



Regione Lazio



Comune di Sacrofano

# COMUNE di SACROFANO

(Provincia di Roma)

COMPLETAMENTO NUOVO POLO SCOLASTICO  
II° LOTTO

LOTTO PRESTAZIONALE  
OPERE STRUTTURALI



*Titolo:*

## RELAZIONE GEOLOGICA

*Data:*

OTTOBRE 2016

*Il progettista:*

Arch. Michele Stamegna  
via Beato Paolo Burali D'Arezzo 20  
04020 Itri (LT)

*Timbro:*

*Doc:*

# 11

## ***INDICE***

<b>1. PREMESSA</b>	pag. 1
<b>2. UBICAZIONE DELL'AREA DI STUDIO</b>	pag. 1
<b>3. ASSETTO GEOMORFOLOGICO</b>	pag. 4
<b>4. ASSETTO GEOLOGICO</b>	pag. 7
<b>5. ASSETTO IDROGEOLOGICO</b>	pag. 11
<b>6. CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI TERRENI E SISMICITA' DELL'AREA</b>	pag. 13
<b>7. CONSIDERAZIONI GEOTECNICHE E CONCLUSIONI</b>	pag. 16
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b>	pag. 18

## **ALLEGATI**

- 1. UBICAZIONE INDAGINI SU ORTOFOTO*
- 2. RISULTATI DELLE PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE*
- 3. DETERMINAZIONE CATEGORIA DI SUOLO DI FONDAZIONE PROSPEZIONE  
SISMICA MASW - MISURA HVSR*



## 1. PREMESSA

Nella presente relazione si riportano i risultati di uno studio geologico effettuato su un'area ubicata nel Comune di Sacrofano, al fine di identificarne le caratteristiche geotecniche richieste per l'esecuzione del Progetto del secondo lotto del Polo Scolastico (fig. 1).

Inizialmente, nel lavoro in questione, sono stati raccolti i dati bibliografici di natura geologica ed idrogeologica relativi a studi precedenti svolti nell'area in oggetto.

Successivamente è stato eseguito un rilevamento geologico al fine di individuare i litotipi presenti nella zona di studio e le loro caratteristiche litologiche.

Dai primi risultati acquisiti, si è ritenuto opportuno effettuare un'indagine geognostica più approfondita mediante 2 prove penetrometriche effettuate tramite penetrometro super pesante (allegati 1, 2).

Per la classificazione sismica della categoria di suolo di fondazione, è stata misurata la velocità delle onde S ( $V_{s30}$ ) mediante una prospezione sismica Masw ed una misura tomografica HVSR (*fit congiunto* - allegato 3).

Queste indagini sono state realizzate al fine di ottenere dati riguardanti i parametri geotecnici utili per la classificazione dei terreni di destinazione del progetto.

Tutte le operazioni di campagna e la loro elaborazione sono state eseguite secondo il **D.M. 14 gennaio 2008** "*Norme tecniche per le costruzioni*", secondo la **Circolare 2 febbraio 2009, n. 617** - *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni"* ed in riferimento alle Raccomandazioni e Direttive dell'A.G.I (Associazione Geotecnica Italiana).

## 2. UBICAZIONE DELL'AREA DI STUDIO

L'area oggetto di questo studio è situata nel Comune di Sacrofano, in corrispondenza del Polo Scolastico, alla quota media di circa 200 m s.l.m.; ed è determinato dalle coordinate UTM E289071 e N4664462, rispetto al **Fuso 33 - Map datum: Ed50**.

Quest'area ricade all'interno della sezione 365060 (Sacrofano) della Carta Tecnica Regionale, scala 1:10.000 (fig. 2) e sulla tavoletta 143 IIne (Campagnano Romano) in scala 1:25.000 (fig. 3).



Fig. 1- Vista di porzione dell'area di studio

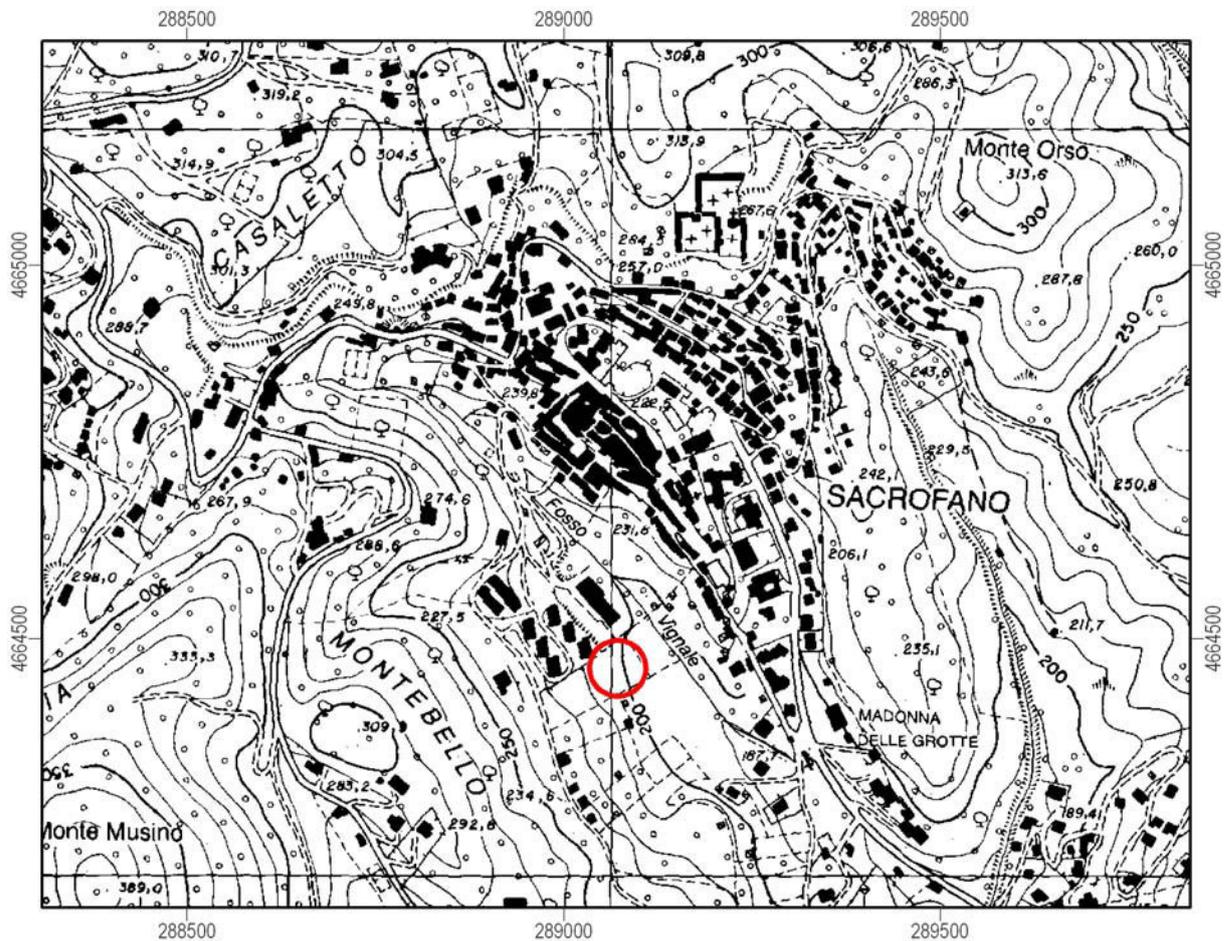


Fig. 2 - Stralcio dalla sezione 365060 (Sacrofano) della Carta Tecnica Regionale scala 1:10.000  
Ubicazione dell'area di studio cerchiata in rosso



### 3. ASSETTO GEOMORFOLOGICO

La zona di studio è situata alla base delle pendici nord-occidentali dei due rilievi collinari Monte Musino – Montebello (fig. 4), ad una quota di 200 m s.l.m., a circa 70 m ad sud-ovest dall'asta del Fosso Vignale allungato in direzione NW-SE.

Quindi, il lotto in oggetto si presenta in un settore poco inclinato max 8° (fig. 4), ma alla base di un pendio che presenta acclività medie di circa 15°.



**Fig. 4**– Vista di porzione dell'area di studio e del lieve pendio soprastante relativo a Montebello

La zona in oggetto ricade all'interno di un sottobacino del Bacino del Tevere, ed in particolare nel sottobacino TEV-410 (UFFICIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO - fig. 5).

Questo bacino presenta la porzione settentrionale disposta N-S mentre la porzione meridionale è allungata E-W. Il sottobacino in questione, si estende dalla stazione di Montopoli a Nord fino al Comune di Roma nel settore di Castel Giubileo a sud ed occupa un'area di circa 11970 ha.

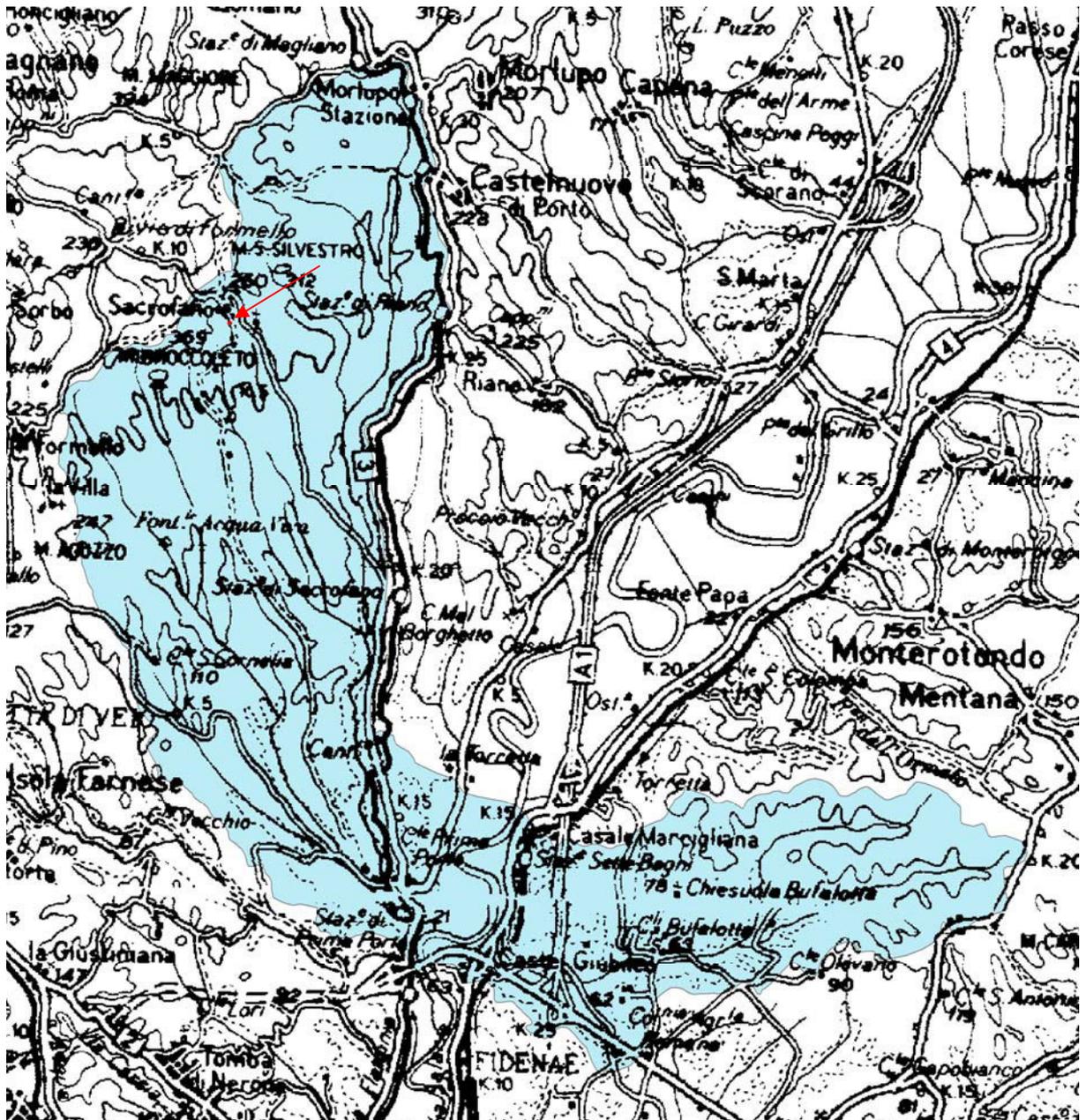


Fig. 5 – Sottobacino TEV-410. La freccia indica l'area di studio

Come è possibile vedere in figg 1-4, nel settore di destinazione del progetto è presente uno scavo antropico dove verrà realizzata la struttura in questione; le scarpate di questo scavo hanno un'altezza media di circa 5 m e presentano indizi di franosità potenziale.

