dott. Geol. Mario Chizzoni**  
Via Germania n° 45  
04100 Latina

Cell. 3358403142  
Uff. 0773624773

# Relazione Geologica

D.G.R.L. 17-12-2010 N° 595 PROGRAMMA DI RIQUALIFICAZIONE URBANA PER ALLOGGI A CANONE SOSTENIBILE. RIQUALIFICAZIONE E RECUPERO DI UN EDIFICIO DI CIVILE ABITAZIONE E DELL'AREA CIRCOSTANTE

## *Comune di SONNINO*

### Indagini eseguite:

- Misure sismiche tipo MASW come da D.G.R. n° 10 del 13-01-2012
- Prova penetrometrica DPSH
- Misure di frequenza tipo HVSR
- Risposta sismica locale

### STIMA DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Strato	Spessore	Peso	Peso eff.	Nspt	Qc	Fi	C	Cu	E	G	Eed
	(m)	(daN/m <sup>3</sup> )	(daN/m <sup>3</sup> )		(daN/cm <sup>2</sup> )	(°)	(daN/cm <sup>2</sup> )				
1	1.8	1657.32	1833.84	3.91	7.67	22.7	-	0.24	38.34	229.66	17.59
2	1	1902.49	2088.82	9.12	17.89	26.7	-	0.61	89.44	509.13	41.03
3	0.6	2079.01	2186.88	25.3	49.70	34.5	-	1.68	248.50	1330.49	114.01

**Committente:**  
ATER  
VIA SAN GASPARE

Latina, 05/2014

Dr. Mario Chizzoni



## Premessa

A seguito dell'incarico ricevuto si redige la presente indagine geologica per descrivere le caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche di un lotto di terreno ubicato in Comune di Sonnino.

Per la definizione dei parametri geotecnici dei terreni di fondazione, si è ritenuto effettuare un'indagine sismica con MASW E HVSR per determinare lo spessore di riporto in corrispondenza del futuro ascensore e un muro di contenimento.

Tutte le operazioni di campagna e la loro elaborazione sono state eseguite secondo quanto richiesto dal D.M. del 11/03/1988 "norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione", e secondo le norme e raccomandazioni dell'AGI (Associazione Geotecnica Italiana).

Nel complesso l'analisi delle caratteristiche stratigrafiche e geologiche in senso lato dei terreni interessati dal presente lavoro si è svolta nelle seguenti fasi:

- Analisi bibliografica dei dati relativi alla geologia ed alle caratteristiche stratigrafiche, idrogeologiche e strutturali dell'area, ricavati da ricerche e studi eseguiti in precedenza nella zona.
- Prova penetrometrica DPSH
- Indagini sismiche, di comprovata validità per categoria di sottosuolo
- Risposta sismica locale
- Misure di frequenza fondamentale tipo HVSR
- Considerazioni conclusive.
- Allegati (cartografie)





## Inquadramento geologico

La storia geologica dell'area in studio è solo un dettaglio di un processo geodinamico di scala regionale.

Le profonde trasformazioni nel corso del tempo si traducono in cambiamenti sostanziali nella paleogeografia degli ambienti con conseguente sviluppo di facies diverse.

Quindi già a partire dal Mesozoico si determina la formazione del grosso sistema orografico carbonatico con altitudini fino a circa 1500 metri, che è appunto la catena dei Monti Lepini-Ausoni-Aurunci e la formazione di depressioni che bordano le zone più rilevate, quali la Valle Latina, la Pianura Pontina, la Piana di Fondi e del Garigliano, che vengono ricoperte da sedimenti continentali, fluvio-lacustri e piroclastici.

Il sollevamento della catena fino alle quote attuali sembra essere un evento molto recente avvenuto per gran parte nel corso del quaternario, dovuto probabilmente ad un fenomeno di natura essenzialmente isostatica tuttora in corso, legato ad un riequilibrio di masse.

L'eustatismo che nel quaternario ha determinato sensibili variazioni del livello di base del reticolo idrografico ha favorito l'erosione carsica e conseguente formazioni di cavità ipogee che caratterizzano tutta la catena dei Volsci.

Le successioni stratigrafiche in tutta la Piana risultano quindi fortemente condizionate dai due fenomeni suddetti: il sollevamento della catena dei Volsci con la conseguente subsidenza dell'area pontina, e le continue variazioni eustatiche del livello marino.

Questi due fenomeni hanno determinato una deposizione differenziata di sedimenti terrigeni tanto da rendere particolarmente complessa la ricostruzione delle serie stratigrafiche.

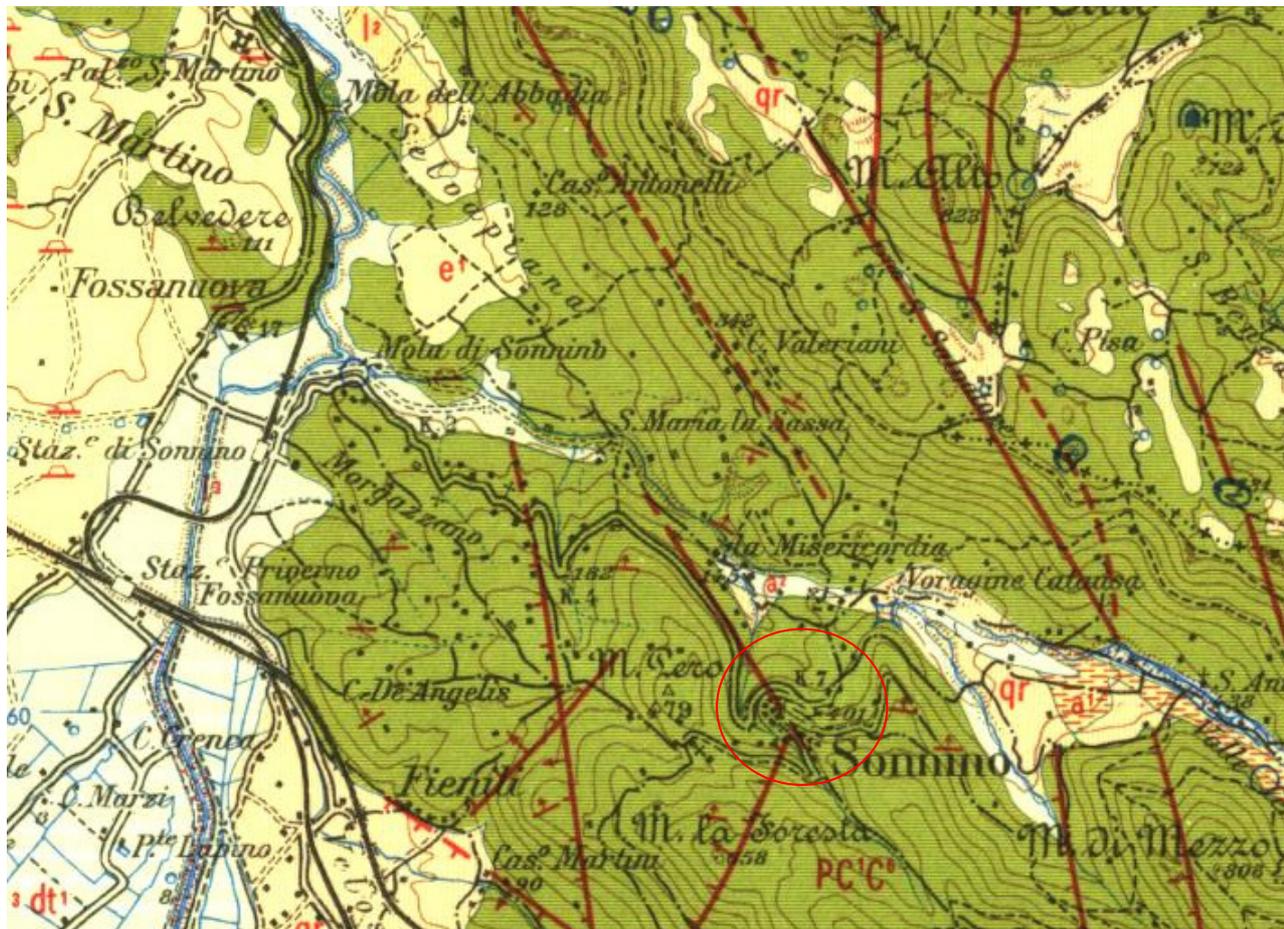
Verso la costa i terreni affioranti sono di natura essenzialmente sabbiosa mentre nelle colmate di depressioni bonificate, possono trovarsi sedimenti limno-palustri argillosi con abbondante componente torbosa.

Nell'area oggetto di studio i litotipi in affioramento sono rappresentati essenzialmente da terreni argillosi e limi sabbiosi con argille e torbe residuali rossicce con consistenze variabili con la profondità da inconsistenti a molto consistenti.

L'intera area, geomorfologicamente omogenea presenta delle scarse caratteristiche litotecniche superficiali che si traducono in condizioni di instabilità per alcune abitazioni poste nelle vicinanze.



**Stralcio ripreso dalla Carta Geologica d'Italia, Foglio 159 FROSINONE, Scala 1:100 000**



# Legenda

	<b>dc</b> <b>dt<sup>1</sup></b>	Discerliche (dc), scavato di canali di bonifica medioevale e fino al 17° secolo (Rio Martino; arginature recenti: facies terroso-torbosa e sabbiosa con molluschi salmastri. Detriti di falda (dt) per lo più incoerenti, localmente franosi. Alluvioni recenti terrazzate (at) e alluvioni attuali.
	<b>at</b> <b>lt</b> <b>et</b>	Suoli e terre umifere nere, colmate per bonifica (at), con molluschi dulcicoli ( <i>Balimus</i> sp., <i>Physa</i> sp., <i>Neritina</i> sp.). Sedimenti limno-palustri argillosi (lt), lenti di torba, marne diatomifere, con: Characeae, molluschi dulcicoli ( <i>Balimus</i> sp., <i>Limnaea</i> sp., <i>Planorbis</i> sp., <i>Cycas</i> sp., <i>Unio</i> sp.). Dune consolidate (et), sabbie grigie (= tumolelli), sbarramento di lagune (Lago di Ceprolace) con molluschi terrestri ( <i>Helicella</i> sp., <i>Gochicella</i> sp., <i>Papillifera</i> sp.).
	<b>qr</b> <b>er</b> <b>ec</b>	Terre rosse (qr), talora miste a materiali piroclastici rimaneggiati, sul fondo di doline e depressioni carsiche; conoidi detritico-terrose poco coerenti. Sabbie gialle e rosse, eoliche, sciolte ("duna antica" Auct.); orizzonte illuviale con croste ferrifere (= orstein); livelli e lenti di ciottolini eolizzati; in superficie industria del Paleolitico superiore (Aurignaciano); potente duna di addossamento a Priverno-Fossanova (er). Sabbie con lenti di ciottoli silicei (ec).
	<b>tr<sup>1</sup></b> <b>lt</b> <b>dt<sup>2</sup></b> <b>tr<sup>2</sup></b> <b>tl</b>	Traverlini (tr <sup>1</sup> ) in relazione a sorgenti sulfidriche (contrada Roana presso Frosinone). Argille lacustri (lt) con ostracodi di acqua dolce e frammenti di gasteropodi, lenti di argille sabbiose, sabbie e marne incoerenti a <i>Planorbis</i> sp., passanti superiormente a (er). Breccie calcaree di pendio (dt <sup>2</sup> ) a cemento rossastro, con filoncelli e croste di calcite spatica; conoidi oniche, (dt <sup>2</sup> ) facies brecciosa a cemento rossastro, con <i>Elephas antiquus</i> RAUC e CAUL., (Sezze Romano); orizzonti travertinosi (tr <sup>2</sup> ) associati a livelli di puddinghe calcaree con intercalate lufiti leucitiche grigie (tl) a Priverno.
	<b>tr<sup>3</sup></b> <b>qc</b> <b>lt</b> <b>bt</b>	Tufi incoerenti e pozzolane (tr <sup>3</sup> ) di colore rosso scuro, talora con grossi cristalli di pirosseno. Gli affioramenti localizzati sul versante SW dei Lepini sono da riferire, almeno in parte, al vulcanismo dei Colli Albani. Ciottolame calcareo (qc) incoerente, o poco cementato, con spessore variabile fino a 30 m. Limo calcareo lacustre (lt), giallo, straterellato, con intercalazioni travertinoso e inclusi piroclastici (Fosso di Monte Acuto e Valle di Patrica). Lave tefritico-leucitiche (bt) con pirosseni di tipo augitico, labradorite e ossidi di ferro; rara l'olivina e il sanidino; fra gli accessori sono presenti magnetite, apatite e rutile. Lave basaltiche (bt) con prevalenza di labradorite, augite e olivina.
	<b>tr<sup>4</sup></b> <b>tt</b> <b>t</b>	Tufi pomicei straterellati (tr <sup>4</sup> ) poco coerenti, tufi a grana minuta, tufi con inclusi di arenaria miocenica (a Pofi, sede delle più estese manifestazioni del vulcanismo ernico). Tufi litoidi (tt) grigi e giallastri, prevalentemente a pasta sottile, con livelli ad abbondanti elementi di calcari, arenarie, noduli argillosi e piccole scorie. Tufi grigi o giallastri compatti (t) d'aspetto brecciato per l'abbondanza di frammenti di calcari e dolomie (zona di Patrica); al Fosso di Monte Acuto contengono grossi cristalli e aggregati cristallini di pirosseni e miche.
	<b>a<sup>1</sup></b> <b>qr<sup>1</sup></b> <b>lt</b> <b>p</b>	Alluvioni antiche terrazzate (a <sup>1</sup> ), a quote anche notevoli e conoidi antiche a ciottolame calcareo e cemento rossastro (Valle Latina). Sabbie sottili (qr <sup>1</sup> ), quarzoso-micacee, chiare, con orizzonte a <i>Cladocora</i> sp.; calcarizzato superiormente; facies marina litoranea a <i>Loripes lacteus</i> (LANS), <i>Chlamys varia</i> (LANS), <i>Tellina planata</i> (LANS), <i>Ostrea edulis</i> (LANS), ecc. (Pianura di Fondi). Sabbie e limi (a) con molluschi marini ( <i>Venerupis senescens</i> (POBI), <i>Cerastoderma lamarchi</i> (KIEWITZ)). Conglomerato poligenico (p) ad elementi prevalentemente arenacei e con ciottoli di calcari marnosi, di biocalcareni e macroforaminiferi e di rocce intrusive acide; passa a sabbioni rossi ferritizzati che poggiano indifferentemente su formazioni prequaternarie.
	<b>ce</b> <b>me</b> <b>m<sup>1</sup></b> <b>m<sup>2</sup></b>	Argille grigie o varicolori, talora scagliose (ce), con olistoliti di calcari marnosi, calciruditi a macroforaminiferi paleogenici, calcari con selce, "scaglia" eocenica e lembi delle serie sottostanti; sono intercalate nella parte alta di (M <sup>1</sup> ) e raramente poggiano su calcari mesozoici (Monte Caccume); argille varicolori e livelli calcarei e marnosi con straterelli manganeseiferi (Carpinato Romano). Argille, argille marnose con alternanze di arenarie grigie e giallastre (M <sup>1</sup> ) gradate in banchi, con impronte di fondo; contengono: <i>Globotulita ventriosa</i> OGNIBEN, <i>Bolivinaoides miocenica</i> GIANOTTI, <i>Cibicides italicus</i> DI NAPOLI ed altri foraminiferi. A Nord del Monte Sisenno sono presenti intercalazioni di calcari e briozoi e litolami (me) e di calcari marnosi con fucoidi: TORTONIANO. Calcari marnosi e marne a tessitura scagliosa (M <sup>2</sup> ), con macrofauna a <i>Orbulina</i> sp., <i>Globosquidina altipina</i> (CASS. e SART.), <i>Globotulita menardi</i> (POMI), <i>Bolinita arta</i> MACCAG., <i>Uvigerina auberiana</i> (POMI), alla base calcareni glauconitiche con piccole coproliti [osfetiche ("fecal pellets")]. TORTONIANO-ELVEZIANO.
	<b>pc<sup>1</sup></b> <b>c<sup>1</sup></b> <b>c<sup>2</sup></b> <b>c<sup>3</sup></b>	Calcari e briozoi e litolami (M <sup>1</sup> ), calcareni, calciruditi e breccie calcaree a <i>Miogyrina</i> sp., <i>Amphistegina</i> sp., <i>Heterostegina</i> sp., anellidi, pettinidi, ostracodi, in trasgressione sui terreni sottostanti. TORTONIANO-LANGHIANO. Calcari bianchi e avane (PC <sup>1</sup> ), a pasta fine o microgranulari, stratificati, con rare intercalazioni di calcari dolomitici. Macrofauna rappresentata da rudiste e gasteropodi. Nella parte alta livelli paleoceni, con: <i>Coskinolina</i> sp., <i>Spirulina</i> sp., <i>Keramophaera tergestina</i> (STACHE) Daniano. Nella parte bassa e media livelli con <i>Aceroidella conica</i> TABINACCI, <i>Dicyclina</i> sp., <i>Cuneolina pavonia parva</i> HENSON, <i>Cladocypina fallax</i> REICHEL. Nell'altoliteva stadii COSSALONGO-Maestrichiano-Cenomaniano sup. Raramente facies detritica ad orbitoli (Morolo). DANIANO-CENOMANIANO SUPERIORE. Calcari nocciola (C <sup>1</sup> ), a pasta fine o microgranulari, stratificati, con alternanze dolomitiche e intercalazioni di livelli oolitici e di micriti straterellate. Contengono <i>Requienia</i> sp., <i>Toucasia</i> sp., <i>Cuneolina pavonia parva</i> HENSON, <i>Bacinnella irregularis</i> RADDOIC, <i>Orbitolinidae</i> , <i>Salpingoporella danarica</i> RADDOIC, <i>Cuneolina</i> "composita" SART. e CASC., <i>Cuneolina laurentii</i> SART. e CASC., <i>Aetionoporella podolica</i> (ALTRI). È presente un livello discontinuo argillo-marnoso verdastro ad <i>Orbitolina</i> sp. e resti di <i>Charophyta</i> sp. CENOMANIANO INFERIORE-NEOCOMIANO INFERIORE. Calcari nocciola, bianchi e grigi (C <sup>2</sup> ), a pasta fine o microgranulari, stratificati, con intercalazioni dolomitiche e lenti e noduli selciferi irregolarmente distribuiti (fra M. Castellone e Roccaforte). Contengono: <i>Salpingoporella annulata</i> CAROZZI, <i>Clypeina jurassica</i> SART., <i>Banksia striata</i> (CAROZZI), Tortoniano; <i>Cladocypina mitabalis</i> REICHEL, <i>Kararaia palatinensis</i> HENSON, Kimmeridgiano-Calluviano; <i>Pfenderina salernitana</i> SART. e CASC., <i>Protopenopsis striata</i> WITTMICHEN, <i>Sellioporella donzelii</i> SART. e CASC., Batoniano-Aeleniano. A Bassiano resti di flora continentale a <i>Brachyphyllum</i> . MALM-DOGGER.

## Idrogeologia

I caratteri idrogeologici del territorio dipendono dai rapporti di giacitura che si sono venuti a determinare tra i diversi sistemi litologici.

La parte emersa della struttura carbonatica lepino-ausono-aurunca, interessata da un vistoso processo carsico è sede di una imponente falda acquifera che alimenta la parte sedimentaria della Pianura Pontina. La permeabilità delle formazioni calcaree è di natura secondaria, dovuta cioè allo stato di fessurazione e carsismo.

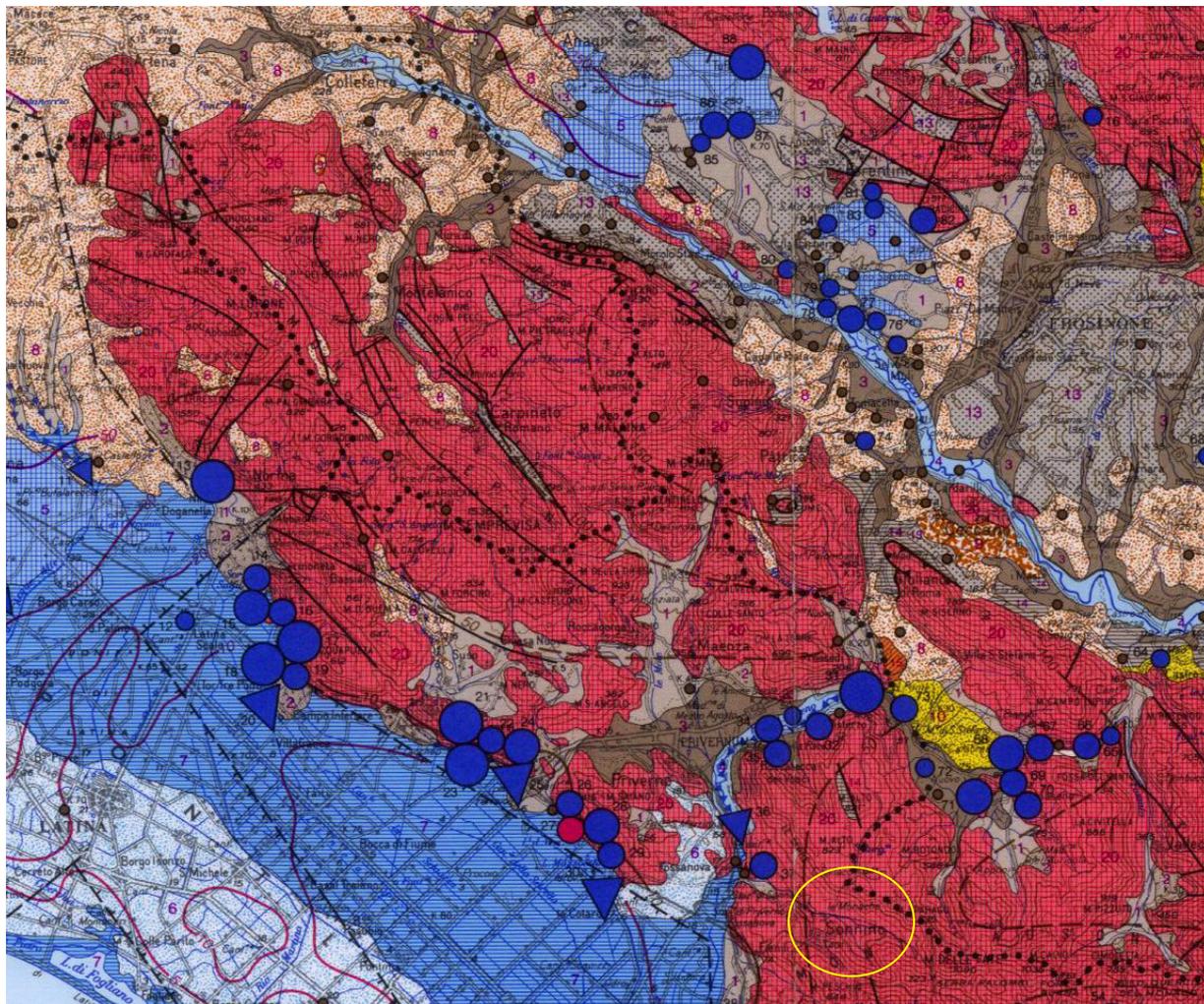
I depositi plio-quadernari presentano permeabilità variabile in funzione della granulometria e della natura litologica.

Non si può escludere una continuità idraulica laterale tra l'acquifero regionale del complesso carbonatico e gli orizzonti più permeabili della piana, ubicati ai margini della dorsale, dove sono presenti numerose sorgenti. L'acquifero carsico lepino-ausono viene alimentato dal processo di infiltrazione che si sviluppa in modo prevalentemente verticale, tanto da assicurare una ricarica sufficientemente omogenea sull'intera idrostruttura.

In particolare l'area oggetto di studio si caratterizza, dal punto di vista idrogeologico per la presenza di suoli e terre umifere sottostante gli orizzonti superficiali che è sede di una unità idrogeologica denominata nella Carta Idrogeologica della Regione Lazio "Complesso dei depositi fluvio lacustri". Questi ultimi determinano nel sottosuolo, alternandosi con gli orizzonti permeabili, sistemi multi-acquiferi con circolazioni idriche localmente separate. In questa zona il livello statico della falda idrica misurato è variabile tra -1.50 m e - 2.00 m s.l.m. La fluttuazione stagionale è dell'ordine dei 2.00 m e le misure vengono riferite al mese di marzo in cui tale livello risulta essere tra i valori massimi della stagione piovosa.



**Stralcio ripreso dalla “Carta Idrogeologica del Lazio”, Scala 1:250 000**



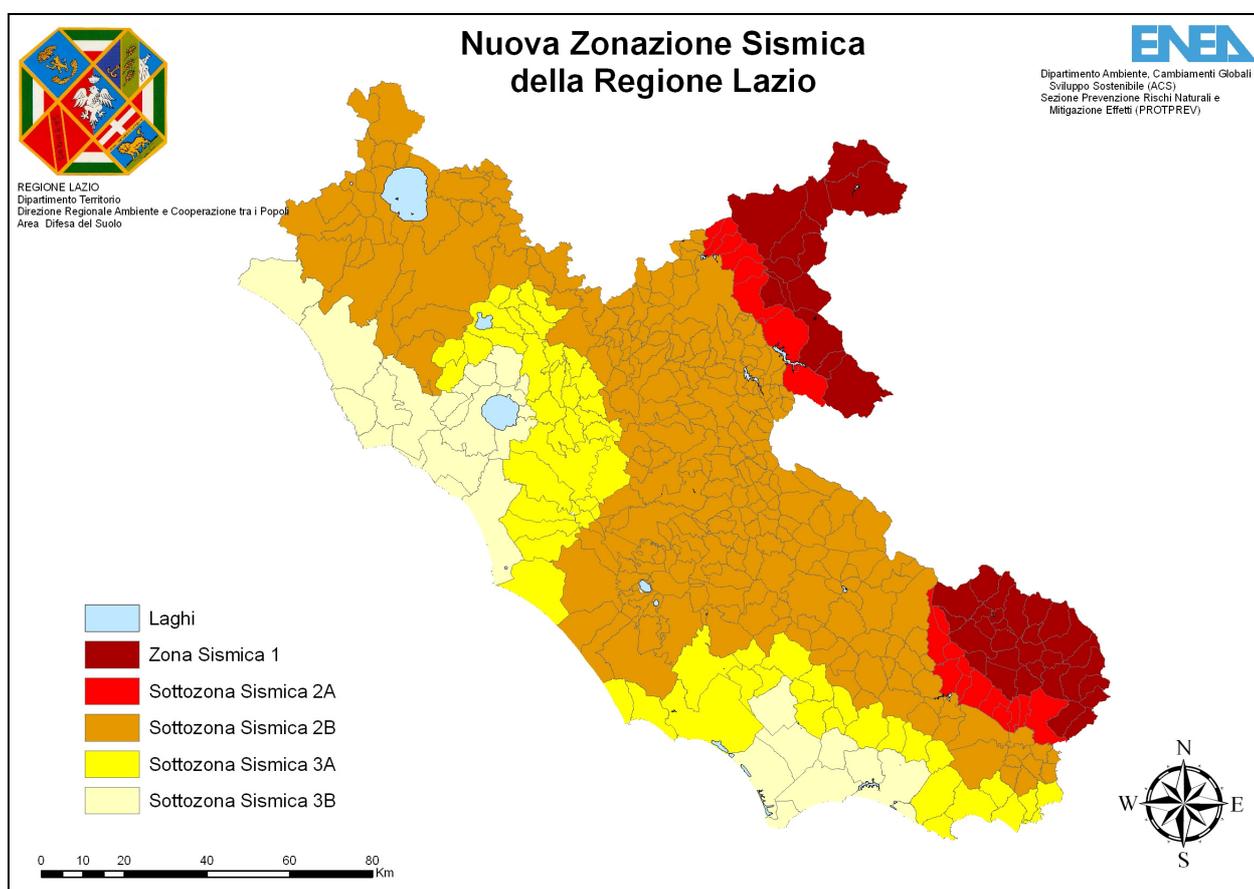
**LEGENDA**

	Complesso di copertura recente		Isopieze acquiferi carbonatici
	Complesso detritico		Isopieze acquiferi vulcanici
	Complesso dei travertini		Isopieze acquiferi alluvionali e costieri
	Complesso delle sabbie dunari		Faglia
	Complesso dei depositi fluvio-palustri		Faglia normale
	Complesso delle piroclastici		Faglia normale presunta
	Complesso di piattaforma carbonatica		Faglia inversa e sovrascorimento
			Sorgente

## Sismicità dell'area

L'ultima riclassificazione sismica è relativa alla **DELIBERA DI GIUNTA REGIONALE n. 387 del 22 Maggio 2009** (*Nuova classificazione sismica del territorio della Regione Lazio in applicazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3519 del 28 Aprile 2006 e della DGR Lazio 766/03*) che ha inserito il comune di Sonnino in **Zona 3 – Sottozona A** (fig. 9); quindi con un' *accelerazione di picco su terreno rigido* (accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni "ag" – riferimento elaborato all'84° percentile) compresa tra i seguenti valori:

$$0.10 \leq ag < 0.15$$



**Fig. 9** – Stralcio dalla Mappa della Nuova Zonazione Sismica della Regione Lazio *DGR Lazio 387/2009*



ZONA SISMICA	SOTTOZONA SISMICA	ACCELERAZIONE CON PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO PARI AL 10% IN 50 ANNI ( $a_g$ )
1		$0.25 \leq a_g < 0,278g$ (val. Max per il Lazio)
2	A	$0.20 \leq a_g < 0.25$
	B	$0.15 \leq a_g < 0.20$
3	A	$0.10 \leq a_g < 0.15$
	B	(val. min.) $0.062 \leq a_g < 0.10$

Tabella 3 - Suddivisione delle sottozone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido utilizzate per lo scenario di riclassificazione sismica della Regione Lazio.