In particolare, la scarpata sud-occidentale è già soggetta a piccoli distaccamenti di porzioni di terreno e piroclastiti (fig.6); quindi tutte le scarpate dello scavo, ed in particolare quella sud-occidentale, sono da ritenersi a potenziale rischio frana e necessitano di opere di protezione, salvaguardia e/o riprofilatura per permettere l'esecuzione dei lavori in sicurezza.



**Fig. 6**– Vista della scarpata (indicata dalle frecce) oggetto di fenomeni di franosità in atto e potenziali

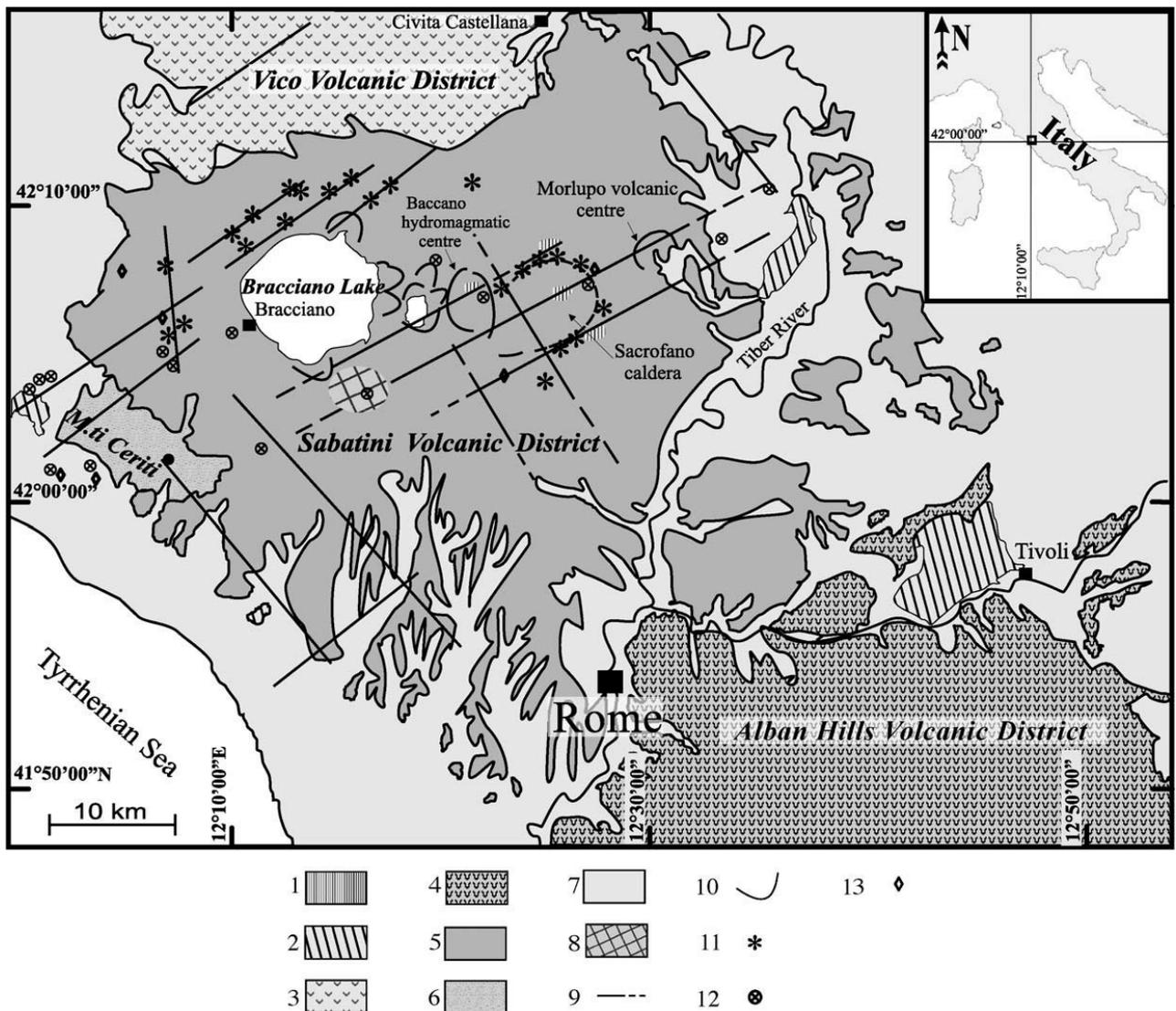
Quindi, vista la situazione geomorfologica dell'area di studio, si consiglia al progettista di avere cura che le opere in progetto siano dotate di un adeguato sistema di smaltimento delle acque meteoriche e di un sistema di drenaggio delle acque a scorrimento superficiale, ad evitare:

- a) qualsiasi azione di ruscellamento superficiale di acque selvagge, inalveandole in idonee canalizzazioni;
- b) la permeazione e la percolazione all'interno del terreno di fondazione

Infine, nella zona in oggetto non è presente il vincolo P.A.I., e non ricade all'interno di parchi o aree protette (SIC, ZPS).

#### 4. ASSETTO GEOLOGICO

L'area di destinazione del progetto è ubicata nella porzione della caldera di Sacrofano e, questo settore, fa parte del Complesso Vulcanico Sabatino impostatosi in corrispondenza di faglie trasversali disposte NE-SW che tagliano le strutture distensive sepolte allungate in direzione appenninica (DE RITA *et alii*, 1988; DI FILIPPO & TORO, 1993; SOTTILI *et alii*, 2004; vedi fig. 7). Questo complesso assetto tettonico influisce sull'attività vulcanica dei Sabatini che si esplica attraverso numerosi centri eruttivi allineati lungo le fratture (LOCARDI & SOMMAVILLA, 1974).



**Fig.7** – Schema geologico del distretto vulcanico sabatino. Legenda: 1)Terreni vulcanici alterati da flussi idrotermali; 2)travertini; 3) prodotti del vulcano di Vico; 4)prodotti del distretto vulcanico dei Colli Albani; 5)prodotti del distretto vulcanico sabatino; 6)prodotti del distretto vulcanico Tolfetano-Cerite-Manziante; 7)terreni sedimentari (Mesozoico-Olocene); 8)depositi piroclastici di ricaduta; 9)maggiori lineamenti tettonici (osservati o supposti); 10)orlo calderico; 11)coni di scorie Stromboliani; 12)hot springs; 13)emissioni di gas.

L'area di studio è caratterizzata da depositi provenienti dall'edificio di Sacrofano-Baccano sviluppatasi all'incirca tra 0.56 - 0.08 Ma (KARNER *et alii*, 2001).

In particolare i depositi vulcanici presenti nella zona di studio sono tufi stratificati, tufiti e tufi terrosi generalmente biancastri con grossi frammenti lavici e prodotti di lancio. Sono presenti diversi livelli di ignimbrite trachitica biancastra con grossi inclusi calcarei, affiorante alla base dello scavo in questione (fig. 8).

La porzione superficiale (1,5 – 3 m dal p.c.) è caratterizzata da depositi detritico-vulcanici pedogenizzati e rimaneggiati, provenienti dalle vulcaniti circostanti.



**Fig. 8**– Vista dello scavo nell'area di studio, le frecce indicano l'ignimbrite alla base dello scavo

Per avere una visione litotecnica più minuziosa e completa dei litotipi presenti nell'area, si è ritenuto necessario l'esecuzione di indagini geognostiche mediante penetrometro dinamico superpesante (fig. 9) in modo tale da poter ricostruire l'assetto geologico particolareggiato e ricavare i parametri geotecnici dei litotipi presenti nell'area di studio (allegati 1, 2).

In particolare, le prove penetrometriche hanno raggiunto una profondità massima di 7 m dal p.c., e sono stati intercettati 3 litotipi a differenti caratteristiche geotecniche (allegato 2):

1. Suolo con spessore max di 1,8 m dal p.c.
2. Depositi vulcanici poco addensati (alternati a depositi vulcanici con medio grado di addensamento)
3. Depositi vulcanici con medio grado di addensamento, talvolta corrispondenti alle ignimbriti (alternati a depositi vulcanici poco addensati)



Fig. 9 – Vista del penetrometro dinamico superpesante durante l'esecuzione di una prova nell'area di studio

Visto che le prove penetrometriche dinamiche non permettono una visione diretta del terreno, le caratteristiche geologiche dei depositi sopradescritti derivano sia da informazioni bibliografiche che dal rilevamento geologico stesso, in cui è stato possibile visionare alcuni tagli poco distanti o presenti nell'area di studio.

Di seguito viene riportata una carta geologica in scala 1:5.000 (fig. 10), su base topografica relativa alla sezione 365060 (Sacrofano) della Carta Tecnica Regionale, derivata sia dal rilevamento geologico effettuato, sia da dati bibliografici quali il *Foglio 143 (Bracciano) della Carta Geologica d'Italia, scala 1:100.000* (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1971).

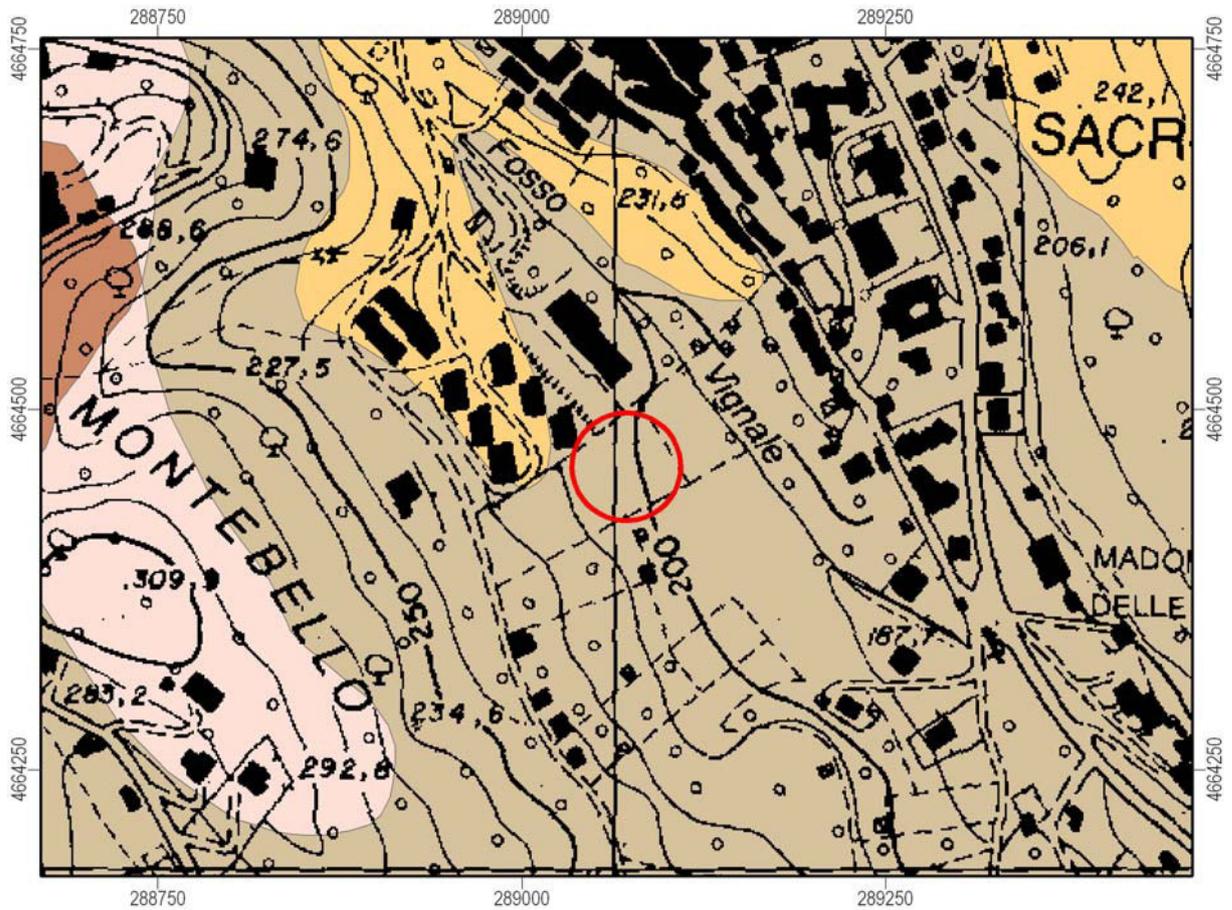


Fig. 10 – Carta litologica in scala 1:5.000.

-  Tufi stratificati in alternanze di debole spessore, cineritici e lapillosi, prevalentemente grigi e bruni, contenenti proietti lavici e pomicei. (Pleistocene)
-  Lave e coni di scorie ad esse legati, prevalentemente leucitiche nerastre e grigie (Pleistocene)
-  Tufi stratificati, tufiti e tufi terrosi generalmente biancastri con grossi frammenti lavici e prodotti di lancio. Sono presenti diversi livelli di ignimbrite trachitica biancastra con grossi inclusi calcarei (Pleistocene)
-  Ignimbrite trachitica biancastra (Pleistocene)
-  Area di studio

## 5. ASSETTO IDROGEOLOGICO

L'area di studio ricade all'interno del *Complesso idrogeologico dei tufi stratificati e delle facies freatomagmatiche* (CAPELLI *et alii*, 2005), nei pressi del limite con il *Complesso delle pozzolane*.

Il primo è caratterizzato da tufi stratificati, tufiti e tufi terrosi. Talora sono presenti livelli di pomici e lapilli e prodotti di alterazione delle facies piroclastiche. Inoltre il complesso comprende anche brecce piroclastiche e tufi cineritici. Nel complesso sono state accorpate formazioni di origine diversa. Tuttavia, la permeabilità della classe risulta bassa o molto bassa.

Il secondo è caratterizzato da depositi di colata piroclastica genericamente massivi e caotici, prevalentemente litoidi, con permeabilità da media a medio-alta per porosità e secondariamente per fratturazione. La permeabilità verticale del complesso è condizionata dalla presenza di paleosuoli molto estesi e spesso con potenze di ordine metrico. Se le vulcaniti hanno subito un processo di zeolitizzazione la permeabilità risulta bassa.

Inoltre, l'area di studio è collocata all'interno del *Bacino idrogeologico dei corsi d'acqua alimentati dai Monti Sabatini Orientali* (CAPELLI *et alii*, 2005).

Questo bacino possiede una superficie stimata in 271 km<sup>2</sup> ed è caratterizzato dai seguenti parametri idrogeologici in mm/anno (CAPELLI *et alii*, 2005):

Precipitazione: 677 - Evapotraspirazione: 386 - Ruscellamento: 89 - Infiltrazione efficace: 229 - Deflusso di base in alveo misurato: 68 - Prelievi: 79.

In particolare, da dati bibliografici (BONI *et alii*, 1983, CAPELLI *et alii*, 2005), la falda principale, nel settore in questione, dovrebbe essere caratterizzata da una superficie piezometrica rilevabile ad una quota di circa 150 metri s.l.m., quindi con una soggiacenza dal p.c. di circa 50 metri.

Non si può escludere l'eventuale presenza di piccole faldine sospese più superficiali.

Il deflusso idrico sotterraneo presenta direzione verso i quadranti sud-orientali.

Di seguito, viene riportata la carta idrogeologica (fig. 11) su base topografica relativa alla sezione 365060 (Sacrofano) della Carta Tecnica Regionale, in scala 1:5.000, realizzata in riferimento al rilevamento geologico effettuato ed al *Foglio 143 (Bracciano) della Carta Geologica d'Italia, scala 1:100.000* (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1971); ed in base ai dati idrogeologici reperiti ed all'andamento delle isofreatiche della *Carta Idrogeologica* di CAPELLI *et alii*, (2005).

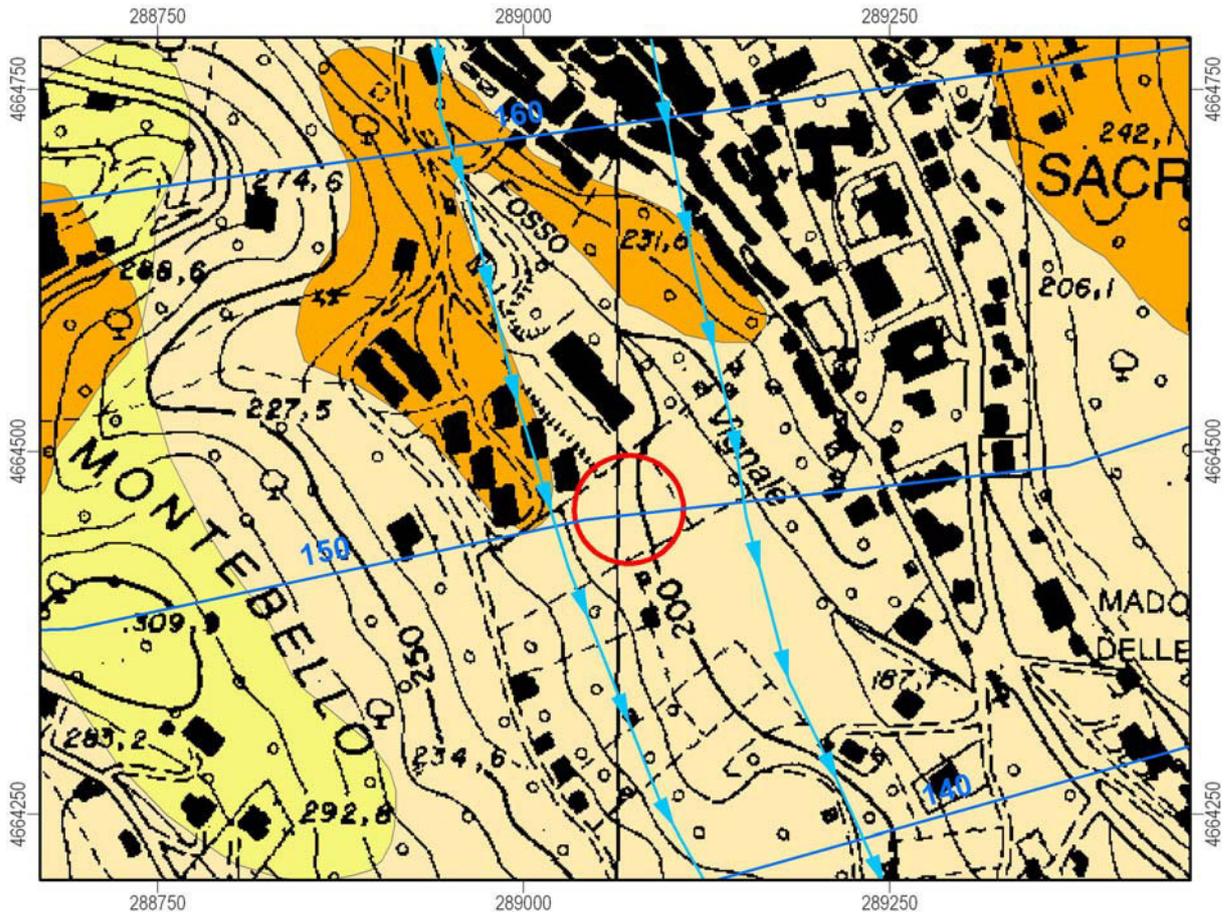


Fig. 11 – Carta idrogeologica in scala 1:5.000.

*Grado di Permeabilità*

 Buona

 Mediocre

 Scarsa

 Linee di deflusso idrico sotterraneo

 Isorealtiche relative alla falda principale (m s.l.m.)

 Area di studio

## 6. CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI TERRENI E SISMICITA' DELL'AREA

Il Lazio è caratterizzato da una sismicità che si distribuisce lungo fasce denominate “Zone sismogenetiche” disposte come la strutture dell’Appennino NW-SE.

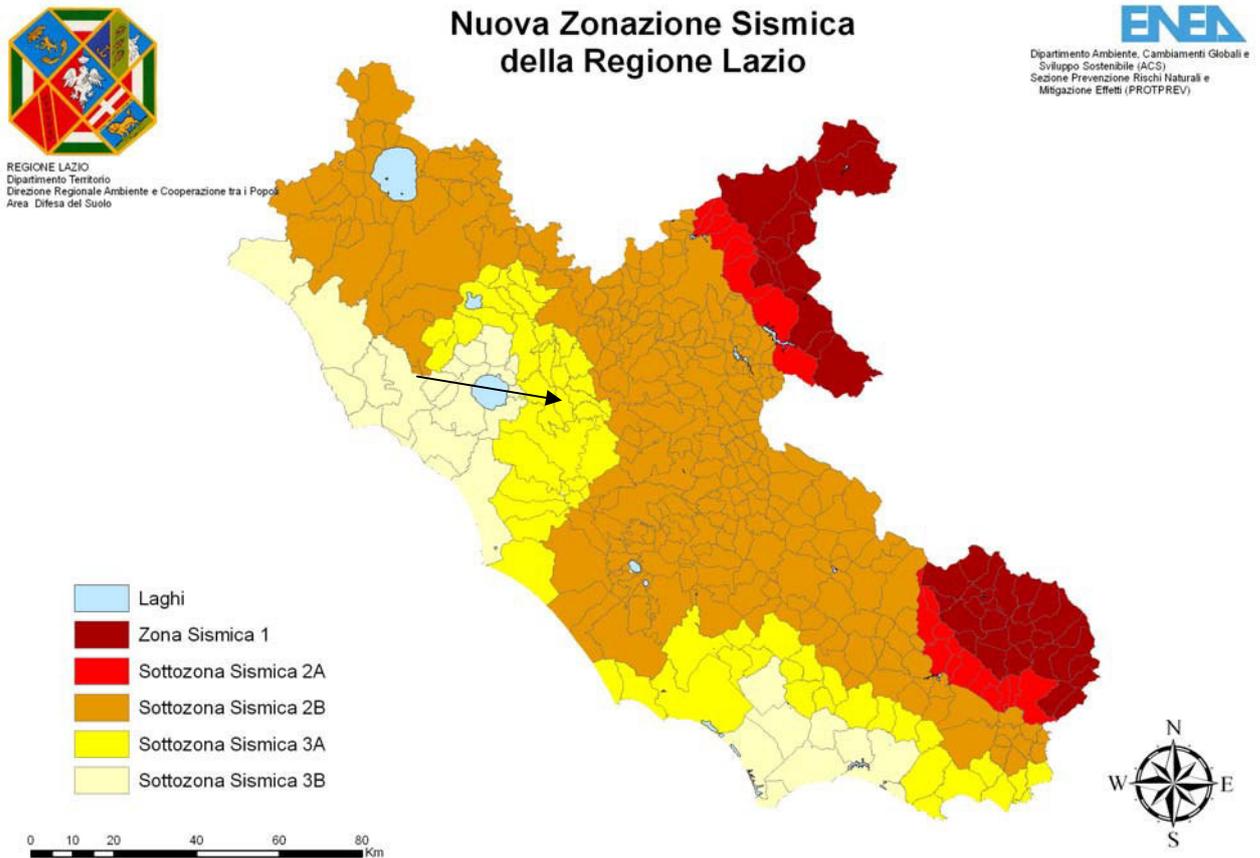
La sismicità dell’area risulta influenzata dalla struttura sismogenetica dei Colli Albani. L’apparato vulcanico albano, d’altro canto, rappresenta una delle più attive strutture sismogenetiche fra quelle legate al vulcanismo recente e localizzate lungo il margine occidentale dell’Appennino. Come tutte le strutture del genere presenta una attività caratterizzata da limitata profondità degli ipocentri (generalmente inferiore ai 7 Km), distribuzione temporale degli eventi sismici “a sciame” e limitata intensità degli stessi (i valori di magnitudo non superano generalmente il valore di 4). Tra i terremoti più forti registrati sui Colli Albani, ricordiamo: 1806 (Rocca di Papa); 1892 (Lanuvio); 1899 (Frascati); 1927 (Nemi), tutti riferibili come VIII grado M.C.S. all’epicentro. In epoca recente, da ricordare lo sciame sismico del 1981, durato oltre 3 mesi e quello del 1989-1990, protrattosi per circa 1 anno, durante il quale sono state registrate oltre tremila scosse (vedi tabella 1)