La nuova riclassificazione si basa su tre zone sismiche a differenza delle quattro della precedente classificazione.

### Zona sismica 1

E' la più gravosa in termini di pericolosità sismica, non presenta sottozone, in quanto il valore di  $a_g$  (accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni). max previsto per il Lazio non giustifica ulteriori suddivisioni ed è compreso tra 0,25 e 0,27

### ▪ Zona sismica 2

E' suddivisa in due sottozone

#### ▪ Sottozona Sismica 2A

Il valore di  $a_g$  (accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni). è compreso tra 0,20 e 0,25

#### ▪ Sottozona Sismica 2B

Il valore di  $a_g$  (accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni). è compreso tra 0,15 e 0,20

### ▪ Zona sismica 3

E' suddivisa in due sottozone

#### ▪ Sottozona Sismica 3A

Il valore di  $a_g$  (accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni). è compreso tra 0,10 e 0,15

#### ▪ Sottozona Sismica 3B

Il valore di  $a_g$  (accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni). è compreso tra 0,062 e 0,10, valore minimo per il Lazio.



## NUOVA CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO DELLA REGIONE LAZIO

Con l'emanazione dell'OPCM 3519/06 lo Stato ha definito i criteri nazionali che ciascuna Regione deve seguire per l'aggiornamento della classificazione sismica del proprio territorio.

Il Lazio è caratterizzato da una sismicità che si distribuisce lungo fasce sismiche omogenee (*zone sismogenetiche*), allungate preferenzialmente secondo la direzione appenninica NW-SE, con centri sismici sia all'interno alla regione sia esterni. Quasi asismica risulta essere la provincia di Latina e poco sismica la zona costiera della provincia di Viterbo.

Storicamente, terremoti di media intensità (*fino all'VIII° MCS/MSK*), ma molto frequenti, avvengono nell'area degli apparati vulcanici dei Colli Albani e Monti Vulsini, ed in alcune aree del Frusinate e del Reatino; terremoti molto forti (*fino al X-XI° MCS/MSK*), ma relativamente poco frequenti, avvengono invece nelle conche di origine tettonica della provincia di Rieti e del basso Frusinate.

Negli studi per la valutazione delle azioni sismiche è indispensabile considerare la pericolosità sismica di base, intesa come la probabilità che un evento sismico di una certa Magnitudo avvenga in un'area secondo un determinato periodo di ritorno.

La Pericolosità sismica di base è definita calcolando il valore atteso di uno o più parametri che descrivono il terremoto su terreno rigido e compatto (*accelerazione del moto del suolo, intensità al sito, spettro di sito*), ed attraverso tali valori è possibile predisporre una classificazione sismica del territorio, finalizzata alla pianificazione territoriale e/o dell'emergenza ed alla programmazione delle attività di prevenzione.

Quello che viene studiato su area vasta o regionale può essere trasferito per studi a scala di dettaglio o locale, definendo la Risposta Sismica Locale (*RSL*), che è legata a specifiche condizioni geomorfologiche dei siti che possono influenzare significativamente la risposta sismica locale.

Con l'OPCM 3519/06 l'intero territorio nazionale veniva suddiviso in 4 zone sulla base di un differente valore dell'accelerazione di picco *ag* su terreno a comportamento rigido, derivante da studi predisposti dall'INGV-DPC. Gli intervalli di accelerazione (*ag*) con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni sono stati rapportati alle 4 zone sismiche indicate dall'OPCM 3519/06 (*tab 1*).

La nuova riclassificazione si basa soltanto su 3 Zone Sismiche a differenza delle quattro della precedente classificazione del 2003, con la scomparsa della zona sismica 4. La Zona Sismica 1, quella più gravosa in termini di pericolosità sismica, non presenta sottozone in quanto il valore di *ag* max previsto per il Lazio non giustifica ulteriori suddivisioni. Pertanto

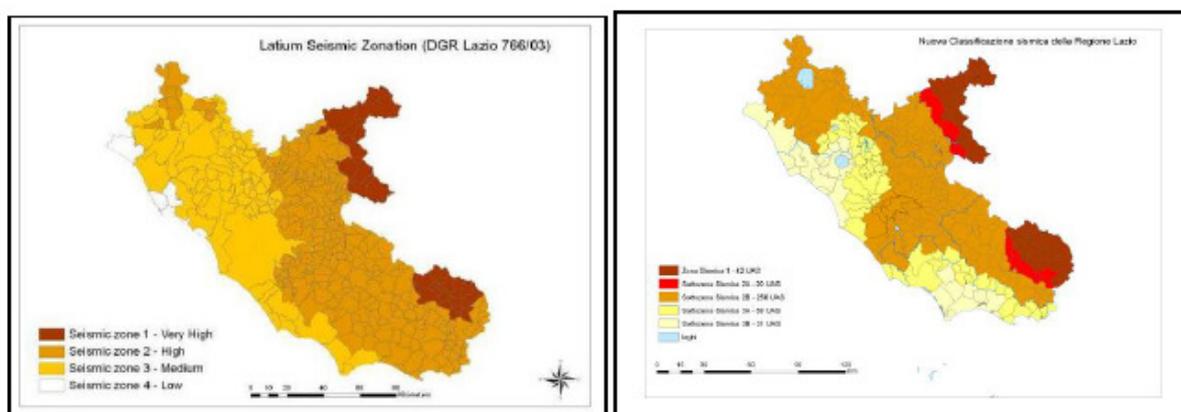


la creazione di sottozona ha interessato soltanto le zone sismiche 2 e 3, con la suddivisione in 4 sottozone sismiche (dalla 2A, ovvero la maggiore sottozona della zona sismica 2, fino alla sottozona sismica 3B, corrispondente alla sottozona meno pericolosa della zona sismica 3) come si evince dalla Tab. 3. Nella Regione Lazio, infatti, i valori di accelerazione  $a_g$  dell'elaborato all'84°percentile dell'INGV-DPC sono compresi fra 0.278g e 0.065g, ai quali si possono correlare empiricamente soltanto tre zone sismiche e quattro sottozone, escludendo quindi totalmente la zona sismica 4.

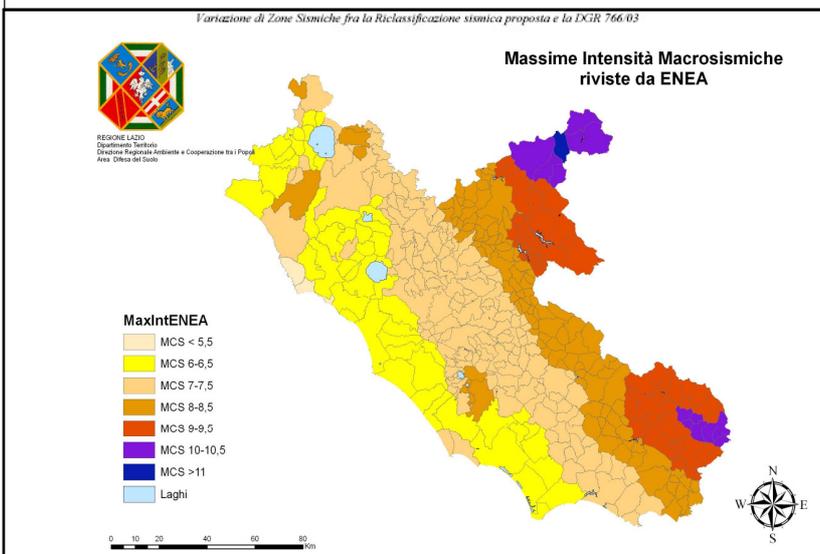
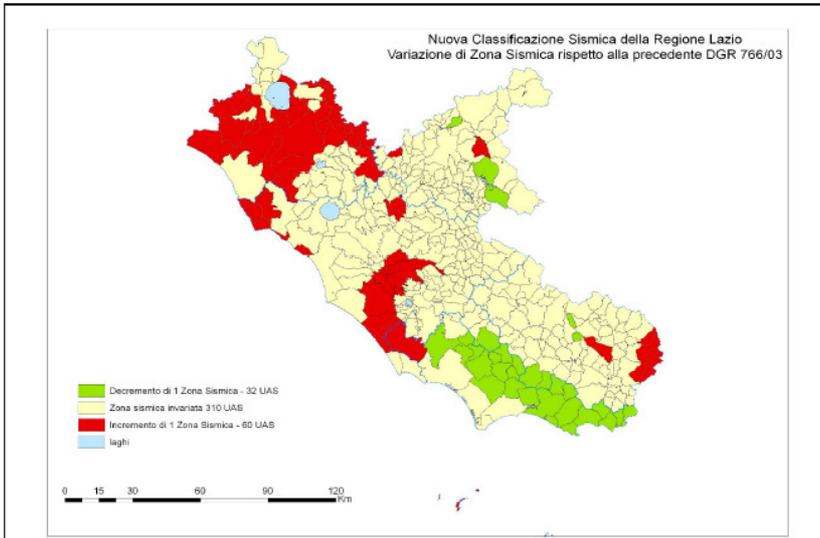
ZONA SISMICA	SOTTOZONA SISMICA	ACCELERAZIONE CON PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO PARI AL 10% IN 50 ANNI ( $a_g$ )
1		$0.25 \leq a_g < 0,278g$ (val. Max per il Lazio)
2	A	$0.20 \leq a_g < 0.25$
	B	$0.15 \leq a_g < 0.20$
3	A	$0.10 \leq a_g < 0.15$
	B	(val. min.) $0.062 \leq a_g < 0.10$

Tabella 3 - Suddivisione delle sottozone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido utilizzate per lo scenario di riclassificazione sismica della Regione Lazio.

Gran parte dei Comuni del Lazio presentano valori  $a_g$  che ricadono interamente in una determinata zona o sottozona sismica, per cui è stato assegnato direttamente il valore della zona/sottozona corrispondente (Comune a zona fissa). Il problema si è posto per quei Comuni i cui valori di accelerazione di picco variavano fra due zone o sottozone diverse. Per cercare di superare questo problema si è operato in prima istanza con il metodo della superficie impegnata, assegnando al Comune il valore della zona/sottozona sismica che incidesse sul proprio territorio con una estensione maggiore dell'80%, sempre che in questa area fossero i centri abitati maggiori.



Confrontando la Classificazione del 2003 con quella proposta (*foto in basso*) si osserva in linea generale un innalzamento della sicurezza con l'aumento dei Comuni in Zona Sismica 1, una sostanziale continuità del dato nei Comuni in Zona Sismica 2 e in Zona 3, anche per la divisione del Comune di Roma nei suoi 19 Municipi (*Tab. 2*).



## Caratteristiche geotecniche dei terreni

Sono state effettuate le prove penetrometriche dinamiche per determinare le caratteristiche geotecniche del terreno in corrispondenza del sito esaminato. La prova consiste nell'infiggere un'asta a punta conica alla profondità interessata battendo con un maglio di peso standard (63,50 Kg) da un'altezza prestabilita (75 cm) e successivamente contare il numero di colpi necessari per fare avanzare l'asta per una profondità massima di 15 m. La lettura Nspt è rappresentata dalla somma dei colpi ogni 20 cm di avanzamento.

Vengono di seguito riportati le metodologie adottate e i dati scaturiti dalla prova.

Dalla prova è stato possibile individuare vari strati con comportamenti geotecnici diversi.



**Penetrometro dinamico pesante (DPSH) PENNI 63**



## Dichiarazione di Conformità

In riferimento alla norma italiana sperimentale

EUROCODICE 7

UNI ENV 1997-3

Si dichiara che

Lo strumento DPSH 63 COMPAC

Denominazione Penetrometro superpesante

Codice Prodotto 19.00.00

È costruito in conformità alle specifiche richieste dalla norma in oggetto

Compac SRL

Via Metauro 19 61029 Canavaccio di Urbino



PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

Committente:  
Cantiere:  
Località:

**Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)**

Rif. Norme	DIN 4094
Peso Massa battente	63,5 Kg
Altezza di caduta libera	0,75 m
Peso sistema di battuta	8 Kg
Diametro punta conica	50,46 mm
Area di base punta	20 cm <sup>2</sup>
Lunghezza delle aste	1 m
Peso aste a metro	6,3 Kg/m
Profondità giunzione prima asta	0,80 m
Avanzamento punta	0,20 m
Numero colpi per punta	N(20)
Coeff. Correlazione	1,504
Rivestimento/fanghi	No
Angolo di apertura punta	90 °

**OPERATORE**

**RESPONSABILE**



**PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE CONTINUE**  
**(DYNAMIC PROBING)**  
**DPSH – DPM (... scpt ecc.)**

NOTE ILLUSTRATIVE - DIVERSE TIPOLOGIE DI PENETROMETRI DINAMICI

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica (per tratti consecutivi  $\delta$ ) misurando il numero di colpi N necessari.

Le Prove Penetrometriche Dinamiche sono molto diffuse ed utilizzate nel territorio da geologi e geotecnici, data la loro semplicità esecutiva, economicità e rapidità di esecuzione.

La loro elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica consente di "catalogare e parametrizzare" il suolo attraversato con un'immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con sondaggi geognostici per la caratterizzazione stratigrafica.

La sonda penetrometrica permette inoltre di riconoscere abbastanza precisamente lo spessore delle coltri sul substrato, la quota di eventuali falde e superfici di rottura sui pendii, e la consistenza in generale del terreno.

L'utilizzo dei dati, ricavati da correlazioni indirette e facendo riferimento a vari autori, dovrà comunque essere trattato con le opportune cautele e, possibilmente, dopo esperienze geologiche acquisite in zona.

Elementi caratteristici del penetrometro dinamico sono i seguenti:

- peso massa battente M
- altezza libera caduta H
- punta conica: diametro base cono D, area base A (angolo di apertura  $\alpha$ )
- avanzamento (penetrazione)  $\delta$
- presenza o meno del rivestimento esterno (fanghi bentonitici).

Con riferimento alla classificazione ISSMFE (1988) dei diversi tipi di penetrometri dinamici (vedi tabella sotto riportata) si rileva una prima suddivisione in quattro classi (in base al peso M della massa battente) :

- tipo LEGGERO (DPL)
- tipo MEDIO (DPM)
- tipo PESANTE (DPH)
- tipo SUPERPESANTE (DPSH)

Classificazione ISSMFE dei penetrometri dinamici:

Tipo	Sigla di riferimento	peso della massa M (kg)	prof.max indagine battente (m)
Leggero	DPL (Light)	$M \leq 10$	8
Medio	DPM (Medium)	$10 < M < 40$	20-25
Pesante	DPH (Heavy)	$40 \leq M < 60$	25
Super pesante (Super Heavy)	DPSH	$M \geq 60$	25



## penetrometri in uso in Italia

In Italia risultano attualmente in uso i seguenti tipi di penetrometri dinamici (non rientranti però nello Standard ISSMFE):

- DINAMICO LEGGERO ITALIANO (DL-30) (MEDIO secondo la classifica ISSMFE)  
massa battente  $M = 30$  kg, altezza di caduta  $H = 0.20$  m, avanzamento  $\delta = 10$  cm, punta conica ( $\alpha=60-90^\circ$ ), diametro  $D = 35.7$  mm, area base cono  $A=10$  cm<sup>2</sup> rivestimento / fango bentonitico :

talora

previsto;

- DINAMICO LEGGERO ITALIANO (DL-20) (MEDIO secondo la classifica ISSMFE)  
massa battente  $M = 20$  kg, altezza di caduta  $H=0.20$  m, avanzamento  $\delta = 10$  cm, punta conica ( $\alpha = 60-90^\circ$ ), diametro  $D = 35.7$  mm, area base cono  $A=10$  cm<sup>2</sup> rivestimento / fango bentonitico :

talora

previsto;

- DINAMICO PESANTE ITALIANO (SUPERPESANTE secondo la classifica ISSMFE)  
massa battente  $M = 73$  kg, altezza di caduta  $H=0.75$  m, avanzamento  $\delta=30$  cm, punta conica ( $\alpha =$

$60^\circ$ ),

diametro  $D = 50.8$  mm, area base cono  $A=20.27$  cm<sup>2</sup> rivestimento: previsto secondo precise indicazioni;

- DINAMICO SUPERPESANTE (Tipo EMILIA)

massa battente  $M=63.5$  kg, altezza caduta  $H=0.75$  m, avanzamento  $\delta=20-30$  cm, punta conica conica ( $\alpha =$

$60^\circ-90^\circ$ ) diametro  $D = 50.5$  mm, area base cono  $A = 20$  cm<sup>2</sup>, rivestimento / fango bentonitico :  
talora previsto.

## Correlazione con $N_{spt}$

Poiché la prova penetrometrica standard (SPT) rappresenta, ad oggi, uno dei mezzi più diffusi ed economici per ricavare informazioni dal sottosuolo, la maggior parte delle correlazioni esistenti riguardano i valori del numero di colpi  $N_{spt}$  ottenuto con la suddetta prova, pertanto si presenta la necessità di rapportare il numero di colpi di una prova dinamica con  $N_{spt}$ . Il passaggio viene dato da:

$$N_{spt} = \beta_t N$$

Dove:

$$\beta_t = \frac{Q}{Q_{SPT}}$$

in cui  $Q$  è l'energia specifica per colpo e  $Q_{spt}$  è quella riferita alla prova SPT.



L'energia specifica per colpo viene calcolata come segue:

$$Q = \frac{M^2 \cdot H}{A \cdot \delta \cdot (M + M')}$$

in cui

M = peso massa battente;

M' = peso aste;

H = altezza di caduta;

A = area base punta conica;

$\delta$  = passo di avanzamento.

### Valutazione resistenza dinamica alla punta Rpd

Formula Olandesi

$$Rpd = \frac{M^2 \cdot H}{[A \cdot e \cdot (M + P)]} = \frac{M^2 \cdot H \cdot N}{[A \cdot \delta \cdot (M + P)]}$$

Rpd = resistenza dinamica punta (area A);

e = infissione media per colpo ( $\delta/N$ );

M = peso massa battente (altezza caduta H);

P = peso totale aste e sistema battuta.

### Metodologia di Elaborazione.

Le elaborazioni sono state effettuate mediante un programma di calcolo automatico Dynamic Probing della *GeoStru Software*.

Il programma calcola il rapporto delle energie trasmesse (coefficiente di correlazione con SPT) tramite le elaborazioni proposte da Pasqualini 1983 - Meyerhof 1956 - Desai 1968 - Borowczyk-Frankowsky 1981.

Permette inoltre di utilizzare i dati ottenuti dall'effettuazione di prove penetrometriche per estrapolare utili informazioni geotecniche e geologiche.

Una vasta esperienza acquisita, unitamente ad una buona interpretazione e correlazione, permettono spesso di ottenere dati utili alla progettazione e frequentemente dati maggiormente attendibili di tanti dati bibliografici sulle litologie e di dati geotecnici determinati sulle verticali litologiche da poche prove di laboratorio eseguite come rappresentazione generale di una verticale eterogenea disuniforme e/o complessa.

In particolare consente di ottenere informazioni su:

- l'andamento verticale e orizzontale degli intervalli stratigrafici,
- la caratterizzazione litologica delle unità stratigrafiche,
- i parametri geotecnici suggeriti da vari autori in funzione dei valori del numero dei colpi e delle resistenza alla punta.



## Valutazioni statistiche e correlazioni

### Elaborazione Statistica

Permette l'elaborazione statistica dei dati numerici di Dynamic Probing, utilizzando nel calcolo dei valori rappresentativi dello strato considerato un valore inferiore o maggiore della media aritmetica dello strato (dato comunque maggiormente utilizzato); i valori possibili in immissione sono :

#### **Media**

Media aritmetica dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Media minima**

Valore statistico inferiore alla media aritmetica dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Massimo**

Valore massimo dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Minimo**

Valore minimo dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Scarto quadratico medio**

Valore statistico di scarto dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Media deviata**

Valore statistico di media deviata dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Media + s**

Media + scarto (valore statistico) dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Media - s**

Media - scarto (valore statistico) dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Distribuzione normale R.C.**

Il valore di  $N_{spt,k}$  viene calcolato sulla base di una distribuzione normale o gaussiana, fissata una probabilità di non superamento del 5%, secondo la seguente relazione:

$$N_{spt,k} = N_{spt,medio} - 1.645 \cdot (\sigma_{N_{spt}})$$

dove  $s_{N_{spt}}$  è la deviazione standard di  $N_{spt}$

#### **Distribuzione normale R.N.C.**

Il valore di  $N_{spt,k}$  viene calcolato sulla base di una distribuzione normale o gaussiana, fissata una probabilità di non superamento del 5%, trattando i valori medi di  $N_{spt}$  distribuiti normalmente:

$$N_{spt,k} = N_{spt,medio} - 1.645 \cdot (\sigma_{N_{spt}}) / \sqrt{n}$$

dove  $n$  è il numero di letture.

#### **Pressione ammissibile**

Pressione ammissibile specifica sull'interstrato (con effetto di riduzione energia per svergolamento aste o no) calcolata secondo le note elaborazioni proposte da Herminier, applicando un coefficiente di sicurezza (generalmente = 20-22) che corrisponde ad un coefficiente di sicurezza standard delle fondazioni pari a 4, con una geometria fondale standard di larghezza pari a 1 mt. ed immersione  $d = 1$  mt..



# Correlazioni geotecniche terreni incoerenti

## Liquefazione

Permette di calcolare utilizzando dati  $N_{spt}$  il potenziale di liquefazione dei suoli (prevalentemente sabbiosi).

Attraverso la relazione di *SHI-MING (1982)*, applicabile a terreni sabbiosi, la liquefazione risulta possibile solamente se  $N_{spt}$  dello strato considerato risulta inferiore a  $N_{spt}$  critico calcolato con l'elaborazione di *SHI-MING*.

## Correzione $N_{spt}$ in presenza di falda

$N_{spt}$  corretto =  $15 + 0.5 \times (N_{spt} - 15)$

$N_{spt}$  è il valore medio nello strato

La correzione viene applicata in presenza di falda solo se il numero di colpi è maggiore di 15 (la correzione viene eseguita se tutto lo strato è in falda).

## Angolo di Attrito

- Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof 1956 - Correlazione valida per terreni non molli a prof. < 5 mt.; correlazione valida per sabbie e ghiaie rappresenta valori medi. - Correlazione storica molto usata, valevole per prof. < 5 mt. per terreni sopra falda e < 8 mt. per terreni in falda (tensioni < 8-10 t/mq)
- Meyerhof 1956 - Correlazioni valide per terreni argillosi ed argillosi-marnosi fessurati, terreni di riporto sciolti e coltri detritiche (da modifica sperimentale di dati).
- Sowers 1961)- Angolo di attrito in gradi valido per sabbie in genere (cond. ottimali per prof. < 4 mt. sopra falda e < 7 mt. per terreni in falda)  $\sigma > 5$  t/mq.
- De Mello - Correlazione valida per terreni prevalentemente sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi (da modifica sperimentale di dati) con angolo di attrito < 38° .
- Malcev 1964 - Angolo di attrito in gradi valido per sabbie in genere (cond. ottimali per prof. > 2 m. e per valori di angolo di attrito < 38° ).
- Schmertmann 1977- Angolo di attrito (gradi) per vari tipi litologici (valori massimi). N.B. valori spesso troppo ottimistici poiché desunti da correlazioni indirette da  $D_r$  %.
- Shioi-Fukuni 1982 (ROAD BRIDGE SPECIFICATION) Angolo di attrito in gradi valido per sabbie - sabbie fini o limose e limi siltosi (cond. ottimali per prof. di prova > 8 mt. sopra falda e > 15 mt. per terreni in falda)  $\sigma > 15$  t/mq.
- Shioi-Fukuni 1982 (JAPANESE NATIONALE RAILWAY) Angolo di attrito valido per sabbie medie e grossolane fino a ghiaiose .
- Angolo di attrito in gradi (Owasaki & Iwasaki) valido per sabbie - sabbie medie e grossolane-ghiaiose (cond. ottimali per prof. > 8 mt. sopra falda e > 15 mt. per terreni in falda)  $s > 15$  t/mq.
- Meyerhof 1965 - Correlazione valida per terreni per sabbie con % di limo < 5% a profondità < 5 mt. e con % di limo > 5% a profondità < 3 mt.
- Mitchell e Katti (1965) - Correlazione valida per sabbie e ghiaie.

## Densità relativa (%)

- Gibbs & Holtz (1957) correlazione valida per qualunque pressione efficace, per ghiaie  $D_r$  viene sovrastimato, per limi sottostimato.
- Skempton (1986) elaborazione valida per limi e sabbie e sabbie da fini a grossolane NC a qualunque pressione efficace, per ghiaie il valore di  $D_r$  % viene sovrastimato, per limi sottostimato.
- Meyerhof (1957).
- Schultze & Menzenbach (1961) per sabbie fini e ghiaiose NC , metodo valido per qualunque valore di pressione efficace in depositi NC, per ghiaie il valore di  $D_r$  % viene sovrastimato, per limi sottostimato.

## Modulo Di Young ( $E_y$ )

- Terzaghi - elaborazione valida per sabbia pulita e sabbia con ghiaia senza considerare la pressione efficace.
- Schmertmann (1978), correlazione valida per vari tipi litologici .
- Schultze-Menzenbach , correlazione valida per vari tipi litologici.
- D'Appollonia ed altri (1970) , correlazione valida per sabbia, sabbia SC, sabbia NC e ghiaia
- Bowles (1982), correlazione valida per sabbia argillosa, sabbia limosa, limo sabbioso, sabbia media, sabbia e ghiaia.



#### **Modulo Edometrico**

- Begemann (1974) elaborazione desunta da esperienze in Grecia, correlazione valida per limo con sabbia, sabbia e ghiaia
- Buisman-Sanglerat, correlazione valida per sabbia e sabbia argillosa.
- Farrent (1963) valida per sabbie, talora anche per sabbie con ghiaia (da modifica sperimentale di dati).
- Menzenbach e Malcev valida per sabbia fine, sabbia ghiaiosa e sabbia e ghiaia.

#### **Stato di consistenza**

- Classificazione A.G.I. 1977

#### **Peso di Volume Gamma**

- Meyerhof ed altri, valida per sabbie, ghiaie, limo, limo sabbioso.

#### **Peso di volume saturo**

- Bowles 1982, Terzaghi-Peck 1948-1967. Correlazione valida per peso specifico del materiale pari a circa  $\gamma = 2,65$  t/mc e per peso di volume secco variabile da 1,33 (Nspt = 0) a 1,99 (Nspt = 95)

#### **Modulo di poisson**

- Classificazione A.G.I.

#### **Potenziale di liquefazione (Stress Ratio)**

- Seed-Idriss 1978-1981. Tale correlazione è valida solamente per sabbie, ghiaie e limi sabbiosi, rappresenta il rapporto tra lo sforzo dinamico medio  $\tau$  e la tensione verticale di consolidazione per la valutazione del potenziale di liquefazione delle sabbie e terreni sabbio-ghiaiosi attraverso grafici degli autori.