<b>Seismic history of Sacrofano</b>		Tab.1 – Ripreso da INGV - DBMI04				
<b>[42.105, 12.447]</b>						
Total number of earthquakes: 3						
Effects		Earthquake occurred:				
<b>Is</b>	<b>Anno Me Gi Or</b>	<b>Area epicentrale</b>	<b>Studio</b>	<b>nMDP</b>	<b>Io</b>	<b>Mw</b>
2	1971 02 06 18 09	TUSCANIA	DOM	89	7-8	4.90
4-5	1997 09 26 09 40 25	Appennino umbro-march.	CFTI	869	8-9	6.05
4-5	1998 03 26 16 26 17	APPENNINO UMBRO-MARCH.	BMING	408	6	5.33

Nel 1998-2001 è stata riformulata una nuova proposta di classificazione che ha aggiornato e modificato la vecchia classificazione del 1983. A seguito dei nuovi studi sulla sismica è stata redatta l’ordinanza del PCM n° 3274 del 20-03-2003, e con la Delibera di Giunta Regione Lazio n. 766 del 01.08.2003 - “*Riclassificazione sismica del territorio della Regione Lazio*” il Comune di Sacrofano è stato classificato come Zona sismica **3**.

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 Sacrofano in **Zona 3** –

**Sottozona A** (fig. 12); 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. 10** – Stralcio dalla Mappa della Nuova Zonazione Sismica della Regione Lazio *DGR Lazio 387/2009*  
La freccia indica il Comune di Sacrofano

Nel 14-01-2008 è stato pubblicato il Decreto Ministeriale che approva le nuove “Norme tecniche sulle costruzioni”; di seguito si presentano alcuni parametri relativi al sito in questione:

1. **CATEGORIA DI SUOLO DI FONDAZIONE** – Questo parametro è stato misurato mediante una prospezione sismica Masw e una misura tomografica HVSR (fit congiunto - vedi allegato 3) che ha fornito una  $V_s$  nei 30 m al di sotto del piano di posa delle fondazioni  $V_{s30}=416$  m/s.

Pertanto, nell'area di studio si ha una categoria di suolo di fondazione **B**: *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s,30}$  compresi tra 360*

*m/s e 800 m/s (ovvero NSPT,30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu,30 > 250 kPa nei terreni a grana fina).*

2. CONDIZIONI TOPOGRAFICHE – **T1** - Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$
3. AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA - Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica **ST =1**

## 7. CONSIDERAZIONI GEOTECNICHE E CONCLUSIONI

Per la caratterizzazione geotecnica dei depositi di fondazione del progetto in questione, sono state effettuate 2 prove penetrometriche mediante penetrometro dinamico super pesante (allegati 1, 2) disposte in maniera trasversale al fabbricato in progetto.

Le prove sono state spinte fino ad una profondità massima di 7 m dal p.c., ed i risultati delle prove hanno evidenziato la presenza di 3 strati a diverso grado di addensamento:

1. Suolo con spessore max di 1,8 m dal p.c.
2. Depositivi vulcanici poco addensati (alternati a depositivi vulcanici con medio grado di addensamento)
3. Depositivi vulcanici con medio grado di addensamento, talvolta corrispondenti alle ignimbriti (alternati a depositivi vulcanici poco addensati)

i parametri geotecnici dei terreni interessati, sono esposti nella tabella seguente (tabella 2 – non è stato inserito lo strato 1, relativo al suolo, che si consiglia di evitare come piano di posa fondazione ).

<b>TABELLA 2 – Valori medi dei coefficienti geotecnici per strato attraversato</b>		
	<i>Depositivi vulcanici pedogenizzati poco addensati</i>	<i>Depositivi vulcanici con medio grado di addensamento addensati</i>
<i>Nspt</i>	5,2	14,5
<i>Densità relativa</i>	20	39
<i>Angolo d'attrito (°)</i>	24°	30°
<i>Coesione (kPa)</i>	1 (dato bibliografico)	10 (dato bibliografico)
<i>Classificazione A.G.I.</i>	Poco addensato	Moderatamente addensato
<i>Peso unità di volume (t/m<sup>3</sup>)</i>	1,44	1,7

In questa tabella sono stati inseriti i valori medi di alcuni parametri geotecnici relativi ad ogni strato riconosciuto e questi valori sono volutamente prudenziali in favore della sicurezza.

Per quanto riguarda l'interpretazione delle prove, in base all'esperienza acquisita ed in base ai depositivi affioranti nei dintorni del settore di destinazione del progetto si è scelto di trattare questi depositivi sabbiosi come terreni granulari o incoerenti; quindi la *coesione* di questi terreni, inserita nella tabella 2, deriva da prove di laboratorio effettuate su campioni indisturbati di terreni simili dove, in alcuni campioni si aveva anche *coesione*=0.

In definitiva, in base ai dati raccolti dall'analisi di terreno, alle informazioni reperite da bibliografia ed ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche si può concludere che:

1. *Nell'area di studio sono presenti tufi stratificati, tufiti e tufi terrosi generalmente biancastri con grossi frammenti lavici e prodotti di lancio. Sono presenti diversi livelli di ignimbrite trachitica biancastra con grossi inclusi calcarei*
2. *Non sono stati riscontrati elementi tettonici in superficie*
3. *L'area di studio ricade all'interno di un sottobacino del Bacino del Tevere, ed in particolare nel sottobacino TEV-410*
4. *L'area di studio è posta a circa 70 m ad sud-ovest dall'asta del Fosso Vignale allungato in direzione NW-SE*
5. *La scarpata sud-occidentale dello scavo dell'area di studio è soggetta a piccoli distaccamenti di porzioni di terreno e piroclastiti; tutte le scarpate dello scavo, ed in particolare quella sud-occidentale, sono da ritenersi a potenziale rischio frana e necessitano di opere di protezione, salvaguardia e/o riprofilatura per permettere l'esecuzione dei lavori in sicurezza*
6. *La superficie piezometrica della falda principale dovrebbe possedere una soggiacenza dal piano campagna di 50 metri.*
7. *Non si può escludere l'eventuale presenza di piccole faldine sospese più superficiali*
8. *La zona di studio non ricade all'interno di parchi o aree protette (SIC – ZPS) e non è soggetta a vincolo P.A.I.*
9. *Nell'area di studio si ha una categoria di suolo di fondazione **B***
10. *Nell'area di studio si ha una categoria topografica **TI***
11. *Nell'area di studio si ha un valore massimo del coefficiente di amplificazione topografica **ST =1***
12. *Vista la situazione geomorfologica, si consiglia al progettista di avere cura che le opere in progetto siano dotate di un adeguato sistema di smaltimento delle acque meteoriche ad evitare:*
  - *qualsiasi azione di ruscellamento superficiale di acque selvagge, inalveandole in idonee canalizzazioni;*
  - *la permeazione e la percolazione all'interno del terreno di fondazione.*
13. *Infine si consiglia il progettista di evitare come piano di posa delle fondazioni lo strato relativo a suolo o terreno vegetale.*

## 8. BIBLIOGRAFIA

**BALDI P., DECANDIA F.A., LAZZAROTTO A. & CALAMAI A.** (1974). *Studio geologico del substrato della copertura vulcanica laziale nella zona dei laghi di Bolsena, Vico e Bracciano*. Mem. Soc. Geol. Ital. **13**, 575–606.

**BONI C., BONO P. & CAPELLI G.** (1983) – *Carta idrogeologica del territorio della Regione Lazio*. Regione Lazio, Assessorato alla Programmazione; Università degli Studi di Roma “La Sapienza”.

**CAPELLI G., MAZZA R. & GAZZETTI C.** (2005) – *Strumenti e Strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio. Gli acquiferi vulcanici*. Quaderni di tecniche e di protezione ambientale, **78**.

**DE RITA D., FUNICIELLO R. & SPOSATO A.** (1988) – *Complessi vulcanici*. Quad. Ric. Sci., vol. **114**. Progetto Finalizzato Geodinamica C.N.R., Roma, 205–215.

**DI FILIPPO M. & TORO B.** (1993). *Gravimetric study of Sabatini area*. In: Di Filippo, M. (Ed.), Sabatini Volcanic Complex. Quad. Ric. Sci., vol. **114**. Progetto Finalizzato Geodinamica C.N.R., Roma, 95–99.

**KARNER D.B., MARRA F. & RENNE P.R.** (2001). *The history of the Monti Sabatini and Alban Hills volcanoes: groundwork for assessing volcanic-tectonic hazards for Rome*. J. Volcanol. Geotherm. Res. **107**, 185–219. Kaye, M.J., 1965. X-ray fluorescence determinations

**MATTIAS P.P. & VENTRIGLIA U.** (1970). *La regione vulcanica dei monti Sabatini e Cimini*. Mem. Soc. Geol. Ital. **9**, 331–384.

**SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA** (1971) - *Foglio 143 (Bracciano) della Carta Geologica d'Italia, scala 1:100.000*. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.

**SOTTILI G., PALLADINO D.M. & ZANON V.** (2004) – *Plinian activity during the early eruptive history of the Sabatini Volcanic District, Central Italy*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **135**, 361-379

**VENTRIGLIA U.** (1971) – *Idrogeologia della provincia di Roma*. Amministrazione Provinciale di Roma.

*Dott. Geologo Diego Galetto*

# ALLEGATO 1 - UBICAZIONE INDAGINI SU ORTOFOTO

Scala 1:1.000



★ Prove penetrometriche DPSH

— Prospezione sismica Masw

■ Misura HVSR

## ALLEGATO 2 - RISULTATI DELLE PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE

Committente: Comune di Sacrofano  
Cantiere: Polo scolastico  
Località: Sacrofano (RM)

### Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DPSH PENNI 63 COMPAC

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	0,8	
Rivestimento/fanghi	No	
Angolo di apertura punta	90 °	

### CORRELAZIONE N - N<sub>spt</sub> (valori suggeriti dalla Compac s.r.l.)

<i>TERRENI PREVALENTEMENTE COESIVI</i>		<i>TERRENI PREVALENTEMENTE GRANULARI</i>	
FATTORE CORRETTIVO	NUMERO COLPI	FATTORE CORRETTIVO	NUMERO COLPI
0,7	N < 8	0,8	N < 8
0,8	8 ≤ N ≤ 14	0,95 - 1,0	8 ≤ N ≤ 14
0,9 - 1,0	N > 14	1,0 - 1,2	N > 14

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

**Note illustrative - Diverse tipologie di penetrometri dinamici**

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infingere 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<sub>spt</sub>

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<sub>spt</sub> ottenuto con la suddetta prova, pertanto si presenta la necessità di rapportare il numero di colpi di una prova dinamica con N<sub>spt</sub>. 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 R<sub>pd</sub>

Formula Olandesi

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

R<sub>pd</sub> = 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.

### **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

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

$N_{spt}$  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
- Buismann-Sanglerat , correlazione valida per sabbia e sabbia argillosa.
- Farent (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>0</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>

**PROVA ... Nr.1**

Strumento utilizzato... DPSH PENNY 63 COMPAC  
 Prova eseguita in data 02/02/2010  
 Profondità prova 5.00 mt  
 Quota 200.00 mt  
 Falda non rilevata

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Res. dinamica (Kg/cm <sup>2</sup> )
0.20	1	0.855	8.31	9.72
0.40	1	0.851	8.27	9.72
0.60	1	0.847	8.23	9.72
0.80	1	0.843	8.20	9.72
1.00	2	0.840	15.10	17.98
1.20	2	0.836	15.04	17.98
1.40	2	0.833	14.97	17.98
1.60	1	0.830	7.46	8.99
1.80	1	0.826	7.43	8.99
2.00	5	0.823	34.42	41.82
2.20	7	0.820	48.01	58.54
2.40	4	0.817	27.34	33.45
2.60	6	0.814	40.86	50.18
2.80	7	0.811	47.50	58.54
3.00	16	0.759	94.91	125.10
3.20	17	0.756	100.48	132.91
3.40	16	0.753	94.25	125.10
3.60	16	0.751	93.93	125.10
3.80	13	0.748	76.07	101.64
4.00	16	0.746	87.62	117.44
4.20	15	0.744	81.88	110.10
4.40	16	0.741	87.08	117.44
4.60	14	0.739	75.97	102.76
4.80	8	0.787	46.22	58.72
5.00	8	0.785	43.44	55.34

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

	Nspt	Prof. Strato (m)	Gibbs & Holtz 1957	Skempton 1986
Strato 1	1.06	1.80	0	9.54
Strato 2	4.64	2.80	19.62	19.87
Strato 3	15.44	4.60	39.49	43.81
Strato 4	6.4	5.00	19.31	24.47

**Angolo di resistenza al taglio**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Mitchell & Katti (1981)	Shioi-Fukuni 1982 (ROAD BRIDGE SPECIFICATION)	Owasaki & Iwasaki
Strato 1	1.06	1.80	1.06	<30	18.99	19.6
Strato 2	4.64	2.80	4.64	<30	23.34	24.63
Strato 3	15.44	4.60	15.44	30-32	30.22	32.57
Strato 4	6.4	5.00	6.4	<30	24.8	26.31

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

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Schmertmann (1978) (Sabbie)	Bowles (1982) Sabbia Media
Strato 1	1.06	1.80	1.06	8.48	---
Strato 2	4.64	2.80	4.64	37.12	---
Strato 3	15.44	4.60	15.44	123.52	152.20
Strato 4	6.4	5.00	6.4	51.20	---

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

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Buisman-Sanglerat (sabbie)	Farrent 1963	Menzenbach e Malcev (Sabbia media)
Strato 1	1.06	1.80	1.06	---	7.53	42.73
Strato 2	4.64	2.80	4.64	---	32.94	58.69
Strato 3	15.44	4.60	15.44	92.64	109.62	106.86
Strato 4	6.4	5.00	6.4	---	45.44	66.54

**Classificazione AGI**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Classificazione AGI
Strato 1	1.06	1.80	1.06	Classificazione A.G.I. 1977	SCIOLTO
Strato 2	4.64	2.80	4.64	Classificazione A.G.I. 1977	POCO ADDENSATO
Strato 3	15.44	4.60	15.44	Classificazione A.G.I. 1977	MODERATAMENTE ADDENSATO
Strato 4	6.4	5.00	6.4	Classificazione A.G.I. 1977	POCO ADDENSATO

**Peso unità di volume**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Gamma (t/m <sup>3</sup> )
Strato 1	1.06	1.80	1.06	Meyerhof ed altri	1.35
Strato 2	4.64	2.80	4.64	Meyerhof ed altri	1.52
Strato 3	15.44	4.60	15.44	Meyerhof ed altri	1.89
Strato 4	6.4	5.00	6.4	Meyerhof ed altri	1.60

**Peso unità di volume saturo**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Gamma Saturo (t/m <sup>3</sup> )
Strato 1	1.06	1.80	1.06	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.86
Strato 2	4.64	2.80	4.64	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.88
Strato 3	15.44	4.60	15.44	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.95
Strato 4	6.4	5.00	6.4	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.90

**Modulo di Poisson**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Poisson
Strato 1	1.06	1.80	1.06	(A.G.I.)	0.35
Strato 2	4.64	2.80	4.64	(A.G.I.)	0.34
Strato 3	15.44	4.60	15.44	(A.G.I.)	0.32
Strato 4	6.4	5.00	6.4	(A.G.I.)	0.34

**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)
Strato 1	1.06	1.80	1.06	68.66	129.53
Strato 2	4.64	2.80	4.64	275.07	319.27
Strato 3	15.44	4.60	15.44	851.61	665.54
Strato 4	6.4	5.00	6.4	372.15	388.58

**Modulo di reazione Ko**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Ko
Strato 1	1.06	1.80	1.06	Navfac 1971-1982	0.04
Strato 2	4.64	2.80	4.64	Navfac 1971-1982	0.90
Strato 3	15.44	4.60	15.44	Navfac 1971-1982	3.21
Strato 4	6.4	5.00	6.4	Navfac 1971-1982	1.31

**Qc ( Resistenza punta Penetrometro Statico)**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Qc (Kg/cm <sup>2</sup> )
Strato 1	1.06	1.80	1.06	Robertson 1983	2.12
Strato 2	4.64	2.80	4.64	Robertson 1983	9.28
Strato 3	15.44	4.60	15.44	Robertson 1983	30.88
Strato 4	6.4	5.00	6.4	Robertson 1983	12.80

**PROVA ... Nr.2**

Strumento utilizzato... DPSH PENNY 63 COMPAC  
 Prova eseguita in data 02/02/2010  
 Profondità prova 7.00 mt  
 Quota 200.00 mt  
 Falda non rilevata

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Res. dinamica (Kg/cm <sup>2</sup> )
0.20	26	0.755	190.67	252.66
0.40	11	0.851	90.94	106.90
0.60	1	0.847	8.23	9.72
0.80	1	0.843	8.20	9.72
1.00	2	0.840	15.10	17.98
1.20	5	0.836	37.59	44.95
1.40	7	0.833	52.41	62.93
1.60	7	0.830	52.20	62.93
1.80	4	0.826	29.71	35.96
2.00	6	0.823	41.31	50.18
2.20	11	0.820	75.45	92.00
2.40	12	0.817	82.01	100.36
2.60	9	0.814	61.29	75.27
2.80	5	0.811	33.93	41.82
3.00	5	0.809	31.61	39.09
3.20	7	0.806	44.11	54.73
3.40	7	0.803	43.97	54.73
3.60	7	0.801	43.83	54.73
3.80	8	0.798	49.94	62.55
4.00	6	0.796	35.06	44.04
4.20	8	0.794	46.61	58.72
4.40	16	0.741	87.08	117.44
4.60	13	0.739	70.54	95.42
4.80	11	0.787	63.55	80.74
5.00	13	0.735	66.10	89.92
5.20	15	0.733	76.05	103.76
5.40	16	0.731	80.91	110.67
5.60	6	0.779	32.34	41.50
5.80	5	0.777	26.88	34.59
6.00	6	0.775	30.43	39.24
6.20	4	0.774	20.24	26.16
6.40	4	0.772	20.20	26.16
6.60	6	0.770	30.23	39.24
6.80	5	0.769	25.14	32.70
7.00	10	0.767	47.58	62.02

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

	Nspt	Prof. Strato (m)	Gibbs & Holtz 1957	Skempton 1986
Strato 2	1.06	1.00	1.05	9.54
Strato 3	5.7	4.20	23.13	22.68
Strato 4	13.3	5.40	34.32	39.83
Strato 5	4.11	6.80	10.49	18.42
Strato 6	8	7.00	20.44	28.4

**Angolo di resistenza al taglio**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Mitchell & Katti (1981)	Shioi-Fukuni 1982 (ROAD BRIDGE SPECIFICATION)	Owasaki & Iwasaki
Strato 2	1.06	1.00	1.06	<30	18.99	19.6
Strato 3	5.7	4.20	5.7	<30	24.25	25.68
Strato 4	13.3	5.40	13.3	30-32	29.12	31.31
Strato 5	4.11	6.80	4.11	<30	22.85	24.07
Strato 6	8	7.00	8	<30	25.95	27.65

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

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Schmertmann (1978) (Sabbie)	Schultze-Menzenbach (Sabbia ghiaiosa)	Bowles (1982) Sabbia Media
Strato 2	1.06	1.00	1.06	8.48	---	---
Strato 3	5.7	4.20	5.7	45.60	---	---
Strato 4	13.3	5.40	13.3	106.40	157.64	141.50
Strato 5	4.11	6.80	4.11	32.88	---	---
Strato 6	8	7.00	8	64.00	95.10	---

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

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Buisman-Sanglerat (sabbie)	Farrent 1963	Menzenbach e Malcev (Sabbia media)
Strato 2	1.06	1.00	1.06	---	7.53	42.73
Strato 3	5.7	4.20	5.7	---	40.47	63.42
Strato 4	13.3	5.40	13.3	79.80	94.43	97.32
Strato 5	4.11	6.80	4.11	---	29.18	56.33
Strato 6	8	7.00	8	---	56.80	73.68

**Classificazione AGI**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Classificazione AGI
Strato 2	1.06	1.00	1.06	Classificazione A.G.I. 1977	SCIOLTO
Strato 3	5.7	4.20	5.7	Classificazione A.G.I. 1977	POCO ADDENSATO
Strato 4	13.3	5.40	13.3	Classificazione A.G.I. 1977	MODERATAMENTE ADDENSATO
Strato 5	4.11	6.80	4.11	Classificazione A.G.I. 1977	POCO ADDENSATO
Strato 6	8	7.00	8	Classificazione A.G.I. 1977	POCO ADDENSATO

**Peso unità di volume**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Gamma (t/m <sup>3</sup> )
Strato 2	1.06	1.00	1.06	Meyerhof ed altri	1.35
Strato 3	5.7	4.20	5.7	Meyerhof ed altri	1.57
Strato 4	13.3	5.40	13.3	Meyerhof ed altri	1.83
Strato 5	4.11	6.80	4.11	Meyerhof ed altri	1.50
Strato 6	8	7.00	8	Meyerhof ed altri	1.66

**Peso unità di volume saturo**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Gamma Saturo (t/m <sup>3</sup> )
Strato 2	1.06	1.00	1.06	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.86
Strato 3	5.7	4.20	5.7	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.89
Strato 4	13.3	5.40	13.3	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.94
Strato 5	4.11	6.80	4.11	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.88
Strato 6	8	7.00	8	Terzaghi-Peck 1948-1967	1.91

**Modulo di Poisson**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Poisson
Strato 2	1.06	1.00	1.06	(A.G.I.)	0.35
Strato 3	5.7	4.20	5.7	(A.G.I.)	0.34
Strato 4	13.3	5.40	13.3	(A.G.I.)	0.33
Strato 5	4.11	6.80	4.11	(A.G.I.)	0.35
Strato 6	8	7.00	8	(A.G.I.)	0.34