#### **Velocità onde di taglio $V_s$ (m/sec)**

- Tale correlazione è valida solamente per terreni incoerenti sabbiosi e ghiaiosi.

#### **Modulo di deformazione di taglio (G)**

- Ohsaki & Iwasaki – elaborazione valida per sabbie con fine plastico e sabbie pulite.
- Robertson e Campanella (1983) e Imai & Tonouchi (1982) elaborazione valida soprattutto per sabbie e per tensioni litostatiche comprese tra 0,5 - 4,0 kg/cmq.

#### **Modulo di reazione (K<sub>o</sub>)**

- Navfac 1971-1982 - elaborazione valida per sabbie, ghiaie, limo, limo sabbioso.

#### **Resistenza alla punta del Penetrometro Statico (Q<sub>c</sub>)**

- Robertson 1983 Q<sub>c</sub>



# Correlazioni geotecniche terreni coesivi

## *Coesione non drenata*

- Benassi & Vannelli- correlazioni scaturite da esperienze ditta costruttrice Penetrometri SUNDA 1983.
- Terzaghi-Peck (1948-1967), correlazione valida per argille sabbiose-siltose NC con  $N_{spt} < 8$  , argille limose-siltose mediamente plastiche, argille marnose alterate-fessurate.
- Terzaghi-Peck (1948). *Cu min-max*.
- Sanglerat , da dati Penetr. Statico per terreni coesivi saturi , tale correlazione non è valida per argille sensitive con sensitività  $> 5$  , per argille sovraconsolidate fessurate e per i limi a bassa plasticità.
- Sanglerat , (per argille limose-sabbiose poco coerenti), valori validi per resistenze penetrometriche  $< 10$  colpi, per resistenze penetrometriche  $> 10$  l'elaborazione valida è comunque quella delle "argille plastiche " di Sanglerat.
- (U.S.D.M.S.M.) U.S. Design Manual Soil Mechanics Coesione non drenata per argille limose e argille di bassa media ed alta plasticità , (Cu- $N_{spt}$ -grado di plasticità).
- Schmertmann 1975 Cu (Kg/cmq) (valori medi), valida per **argille e limi argillosi** con  $N_c=20$  e  $Q_c/N_{spt}=2$ .
- Schmertmann 1975 Cu (Kg/cmq) (valori minimi), valida per argille NC .
- Fletcher 1965 - (Argilla di Chicago) . Coesione non drenata Cu (Kg/cmq), colonna valori validi per argille a medio-bassa plasticità .
- Houston (1960) - argilla di media-alta plasticità.
- Shioi-Fukuni 1982 , valida per suoli poco coerenti e plastici, argilla di media-alta plasticità.
- Begemann.
- De Beer.

## *Resistenza alla punta del Penetrometro Statico ( $Q_c$ )*

- Robertson 1983  $Q_c$

## *Modulo Edometrico-Confinato ( $M_o$ )*

- Stroud e Butler (1975) - per litotipi a media plasticità, valida per litotipi argillosi a media-medio-alta plasticità - da esperienze su argille glaciali.
- Stroud e Butler (1975), per litotipi a medio-bassa plasticità ( $IP < 20$ ), valida per litotipi argillosi a medio-bassa plasticità ( $IP < 20$ ) - da esperienze su argille glaciali .
- Vesic (1970) correlazione valida per argille molli (valori minimi e massimi).
- Trofimenkov (1974), Mitchell e Gardner Modulo Confinato - $M_o$  (Eed) (Kg/cmq)-, valida per litotipi argillosi e limosi-argillosi (rapporto  $Q_c/N_{spt}=1.5-2.0$ ).
- Buismann- Sanglerat, valida per argille compatte ( $N_{spt} < 30$ ) medie e molli ( $N_{spt} < 4$ ) e argille sabbiose ( $N_{spt}=6-12$ ).

## *Modulo Di Young ( $E_\gamma$ )*

- Schultze-Menzenbach - (Min. e Max.), correlazione valida per limi coerenti e limi argillosi con I.P.  $> 15$
- D'Appollonia ed altri (1983) - correlazione valida per argille sature-argille fessurate.

## *Stato di consistenza*

- Classificazione A.G.I. 1977

## *Peso di Volume Gamma*

- Meyerhof ed altri, valida per argille, argille sabbiose e limose prevalentemente coerenti.

## *Peso di volume saturo*

- Correlazione Bowles (1982), Terzaghi-Peck (1948-1967), valida per condizioni specifiche: peso specifico del materiale pari a circa  $G=2,70$  (t/mc) e per indici dei vuoti variabili da 1,833 ( $N_{spt}=0$ ) a 0,545 ( $N_{spt}=28$ )

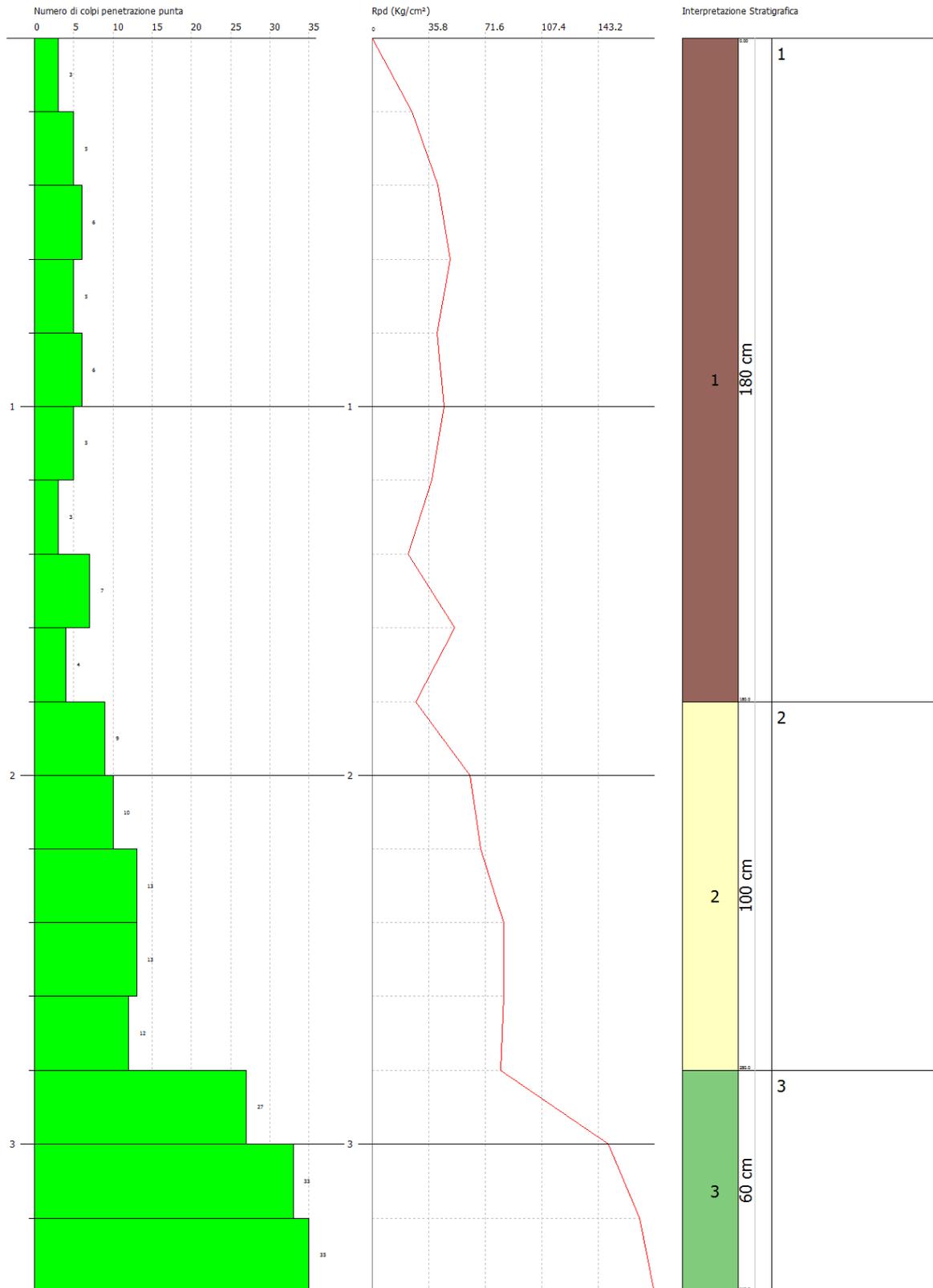


PROVA PENETROMETRICA DINAMICA Nr.1  
 Strumento utilizzato... DPHS (Dynamic Probing Super Heavy)

Committente:  
 Cantiere:  
 Località:

Data: 04/02/2014

Scala 1:15



PROVA ... Nr.1

Strumento utilizzato... DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)  
 Prova eseguita in data 04/01/2014  
 Profondità prova 3.40 mt  
 Falda non rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Res. dinamica (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )
0.20	3	0.855	24.92	29.15	1.25	1.46
0.40	5	0.851	41.34	48.59	2.07	2.43
0.60	6	0.847	49.39	58.31	2.47	2.92
0.80	5	0.843	40.98	48.59	2.05	2.43
1.00	6	0.840	45.30	53.94	2.26	2.70
1.20	5	0.836	37.59	44.95	1.88	2.25
1.40	3	0.833	22.46	26.97	1.12	1.35
1.60	7	0.830	52.20	62.93	2.61	3.15
1.80	4	0.826	29.71	35.96	1.49	1.80
2.00	9	0.823	61.96	75.27	3.10	3.76
2.20	10	0.820	68.59	83.63	3.43	4.18
2.40	13	0.767	83.41	108.72	4.17	5.44
2.60	13	0.764	83.09	108.72	4.15	5.44
2.80	12	0.811	81.43	100.36	4.07	5.02
3.00	27	0.709	149.60	211.10	7.48	10.55
3.20	33	0.656	169.25	258.01	8.46	12.90
3.40	35	0.653	178.80	273.65	8.94	13.68

Prof. Strato (m)	NPDM	Rd (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo	Clay Fraction (%)	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )	Peso unità di volume saturo (t/m <sup>3</sup> )	Tensione efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Coeff. di correlaz. con Nspt	Nspt	Descrizione
1.8	4.89	45.49	Incoerente - coesivo	0	1.87	1.9	0.17	0.8	3.91	1
2.8	11.4	95.34	Incoerente - coesivo	0	2.09	2.3	0.44	0.8	9.12	2
3.4	31.67	247.59	Incoerente - coesivo	0	2.5	2.5	0.62	0.8	25.34	3

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA Nr.1

TERRENI COESIVI

Coesione non drenata (Kg/cm<sup>2</sup>)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Terzaghi-Peck	Sanglerat	Terzaghi-Peck (1948)	U.S.D.M. S.M	Schmertm ann 1975	SUNDA (1983) Benassi e Vannelli	Fletcher (1965) Argilla di Chicago	Houston (1960)	Shioi - Fukui 1982	Begeman n	De Beer
[1] - 1	3.91	1.80	0.24	0.49	0.15	0.16	0.38	1.37	0.36	0.73	0.20	0.46	0.49
[2] - 2	9.12	2.80	0.62	1.14	0.50	0.37	0.89	2.86	0.81	1.13	0.46	1.21	1.14
[3] - 3	25.34	3.40	1.71	3.17	1.00	0.97	2.52	7.43	2.10	2.60	1.27	3.92	3.17

Qc ( Resistenza punta Penetrometro Statico)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Qc (Kg/cm <sup>2</sup> )
[1] - 1	3.91	1.80	Robertson (1983)	7.82
[2] - 2	9.12	2.80	Robertson (1983)	18.24
[3] - 3	25.34	3.40	Robertson (1983)	50.68



**Modulo Edometrico (Kg/cm<sup>2</sup>)**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Stroud e Butler (1975)	Vesic (1970)	Trofimenkov (1974), Mitchell e Gardner	Buisman-Sanglerat
[1] - 1	3.91	1.80	17.94	58.65	41.67	48.88
[2] - 2	9.12	2.80	41.84	--	94.81	114.00
[3] - 3	25.34	3.40	116.26	--	260.24	253.40

**Modulo di Young (Kg/cm<sup>2</sup>)**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Schultze	Apollonia
[1] - 1	3.91	1.80	24.57	39.10
[2] - 2	9.12	2.80	84.48	91.20
[3] - 3	25.34	3.40	271.01	253.40

**Classificazione AGI**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Classificazione
[1] - 1	3.91	1.80	A.G.I. (1977)	POCO CONSISTENTE
[2] - 2	9.12	2.80	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[3] - 3	25.34	3.40	A.G.I. (1977)	MOLTO CONSISTENTE

**Peso unità di volume**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )
[1] - 1	3.91	1.80	Meyerhof ed altri	1.69
[2] - 2	9.12	2.80	Meyerhof ed altri	1.94
[3] - 3	25.34	3.40	Meyerhof ed altri	2.12

**Peso unità di volume saturo**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m <sup>3</sup> )
[1] - 1	3.91	1.80	Meyerhof ed altri	1.87
[2] - 2	9.12	2.80	Meyerhof ed altri	2.13
[3] - 3	25.34	3.40	Meyerhof ed altri	2.23

**Velocità onde di taglio**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Velocità onde di taglio (m/s)
[1] - 1	3.91	1.80		0
[2] - 2	9.12	2.80		0
[3] - 3	25.34	3.40		0

**TERRENI INCOERENTI****Densità relativa**

	Intestazione NSPT	Prof. Strato (m)	Gibbs & Holtz 1957	Meyerhof 1957	Schultze & Menzenbach (1961)	Skempton 1986
[1] - 1	3.91	1.80	19.12	44.56	52.39	17.87
[2] - 2	9.12	2.80	30.42	59.37	61.01	31.01
[3] - 3	25.34	3.40	50.07	91.99	90.93	58.37

**Angolo di resistenza al taglio**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof 1956	Meyerhof (1956)	Sowers (1961)	Malcev (1964)	Meyerhof (1965)	Schmertmann (1977) Sabbie	Mitchell & Katti (1981)	Shioi-Fukuni 1982 (ROAD BRIDGE SPECIFICATION)	Japanese National Railway	De Mello	Owasaki & Iwasaki
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	28.12	21.12	29.09	31.08	31.21	0	<30	22.66	28.17	30.26	23.84
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	29.61	22.61	30.55	30.36	33.33	0	<30	26.7	29.74	36.62	28.51
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	34.24	27.24	35.1	31.27	38.56	40.88	32-35	34.5	34.6	44.86	37.51

**Modulo di Young (Kg/cm<sup>2</sup>)**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Terzaghi	Schmertmann (1978) (Sabbie)	Schultze-Menzenbach (Sabbia ghiaiosa)	D'Appollonia ed altri 1970 (Sabbia)	Bowles (1982) Sabbia Media
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	---	31.28	---	---	---
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	---	72.96	108.32	---	---
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	359.31	202.72	299.71	370.05	201.70



**Modulo Edometrico (Kg/cm<sup>2</sup>)**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Buisman-Sanglerat (sabbie)	Begemann 1974 (Ghiaia con sabbia)	Farrent 1963	Menzenbach e Malcev (Sabbia media)
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	---	35.50	27.76	55.44
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	---	46.20	64.75	78.68
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	152.04	79.51	179.91	151.02

**Classificazione AGI**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Classificazione AGI
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	Classificazione A.G.I	SCIOLTO
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	Classificazione A.G.I	POCO ADDENSATO
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	Classificazione A.G.I	MODERATAMENTE ADDENSATO

**Peso unità di volume**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Gamma (t/m <sup>3</sup> )
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	Meyerhof ed altri	1.49
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	Meyerhof ed altri	1.70
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	Meyerhof ed altri	2.08

**Peso unità di volume saturo**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Gamma Saturo (t/m <sup>3</sup> )
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.88
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.91
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	Terzaghi-Peck 1948-1967	2.50

**Modulo di Poisson**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Poisson
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	(A.G.I.)	0.35
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	(A.G.I.)	0.34
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	(A.G.I.)	0.3

**Modulo di deformazione a taglio dinamico (Kg/cm<sup>2</sup>)**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Ohsaki (Sabbie pulite)	Robertson e Campanella (1983) e Imai & Tonouchi (1982)
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	234.19	287.56
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	519.17	482.47
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	1356.72	900.82

**Velocità onde di taglio**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Velocità onde di taglio (m/s)
[1] - 1	3.91	1.80	3.91	Ohta & Goto (1978) Limi	84.87
[2] - 2	9.12	2.80	9.12	Ohta & Goto (1978) Limi	117.76
[3] - 3	25.34	3.40	25.34	Ohta & Goto (1978) Limi	148.87



# ***DETERMINAZIONE CATEGORIA DI SOTTOSUOLO PROSPEZIONI SISMICHE MASW E ReMi***

## **1. PREMESSA**

Sono state effettuate due prospezioni sismiche lungo un array (fig. 1): una di tipo attivo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh) ed una di tipo passivo ReMi (Refraction Microtremor ovvero analisi del sottosuolo mediante l'uso di microtremori).

Queste indagini sismiche sono state eseguite in un'area ricadente in Via San Gaspare (fig. 2), nel Comune di Sonnino (LT), al fine di classificare sismicamente il suolo, ossia definire la categoria sottosuolo secondo la normativa vigente (D.M. 14 gennaio 2008).



**Fig. 1** – Preparazione della stesa sismica





**Fig. 2** - Ortofoto con ubicazione dell' *array* sismico (in rosso)  
 Sistema di coordinate UTM33 ED50

Scala 1:1.000

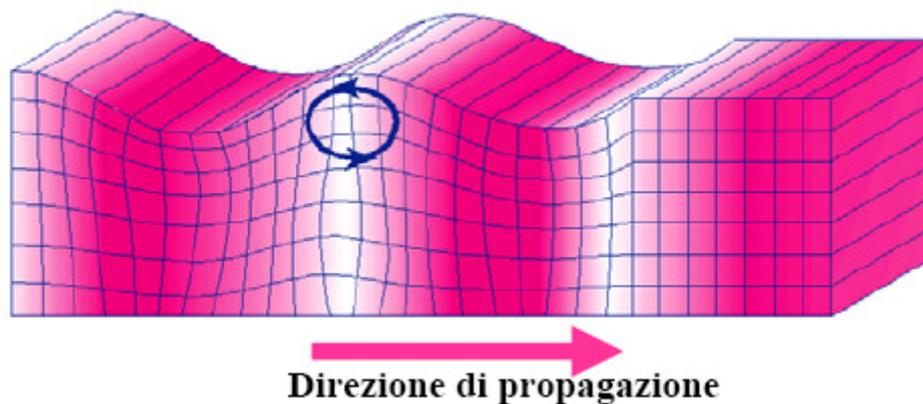


## 2. CENNI TEORICI SUL METODO MASW

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

Le onde di Rayleigh sono polarizzate in un piano verticale (fig. 3) e si generano in corrispondenza della superficie libera del mezzo quando viene sollecitato acusticamente. In questo tipo di onde le particelle descrivono un movimento di tipo ellittico la cui ampiezza decresce esponenzialmente con la distanza dalla superficie libera. L'asse maggiore delle ellissi è normale alla superficie libera del mezzo ed alla direzione di propagazione delle onde e le particelle compiono questo movimento ellittico in senso retrogrado rispetto alla direzione di propagazione delle onde che vengono generate.



**Fig. 3** - Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

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

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



I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°. Nella pratica è stato osservato che, se si esegue la prova con lo stendimento dei sensori lungo la direzione di massima pendenza, la presenza di forti acclività comporta una traslazione della curva di dispersione sperimentale. Il problema è mitigato disponendo lo stendimento dei sensori lungo una curva di livello in direzione perpendicolare alla direzione di massima pendenza.

Il metodo MASW consiste in tre fasi:

- ✓ calcolo della curva di dispersione apparente sperimentale;
- ✓ calcolo della curva di dispersione apparente numerica;
- ✓ individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$  (o in maniera alternativa alle velocità  $V_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson  $\nu$ ), la densità di massa  $\rho$  degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo.

Mediante l'analisi delle onde di Rayleigh viene determinato il parametro  $V_{s30}$ , che rappresenta la velocità media di propagazione delle onde S nei primi 30 metri di profondità ed è calcolato mediante la seguente espressione:

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

Dove:

$h_i$  è lo spessore dello strato  $i$ -esimo

$V_i$  è la velocità dello strato  $i$ -esimo

La classificazione del terreno di fondazione è ottenuta attraverso la stima del parametro  $V_{s30}$ , come indicato dalla normativa vigente (OPCM 3274, DM 19/ 09/ 2005 e D.M. 2008 “Nuove norme tecniche sulle costruzioni”).



### 3. CENNI TEORICI SUL METODO ReMi

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

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

In situazioni dove un terreno più “competente” è sovrapposto a una zona più debole legata a subsidenza o al collasso di materiali più deboli sottostanti o a spazi vuoti, ReMi ha la capacità di individuare la velocità delle onde S dell'orizzonte debole sottostante.

La fonte di energia delle onde di superficie per il ReMi può essere il rumore ambientale o i semplici passi per stendimenti che indagano profondità limitate o rumore di veicoli per lunghezze maggiori.

I profili ReMi si eseguono con successo in aree urbane con attività considerevole, usando il rumore ambientale come fonte di energia. Per indagini presso autostrade, il passaggio dei veicoli può servire da sorgente di energia.

Le velocità delle onde S (onde di taglio), il tipico parametro misurato dei materiali geologici, sono una funzione dei moduli dei vari materiali nel profilo del sottosuolo.

Le basi della teoria sono le stesse dell'analisi spettrale delle onde di superficie ( SASW ) e della multi analisi delle onde di superficie ( MASW ).

I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh da quelli superiori e dall'aliasing spaziale. C'è in questo caso la necessità di soddisfare la condizione di “omnidirezionalità” delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni; le scelte dei parametri di acquisizione influenzano molto il risultato finale.

Infatti, normalmente si accetta l'approssimazione secondo cui la massima profondità di indagine MASW per la quale calcolare il valore VS, può essere paragonato alla metà della lunghezza d'onda  $l_{max}$  misurata dai ricevitori (Park et al., 1999), quest'ultima in generale è considerata circa pari alla lunghezza L dello stendimento.

Nel caso REMI è necessario rilevare un numero di microtremori elevato, ciò sarà ottenibile semplicemente allungando i tempi di registrazione del segnale rispetto ai metodi attivi.



## 4. STRUMENTAZIONE ADOTTATA

L'analisi delle onde superficiali è stata effettuata utilizzando un sistema sismico digitale multicanale (**SoilSpy Rosina**) di concezione totalmente nuova progettato e realizzato appositamente per eseguire indagini di prospezione sismica convenzionali (rifrazione, riflessione) e non convenzionali (Re.Mi. - M.A.S.W. - S.A.S.W. – SPAC - ESAC).

Il **SoilSpy Rosina** (fig. 4) è composto da un cavo di trasmissione digitale dati lungo il quale sono disposti i moduli di amplificazione/digitalizzazione collegati ai sensori (comunemente geofoni). Il sistema si connette ad un PC portatile per l'impostazione dei parametri di acquisizione, per il salvataggio dei dati e la loro preanalisi.



**Fig. 4** - Sistema sismico digitale multicanale **SoilSpy Rosina**



## 5. CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE INDAGINI MASW E REMI

Le prospezioni sismiche Masw e ReMi sono state eseguite con uno stendimento geofonico di 15 m, disposto sul terreno secondo un array lineare da 16 geofoni con interasse pari a 1 m (fig. 5).

La differenza di quota tra il geofono trigger (T1) ed il geofono 16 è pari a 0 m

La lunghezza e geometria dello stendimento sono state condizionate da questioni logistiche.

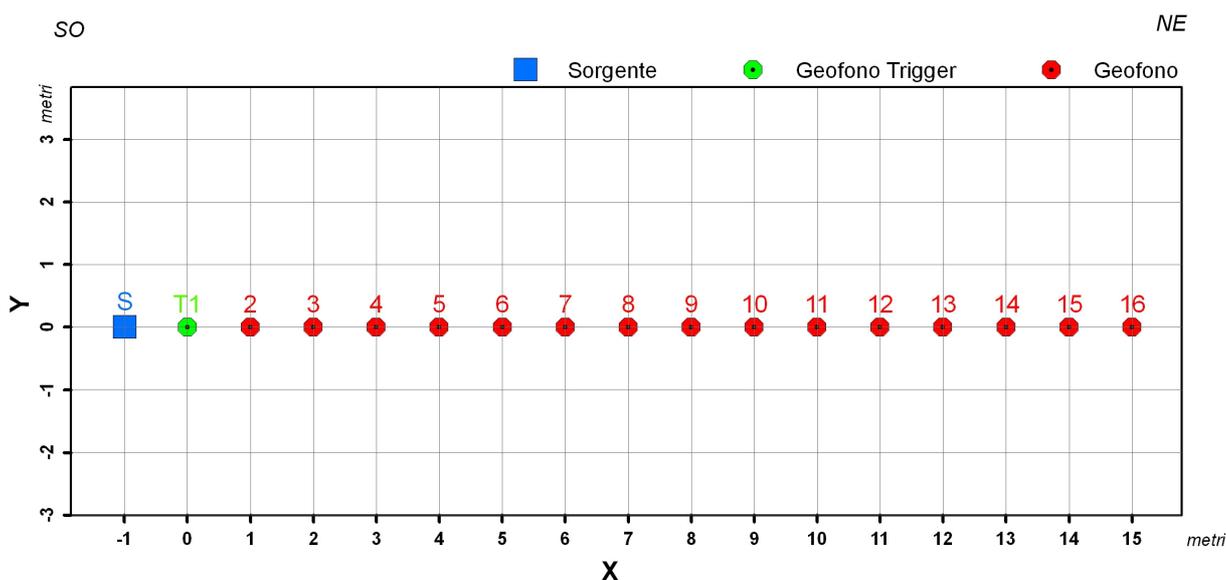


Fig. 5 – Schema di posizionamento stesa.

Per ottenere una buona risoluzione in termini di frequenza sono stati utilizzati geofoni da 4.5 Hz (tipo Geospace),

Nell'esecuzione della prova MASW attiva è stato utilizzato come sistema di energizzazione una mazza di 8 Kg battente su piattello metallico; quando la battuta sulla superficie della piastra non risultava netta o veniva colpita due volte erroneamente, la prova veniva ripetuta.

Per aumentare il rapporto segnale/rumore si è proceduto alla somma di più energizzazioni (processo di *stacking*).

La sorgente è stata posta ad una distanza di 1 m dal primo geofono utilizzato come *Trigger*.

Nell'esecuzione della prova ReMi si è proceduto ad una registrazione in continuo (in modalità passiva ovviamente) di durata 5 minuti, poichè il **SoilSpy Rosina** non pone nessun limite di durata della registrazione, ossia non bisogna scendere a compromessi tra frequenza di campionamento, numero di canali e durata della registrazione.