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

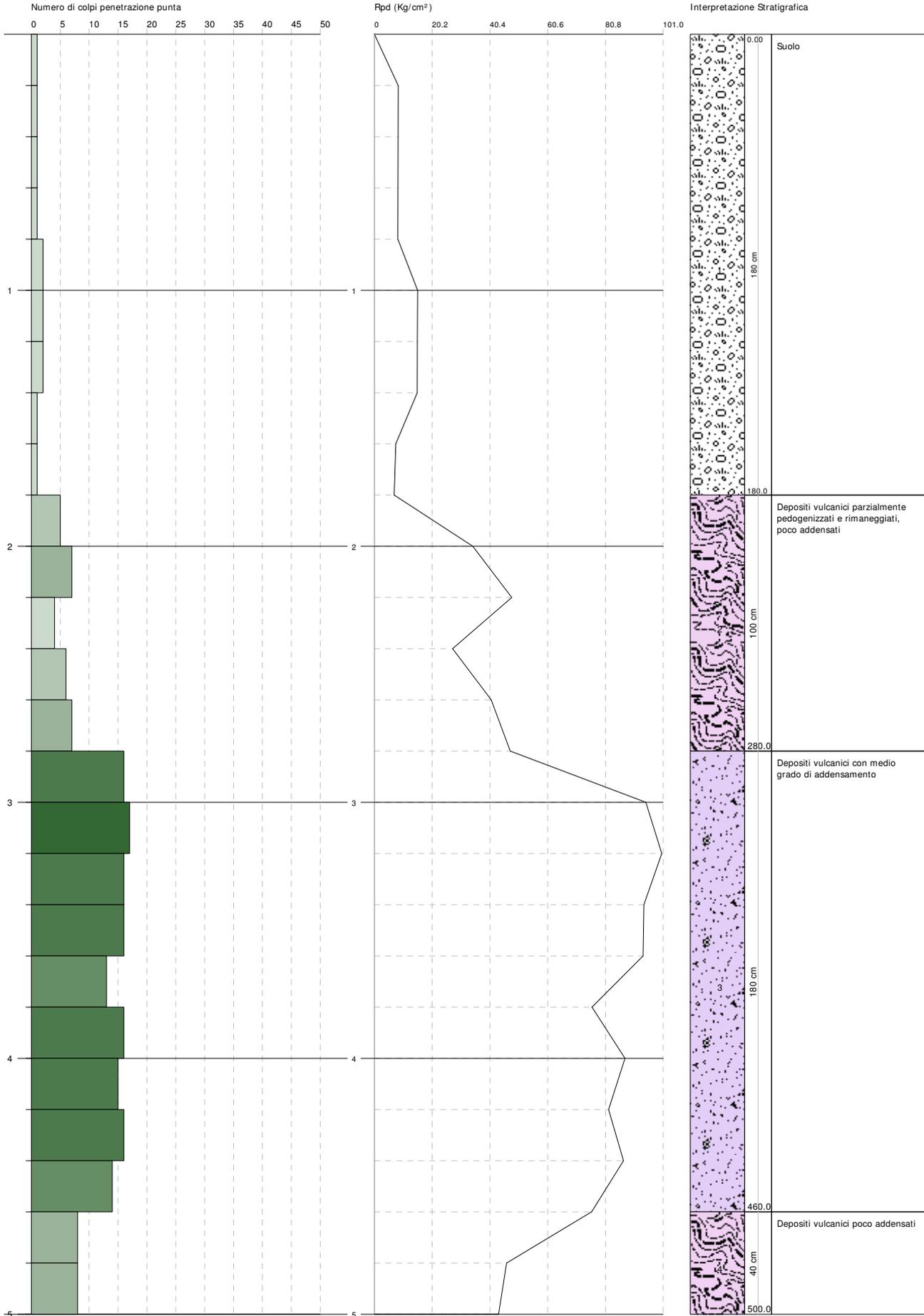
	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Ohsaki (Sabbie pulite)	Robertson e Campanella (1983) e Imai & Tonouchi (1982)
Strato 2	1.06	1.00	1.06	68.66	129.53
Strato 3	5.7	4.20	5.7	333.76	362.03
Strato 4	13.3	5.40	13.3	740.17	607.55
Strato 5	4.11	6.80	4.11	245.43	296.46
Strato 6	8	7.00	8	459.01	445.35

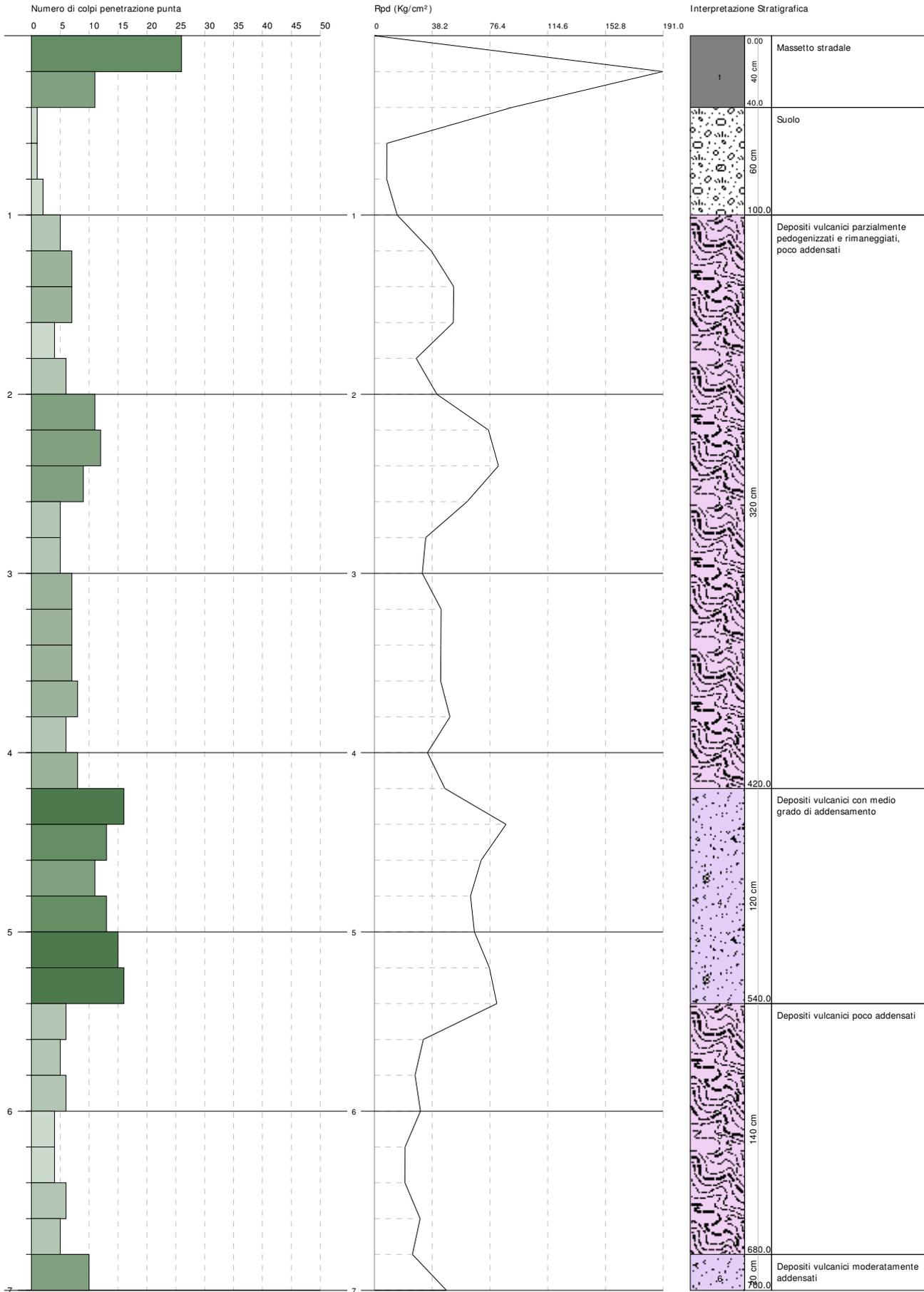
**Modulo di reazione Ko**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Ko
Strato 2	1.06	1.00	1.06	Navfac 1971-1982	0.04
Strato 3	5.7	4.20	5.7	Navfac 1971-1982	1.15
Strato 4	13.3	5.40	13.3	Navfac 1971-1982	2.79
Strato 5	4.11	6.80	4.11	Navfac 1971-1982	0.78
Strato 6	8	7.00	8	Navfac 1971-1982	1.67

**Qc ( Resistenza punta Penetrometro Statico)**

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Qc (Kg/cm <sup>2</sup> )
Strato 2	1.06	1.00	1.06	Robertson 1983	2.12
Strato 3	5.7	4.20	5.7	Robertson 1983	11.40
Strato 4	13.3	5.40	13.3	Robertson 1983	26.60
Strato 5	4.11	6.80	4.11	Robertson 1983	8.22
Strato 6	8	7.00	8	Robertson 1983	16.00





# ALLEGATO 3 - DETERMINAZIONE CATEGORIA DI SUOLO DI FONDAZIONE

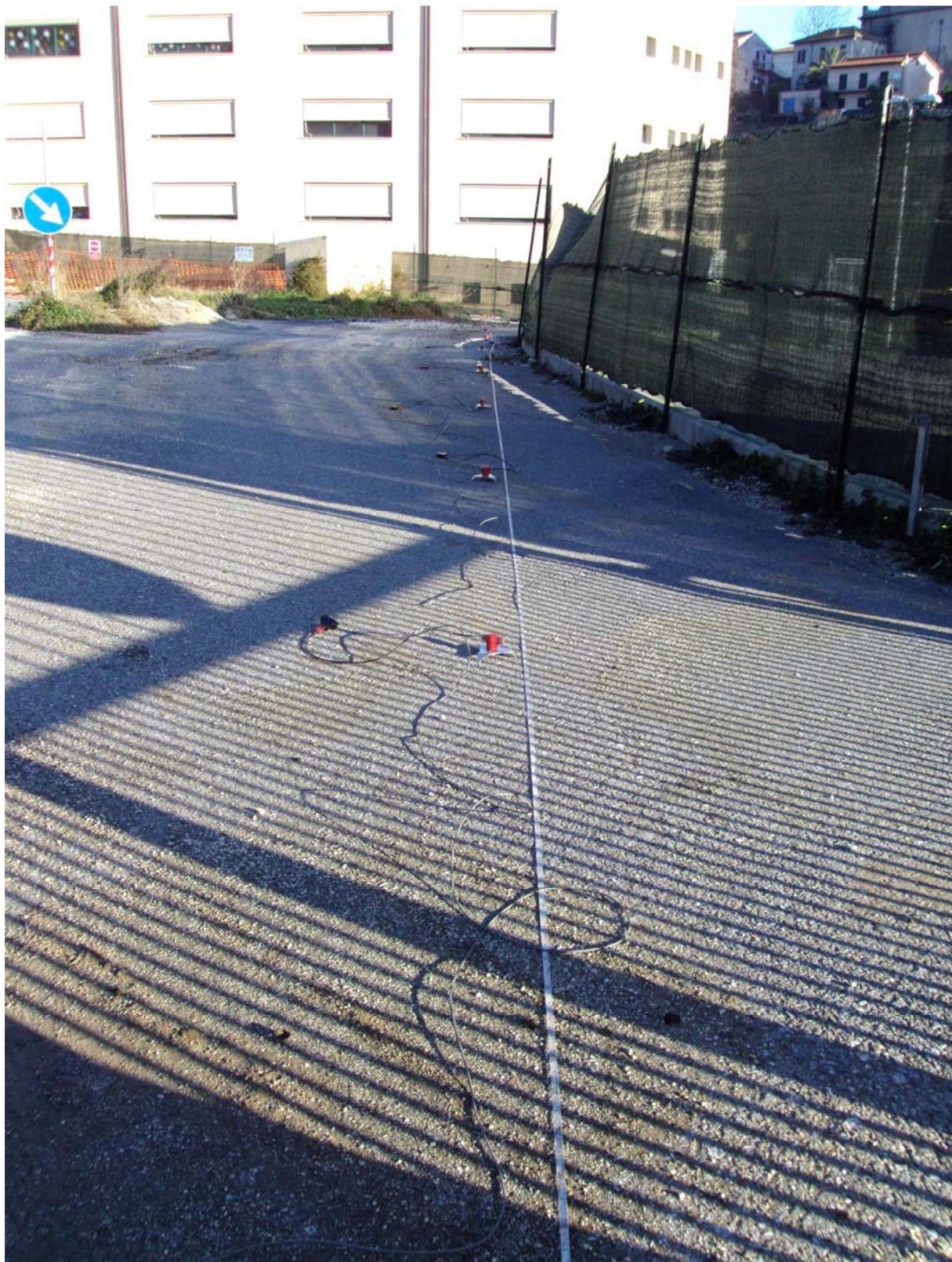
## *PROSPEZIONE SISMICA MASW – MISURA HVSR*

### 1. PREMESSA

Su incarico del Comune di Sacrofano sono state effettuate una registrazione di rumore sismico ambientale (misura tromografica HVSR, fig. 1) ed una prospezione sismica M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh; fig. 2) in un'area ricadente nel Polo Scolastico del Comune di Sacrofano (RM; fig.3), al fine classificare sismicamente il suolo, ossia definire la categoria di suolo di fondazione secondo la normativa vigente (D.M. 14 gennaio 2008).



**Fig. 1** - Foto della misura tromografica HVSR



**Fig. 2** - Foto dell'array sismico per la prospezione sismica Masw



**Fig. 3** – Ubicazione delle indagini geofisiche su ortofoto  
 Sistema di coordinate UTM33 ED50

*Scala 1:1.000*

## 2.CENNI TEORICI SUL METODO MASW

Lo scopo della prova MAS W consiste nel determinare il profilo di rigidezza del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh ( $V_R$ ) e un successivo processo di inversione, attraverso il quale viene fornita una stima indiretta della distribuzione delle  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio).

La prova si applica quando la profondità delle coperture da esplorare è compresa tra i 10 e i 50 m, presentando una maggiore attendibilità per profondità indagate inferiori ai 20 m. Si rende necessaria soprattutto quando interessano dati medi relativi ad ampi volumi di terreno e quando i risultati da ottenere devono essere di qualità e precisione buone.

Per l'esecuzione della prova è necessaria una superficie pianeggiante più o meno ampia in relazione alla profondità di indagine.

Si suppone che il volume di terreno interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo e isotropo.

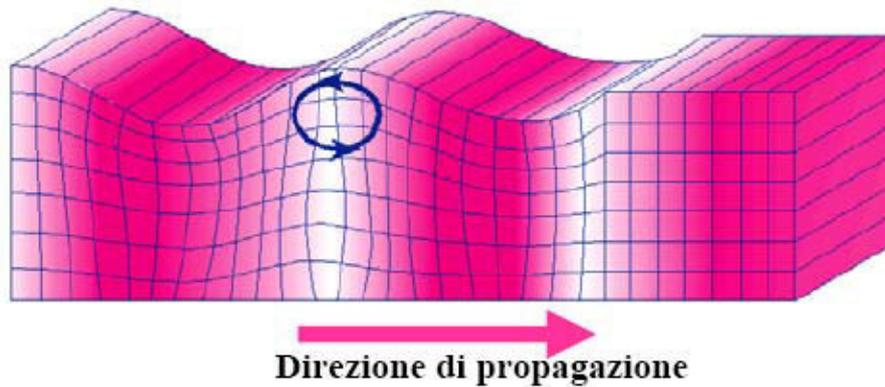
La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione dinamica verticale in un determinato campo di frequenze, opportunamente regolabile, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di rigidezza può scomporsi in due fasi fondamentali:

- ✓ deduzione della curva di dispersione (velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza) caratteristica del sito in esame;
- ✓ processo di inversione, finalizzato a ottenere partendo dalla curva suddetta una stima del profilo di rigidezza a essa associato.

Ai fini di questa prova, di tutte le componenti di moto prodotte nel terreno dalla sorgente, interessano quelle che si trasmettono lungo la superficie (onde superficiali) e di queste quelle di Rayleigh, polarizzate sul piano verticale e caratterizzate da componenti sia longitudinali sia trasversali.

Tali onde si propagano lungo fronti d'onda cilindrici, coassiali rispetto alla sorgente, con attenuazione proporzionale all'inverso della radice di  $r$  (dove  $r$  è la distanza dalla sorgente) inferiore all'attenuazione delle onde di volume (proporzionale invece a  $1/r$ ) e perciò già a distanze non molto grandi le onde di superficie tendono a prevalere nettamente su quelle di volume (fig. 4).



**Fig. 4** - 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.

La componente verticale del moto indotta dalle onde di Rayleigh è predominante su quella orizzontale e si attenua con la profondità rapidamente fino a diventare insignificante a una quota di poco superiore alla lunghezza d'onda  $\lambda$  della sollecitazione indotta. Perciò per indagare profondità sempre maggiori e ricavare la velocità caratteristica delle onde di Rayleigh è opportuno aumentare progressivamente la lunghezza d'onda della sollecitazione prodotta dalla sorgente, costruendo così una curva in cui sia riportata al variare della lunghezza d'onda  $\lambda$ , e quindi della profondità investigata, la velocità delle onde di Rayleigh calcolata (curva di dispersione).

La velocità  $V_R$  risulta sperimentalmente assai prossima a quella delle onde di taglio  $V_s$  (variando in funzione del coefficiente di Poisson tra 0.86 e 0.95), tramite la quale si possono ricavare le caratteristiche meccaniche del terreno per mezzo delle relazioni precedentemente citate.

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si compone di un *sistema sorgente* - *sistema di ricezione* - *sistema di acquisizione dati* (fig. 7).

### 3.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. 5, 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:

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

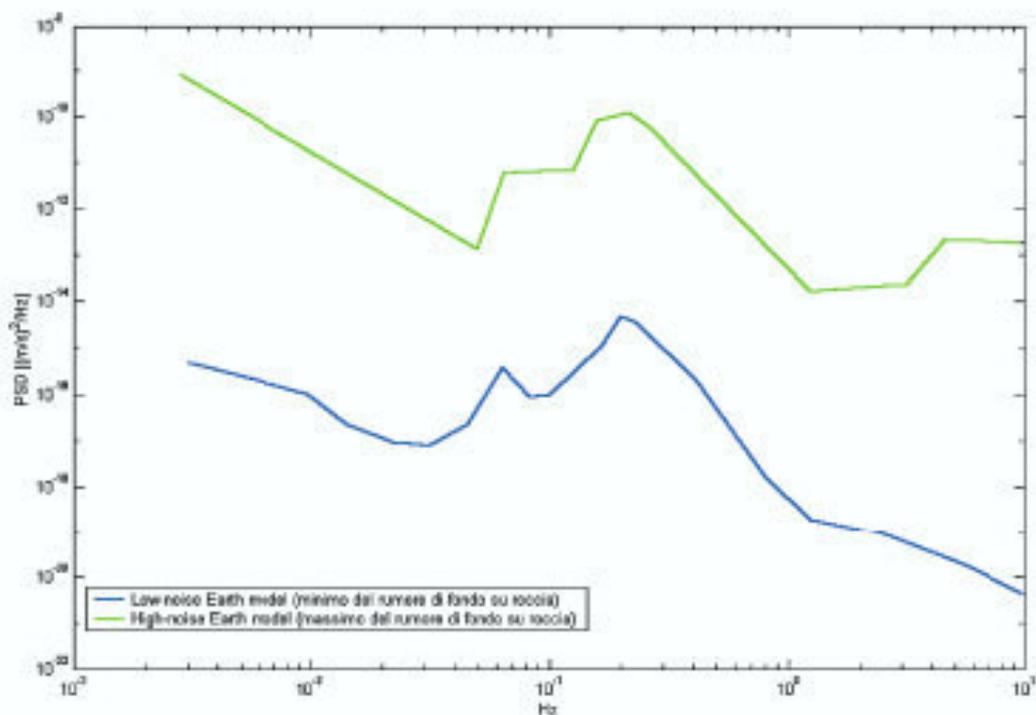
in cui  $V_s$  è la velocità media delle onde S nello strato  $N$  ed  $h$  è lo spessore.

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. 5** - 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.

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 oppure i risultati della prova Masw (come in questo lavoro), generando in tal modo un *fit congiunto* sia sul *Phase velocity spectra* delle Masw che sulla curva H/V sperimentale.

La procedura di inversione consiste di 3 passi:

1. Nel caso in cui non si abbia un *Phase velocity spectra* (derivante da una misura Masw, Remi, ecc..) si procede all'identificazione di un orizzonte stratigrafico superficiale (di solito ad alcuni metri di profondità)
2. identificazione del marker HVSR corrispondente,
3. fit della curva HVSR teorica utilizzando 1) e 2) come vincoli. In questo lavoro, avendo effettuato un'indagine Masw, si è proceduto ad un *fit congiunto* sia sul *Phase velocity spectra* delle Masw che sulla curva H/V sperimentale (CASTELLARO & MULARGIA, 2007).

Bisogna segnalare che non è stato raggiunto un fit preciso sulla curva H/V, ma comunque questa ha dato un ottimo aiuto nella determinazione della velocità del substrato vulcanico e nella delimitazione della profondità del tetto del medesimo.

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.

#### 4. CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'INDAGINE MASW E DELLA MISURA HVSR (RUMORE SISMICO AMBIENTALE)

Come sopramenzionato, per la determinazione delle  $V_{s30}$ , nell'ambito di questo lavoro sono state effettuate due tipologie di indagine: Masw, misura HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR).

Di seguito vengono riportate le caratteristiche tecniche dell'indagine Masw e della misura HVSR.

##### 4.1 CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'INDAGINE MASW

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. 6) 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. 7).



**Fig. 6 - Sistema sismico digitale multicanale SoilSpy Rosina**

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 (fig. 7); 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*).