## 6. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI E RISULTATI

L'acquisizione dei dati è stata effettuata mediante il software SoilSpy Rosina 3.16 della Micromed S.p.A. che è lo strumento che permette di impostare i parametri di acquisizione, di visualizzare i tracciati e di effettuare una prima analisi

Le impostazioni dei parametri di acquisizione dell'*array* in oggetto sono:

**Settaggio Trigger (solo per MASW):**

*Trigger* = Geofono 1

*Durata del Pre-trigger* = 1/16 sec

*Durata totale di acquisizione del segnale* = 3 sec

**Settaggio Gain** = 1 $\mu$ V/digit (corrisponde a un input massimo di segnale  $\pm 32.7$  mV) per tutti i moduli di digitalizzazione

**Frequenza di campionamento** = 1024 Hz

**Durata totale di acquisizione del segnale in continuo** = 5 minuti (ReMi)

### 6.1 ELABORAZIONE ED ANALISI – METODO MASW

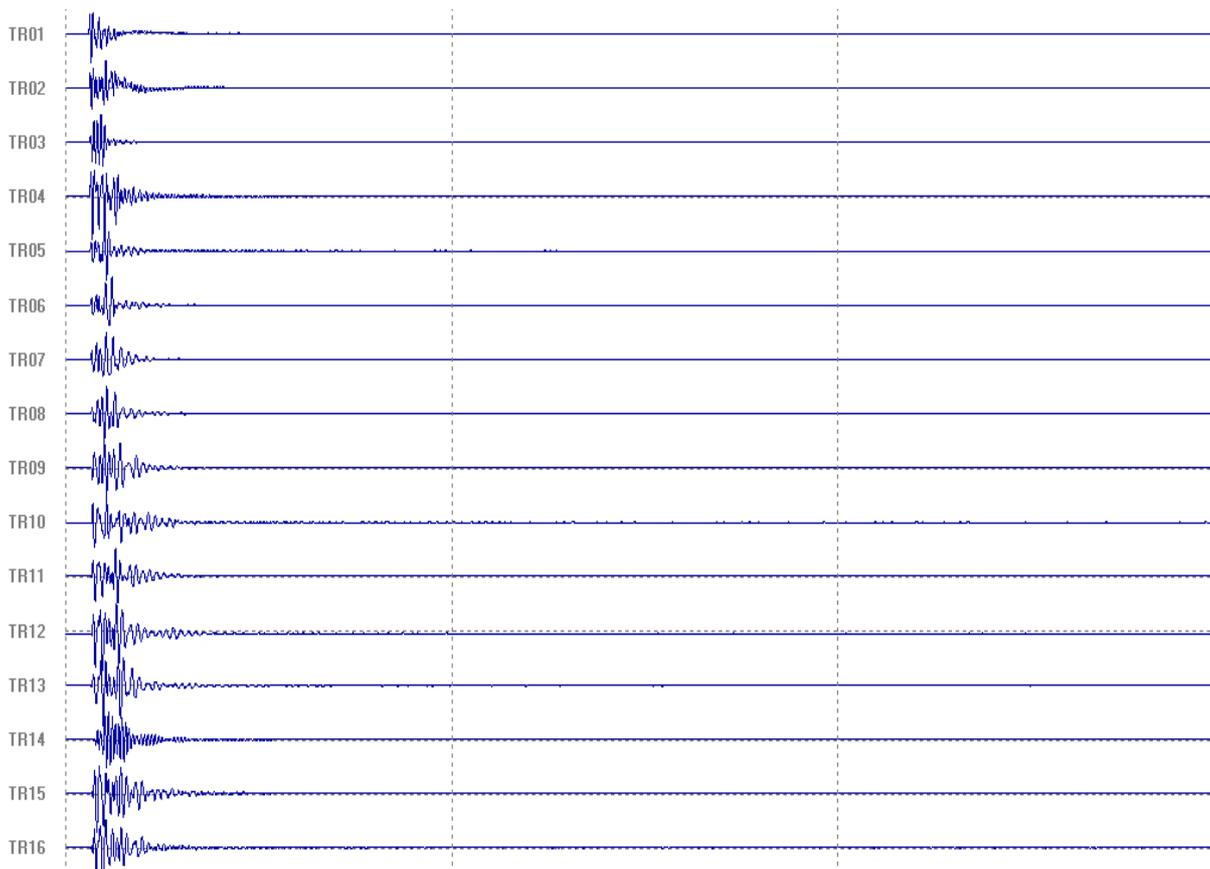
Dopo aver effettuato l'acquisizione in modalità attiva, è stato creato un'Average di tutte le energizzazioni effettuate scegliendo le migliori (fig. 6)..

I dati sperimentali, acquisiti e pre-elaborati sono stati importati nel programma Grilla (Micromed S.p.A), il quale permette l'archiviazione dei tracciati acquisiti con SoilSpy Rosina e contiene un modulo per il calcolo degli spettri di velocità di fase delle onde di superficie e la modellazione di curve di dispersione teoriche nel modo fondamentale e superiori.

L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "*phase velocity-frequency*" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).





**Fig. 6** – Sismogramma relativo all'indagine Sismica MASW

Il calcolo del **phase velocity spectra** è stato svolto con i seguenti parametri:

- *Min. Freq. [Hz]* = 1 Hz
- *Max. Freq. [Hz]* = 70 Hz
- *Step V [m/s]* = 1 m/s
- *Win. Length [s]* = 3 sec

Sullo **phase velocity spectra** ottenuto è stato eseguito un “picking” attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (fig. 7)

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma velocità di fase - frequenza per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo.



In particolare, l'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  viene ottenuto modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$  (o in maniera alternativa alle velocità  $V_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson  $\nu$ ), la densità di massa  $\rho$  degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde  $S$  si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali (fig. 7).

THEORETICAL RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE- Masw

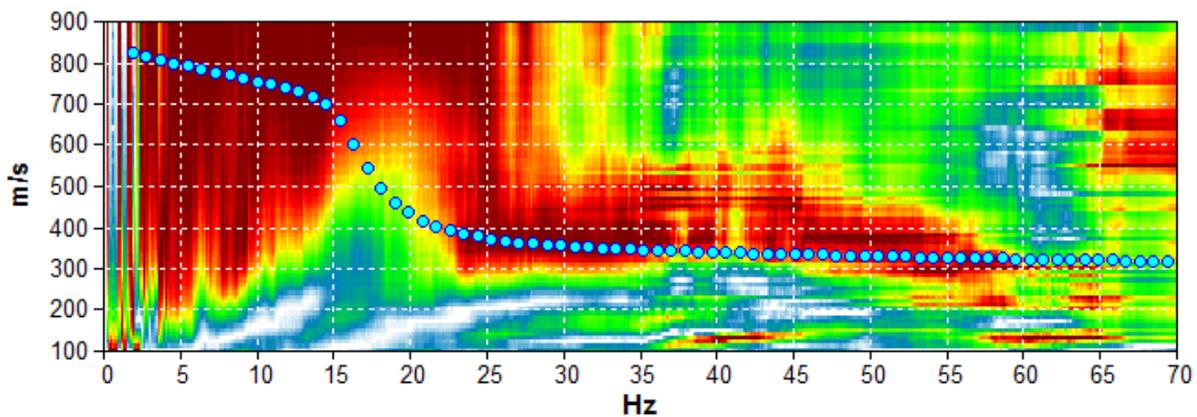


Fig. 7- Phase velocity spectra con picking ottenuto dalla prospezione masw effettuata

L'analisi del **phase velocity spectra** consente di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio  $V_s$  in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione si ottiene il seguente modello medio di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità (tab. 1), rappresentativo dell'area investigata (stendimento complessivo di 15 m):

Tab,1 . MODELLO MEDIO DI VELOCITA' DELLE ONDE SISMICHE DI TAGLIO			
Strato	Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	$V_s$ [m/s]
1	2.4	2.4	322
2	9.5	7.1	376
3	17.4	7.9	750
4	inf.	inf.	900



## 6.2 ELABORAZIONE ED ANALISI – METODO REMI

Dopo aver effettuato l'acquisizione in modalità passiva, per un tempo continuo di 5 minuti, i dati acquisiti sono stati importati nel programma Grilla (Micromed S.p.A), al fine di calcolare gli spettri di velocità di fase delle onde di superficie e la relativa modellazione delle curve di dispersione teoriche nel modo fondamentale.

Il calcolo del **phase velocity spectra** è stato svolto con i seguenti parametri:

- *Min. Freq. [Hz]* = 1 Hz
- *Max. Freq. [Hz]* = 70 Hz
- *Step V [m/s]* = 5 m/s
- *Win. Length [s]* = 20 sec

Con l'impostazione di questi parametri è stato possibile ottenere 30 curve di dispersione di cui 15 mediante elaborazione normale e 15 mediante elaborazione *reverse*.

Le due migliori curve sono state prese come riferimento per l'elaborazione (mediante *Average* delle due curve) del **phase velocity spectra** definitivo.

Sul **phase velocity spectra** ottenuto è stato eseguito un "picking" manuale attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (fig. 8)

Anche in questo caso dall'inversione della curva di dispersione si è ottenuto il modello medio di velocità delle onde sismiche di taglio (tab.2), derivato dal metodo ReMi (stendimento complessivo di 15 m – stesso array delle Masw).

THEORETICAL RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE – ReMi

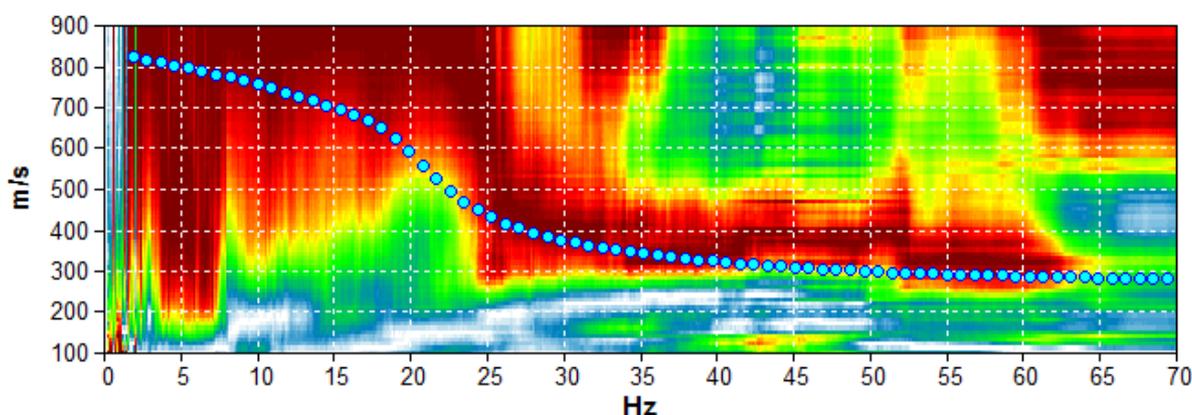


Fig. 8 - Phase velocity spectra con picking ottenuto dalla prospezione ReMi effettuata



**Tab,2 - MODELLO MEDIO DI VELOCITA' DELLE ONDE SISMICHE DI TAGLIO**

Strato	Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1	2.2	2.2	287
2	3.7	1.5	318
3	8.7	5	424
4	20.3	11.6	784
5	inf.	inf.	900

### 6.3 STIMA Vs30 E CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

A partire dal modello sismico monodimensionale, è possibile calcolare il valore delle Vs30, che rappresenta la “velocità equivalente” di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità dal piano di posa della fondazione. Per il calcolo delle Vs30 si fa riferimento alla seguente espressione, riportata nel D.M. 14.09.2005 e nel D.M. 14.01.2008 (“*Norme tecniche per le costruzioni*”):

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n H_i / V_i}$$

dove Hi e Vi indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (m/s) dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori a partire dalla base della fondazione.

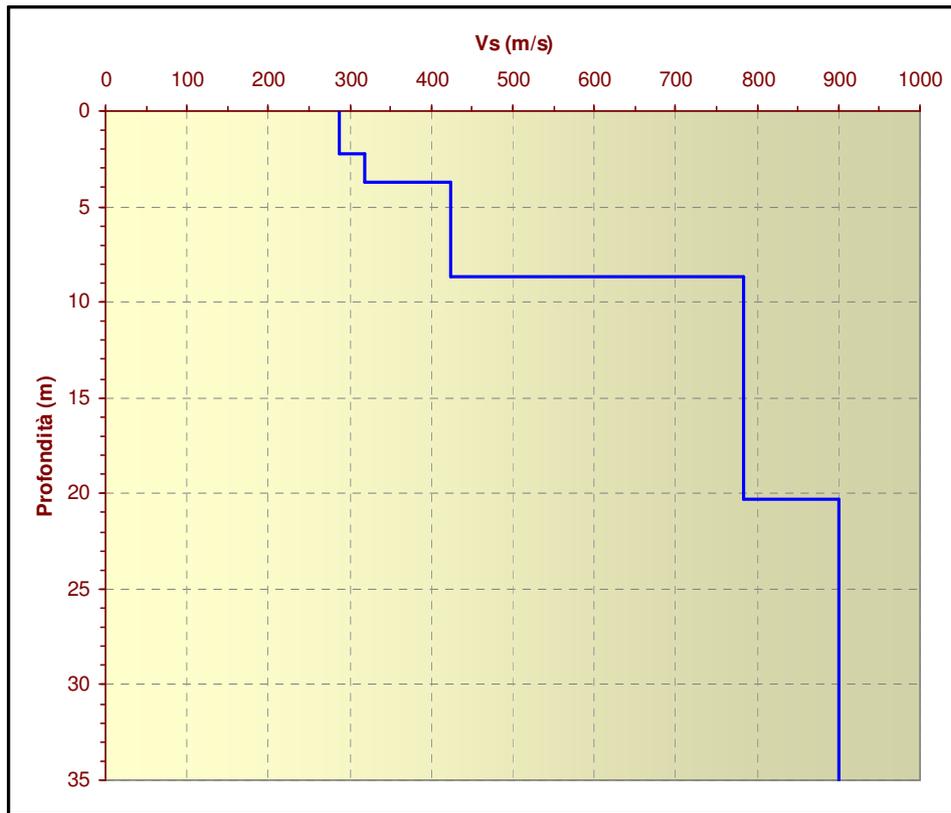
Utilizzando la formula sopra riportata si ottengono i seguenti valori di Vs30 per la metodologia ReMi e Masw dal p.c. (figg.9 - 10):

*Metodo ReMi - Vs(0.0-30.0)=603m/s*

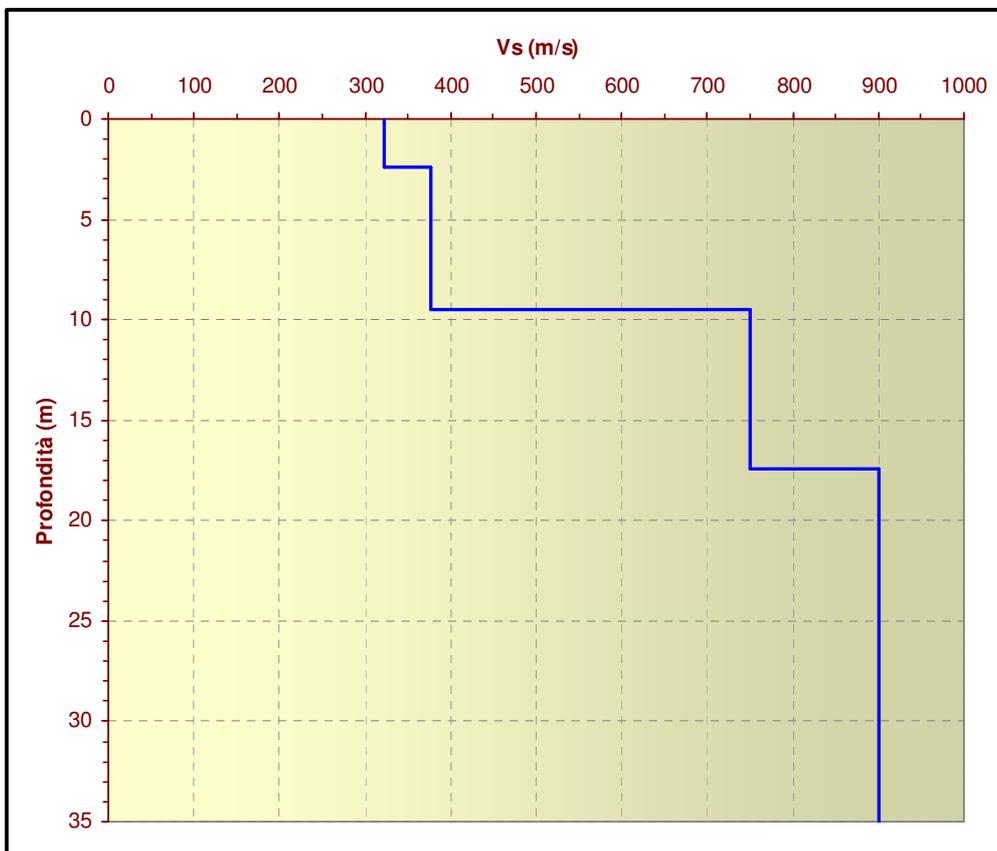
*Metodo Masw - Vs(0.0-30.0)=590m/s*

*Media Vs30 - Vs(0.0-30.0)= 596.5m/s*





**Fig. 9-** Profilo verticale 1D delle Vs ottenuto dall'inversione della curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh: ReMi



**Fig. 10-** Profilo verticale 1D delle Vs ottenuto dall'inversione della curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh: Masw



a cui corrisponde la **categoria di sottosuolo di tipo B**

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



# ANALISI NUMERICA DI RISPOSTA SISMICA LOCALE MONODIMENSIONALE

## 1.PREMESSA

Nella presente relazione si riportano i risultati di un'analisi di risposta sismica locale relativa al sito ubicato in Via San Gaspare nel Comune di Sonnino (LT).

In particolare, per la valutazione degli effetti sismici di sito sono state eseguite le seguenti operazioni:

- ✓ Definizione del modello geotecnico del sottosuolo attraverso indagini dirette (rilevamento geologico) e indirette (Masw),
- ✓ Scelta dell'input sismico
- ✓ Stima dell'amplificazione del moto in superficie rispetto al bedrock, in funzione della frequenza.
- ✓ Stima degli spettri di risposta elastici (smorzamento assunto pari al 5%) per gli Stati Limite (SLV – SLD - SLO).

## 2. DEFINIZIONE DEL MODELLO DI SOTTOSUOLO

Il modello di sottosuolo è stato ricavato soprattutto in funzione delle prospezioni sismiche Masw e ReMi che hanno evidenziato la presenza del bedrock sismico ( $V_s > 800$  m/s) ad una profondità media di 19m dal p.c.

In particolare, da evidenziare che entrambe le indagini evidenziano un salto di velocità importante a circa 9m dal p.c. con velocità che passa mediamente da 400m/s a 762 m/s, che corrisponde al passaggio tra una porzione detritica fratturata del calcare ed il sottostante calcare litoide. Questo repentino salto di velocità, condiziona in maniera evidente il risultato della risposta sismica locale.

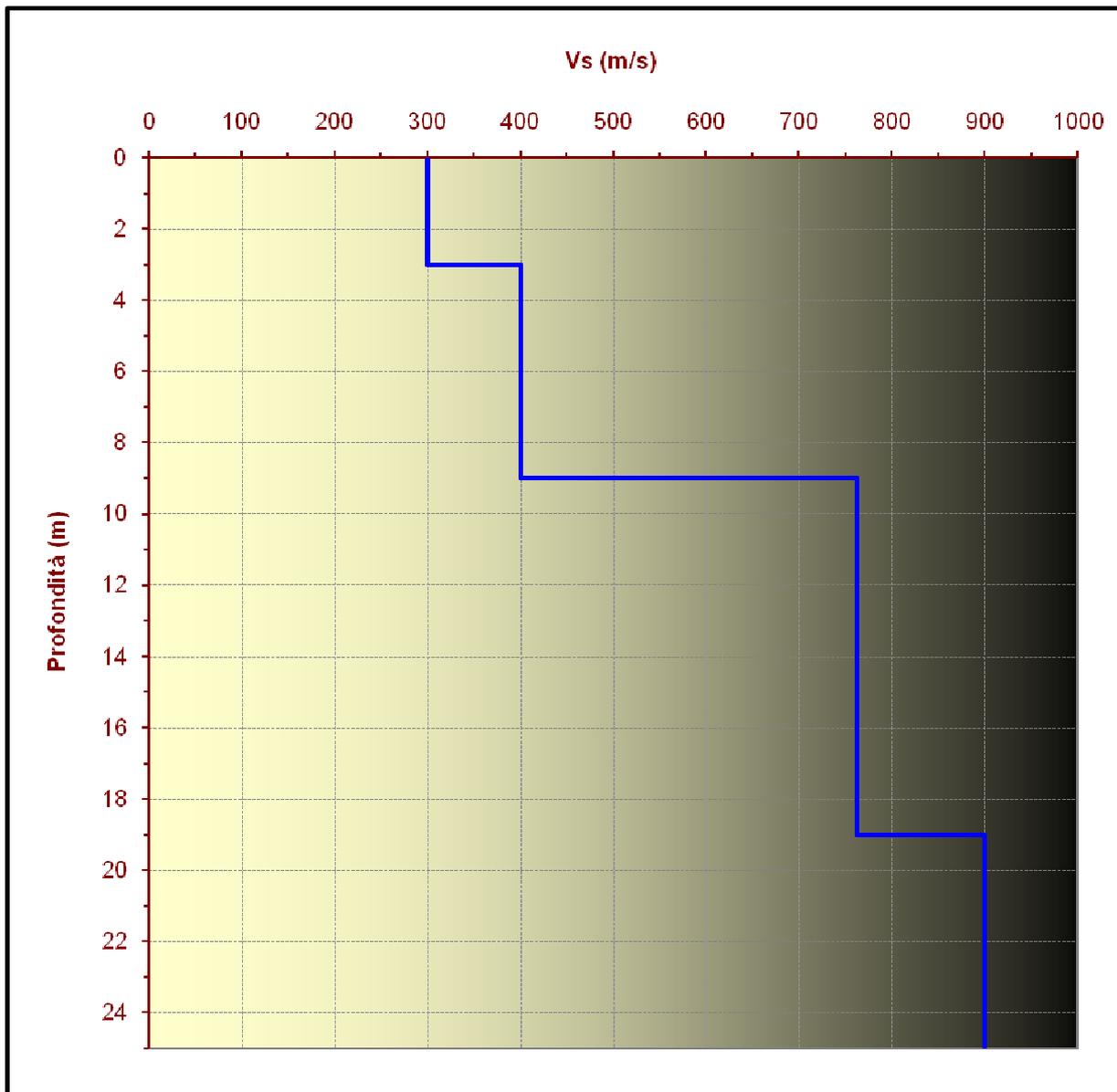
Al fine di ottenere una modellazione con qualche senso fisico, si è pertanto scelto di lavorare con un modello di sottosuolo in grado di riprodurre questa evidenza sperimentale.

Il profilo di sottosuolo medio utilizzato per quest'analisi è riportato in fig. 1 e Tab.1.

**TAB.1 - MODELLO MEDIO DI SOTTOSUOLO**

LITOTIPO	PROFONDITÀ ALLA BASE DELLO STRATO [m]	SPESSORE	Vs
		[m]	[m/s]
Detriti/riporto	3	3	300
Calcarei notevolmente fratturati	9	6	400
Calcarei	19	10	762
Bedrock	inf	inf	900



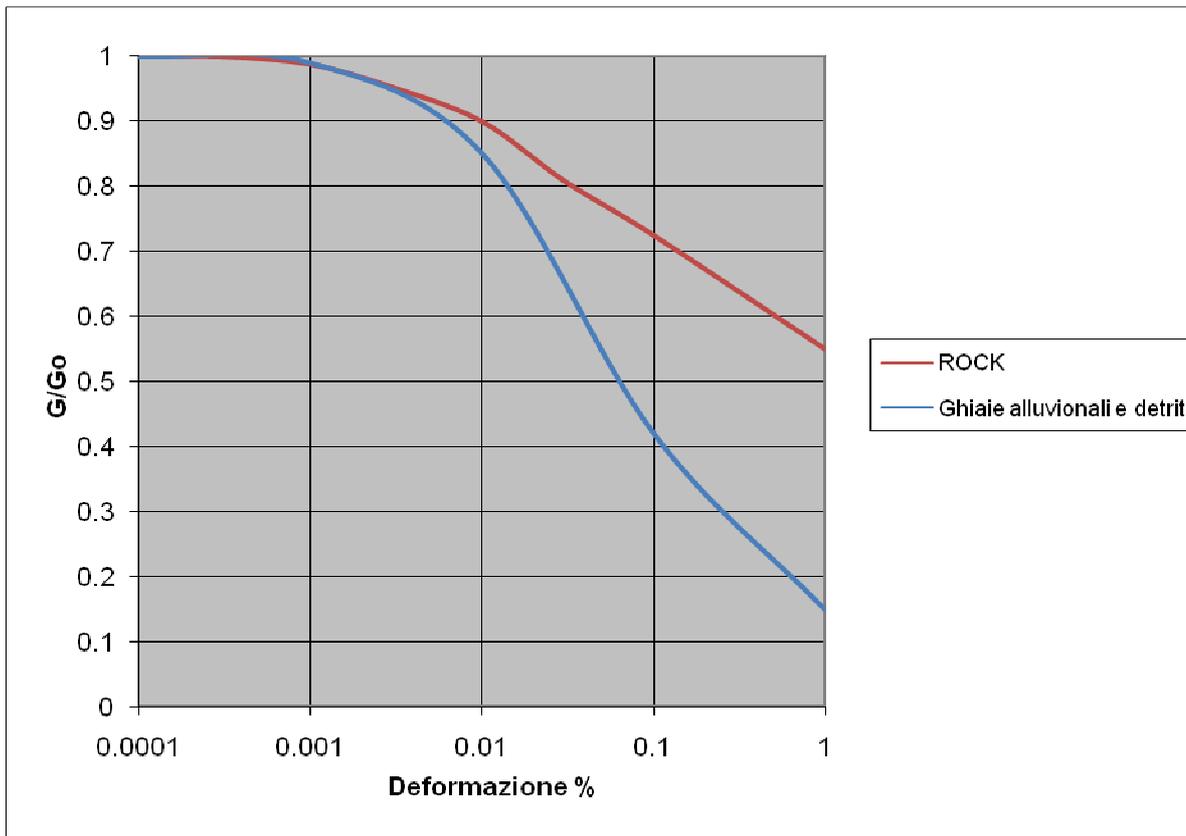


**Fig. 1** -Profilo di Vs semplificato impiegato per la modellazione del sito in esame

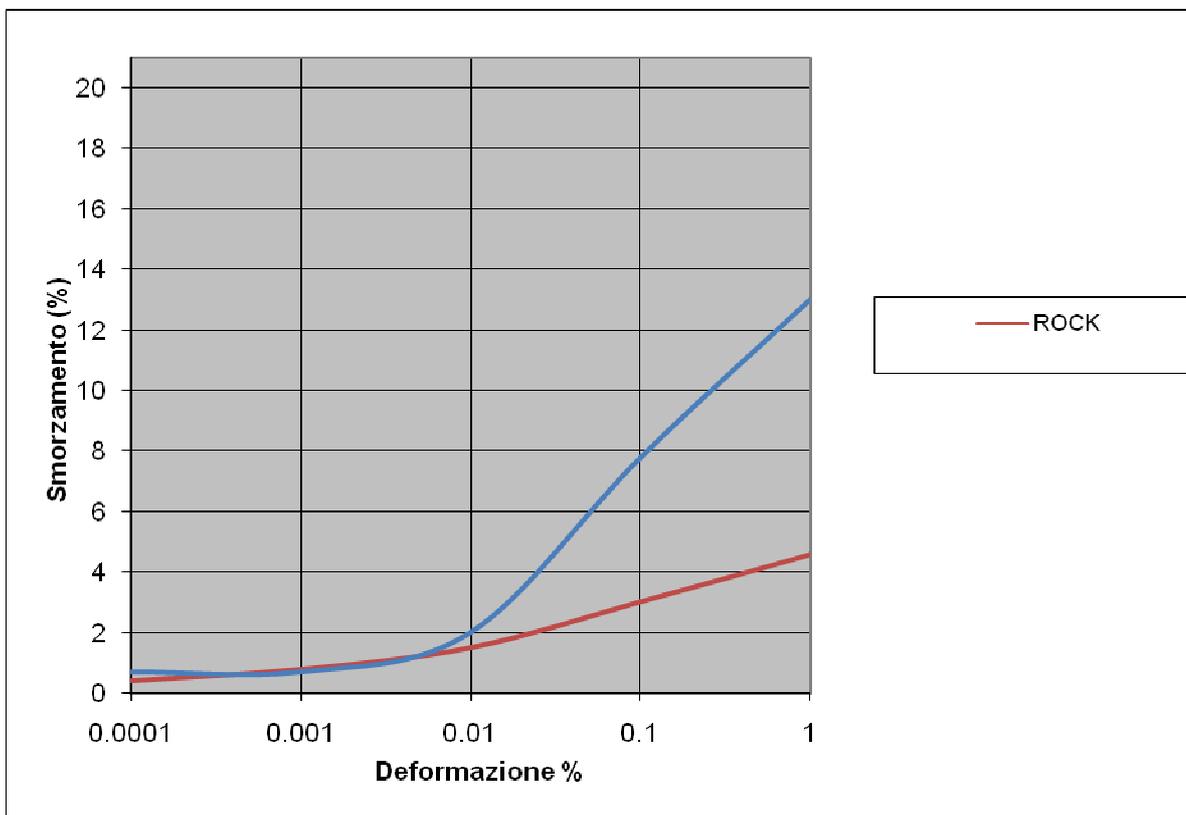
Una volta definito il modello di sottosuolo, sono state scelte le curve di decadimento associabili ai litotipi del modello di sottosuolo (figg. 2-3):

- ✓ Detriti/riporto= *Regione Lazio, Ghiaie alluvionali e detriti*
- ✓ Calcari notevolmente fratturati = *Regione Lazio, Ghiaie alluvionali e detriti*
- ✓ Calcari ( $V_s < 800$  m/s ossia deformabile)= *RockIdris*





**Fig. 2** -Curve di andamento del modulo di taglio in funzione della deformazione per i diversi tipi di materiale usate in questo studio.



**Fig. 3** -Curve di andamento dello smorzamento (%) in funzione della deformazione per i diversi tipi di materiale usate in questo studio.



### 3. SCELTA DELL'INPUT SISMICO

Una volta determinato il modello di sottosuolo si è passati alla definizione dell'input in termini di eventi sismici da sottoporre a simulazione. Il primo passo compiuto è stata la stima dell'accelerazione di base ( $a_g$ ) effettuata utilizzando il foglio di calcolo Spettri-NTC ver.1.0.3 rilasciato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici per la stima dell'azione sismica di progetto (tab.2), utilizzando una  $V_N=50$  anni e Coefficiente d'uso della costruzione  $C_u=1$ .

Mediante il software Spettri-NTC sono stati anche ricavati gli spettri di risposta orizzontale per gli stati limite SLV-SLD-SLO, relativi al sito in questione, distinti in funzione della Categoria di sottosuolo (fig. 4-5-6)

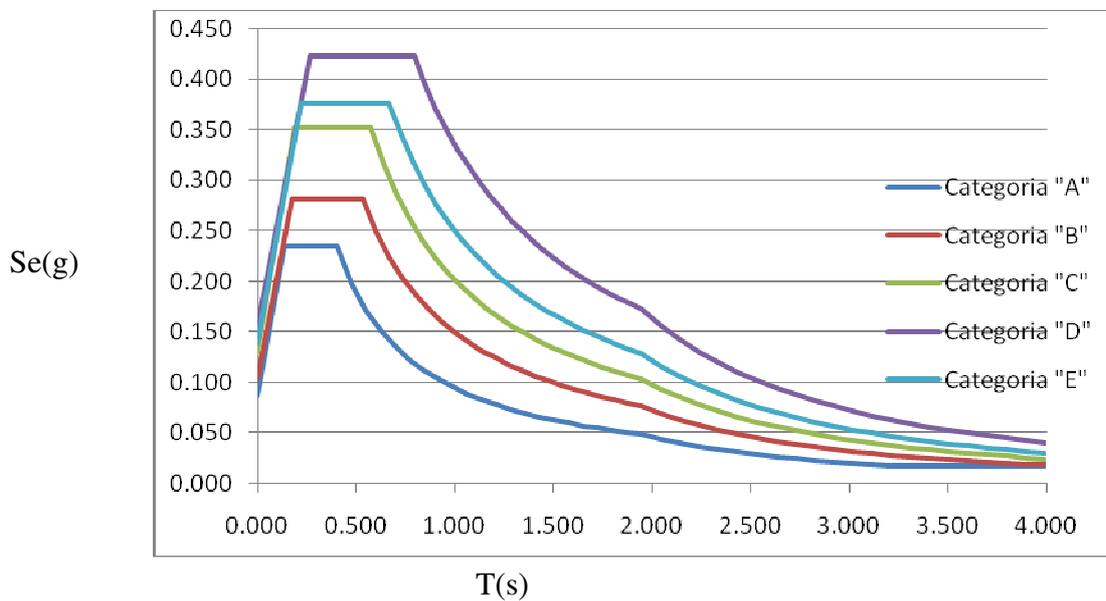
SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	30	0,036	2,542	0,262
SLD	50	0,043	2,544	0,290
SLV	475	0,086	2,718	0,402
SLC	975	0,106	2,744	0,434

**TAB.2** - Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_C^*$  per i periodi di ritorno  $T_R$  associati a ciascuno SL

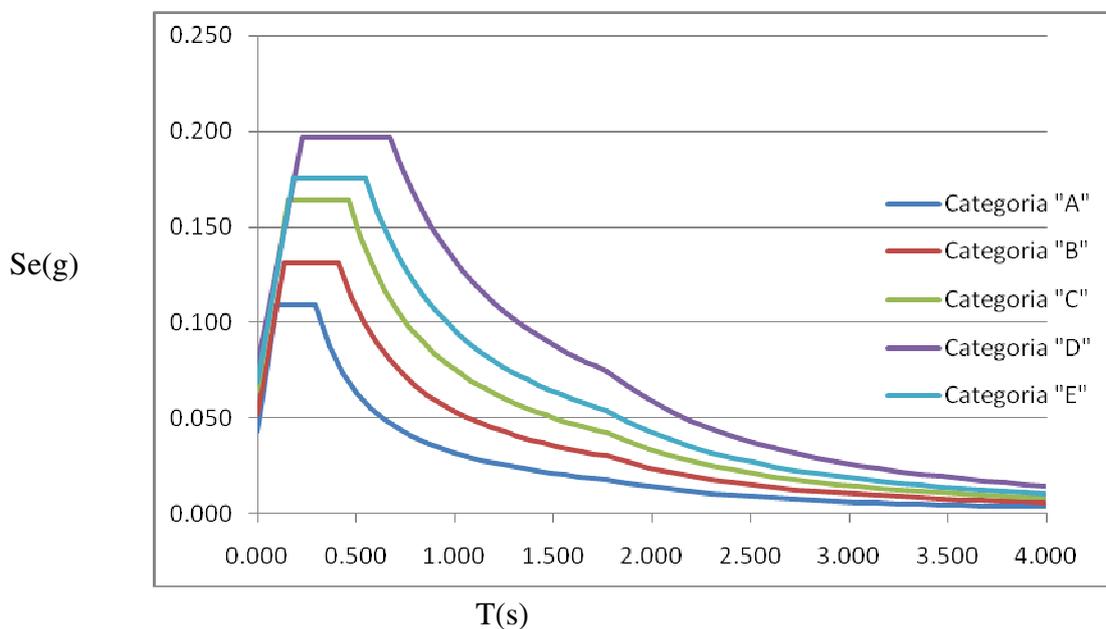
Successivamente visto che l'estrazione degli accelerogrammi di input prevede la determinazione di altri parametri sismologici, oltre il valore di  $a_g$ .

In particolare, bisognerà conoscere per il sito in esame i dati di **disaggregazione** (variabilità in termini di magnitudo e distanza), questi sono stati desunti dalla pagina del sito dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia di Milano <http://esse1-gis.mi.ingv.it> dedicata ai dati di pericolosità sismica nazionale (Tab. 3).



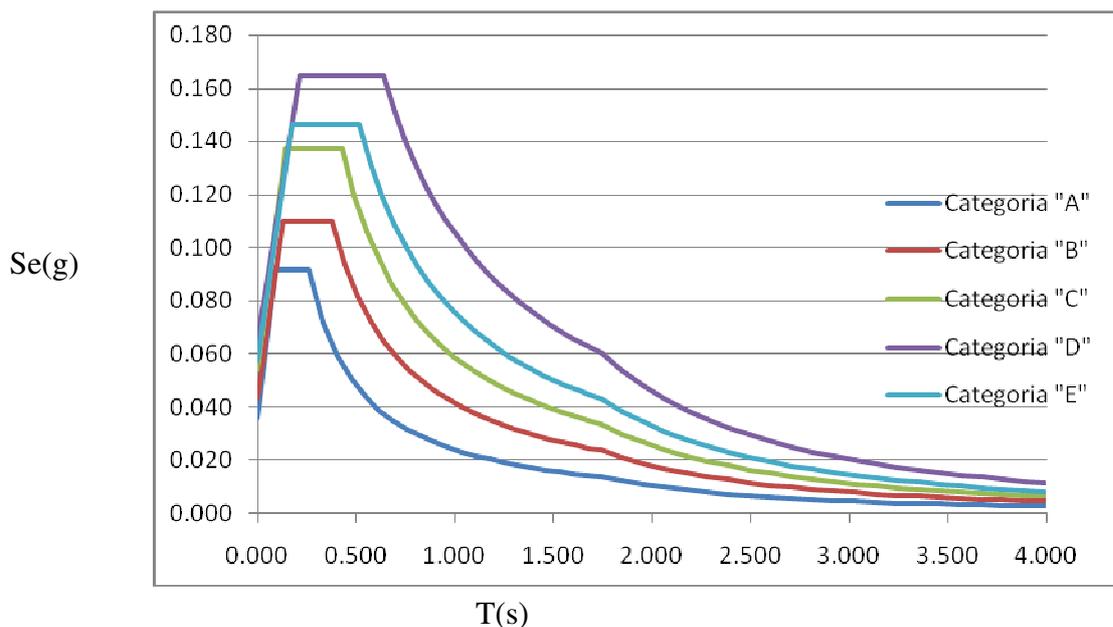


**Fig. 4** - Spettri di risposta orizzontale per lo stato limite SLV distinti in funzione della categoria di sottosuolo



**Fig. 5** - Spettri di risposta orizzontale per lo stato limite SLD distinti in funzione della categoria di sottosuolo





**Fig. 6** - Spettri di risposta orizzontale per lo stato limite SLO distinti in funzione della categoria di sottosuolo

**TAB.3**

DISTANZA (km)	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilita' di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 41.4346, lon: 13.2236, ID: 30521)										
	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	0.982	1.240	0.378	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	7.880	11.800	4.670	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	2.240	4.660	2.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.266	1.840	2.130	1.240	1.300	1.080	0.549	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.564	1.980	2.530	3.080	2.900	1.630	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.013	0.818	1.950	2.860	3.120	1.950	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.186	1.270	2.340	2.920	2.020	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.009	0.647	1.690	2.440	1.860	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.255	1.260	2.260	2.020	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.063	0.821	1.820	1.810	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.377	0.965	1.040	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.169	0.577	0.662	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.067	0.352	0.440	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.213	0.302	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.121	0.199	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.064	0.122	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033	0.072	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.044	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.030	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.020	0.000	0.000	0.000

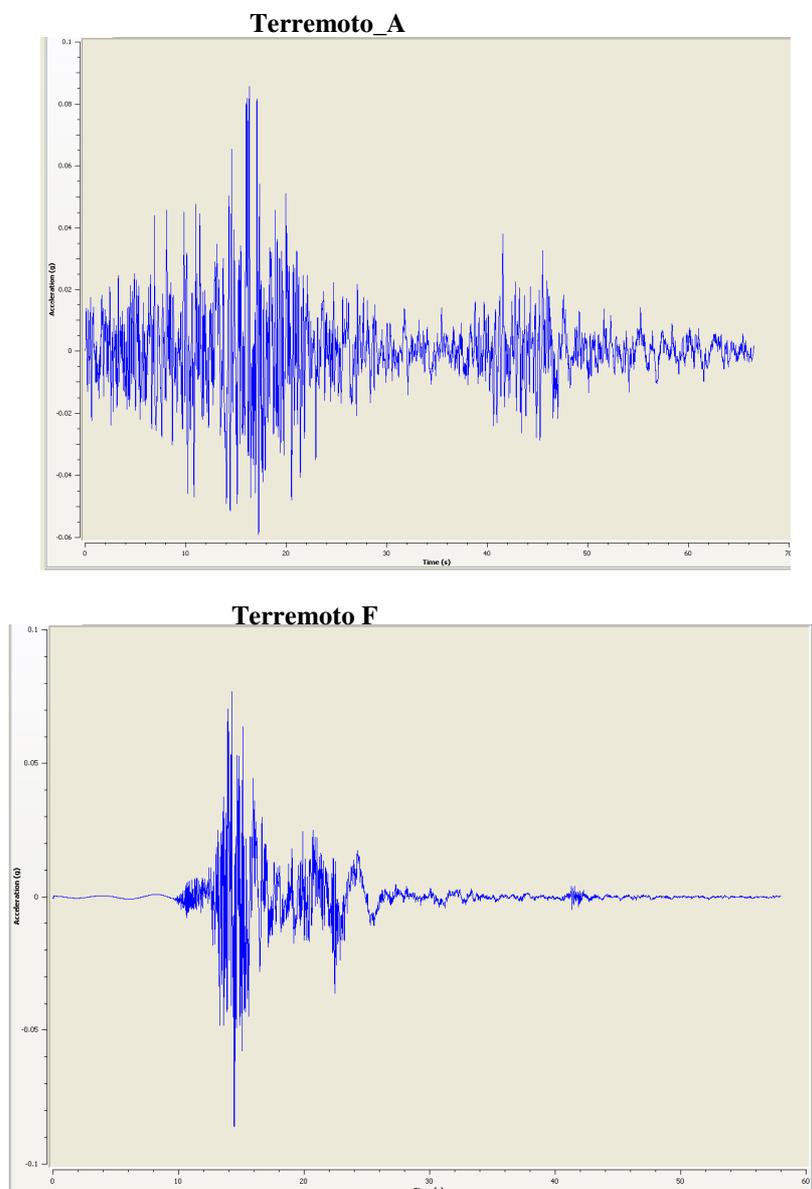
Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.800	47.600	1.550



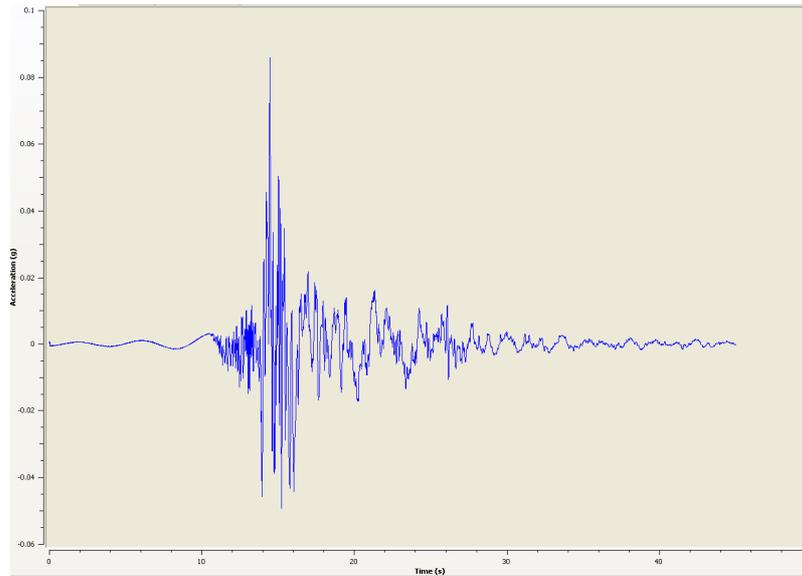
A questo punto, mediante l'utilizzo dei dati sopramenzionati, è stata avviata l'estrazione degli accelerogrammi di input. mediante il software **Rexel 3.5 beta**, messo a punto dalla ReLUIIS di Napoli.

Questo software permette l'estrazione di accelerogrammi di input naturali per applicazioni ingegneristiche da più banche dati; quella utilizzata per questa analisi è la banca dati europea ESD (Ambraseys et al., 2004) da cui sono stati estratti 7 accelerogrammi per ogni stato limite (fig. 7; tab.4, 5, 6), a cui corrispondono gli spettri di input ed output riportati nelle figure 8-9-10.

**Fig. 7–N.3** Accelerogrammi dei 7 di input (al bedrock) - SLV  $|PGA_0| = 0.086$  g.



### Terremoto G



Tab.4 - Terremoti utilizzati per la risposta sismica locale - SLV

Earthquake ID	EarthquakeName	Mw	Fault Mechanism	EpicentralDistance [km]	PGA_X [m/s <sup>2</sup> ]	PGA_Y [m/s <sup>2</sup> ]	PGV_X [m/s]	PGV_Y [m/s]	EC8 Site class
2142	South Iceland (aftershock)	6.4	strike slip	20	10,426	0.8446	0.0941	0.1217	A
2142	South Iceland (aftershock)	6.4	strike slip	24	11,132	0.5434	0.1083	0.0409	A
146	Campano Lucano	6.9	normal	25	0.5878	0.5876	0.0436	0.0585	A
2142	South Iceland (aftershock)	6.4	strike slip	14	17,476	11,423	0.0966	0.1765	A
1635	South Iceland	6.5	strike slip	13	12,916	15,325	0.1611	0.101	A
189	Golbasi	6	oblique	29	0.3831	0.538	0.0289	0.0749	A
286	Umbria Marche	6	normal	21	18,296	15,949	0.1007	0.0808	A
mean:		6.371		20.85714	1.14221	0.969043	0.090471	0.093471	

Tab.5 - Terremoti utilizzati per la risposta sismica locale - SLD

Earthquake ID	EarthquakeName	Mw	Fault Mechanism	EpicentralDistance [km]	PGA_X [m/s <sup>2</sup> ]	PGA_Y [m/s <sup>2</sup> ]	PGV_X [m/s]	PGV_Y [m/s]
1635	South Iceland	6.5	strike slip	34	0.3856	0.4192	0.0386	0.0436
2142	South Iceland (aftershock)	6.4	strike slip	22	0.513	0.386	0.0572	0.0397
1635	South Iceland	6.5	strike slip	31	0.54	0.6615	0.0394	0.0779
189	Golbasi	6	oblique	29	0.3831	0.538	0.0289	0.0749
1635	South Iceland	6.5	strike slip	34	0.3856	0.4192	0.0386	0.0436
286	Umbria Marche	6	normal	25	0.6803	10,332	0.0319	0.0441
65	Friuli (aftershock)	6	thrust	32	0.8677	0.4837	0.0267	0.0178
mean:		6.271428571		29.57142857	0.53647	0.562971429	0.037328571	0.0488



Tab.6 - Terremoti utilizzati per la risposta sismica locale - SLO

Earthquake ID	EarthquakeName	Mw	Fault Mechanism	EpicentralDistance [km]	PGA_X [m/s^2]	PGA_Y [m/s^2]	PGV_X [m/s]	PGV_Y [m/s]	EC8 Site
1338	Mt. Vatnafjoll	6	oblique	25	0.3021	0.3394	0.0279	0.0218	A
1338	Mt. Vatnafjoll	6	oblique	24	0.3222	0.243	0.0168	0.0228	A
286	Umbria Marche	6	normal	37	0.2121	0.2041	0.0111	0.011	A
1635	South Iceland	6.5	strike slip	42	0.2511	0.409	0.0214	0.0264	A
1635	South Iceland	6.5	strike slip	29	0.8851	0.5617	0.0443	0.0271	A
1635	South Iceland	6.5	strike slip	34	0.3856	0.4192	0.0386	0.0436	A
65	Friuli (aftershock)	6	thrust	32	0.8677	0.4837	0.0267	0.0178	A
mean:		6.214285714		31.85714286	0.46084	0.380014286	0.026685714	0.024357143	

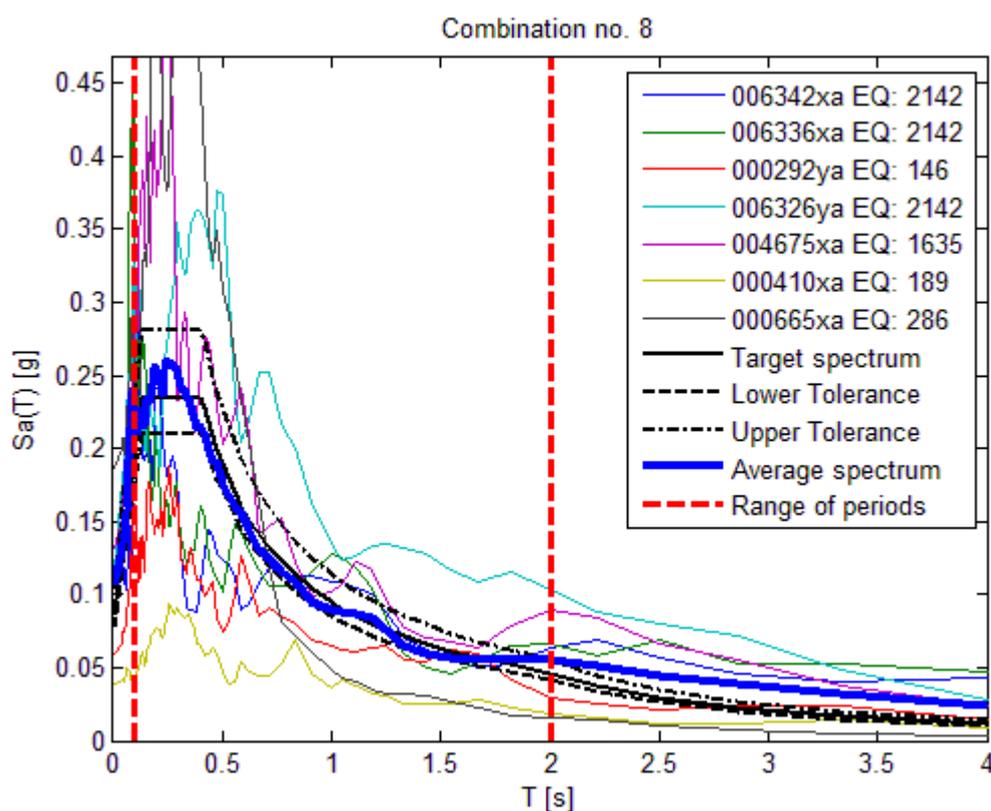


Fig. 8 – Combinazione relativa agli spettri di input ed output ottenuti mediante Rexel 3.5 beta relativi agli accelerogrammi, utilizzati per lo stato limite SLV



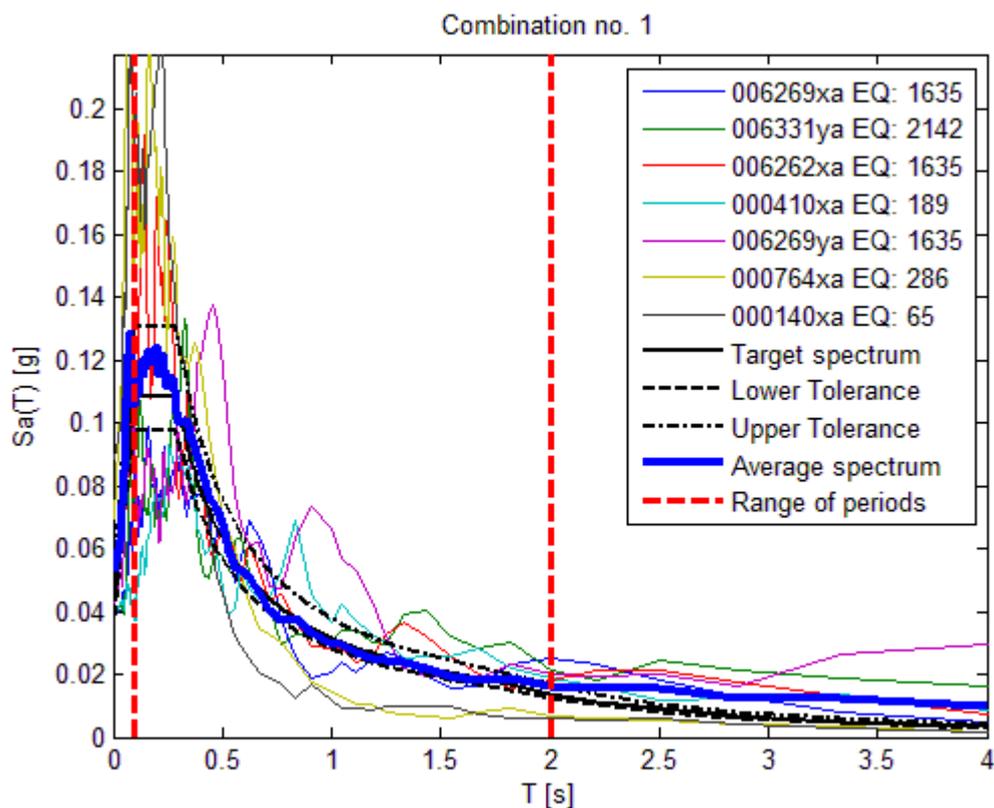


Fig. 9 – Combinazione relativa agli spettri di input ed output ottenuti mediante Rexel 3.5 beta relativi agli accelerogrammi, utilizzati per lo stato limite SLD

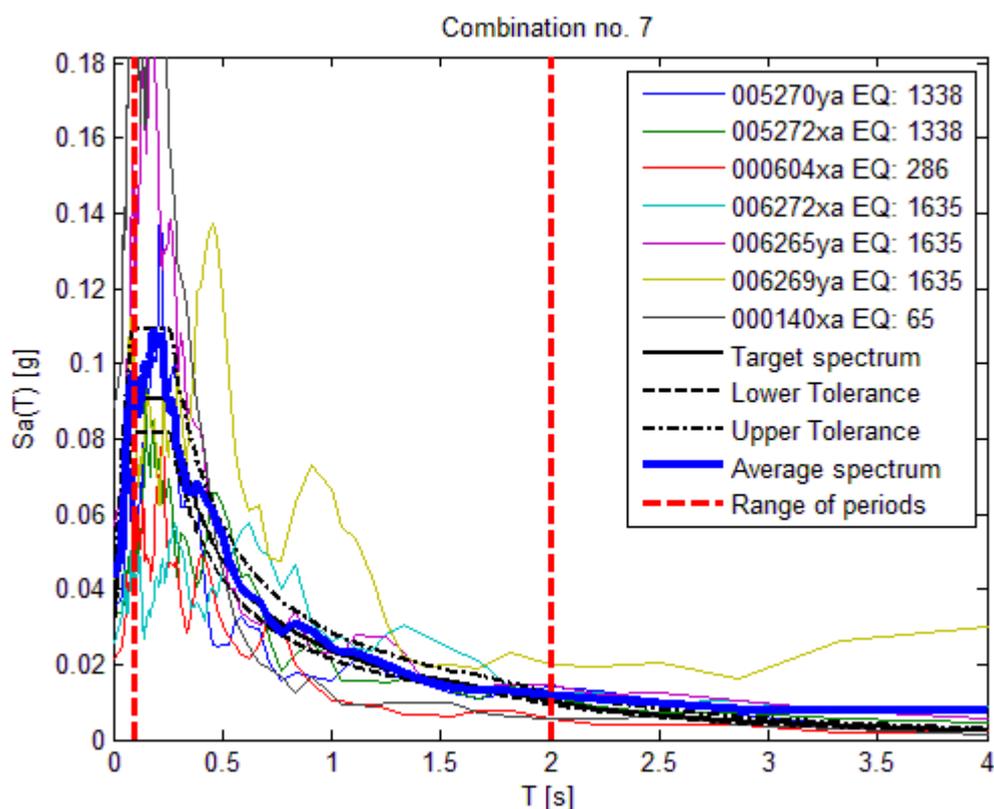


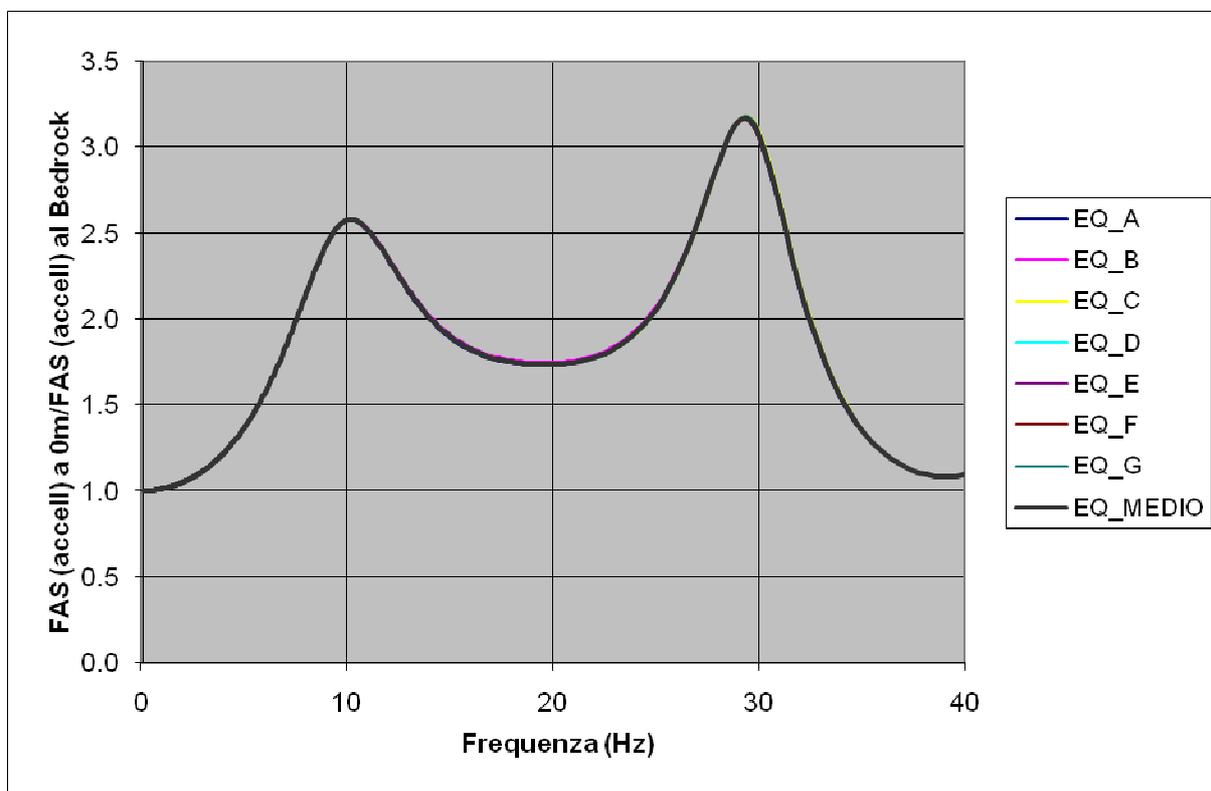
Fig. 10 – Combinazione relativa agli spettri di input ed output ottenuti mediante Rexel 3.5 beta relativi agli accelerogrammi, utilizzati per lo stato limite SLO



## 4. FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DEL SITO

Sebbene non richiesto come output ai fini progettuali, la funzione di trasferimento del sito (fig.11) è un ottimo ed immediato strumento per visualizzare la modalità con cui il sito, sulla base delle sue caratteristiche sismostratigrafiche, influisce sul segnale in ingresso, poiché determina i livelli di amplificazione nel dominio delle frequenze.

Per il calcolo del moto atteso in superficie si è partiti dai 7 accelerogrammi reali di input (componente orizzontale del moto; 7 per ogni stato limite) relativi ad un sito in roccia (A) con valore di accelerazione di picco  $ag = 0.086$  g per SLV. Tale valore di  $ag$  deriva dai dati imposti secondo le NTC (2008) per il sito di studio, scalato per un coefficiente d'uso 1 che corrisponde ad una classe d'uso II, vita nominale =50 anni, secondo lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV).



**Fig. 11** - Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 7 terremoti



## 6. SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI (SLE)PER GLI STATI LIMITE SLV – SLD - SLO

Il risultato della risposta sismica locale sono gli spettri di risposta elastici per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi prescelti ed il loro valore medio. Gli spettri di risposta medi sono dati in forma numerica in Tabella 7 ed in forma grafica nelle figg. 12-13-14 per i tre Stati Limite SLV-SLD-SLO; mentre nelle figure 15-16-17 gli spettri di output della risposta sismica locale sono confrontati con gli spettri di risposta orizzontale distinti in funzione della categoria di sottosuolo.

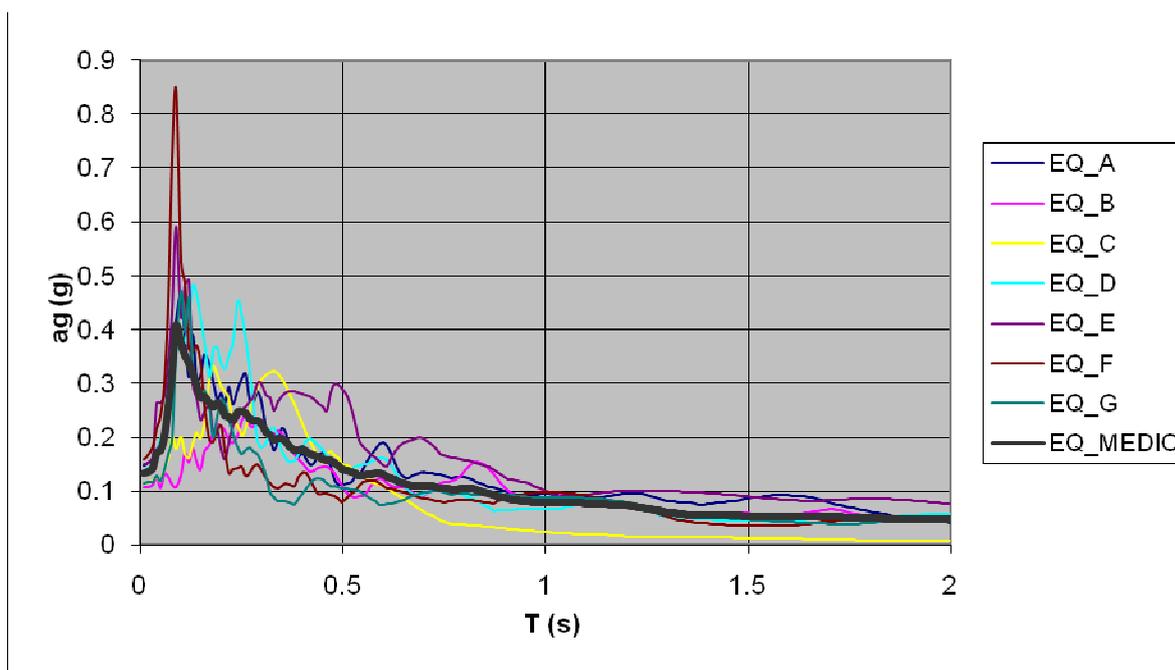


Fig. 12 - Spettri di risposta ottenuti da 7 accelerogrammi di input e la loro media (nero) - SLV

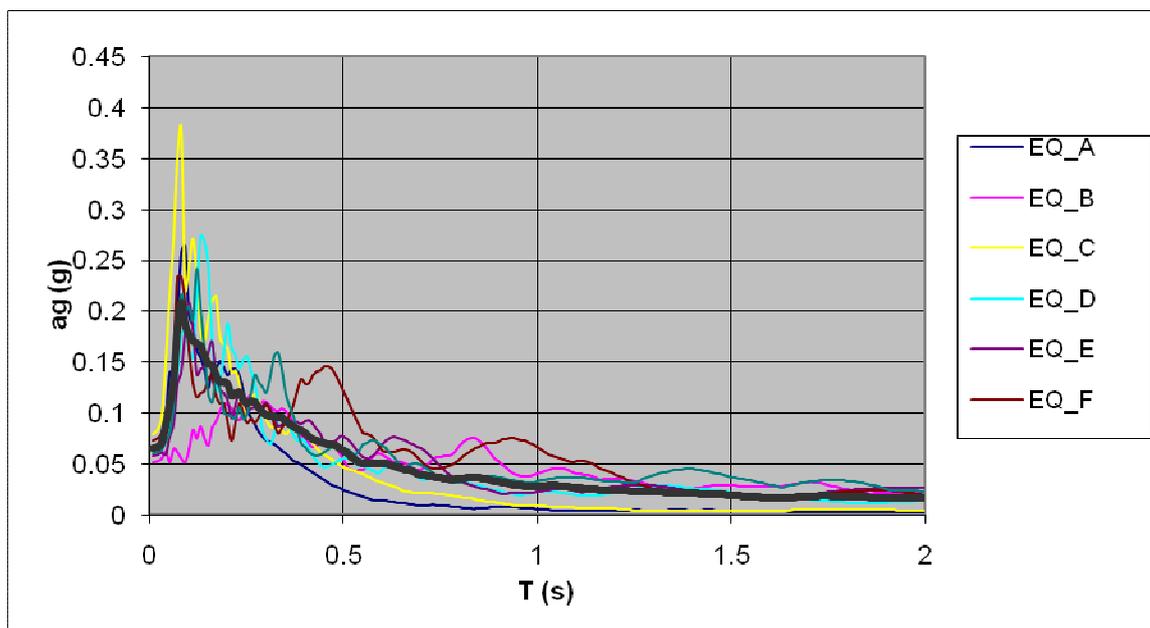
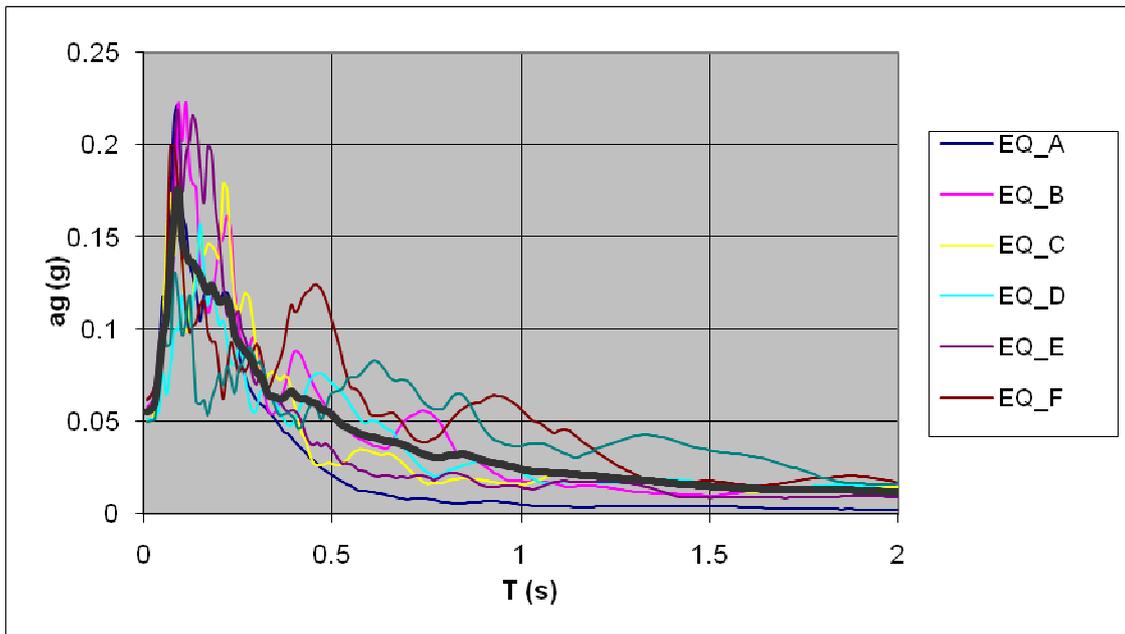
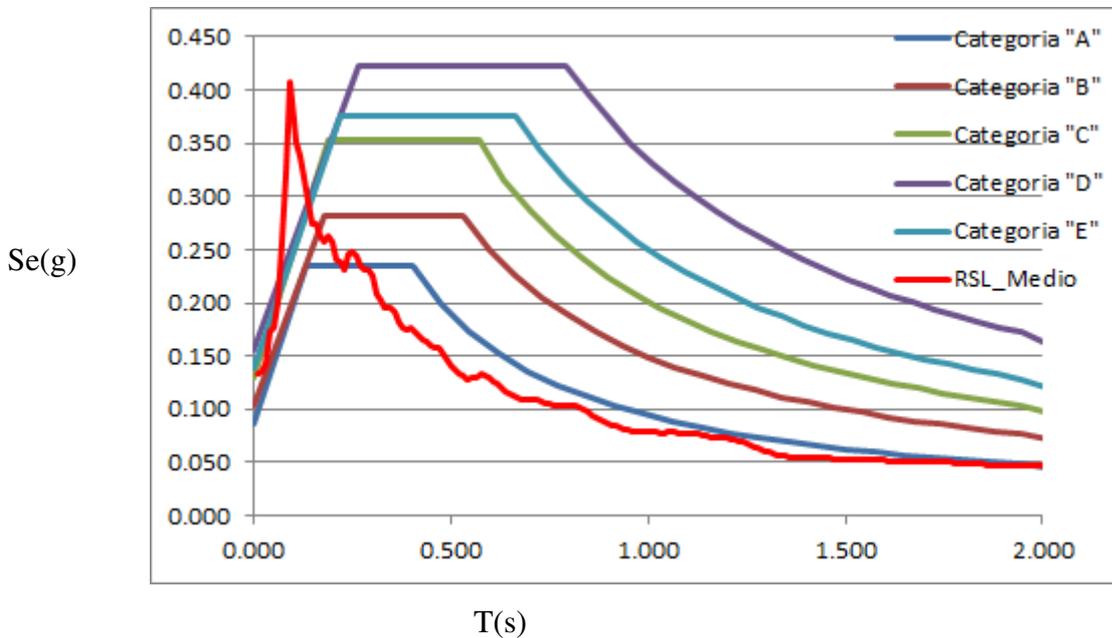


Fig. 13 - Spettri di risposta ottenuti da 7 accelerogrammi di input e la loro media (nero) - SLD



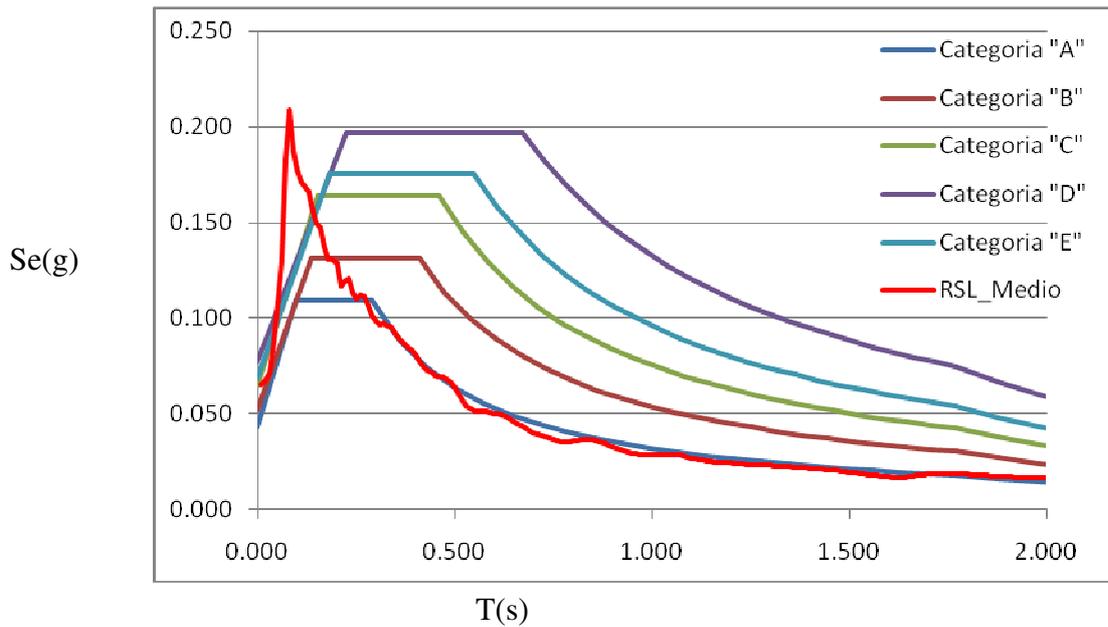


**Fig. 14** - Spettri di risposta ottenuti da 7 accelerogrammi di input e la loro media (nero) - SLO

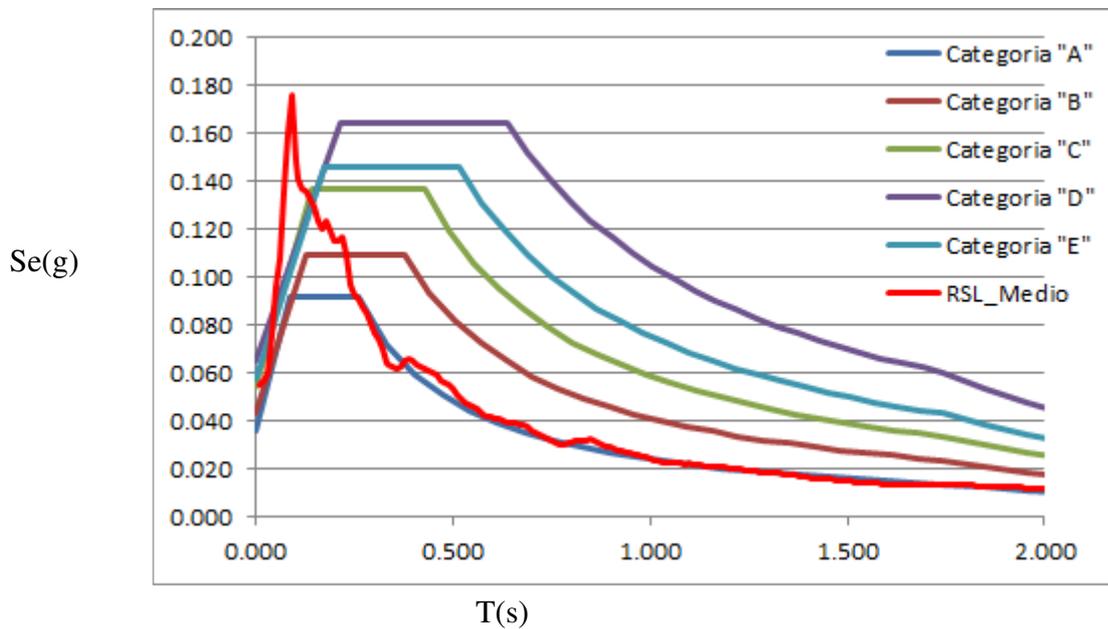


**Fig. 15**–Spettro di output di risposta sismica locale confrontato con gli spettri di normativa per lo stato limite SLV distinti in funzione della categoria di sottosuolo





**Fig. 16** - Spettro di output di risposta sismica locale confrontato con gli spettri di normativa per lo stato limite SLD distinti in funzione della categoria di sottosuolo



**Fig. 17** - Spettro di output di risposta sismica locale confrontato con gli spettri di normativa per lo stato limite SLO distinti in funzione della categoria di sottosuolo



**Tabella 7** -Spettri di risposta medi calcolati per il sito

Periodo (s)	Spettro di risposta medio (g) SLV	Spettro di risposta medio (g) SLD	Spettro di risposta medio (g) SLO
0.01	0,132751855	0,065356541	0,055364818
0.02	0,135806057	0,067242579	0,056769207
0.03	0,143211442	0,071828348	0,059841038
0.04	0,171922765	0,088283868	0,076095136
0.05	0,176340397	0,108101847	0,096300163
0.06	0,200601421	0,129903282	0,107469178
0.07	0,256587802	0,182530882	0,135947088
0.08	0,321595525	0,208424289	0,160190407
0.09	0,407861809	0,187007845	0,175748421
0.1	0,372100604	0,17740829	0,148567848
0.11	0,35178339	0,171597712	0,141255729
0.12	0,337501872	0,168891403	0,136555437
0.13	0,317488736	0,16609847	0,136141318
0.14	0,295514346	0,155908454	0,132818387
0.15	0,274300789	0,148971153	0,129179296
0.16	0,274159842	0,1469897	0,123674918
0.17	0,263538857	0,13751523	0,120160236
0.18	0,257240188	0,130468834	0,123609717
0.19	0,26282211	0,130391383	0,119216963
0.2	0,256672496	0,128622791	0,1147954
0.21	0,240131229	0,116902469	0,115513132
0.22	0,238240172	0,119049347	0,116556919
0.23	0,231570653	0,120426009	0,109585066
0.24	0,246327078	0,113393015	0,096832475
0.25	0,247299262	0,109790253	0,09302556
0.26	0,245004277	0,112134714	0,09080841
0.27	0,23521106	0,111304659	0,088043569
0.28	0,230410332	0,106289263	0,085553077
0.29	0,230146623	0,101329873	0,081310364
0.3	0,22484656	0,098647043	0,077087817
0.31	0,209153223	0,096901937	0,074584351
0.32	0,203266986	0,097178764	0,069905624
0.33	0,194821959	0,096242141	0,064328028
0.34	0,196030896	0,095257162	0,06342775
0.35	0,196263439	0,091696645	0,062788252
0.36	0,191127721	0,088948476	0,062113182
0.37	0,182640343	0,086514512	0,062860157
0.38	0,176357695	0,084582502	0,064990367



0.39	0,175042325	0,083028144	0,066294625
0.4	0,177094356	0,080829658	0,065076869
0.41	0,173610079	0,077453358	0,06321951
0.42	0,169126827	0,074832184	0,062527721
0.43	0,165526438	0,072804945	0,062216787
0.44	0,162827445	0,07159825	0,061140737
0.45	0,159310489	0,070204762	0,060309371
0.46	0,157638435	0,069538796	0,059195277
0.47	0,157180721	0,069230965	0,056995083
0.48	0,152599412	0,067983742	0,056354271
0.49	0,146803918	0,066280268	0,055414633
0.5	0,140338715	0,06356893	0,053577922
0.51	0,136715485	0,060415487	0,051250418
0.52	0,134356389	0,05750666	0,04913366
0.53	0,131898329	0,054105725	0,047743024
0.54	0,1286507	0,0523211	0,046926826
0.55	0,128803087	0,051172623	0,045587444
0.56	0,12988032	0,051027326	0,044730385
0.57	0,131410334	0,051280441	0,043738072
0.58	0,132949103	0,051173901	0,042862387
0.59	0,132335887	0,050666527	0,042125169
0.6	0,130140609	0,050193773	0,041593137
0.61	0,126290088	0,05008964	0,041297154
0.62	0,123597379	0,049511602	0,040813856
0.63	0,120142789	0,048593922	0,040129629
0.64	0,116941765	0,047411052	0,039523915
0.65	0,11416223	0,045997263	0,039137204
0.66	0,111966204	0,044859564	0,038982296
0.67	0,110152278	0,043872516	0,038540169
0.68	0,109527229	0,042616823	0,038063404
0.69	0,109100992	0,041236412	0,037311539
0.7	0,108870133	0,039950431	0,036293926
0.71	0,10865717	0,039090957	0,035273928
0.72	0,108225938	0,038482374	0,034242179
0.73	0,107232892	0,037871666	0,033305482
0.74	0,105599869	0,037131404	0,032324849
0.75	0,104418022	0,036322487	0,03147767
0.76	0,103717162	0,035692752	0,03090713
0.77	0,102825898	0,035149261	0,030380845
0.78	0,102814721	0,034866931	0,030349077
0.79	0,103283148	0,035107915	0,030595939
0.8	0,103633172	0,035618503	0,030932371
0.81	0,103827125	0,036175569	0,031467581
0.82	0,103314518	0,03660292	0,031802115
0.83	0,102024264	0,036780113	0,031868984



0.84	0,10014555	0,036755234	0,032169052
0.85	0,097686762	0,036529377	0,032198373
0.86	0,094827027	0,036013281	0,031858474
0.87	0,092104084	0,035299475	0,031242708
0.88	0,090367819	0,034425198	0,03046952
0.89	0,088447969	0,03335569	0,029594243
0.9	0,086821487	0,032672868	0,02896045
0.91	0,085181094	0,03202218	0,028454268
0.92	0,083813457	0,031383153	0,027986779
0.93	0,082410023	0,030669818	0,027548093
0.94	0,081234947	0,029991895	0,027108431
0.95	0,080401944	0,029407882	0,026655442
0.96	0,079780574	0,028873184	0,026168361
0.97	0,079260859	0,028688961	0,025749334
0.98	0,078860166	0,028537854	0,025278517
0.99	0,078811435	0,028580011	0,024825115
1	0,078715583	0,028684143	0,024317989
1.01	0,078518502	0,028745814	0,023756297
1.02	0,078187178	0,028743901	0,023291723
1.03	0,077737248	0,028754441	0,022955191
1.04	0,077851617	0,028842346	0,022827832
1.05	0,078481906	0,028802407	0,022716755
1.06	0,078683064	0,028601925	0,022612129
1.07	0,078439784	0,028203757	0,022476924
1.08	0,077797026	0,027605381	0,022300268
1.09	0,077241215	0,026866321	0,022106943
1.1	0,077015359	0,026598234	0,022221703
1.11	0,076838303	0,026322371	0,022182219
1.12	0,076624274	0,026064964	0,021981609
1.13	0,076288028	0,025832184	0,021654276
1.14	0,075782688	0,025501016	0,021333984
1.15	0,075080694	0,025027855	0,021069851
1.16	0,074185904	0,024469244	0,020933533
1.17	0,073920992	0,024428043	0,020883372
1.18	0,073573763	0,024410936	0,020772102
1.19	0,073118963	0,024370798	0,020615969
1.2	0,072538033	0,024280757	0,020430594
1.21	0,071785264	0,024140961	0,020222011
1.22	0,070955911	0,023955057	0,019989176
1.23	0,0699917	0,023739677	0,019751571
1.24	0,068876232	0,02350952	0,019556075
1.25	0,067621448	0,023296572	0,019359589
1.26	0,066232838	0,023263522	0,019149328
1.27	0,064707299	0,023245172	0,018933527
1.28	0,063064058	0,023164513	0,018821432



1.29	0,061508962	0,023052294	0,018707792
1.3	0,060371842	0,022984392	0,01855097
1.31	0,059355975	0,022843158	0,01838687
1.32	0,058371396	0,02264579	0,018213276
1.33	0,057360507	0,022474365	0,018059894
1.34	0,056520606	0,022350495	0,017937063
1.35	0,055733208	0,02218831	0,017790774
1.36	0,05515951	0,022010273	0,017607745
1.37	0,054681908	0,021865094	0,017387477
1.38	0,05425199	0,021720117	0,017132329
1.39	0,053971535	0,021544988	0,016845169
1.4	0,053972299	0,021419663	0,016538588
1.41	0,05393876	0,021298961	0,016253451
1.42	0,053934346	0,021162901	0,016055909
1.43	0,053869442	0,020974703	0,015910316
1.44	0,053738044	0,020764729	0,015780187
1.45	0,053704281	0,020647193	0,015695308
1.46	0,053706308	0,020499969	0,015596354
1.47	0,053665709	0,020301002	0,015467742
1.48	0,053567276	0,020047677	0,015306453
1.49	0,053403921	0,019759082	0,015122294
1.5	0,053242549	0,019451815	0,014919853
1.51	0,053079355	0,019151523	0,014725305
1.52	0,052906865	0,018861058	0,01458916
1.53	0,052722972	0,018593871	0,014457632
1.54	0,052572894	0,018343661	0,014318535
1.55	0,052608449	0,018102723	0,01417358
1.56	0,052572133	0,017864329	0,014042747
1.57	0,052463978	0,017624719	0,013942408
1.58	0,052298882	0,017386287	0,01385773
1.59	0,052071512	0,017147692	0,013765863
1.6	0,051817109	0,016915443	0,013682447
1.61	0,051594264	0,016694417	0,01360499
1.62	0,051621345	0,016501159	0,013527818
1.63	0,051634444	0,016415681	0,013473458
1.64	0,051609014	0,016672189	0,013427948
1.65	0,051540089	0,016949273	0,013379887
1.66	0,0514279	0,017229612	0,013324361
1.67	0,051400139	0,017545037	0,013278989
1.68	0,051389464	0,017866657	0,013260603
1.69	0,051432659	0,018166187	0,013248593
1.7	0,051440709	0,018412994	0,013250607
1.71	0,051396691	0,018596229	0,013252192
1.72	0,051284079	0,01871186	0,013302596
1.73	0,051097432	0,018769532	0,013333686



1.74	0,050845643	0,018774245	0,0133447
1.75	0,050540988	0,01873892	0,013348465
1.76	0,05026945	0,018673055	0,013347938
1.77	0,050058833	0,018580555	0,013328803
1.78	0,049844187	0,018466589	0,013281512
1.79	0,049629685	0,018329899	0,013212663
1.8	0,049425682	0,018185591	0,013126912
1.81	0,049219274	0,018067162	0,01308738
1.82	0,049001983	0,017927442	0,013033623
1.83	0,048765407	0,017789092	0,012983148
1.84	0,048503595	0,017662793	0,012950602
1.85	0,048221736	0,01751405	0,01290659
1.86	0,047923011	0,017337396	0,012882626
1.87	0,047926554	0,017288798	0,012859744
1.88	0,04794566	0,017218634	0,012814097
1.89	0,047926466	0,017142283	0,012748869
1.9	0,047875874	0,017028144	0,012669263
1.91	0,047799673	0,01687828	0,012575509
1.92	0,047697392	0,016810723	0,012466182
1.93	0,047570002	0,016759724	0,012354149
1.94	0,047424543	0,016693926	0,012239399
1.95	0,047267039	0,016605113	0,0121173
1.96	0,047235835	0,016568071	0,011985215
1.97	0,047235363	0,01653762	0,011848479
1.98	0,04721873	0,016487514	0,011712681
1.99	0,047177137	0,016411813	0,011575599
2	0,047100221	0,016323266	0,011448663
2.01	0,046976794	0,016241013	0,011349035
2.02	0,04680164	0,016133276	0,011263785
2.03	0,04656632	0,01600006	0,011185554
2.04	0,046264779	0,01583919	0,011109469
2.05	0,046162693	0,015778754	0,011040991
2.06	0,046075551	0,01572921	0,010968944
2.07	0,045934841	0,015654688	0,010891928
2.08	0,045747232	0,015558114	0,010812334
2.09	0,045572606	0,015450456	0,010734018
2.1	0,045411033	0,015374089	0,010659923
2.11	0,045208873	0,015304463	0,010596486
2.12	0,045022226	0,015229711	0,010539387
2.13	0,044859156	0,015151837	0,010482911
2.14	0,044667666	0,015073113	0,010436185
2.15	0,044461287	0,015017412	0,010445716
2.16	0,044226362	0,015033442	0,010454803
2.17	0,04397238	0,015040487	0,010459696
2.18	0,043698183	0,015036169	0,010458968



2.19	0,043405688	0,015021175	0,010452444
2.2	0,043097872	0,014999212	0,01044026
2.21	0,042771459	0,014966166	0,010423495
2.22	0,042428023	0,014918673	0,010403647
2.23	0,042085073	0,014865053	0,010380882
2.24	0,041815966	0,014844335	0,010358459
2.25	0,041518732	0,014805424	0,010338648
2.26	0,041198319	0,014746837	0,010314693
2.27	0,040843405	0,014723662	0,010289345
2.28	0,040449514	0,014752302	0,010259652
2.29	0,040025369	0,014799472	0,010226643
2.3	0,03956559	0,014824641	0,010188582
2.31	0,039118322	0,014829639	0,010146279
2.32	0,038722424	0,014817419	0,010101324
2.33	0,038321413	0,014788898	0,010054266
2.34	0,03801202	0,014763747	0,010006457
2.35	0,037733563	0,014739089	0,0099581
2.36	0,037545675	0,014716394	0,009911644
2.37	0,037492659	0,014735519	0,009864656
2.38	0,037445643	0,014741109	0,009816967
2.39	0,037386243	0,014733898	0,009768578
2.4	0,037376588	0,01471389	0,009734377
2.41	0,037358197	0,014686785	0,009705624
2.42	0,037347879	0,014669014	0,009681321
2.43	0,037337875	0,014690946	0,00965444
2.44	0,037320515	0,014703432	0,009625686
2.45	0,0373027	0,014709914	0,009595041
2.46	0,037278722	0,0147083	0,009565449
2.47	0,037279652	0,014701247	0,009534046
2.48	0,037295586	0,014684975	0,009502645
2.49	0,037312505	0,01466048	0,009470698
2.5	0,037313247	0,014627082	0,009463096
2.51	0,037304524	0,014583554	0,009480083
2.52	0,037294893	0,014531235	0,009494772
2.53	0,037270772	0,014469162	0,009504037
2.54	0,037229361	0,014397848	0,009508523
2.55	0,037170353	0,014320486	0,009511781
2.56	0,037098018	0,014235788	0,009508231
2.57	0,037012591	0,014140826	0,009495809
2.58	0,036911995	0,014036509	0,009475503
2.59	0,036804245	0,013924193	0,009449034
2.6	0,036707091	0,013814207	0,009420893
2.61	0,036603047	0,013702744	0,009394549
2.62	0,03649446	0,013632252	0,009366806
2.63	0,036381935	0,013565482	0,009338133



2.64	0,036258808	0,013496819	0,009312558
2.65	0,036140056	0,013426272	0,009289781
2.66	0,036013863	0,013354034	0,009268474
2.67	0,035876555	0,013281365	0,009245605
2.68	0,035725177	0,013209843	0,00922088
2.69	0,035564706	0,013153322	0,009203004
2.7	0,035396741	0,013093477	0,009175473
2.71	0,035222524	0,013031131	0,009138625
2.72	0,035042451	0,012964826	0,009089642
2.73	0,034855231	0,012895852	0,009036376
2.74	0,034663619	0,012825197	0,008981926
2.75	0,034471855	0,012755324	0,008926912
2.76	0,034280204	0,012684634	0,008863045
2.77	0,034106041	0,01261446	0,008791527
2.78	0,033946796	0,012545772	0,008715387
2.79	0,033791936	0,012480446	0,008642127
2.8	0,033638627	0,012415633	0,008567178
2.81	0,033484809	0,012351181	0,008491068
2.82	0,033345822	0,012293764	0,008414407
2.83	0,033228231	0,012249603	0,008339156
2.84	0,033109786	0,012206086	0,008265857
2.85	0,032989379	0,012163252	0,008194617
2.86	0,032864366	0,012126371	0,008124858
2.87	0,032734706	0,012102631	0,008056708
2.88	0,032599517	0,012078121	0,007989924
2.89	0,032455236	0,01205445	0,007923846
2.9	0,03230145	0,012025653	0,007856457
2.91	0,032136052	0,011989667	0,007786582
2.92	0,031957479	0,011945714	0,007713765
2.93	0,031766629	0,011893563	0,007637103
2.94	0,031564066	0,011834006	0,007556656
2.95	0,031352466	0,011767503	0,007473035
2.96	0,031156998	0,011696914	0,007386995
2.97	0,030961721	0,011628644	0,007303281
2.98	0,030766712	0,01157508	0,007233748
2.99	0,030575318	0,011521199	0,007164081
3	0,030389911	0,011475568	0,007104945
3.01	0,030212902	0,011443263	0,007056477
3.02	0,030043493	0,011413168	0,007008838
3.03	0,029881832	0,011385374	0,006965066
3.04	0,029729417	0,011360055	0,006926712
3.05	0,029585459	0,011337398	0,006900267
3.06	0,029448553	0,011320405	0,006909615
3.07	0,029318942	0,01130663	0,00692029
3.08	0,029197638	0,011296977	0,006938932



3.09	0,029084262	0,011291377	0,006957391
3.1	0,028979329	0,011289243	0,006975298
3.11	0,028881851	0,011290962	0,006993166
3.12	0,028792654	0,011295069	0,007010155
3.13	0,02871279	0,011302413	0,007025957
3.14	0,028640148	0,011312231	0,007043185
3.15	0,028574873	0,011324268	0,007061263
3.16	0,028516166	0,011345241	0,007078127
3.17	0,028465341	0,011371831	0,007092916
3.18	0,02842409	0,011399608	0,007106106
3.19	0,028421595	0,011430582	0,007117147
3.2	0,028434569	0,011464239	0,007127232
3.21	0,028453142	0,011501931	0,007136796
3.22	0,028478136	0,011540803	0,007145817
3.23	0,028506424	0,011581535	0,007154713
3.24	0,028538175	0,011623813	0,007163773
3.25	0,028571511	0,011667603	0,007173097
3.26	0,028603757	0,011713711	0,007182643
3.27	0,028634963	0,011762867	0,007193641
3.28	0,028665335	0,011815027	0,007208911
3.29	0,028694197	0,011869088	0,007226449
3.3	0,028725273	0,011924447	0,007244561
3.31	0,028753225	0,011980605	0,007263271
3.32	0,028778966	0,012036811	0,007297763
3.33	0,028803338	0,012092469	0,007334199
3.34	0,028828713	0,012145924	0,007374166
3.35	0,028849753	0,012195579	0,007412794
3.36	0,028861594	0,01223941	0,007449271
3.37	0,028860405	0,012275608	0,007483075
3.38	0,028842949	0,012302121	0,007513702
3.39	0,028805156	0,012317555	0,007540285
3.4	0,028745836	0,012321606	0,007562376
3.41	0,028663976	0,012322973	0,007579902
3.42	0,028556768	0,01231154	0,007593057
3.43	0,028478051	0,012287443	0,00760495
3.44	0,028394068	0,012251719	0,007612729
3.45	0,028290683	0,012206264	0,007616581
3.46	0,028171637	0,012161489	0,007617308
3.47	0,028046496	0,012124729	0,007618361
3.48	0,027927354	0,01209	0,007619126
3.49	0,027798486	0,012049693	0,007618562
3.5	0,027661633	0,012004733	0,007617523
3.51	0,027517587	0,011955708	0,007615771
3.52	0,02740661	0,01192486	0,007616744
3.53	0,027292775	0,011896269	0,007619002



3.54	0,027168731	0,011865753	0,007622683
3.55	0,027036705	0,011830986	0,007625758
3.56	0,026899235	0,011793307	0,007628653
3.57	0,026783036	0,011753314	0,007632444
3.58	0,026663917	0,011712581	0,007652015
3.59	0,026553266	0,011672845	0,007680952
3.6	0,026438999	0,011631617	0,00770903
3.61	0,026322921	0,011588956	0,007735973
3.62	0,026206534	0,011552526	0,007761948
3.63	0,026090583	0,01151599	0,007786327
3.64	0,025975955	0,011479751	0,007809004
3.65	0,025862958	0,011442797	0,007829341
3.66	0,025751527	0,011405698	0,00784714
3.67	0,025640659	0,011367743	0,007861624
3.68	0,025530178	0,011328984	0,007872748
3.69	0,025418724	0,011292315	0,007882629
3.7	0,025304752	0,011265647	0,007897659
3.71	0,025187339	0,011237317	0,007908125
3.72	0,025070438	0,011207416	0,007913904
3.73	0,024951572	0,011175493	0,007914983
3.74	0,024828557	0,011142317	0,007912194
3.75	0,024702456	0,011111389	0,007908303
3.76	0,02457302	0,011078929	0,007901134
3.77	0,024442007	0,011050751	0,007890518
3.78	0,024310706	0,011022681	0,007876802
3.79	0,024180075	0,010993157	0,007861742
3.8	0,02405138	0,010962556	0,007850666
3.81	0,023926407	0,010930751	0,007836897
3.82	0,023803126	0,010897242	0,007820701
3.83	0,023681109	0,01086231	0,007802385
3.84	0,023563968	0,010825506	0,007782159
3.85	0,02345008	0,010786641	0,007760118
3.86	0,023333634	0,010745468	0,007736316
3.87	0,023212688	0,010701675	0,00771081
3.88	0,023087975	0,010655414	0,007683782
3.89	0,022959405	0,010606456	0,007657552
3.9	0,022824306	0,010555135	0,007647478
3.91	0,022680957	0,010504059	0,007636096
3.92	0,022529502	0,01045493	0,00762355
3.93	0,022371527	0,01040639	0,007609769
3.94	0,022213459	0,010354607	0,007594842
3.95	0,022062021	0,01029947	0,007578918
3.96	0,021905408	0,010242013	0,007562034
3.97	0,02176542	0,010181636	0,007544059
3.98	0,02162182	0,010118072	0,007525077



3.99	0,021474904	0,010051441	0,00750494
4	0,02132534	0,009981497	0,007483398
4.01	0,021188433	0,009915605	0,00746002
4.02	0,0210772	0,00986463	0,007434509
4.03	0,020964107	0,009817759	0,007406495
4.04	0,020848274	0,009767611	0,007375633
4.05	0,020727869	0,009713639	0,007341624
4.06	0,020601377	0,009655702	0,007303952
4.07	0,02046652	0,009594317	0,007262253
4.08	0,0203215	0,009527374	0,007216531
4.09	0,020165777	0,009467127	0,007168247
4.1	0,019998186	0,009405602	0,007118063
4.11	0,019821144	0,009339259	0,007063962
4.12	0,019632521	0,009267124	0,007005805
4.13	0,019433317	0,00918928	0,006943995
4.14	0,019225687	0,009106443	0,006878718
4.15	0,01902398	0,009025559	0,006810826
4.16	0,018816059	0,00894007	0,00674195
4.17	0,018603297	0,008851216	0,006673545
4.18	0,018387029	0,008759061	0,006603227
4.19	0,018169408	0,008664062	0,00653122
4.2	0,017956647	0,008566966	0,006457883
4.21	0,017750756	0,008468107	0,006383565
4.22	0,017564383	0,008368049	0,006308451
4.23	0,017378963	0,008267494	0,006232872
4.24	0,017194624	0,008166348	0,006156918
4.25	0,01701149	0,00806496	0,006080618
4.26	0,016828403	0,007964821	0,006004021
4.27	0,016645535	0,007864521	0,005927096
4.28	0,016463889	0,007764562	0,005849927
4.29	0,016306005	0,007675565	0,005772559
4.3	0,016145147	0,007585206	0,005695113
4.31	0,015979754	0,007502221	0,005625232
4.32	0,015809356	0,007429425	0,005564995
4.33	0,015634359	0,007354635	0,005504463
4.34	0,015472607	0,007280457	0,005443886
4.35	0,015305842	0,007205521	0,005383308
4.36	0,015133897	0,007129464	0,005322865
4.37	0,014958018	0,00705254	0,005262701
4.38	0,014779096	0,006976379	0,005203328
4.39	0,01459806	0,006899507	0,005144131
4.4	0,014416398	0,006822312	0,005085426
4.41	0,014235046	0,006744981	0,005027093
4.42	0,014054912	0,00666772	0,004969369
4.43	0,013876519	0,006590564	0,004911998



4.44	0,013700433	0,006513655	0,004855197
4.45	0,013527791	0,006437403	0,004798695
4.46	0,013358287	0,006361641	0,004742612
4.47	0,013192332	0,006286767	0,004686789
4.48	0,013030469	0,006212653	0,004635222
4.49	0,012872585	0,006139542	0,004590678
4.5	0,012718147	0,006067888	0,004546618
4.51	0,012566839	0,005997886	0,004502858
4.52	0,012418236	0,005929135	0,004459189
4.53	0,012272111	0,005860998	0,004414743
4.54	0,012129161	0,005793212	0,004369627
4.55	0,011987761	0,005725745	0,004323476
4.56	0,011847629	0,005658261	0,004276247
4.57	0,011708254	0,005590894	0,004227961
4.58	0,011570666	0,00552358	0,004178689
4.59	0,011433974	0,005456257	0,00412842
4.6	0,011297844	0,005388743	0,00407722
4.61	0,011161987	0,005321334	0,004025282
4.62	0,011026647	0,005254831	0,003972667
4.63	0,010891762	0,005189041	0,003919517
4.64	0,010763327	0,005123447	0,003866072
4.65	0,010639085	0,005058125	0,003812319
4.66	0,010515953	0,004993175	0,003758658
4.67	0,010414224	0,004928529	0,003704996
4.68	0,010312684	0,004864392	0,003651581
4.69	0,01021168	0,00480077	0,003598566
4.7	0,010110981	0,004737566	0,003545899
4.71	0,010010909	0,004675047	0,00349395
4.72	0,009916285	0,004615559	0,003442536
4.73	0,009828897	0,004559948	0,003391843
4.74	0,009742545	0,004508848	0,003345139
4.75	0,009657491	0,004459162	0,003299737
4.76	0,009574819	0,00441017	0,003255099
4.77	0,009498041	0,004361791	0,00321324
4.78	0,009422811	0,00431401	0,003171853
4.79	0,009348925	0,00426771	0,003130996
4.8	0,00927627	0,004224424	0,00309164
4.81	0,009204954	0,00418166	0,003052861
4.82	0,009134896	0,004139438	0,003014521
4.83	0,009066504	0,004098215	0,002977012
4.84	0,00899924	0,004058757	0,002940953
4.85	0,008932722	0,004019817	0,002905349
4.86	0,008866971	0,0039813	0,002870119
4.87	0,008806172	0,003943332	0,002835385
4.88	0,008747949	0,003905803	0,002801082



4.89	0,008689972	0,003868803	0,002767292
4.9	0,008632177	0,003832293	0,002733999
4.91	0,008574391	0,003796214	0,002701154
4.92	0,008516542	0,003760655	0,002668835
4.93	0,008458535	0,003725556	0,002637047
4.94	0,008400374	0,003690857	0,002605779
4.95	0,008342125	0,003656558	0,002577314
4.96	0,008283659	0,00362266	0,002549762
4.97	0,008224858	0,003589003	0,002522533
4.98	0,008165776	0,003555613	0,002495636
4.99	0,008106485	0,003522467	0,00246907
5	0,008046773	0,00348942	0,002442798



## 6. SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI (SLE) NORMALIZZATI

Una volta ottenuto come risultato della risposta sismica locale gli spettri di risposta elasticisopramenzionati, si è proceduto. Gli spettri di risposta medi ottenuti per i tre Stati Limite SLV-SLD-SLO sonostati trasformati in *grafici di Output equivalenti alla spettrocompatibilità*, ossiaalla classica forma dello spettro di normativa.

La fase di normalizzazione degli spettri è stata eseguita mediante un foglio di calcolo in excellcreandotre spettri normalizzati (uno per ogni stato limite; figg. 18-19-20) “cuciti” su quello ottenuto dall'analisi 1D, in maniera tale che essi ne siano compresi interamente:

- **ag/g, F0, T\*c** e **Td** sono stati ricavati automaticamentedalle coordinate del sito e dalle scelte progettuali,
- i parametri dipendenti **Tbe T** sono stati calcolati manualmente dal grafico (verificando l'aderenza dellospetro semplificato allo spettro di output delle analisi);
- **S** è stato ricavato dalla formula [3.2.4] delle NTC2008 ovvero  $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot h \cdot F_0$  dove **S** è l'unica incognita e quindi  $S = S_e(T) / a_g \cdot h \cdot F_0$

### Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$\begin{array}{l}
 0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \\
 T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)
 \end{array}$$



Grafico di Output equivalente alla spettrocompatibilità- Spettro di risposta elastico ( $\xi = 5\%$ )  
SLV

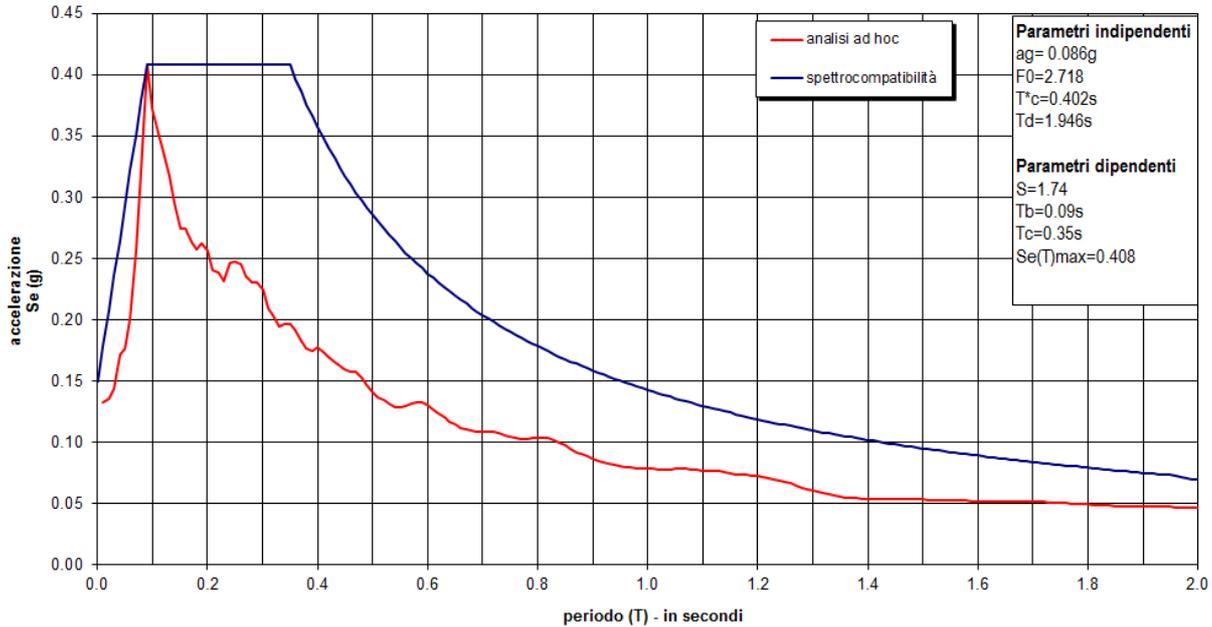


Fig. 18 - Grafico di Output equivalente alla spettrocompatibilità- SLV

Grafico di Output equivalente alla spettrocompatibilità- Spettro di risposta elastico ( $\xi = 5\%$ )  
SLD

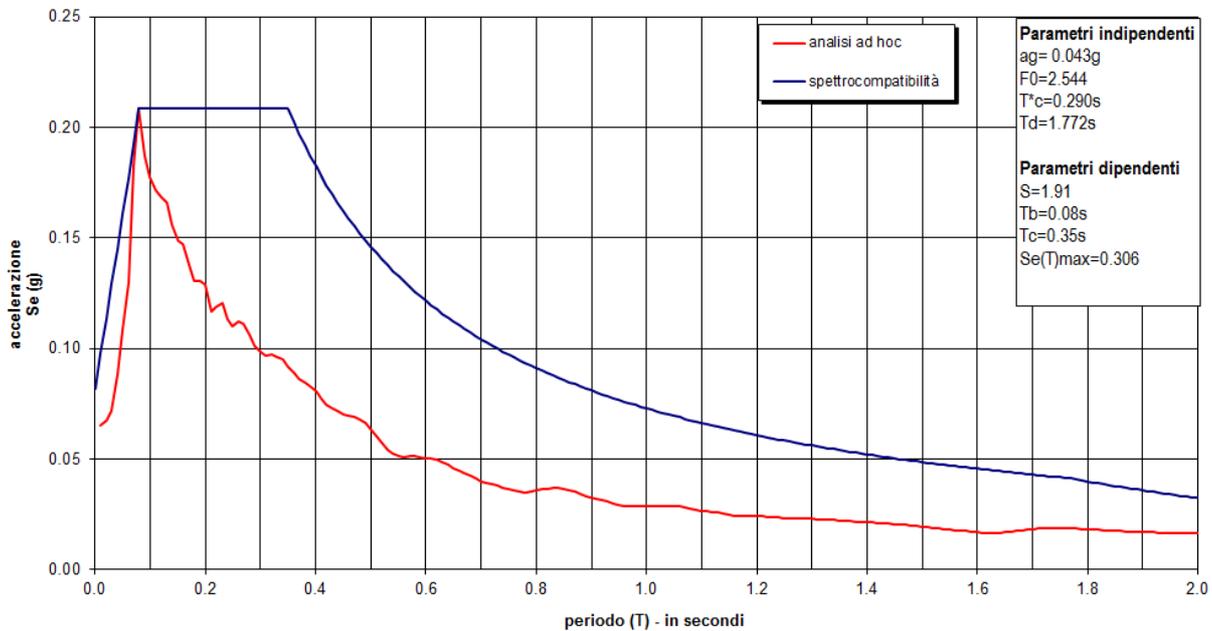


Fig. 19- Grafico di Output equivalente alla spettrocompatibilità- SLD



Grafico di Output equivalente alla spettrocompatibilità- Spettro di risposta elastico ( $\xi = 5\%$ )  
SLO

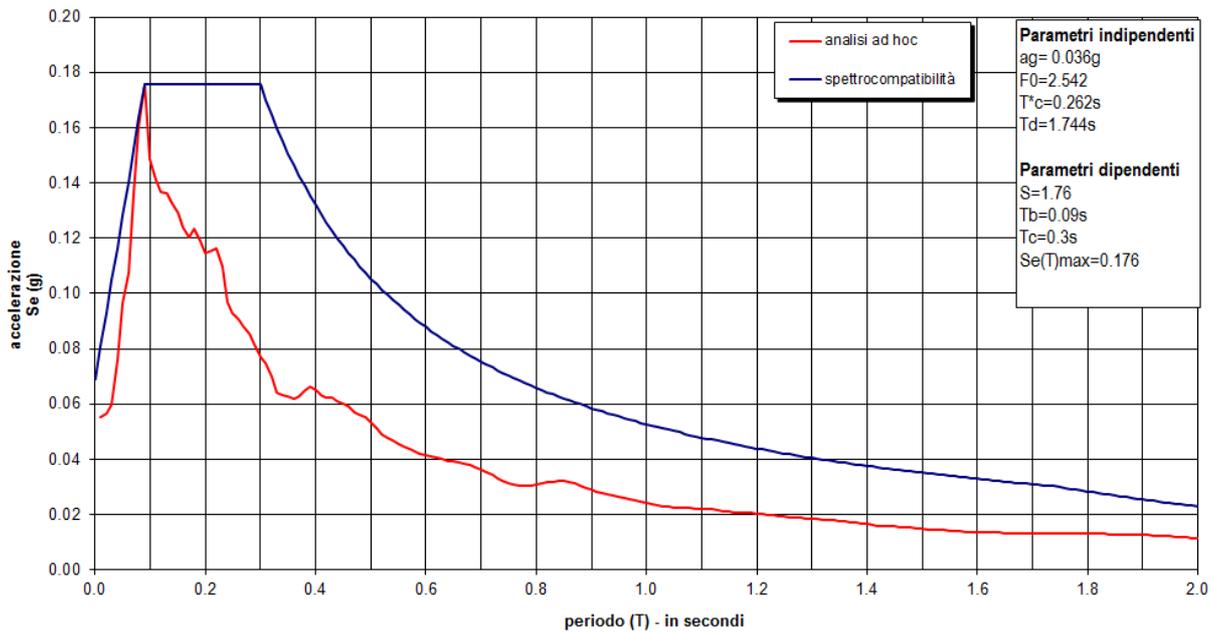


Fig. 20 - Grafico di Output equivalente alla spettrocompatibilità- SLO

# DETERMINAZIONE CATEGORIA DI SOTTOSUOLO MISURA HVSR

## PREMESSA

S sono state effettuate n.2 registrazioni di rumore sismico ambientale (misure HVSR; fig. 1) in un'area ricadente nel Comune di Sonnino (LT), al fine di classificare sismicamente il suolo, ossia definire la categoria di sottosuolo secondo la normativa vigente (D.M. 14 gennaio 2008).



**Fig. 1** – Ortofoto in scala 1:1.000. Sistema di riferimento UTM33 ED50      Scala 1:1.000  
Misura HVSR in verde



## CENNI TEORICI SULLE MISURE HVSR PER LA STIMA DELLE $V_{S30}$

Le basi teoriche di questa tecnica si basano sul rumore sismico ambientale (CASTELLARO *et alii*, 2005), presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre.

Si chiama anche *microtremore* in quanto riguarda oscillazioni molto piccole ( $10-15 [m/s^2]^2$  in termini di accelerazione), molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo vicino.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Lo spettro in frequenza del rumore di fondo in un terreno roccioso e pianeggiante presenta l'andamento illustrato in fig. 2, dove i picchi a 0.14 e 0.07 Hz sono comunemente interpretati come originati dalle onde oceaniche. Tali componenti spettrali vengono attenuate molto poco anche dopo tragitti di migliaia di chilometri per effetto di guida d'onda.

A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie ma anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz, a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.

Il metodo in questione fu reso popolare principalmente da NAKAMURA (1989) come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale ed è ampiamente riconosciuto che l'HVSR è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli, informazione che è comunque di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Riconosciuta questa capacità e dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSR può essere in linea di principio usato come strumento stratigrafico.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato di terreno  $N$  relativa alle relative alle onde S è:

$$f_r = V_s/4 h \quad (1)$$

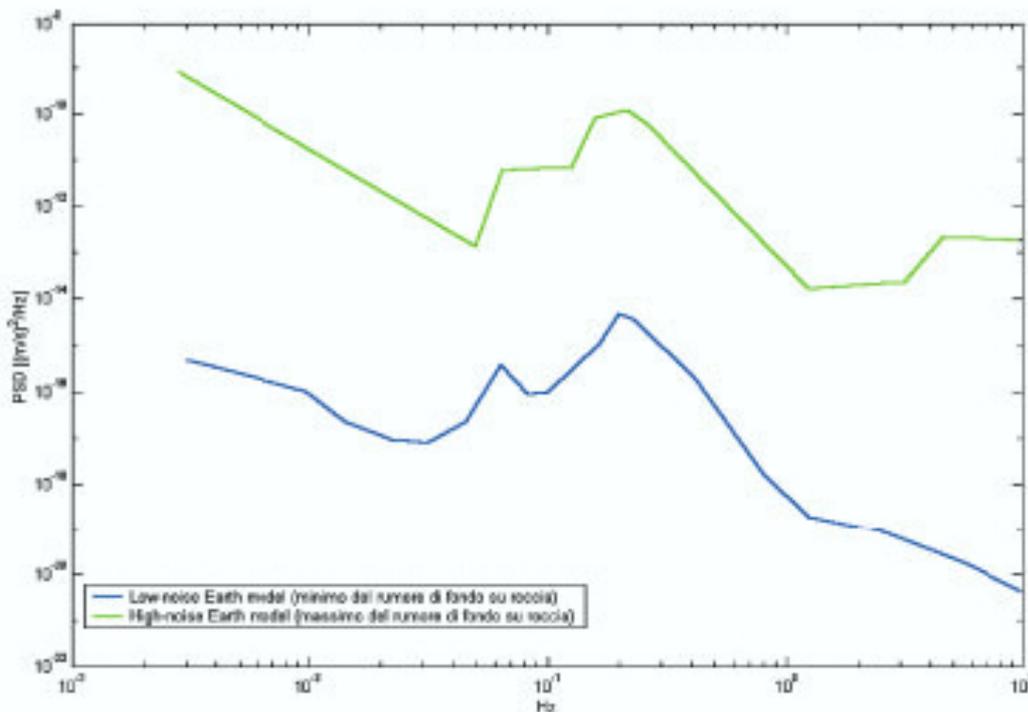
in cui  $V_s$  è la velocità media delle onde S nello strato  $N$  ed  $h$  è lo spessore.

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità che è solitamente disponibile almeno a livello di massima, è in grado di fornire previsioni sullo spessore  $h$  degli strati. Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto, ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per



- a) il contenuto in frequenza,
- b) la risposta strumentale
- c) l'ampiezza del segnale

quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto (MULARGIA *et alii*, 2007).



**Fig. 2** - Spettro del rumore sismico (in termini di velocità, componente verticale del moto) minimo e massimo secondo i modelli standard del servizio geologico USA (USGS) (J. Peterson, Observations and modelling of background seismic noise, Open-file report 93-322, USGS, 1993).

La situazione, nel caso di un suolo reale, è spesso più complessa. Innanzitutto il modello di strato piano al di sopra del bedrock si applica molto raramente. Poi, la velocità aumenta con la profondità, possono esserci eterogeneità laterali importanti ed infine la topografia può non essere piana. L'inversione delle misure di tremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta quindi la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli 'sintetici', cioè con quelli calcolati relativamente al campo d'onde completo di un modello 3D. L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini.

Quindi, l'equazione [1] permette di calcolare le  $V_{S30}$  conoscendo la frequenza fondamentale di risonanza dei depositi (misurata dal tromino) e la profondità dei depositi stessi (misurata con la prova penetrometrica).



Questa tecnica è basata sulla inversione dei rapporti spettrali del tremore sismico (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR) registrato in una stazione singola. La curva sperimentale HVSR viene fittata con una curva teorica usando come vincolo lo spessore dello strato più superficiale (o altro orizzonte) di sottosuolo, generando in tal modo un *fit* sulla curva H/V sperimentale.

La procedura di inversione consiste di 3 passi:

1. Si procede all'identificazione di un orizzonte stratigrafico superficiale (di solito ad alcuni metri di profondità), identificato in questo caso con le prove penetrometriche DPSH.
2. identificazione del marker HVSR corrispondente,
3. fit della curva HVSR teorica utilizzando 1) e 2) come vincoli. (CASTELLARO & MULARGIA, 2007).

La curva HVSR teorica è calcolata assumendo un campo di tremore con sorgenti puntuali distanti posizionate casualmente sulla superficie, ed un campo d'onde che si propagano in un mezzo stratificato 1-D, con i coefficienti di accoppiamento di Ben-Menahem e Singh (1981), correzione di stabilità di Dunkin per i propagatori e con valori di  $Q=10$  indipendente dalla frequenza.

## CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE MISURE HVSR

Le misure del rumore sismico ambientale sono state effettuate mediante il tromografo digitale Tromino (fig. 3), mediante un'acquisizione di 20 minuti ad una frequenza di 256 Hz.

Si tratta di un apparecchio portatile compatto di circa 10 x 7 x 14 cm e 1 kg di peso dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, alimentato da 2 batterie AA da 1.5 V, fornito di GPS interno e senza alcun cavo esterno.



**Fig. 3** - Sistema per l'Acquisizione del Rumore Sismico **Tromino**



## TROMINIO 1

Strumento: TRS-0006/00-06

Inizio registrazione: 18/10/12 09:43:00 Fine registrazione: 18/10/12 09:59:01

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h16'00".

Analizzato 83% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 256 Hz

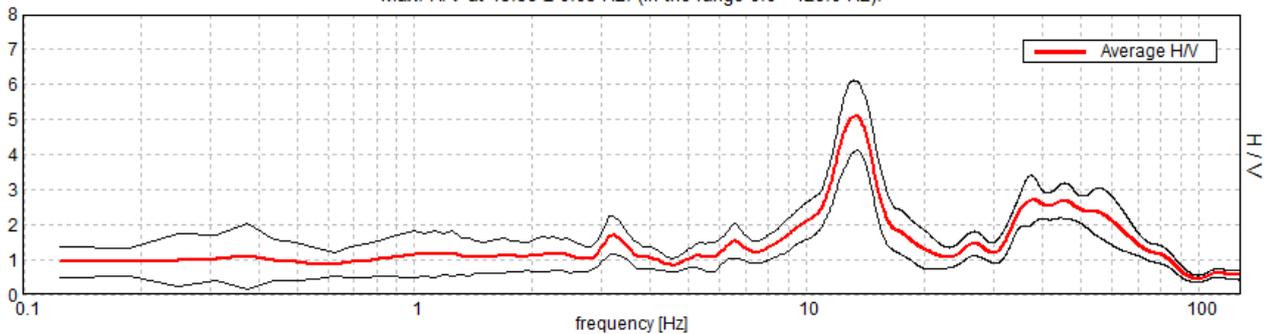
Lunghezza finestre: 10 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

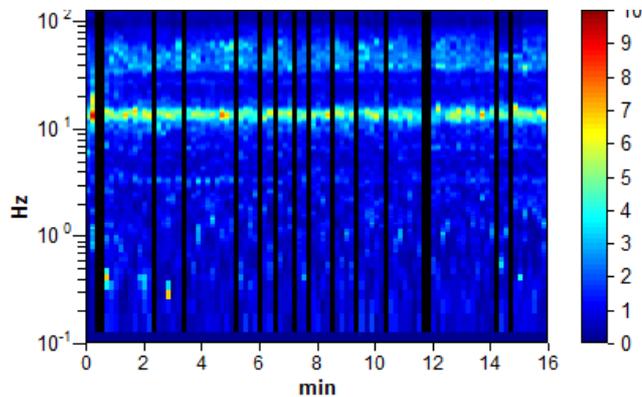
Lisciamento: 10%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

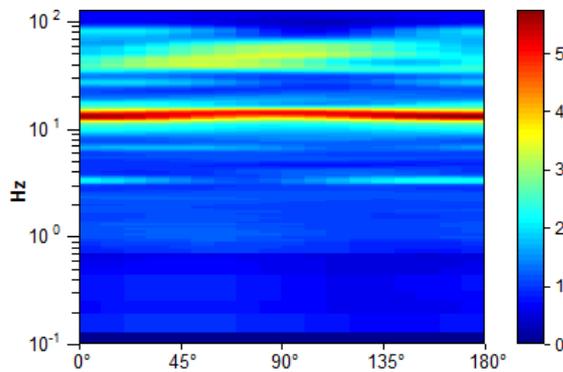
Max. H/V at 13.38 ± 0.05 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).



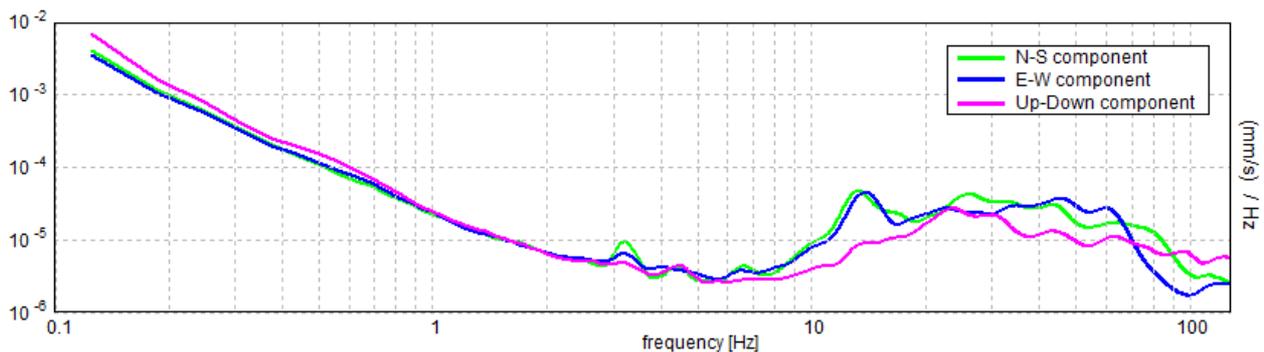
### SERIE TEMPORALE H/V



### DIREZIONALITA' H/V



### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. **Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente.**]

**Picco H/V a  $13.38 \pm 0.05$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 128.0 Hz).**

**Criteri per una curva H/V affidabile**

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$13.38 > 1.00$	<b>OK</b>	
$n_c(f_0) > 200$	$10700.0 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ 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 $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 322	<b>OK</b>	

**Criteri per un picco H/V chiaro**

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

<b>Esiste <math>f^-</math> in <math>[f_0/4, f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^-) &lt; A_0 / 2</math></b>	11.0 Hz	<b>OK</b>	
<b>Esiste <math>f^+</math> in <math>[f_0, 4f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^+) &lt; A_0 / 2</math></b>	15.625 Hz	<b>OK</b>	
<b><math>A_0 &gt; 2</math></b>	$5.10 > 2$	<b>OK</b>	
<b><math>f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%</math></b>	$ 0.00204  < 0.05$	<b>OK</b>	
<b><math>\sigma_f &lt; \varepsilon(f_0)</math></b>	$0.02731 < 0.66875$	<b>OK</b>	
<b><math>\sigma_A(f_0) &lt; \theta(f_0)</math></b>	$0.4985 < 1.58$	<b>OK</b>	

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



## TROMINIO 2

Strumento: TRS-0006/00-06

Inizio registrazione: 18/10/12 10:19:43 Fine registrazione: 18/10/12 10:35:44

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h16'00".

Analizzato 47% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 256 Hz

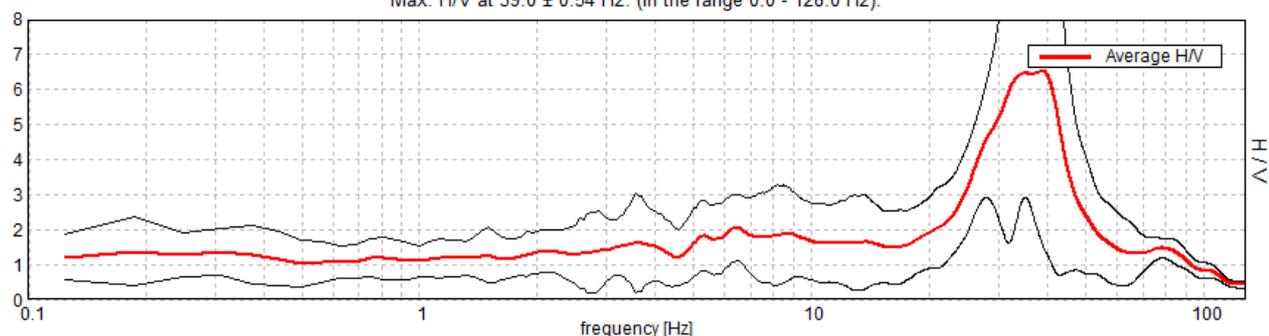
Lunghezza finestre: 10 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

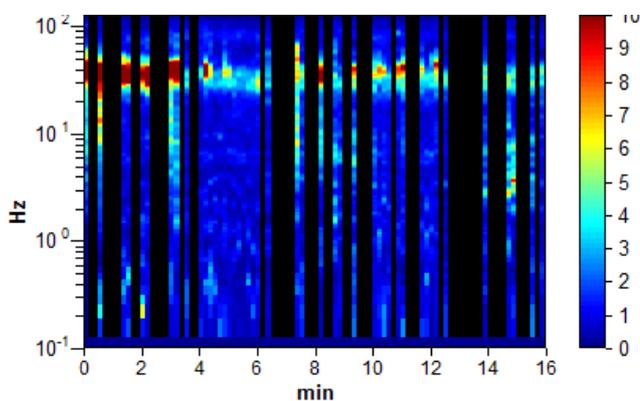
Lisciamento: 10%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

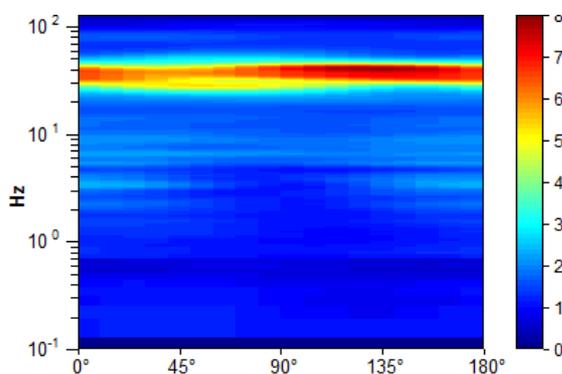
Max. H/V at 39.0 ± 0.54 Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).



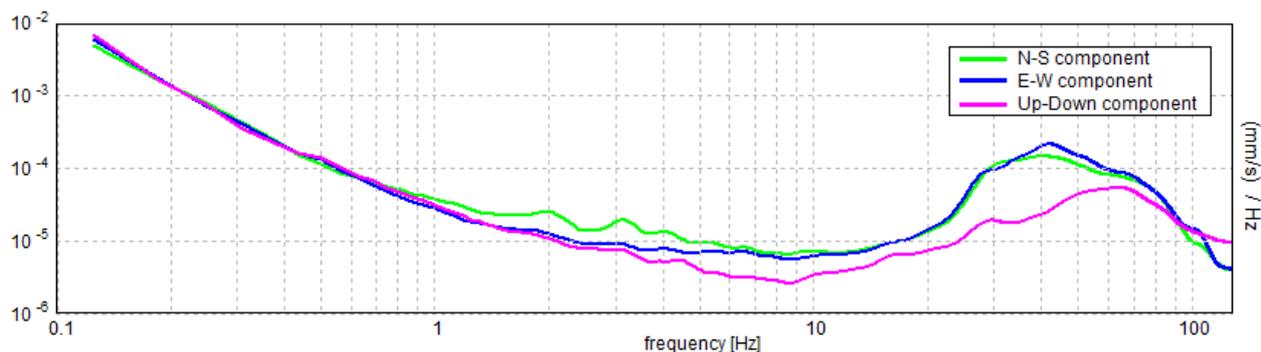
### SERIE TEMPORALE H/V



### DIREZIONALITA' H/V



### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



# STRATIGRAFIA

La ricostruzione della stratigrafia è stata desunta da dati ricavati da sondaggi eseguiti in aree limitrofe e confrontabili con quelli ricavati dalle indagini indirette eseguite:

- 0 – 2.40 Terreno vegetale
- 2.40 – 9 mt Calcari bianchi e avana fratturati
- 9 – 30 mt Calcari bianchi e avana compatti

MODULO SONDAGGI PENETROMETRICI														
Committente		Profondità raggiunta		Quota Alt. P.C.		Certificato n°		Pagina						
Operatore		Indagine		Note		Inizio/Fine Misurazione								
Responsabile		Sondaggio		Tipo Carotaggio		Tipo Sonda		Coordinate X Y						
Quota (mt)	Utile	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T. (n° Colpi)	Penet. End. (kg/cm²)	Veloc. (m/s)	Carogni	Intens. Penetrometro	Indic. Strutturale	Caric. Carotag.	F.M.A.	Altri param. Micro penet.	Piezometro (P) e Idrometro (I)
0		TERRENO VEGETALE												
2.40		CALCARI BIANCHI E AVANA FRATTURATI	2.40											
9.00		CALCARI BIANCHI E AVANA COMPATTI	9.00											
30.00			30.00											

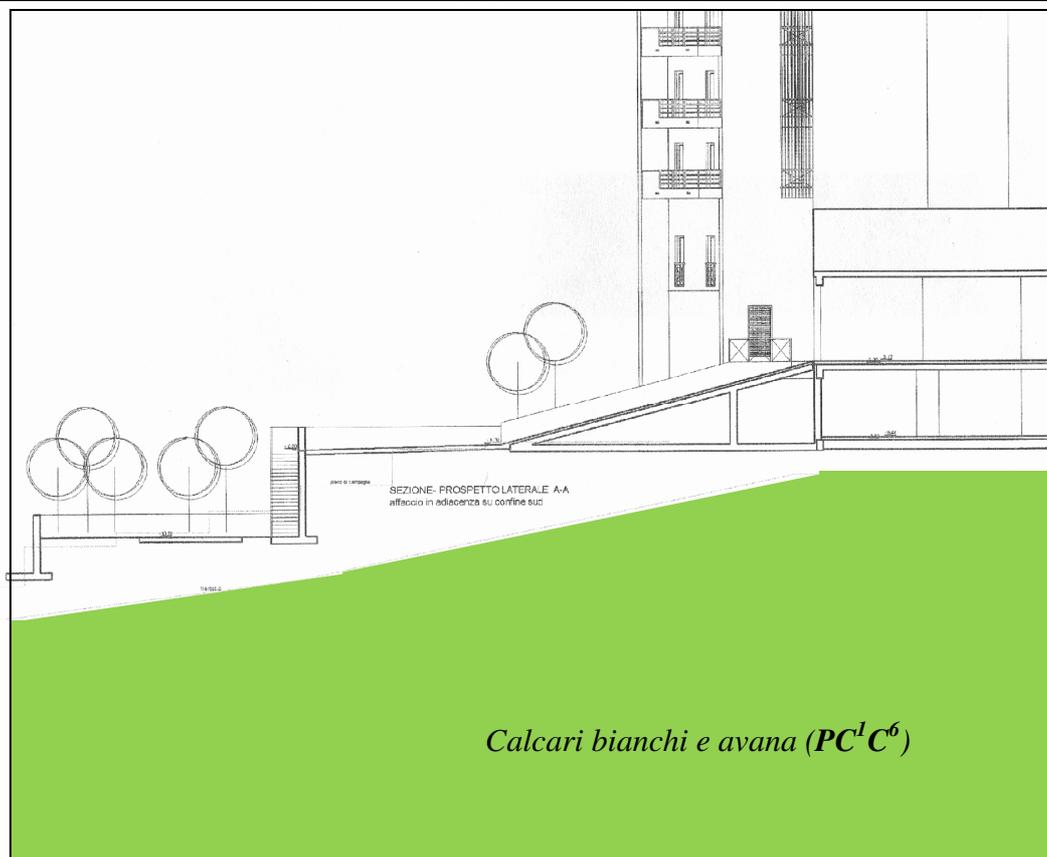
Campioni: S-Paroli Scillo, O-Osteroberg, M-Hader, R-Rimaneggiato, Sa-Rimaneggiato da SPT  
 Piezometro: ATa-Tubo Aperto, CG-Casagrande  
 Perforazione: CG-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, SC-Sitta Continua  
 Stabilizzazione: SO-Roadmento Metallico, SO-Ringhi Betonati  
 Prova SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa

Responsabile

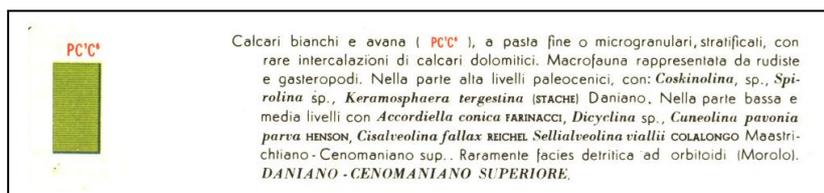


## Rapporti stratigrafici del Sito

Sezione ripresa dal progetto con rappresentati i rapporti stratigrafici



Legenda ripresa dal Foglio 159 "Frosinone" della Carta Geologica d'Italia, Scala 1: 100 000:



**RAPPORTO STRATIGRAFICO CONCORDANTE** :successione stratigrafica verticale con strati tra loro paralleli, orizzontali o inclinati che siano;



Sezione ripresa dal progetto con rappresentati i rapporti stratigrafici



Calcari bianchi e avana (PC¹C⁶)

Legenda ripresa dal Foglio 159 "Frosinone" della Carta Geologica d'Italia, Scala 1: 100 000:

	<p>Calcari bianchi e avana (PC¹C⁶), a pasta fine o microgranulari, stratificati, con rare intercalazioni di calcari dolomitici. Macrofauna rappresentata da rudiste e gasteropodi. Nella parte alta livelli paleocenici, con: <i>Coskinolina</i>, sp., <i>Spirulina</i> sp., <i>Keramosphaera tergestina</i> (STACHE) Daniano. Nella parte bassa e media livelli con <i>Accordiella conica</i> FARINACCI, <i>Dicyclina</i> sp., <i>Cuneolina pavonia parva</i> HENSON, <i>Cisalveolina fallax</i> REICHEL <i>Selliolvelina vialii</i> COLALONGO Maestri-chiano-Cenomaniano sup. Raramente facies detritica ad orbitoidi (Morolo). DANIANO -CENOMANIANO SUPERIORE.</p>
--	---

**RAPPORTO STRATIGRAFICO CONCORDANTE** :successione stratigrafica verticale con strati tra loro paralleli, orizzontali o inclinati che siano;



## Considerazioni conclusive

A conclusione del presente studio si traccia il quadro riassuntivo sulla base di quanto è emerso dalle indagini di superficie svolte che hanno permesso di descrivere i caratteri geotecnici e stratigrafici della zona di studio.

Lo spessore dello strato di terreno di riporto è di circa mt 2,50.

Le opere in progetto dovranno essere tutte impostate sul sub-strato roccioso calcareo.

### STIMA PARAMETRI GEOTECNICI

Strato	Prof. (m)	Nspt	Tipo	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )	Peso unità di volume saturo (t/m <sup>3</sup> )	Angolo di resistenza al taglio (°)	Coesione non drenata (Kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo Edometrico (Kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo Elastico (Kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo Poisson	Modulo di taglio G (Kg/cm <sup>2</sup> )
Strato - 1	1.8	3.91	Coesivo Incoerente	1.69	1.87	22.66	0.24	17.94	39.10	0.35	234.19
Strato - 2	2.8	9.12	Coesivo Incoerente	1.94	2.13	26.7	0.62	41.84	91.20	0.34	519.17
Strato - 3	3.4	25.34	Coesivo Incoerente	2.12	2.23	34.5	1.71	116.26	253.40	0.3	1356.72

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, la categoria di profilo stratigrafico del suolo di fondazione è equivalente a "B":

$$\text{Media } V_{s30} - V_s(0.0-30.0) = 596.5 \text{ m/s}$$

*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  $V_{s,30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero  $N_{SPT,30} > 50$  nei terreni a grana grossa e  $c_{u,30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).*

L'ultima riclassificazione sismica relativa alla **DELIBERA DI GIUNTA REGIONALE n. 387 del 22 Maggio 2009** ha inserito il comune di Sonnino in **Zona 3 – Sottozona B**; quindi con un' *accelerazione di picco su terreno rigido* compresa tra i seguenti valori:

$$0.62 \leq a_g < 0.10$$



CONDIZIONI TOPOGRAFICHE - **T1** Pendii con inclinazione media  $i < 15^\circ$

AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA - Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica **ST = 1**

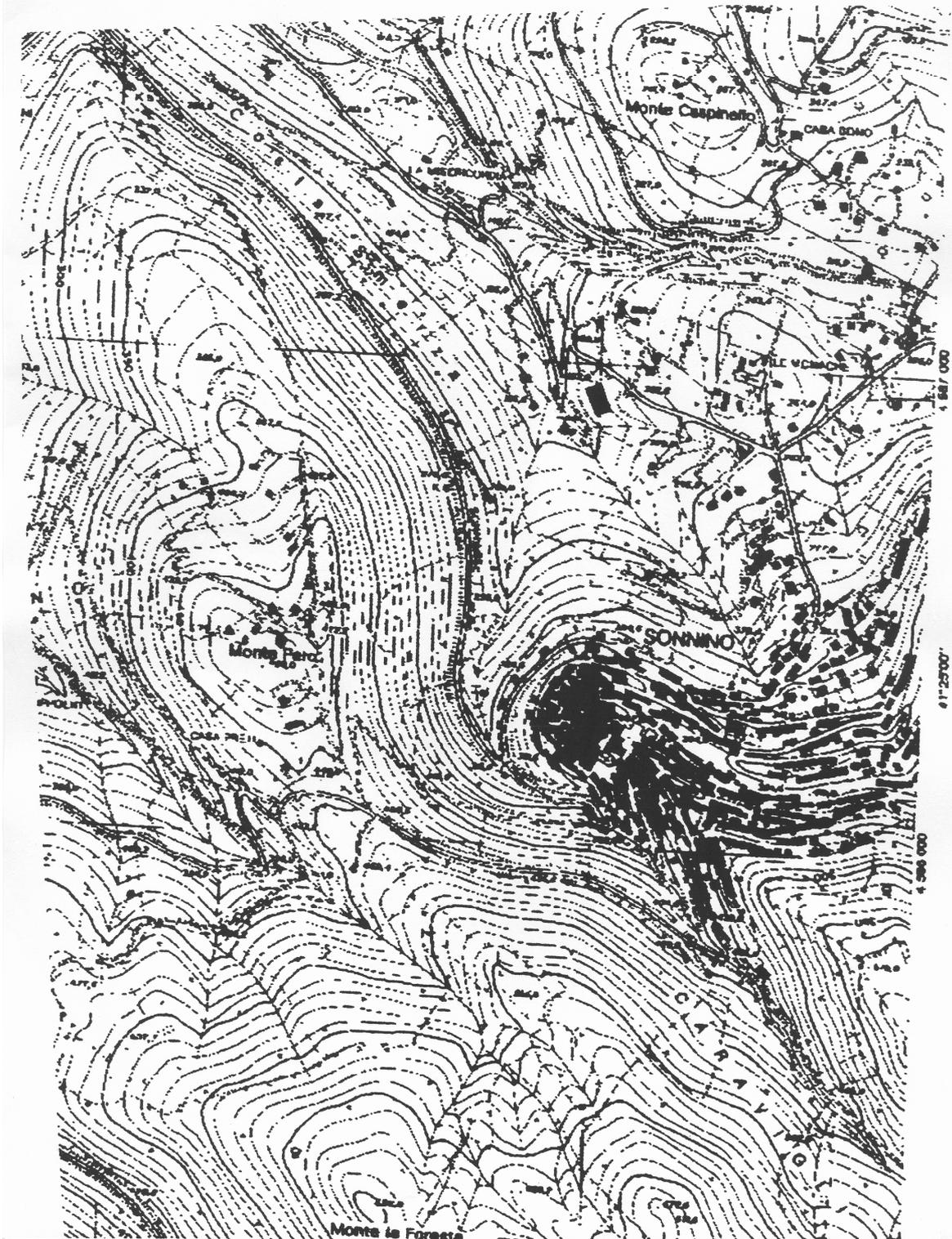
In riferimento alla pericolosità geologica art. 4 comma 2 del DGR 10/2012 **il geologo dichiara:**

- 1) *il terreno nel quale verrà realizzata l'opera ha una pendenza minore di  $15^\circ$ ;*
- 2) *il terreno è geologicamente stabile non presenta alcuna delle seguenti condizioni geologiche:*
  - a) *nel terreno non sono presenti zone suscettibili a liquefazione;*
  - b) *nel terreno non sono presenti zone in subsidenza o con cedimenti differenziati del terreno;*
  - c) *nel terreno non sono presenti zone suscettibili di amplificazione sismica o suscettibili di instabilità definite da studi validati dall'Ufficio Geologico e Sismico Regionale;*
  - d) *nel terreno non sono presenti zone in frana e/o dissesto;*
  - e) *nel terreno non sono presenti zone a rischio R3 O R4 per i Piani delle Autorità di Bacino competenti.*

Pertanto il sito in oggetto ha una pericolosità geologica **bassa** e l'opera in progetto, come riferito dal tecnico, ricade nella tipologia in **classe d'uso 2**. Per quanto riportato sono state eseguite 2 indagini geofisiche indirette di comprovata validità, una prova penetrometrica di tipo DPSH e la risposta sismica locale come da D.G.R. n° 10 del 13-01-2012.



**STRALCIO CARTA TECNICA REGIONALE**  
SCALA 1 : 10.000



## SEZIONE PROGETTO LATERALE