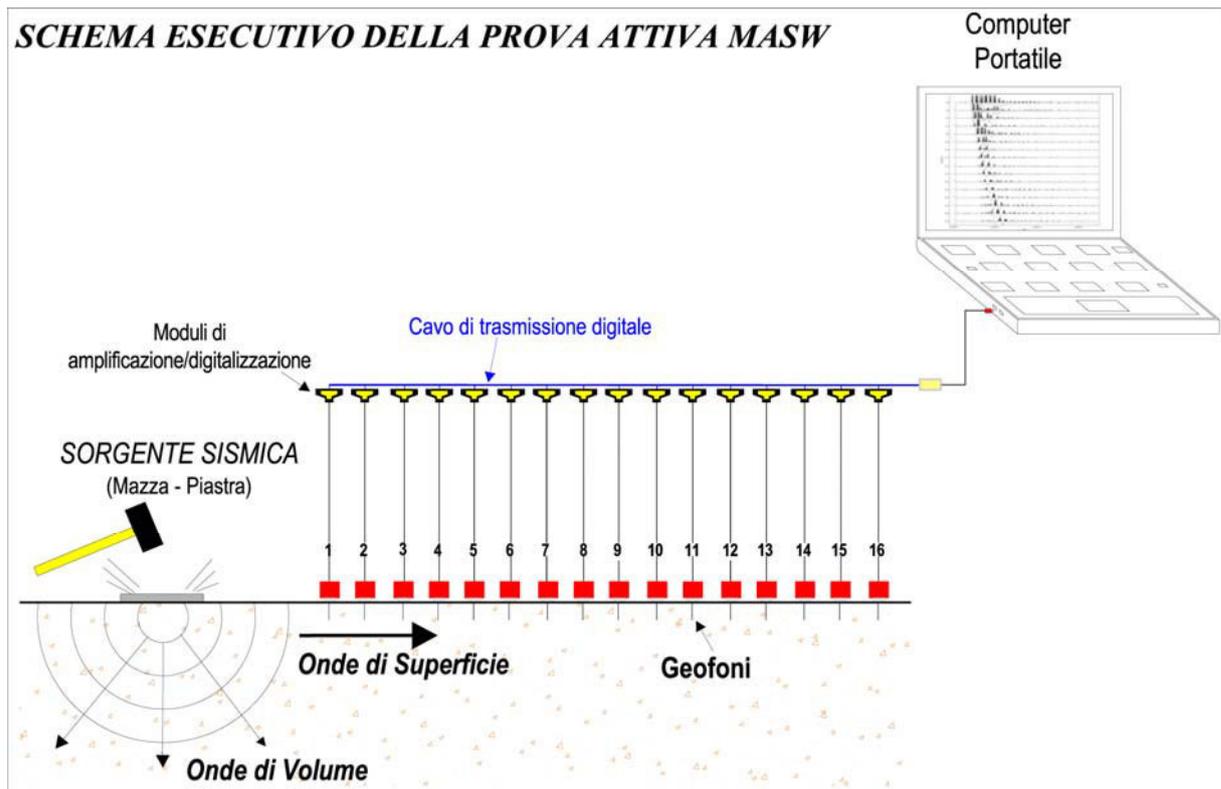


Fig. 7 – Schema esecutivo della prova attiva Masw eseguita

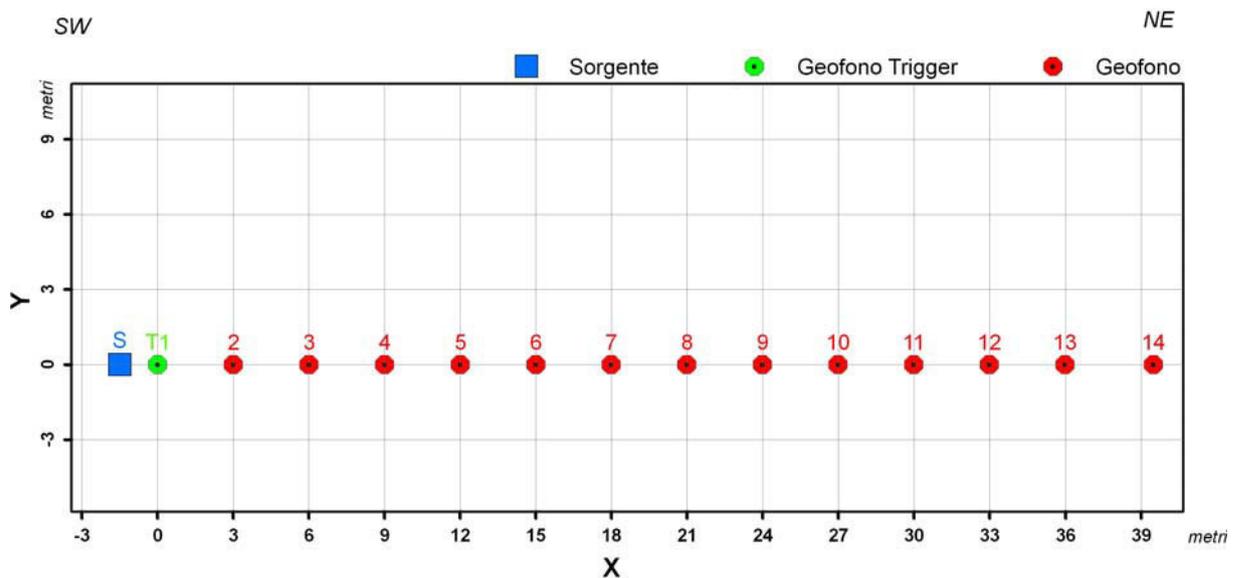
#### 4.2 SCHEMA ARRAY SISMICO

La prospezione sismica masw è stata eseguita con uno stendimento geofonico di 39,5 m, disposta sul terreno secondo un array lineare da 14 geofoni con interasse pari a 3.0 m (fig. 8).

La sorgente è stata posta ad una distanza di 1,5 m dal primo geofono utilizzato come *Trigger*.

La differenza di quota tra il geofono trigger (T1) ed il geofono 16 è di 0,3 m.

La lunghezza e geometria dell'array è stata condizionata da questioni logistiche.



**Fig. 8** – Schema di posizionamento array prospezione sismica masw

#### 4.3 CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE MISURE HVSR

La misura del rumore sismico ambientale è stata effettuata mediante il tromografo digitale Tromino (fig. 9), 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. 9** - Sistema per l’Acquisizione del Rumore Sismico **Tromino**

## 5. ACQUISIZIONE, ELABORAZIONE DATI E RISULTATI

L'utilizzo di entrambe le indagini permette una stima delle  $V_{S30}$  nettamente più precisa poiché permette un'elaborazione o *fit congiunto* creando una taratura contemporanea tra i risultati delle due misurazioni, ossia della *curva H/V* e dello *spettro di velocità di fase delle onde di superficie (curve di dispersione)* proveniente dall'indagine in array attiva (Masw).

Inoltre, questa metodologia permette una buona ricostruzione della sismostratigrafia dell'area; ossia dà la possibilità di ricostruire, dal p.c. in profondità, le variazioni di densità e le variazioni litologiche principali.

### 5.1 ACQUISIZIONE DEI DATI MASW

L'acquisizione dei dati Masw è stata effettuata mediante il software SoilSpy Rosina 3.13 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 (tab.1):

#### **Settaggio Trigger:**

*Trigger* = Geofono 1

*Percentuale di soglia* = 10 %

*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* = 512 Hz

Name	Component	Sampling frequency	dt	N samples	Duration	Rec x	Type	Max amplitude
R001	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	0	Waveform	32304
R002	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	3	Waveform	32273
R003	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	6	Waveform	25214
R004	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	9	Waveform	19499
R005	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	12	Waveform	13816
R006	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	15	Waveform	10230
R007	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	18	Waveform	10134
R008	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	21	Waveform	6718
R009	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	24	Waveform	4330
R010	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	27	Waveform	2586
R011	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	30	Waveform	2087
R012	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	33	Waveform	1896
R013	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	36	Waveform	1579
R014	Vertical	512	0,001953125	1536	3.000000 s	39,5	Waveform	517

**Tabella 1**

Successivamente è stato creato un'Average di tutte le energizzazioni effettuate scegliendo le migliori (fig. 10).

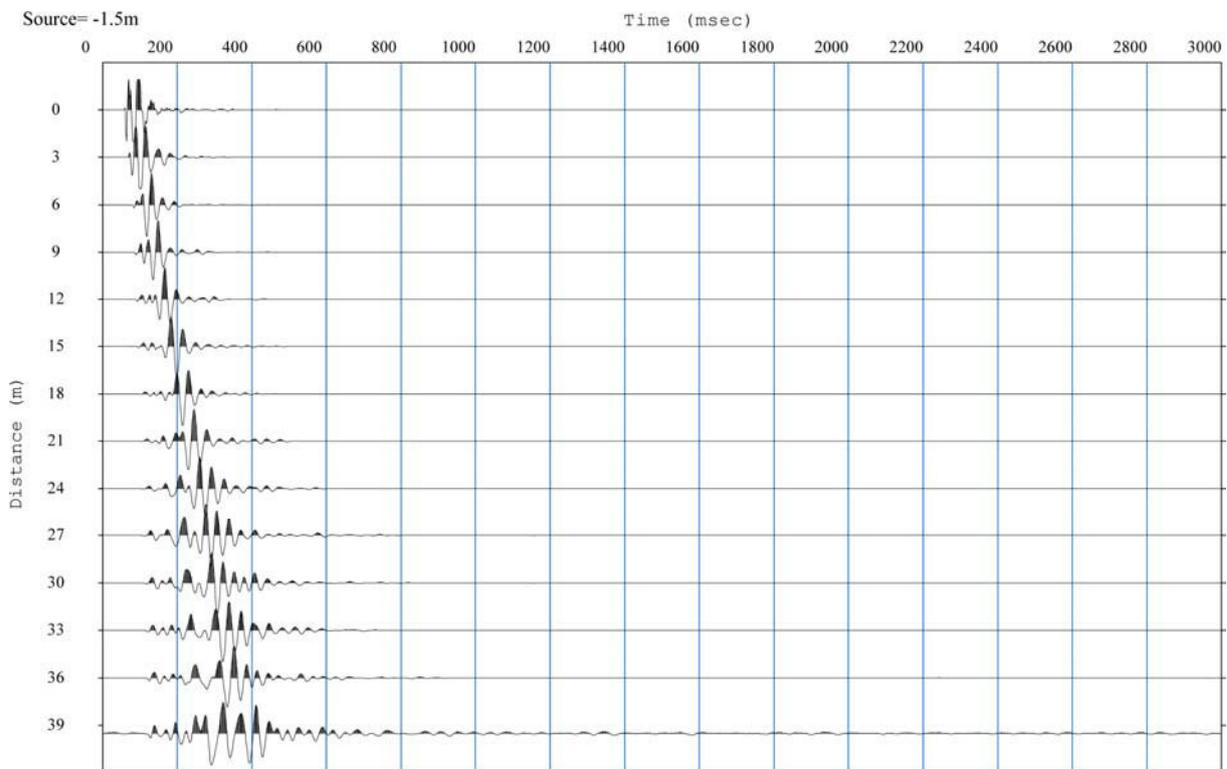


Fig. 10 – Sismogramma relativo all'indagine Sismica MASW

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).

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*

## 5.2 ELABORAZIONE DELLA CURVA H/V

*L'elaborazione della curva H/V* è stata effettuata mediante il software Grilla in dotazione a Tromino.

In sintesi, il segnale dei velocimetri è stato acquisito per un tempo  $t$  (20 min), e digitalizzato a 24 bit.

Il software Grilla, per ciascuna delle 3 componenti del moto:

1. divide il tracciato acquisito in finestre di lunghezza  $L$  (in questo lavoro generalmente 30 s),
  2. elimina il trend da ciascuna finestra,
  3. ne fa il “taper” con una finestra Bartlett,
  4. fa il “pad” di ciascuna finestra con degli zero,
  5. calcola la trasformata di Fourier (FFT) per ciascuna finestra,
  6. calcola lo spettro di ampiezza per ciascuna finestra,
  7. liscia lo spettro di ogni finestra secondo la funzione di lisciamiento  $f$ ,
- e calcola il rapporto spettrale HVSR ad ogni frequenza, per ciascuna finestra.

La funzione HVSR finale è data dalle media degli HVSR di ciascuna finestra. Per produrre l'HVSR finale le componenti orizzontali sono mediate tra loro con la media quadratica e vengono poi divise per la componente verticale.

La curva H/V presente in questo lavoro è stata ottenuta secondo i seguenti parametri e processi:

***Lunghezza Traccia:*** 0h20'00".

***Analizzato 84% della traccia***

***Frequenza di campionamento:*** 256 Hz

***Window size:*** 20 s

***Lisciamiento finestra:*** Triangular window

***Lisciamiento:*** 10%

### 5.3 FIT CONGIUNTO (HVS+MASW)

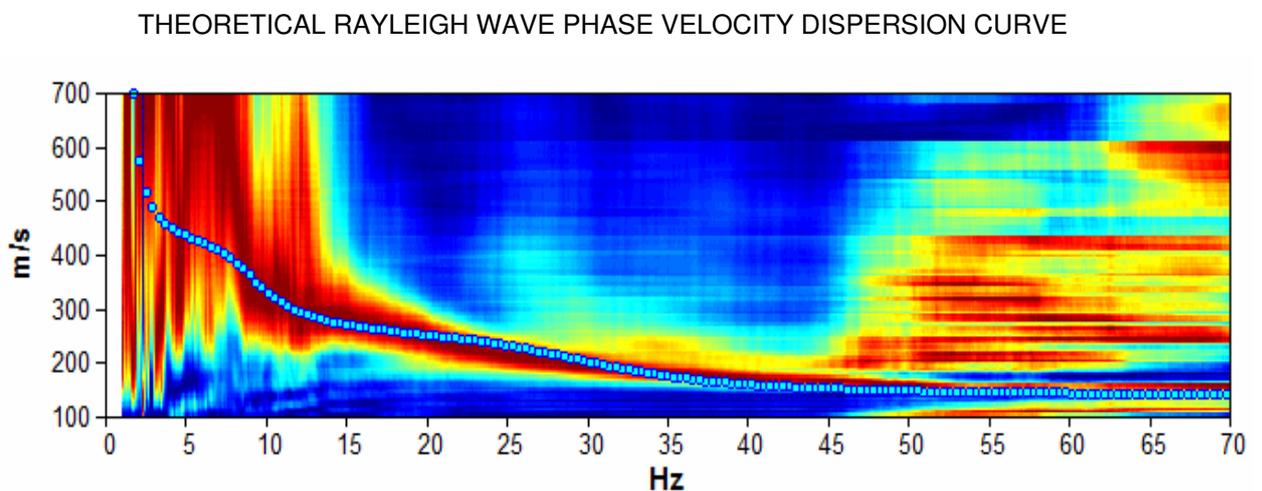
Il Fit congiunto (prova HVS+MASW) si compone nel modo seguente: una volta acquisite le curve si è proceduto all'esecuzione di un "picking" (*fit congiunto*) sia sulla **phase velocity spectra** che sulla **curva H/V** ottenute.

Il picking è stato effettuato attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (sulla curva di dispersione fig. 11) e contemporaneamente tarandolo con la curva sperimentale HVS (figg. 12-13).

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.

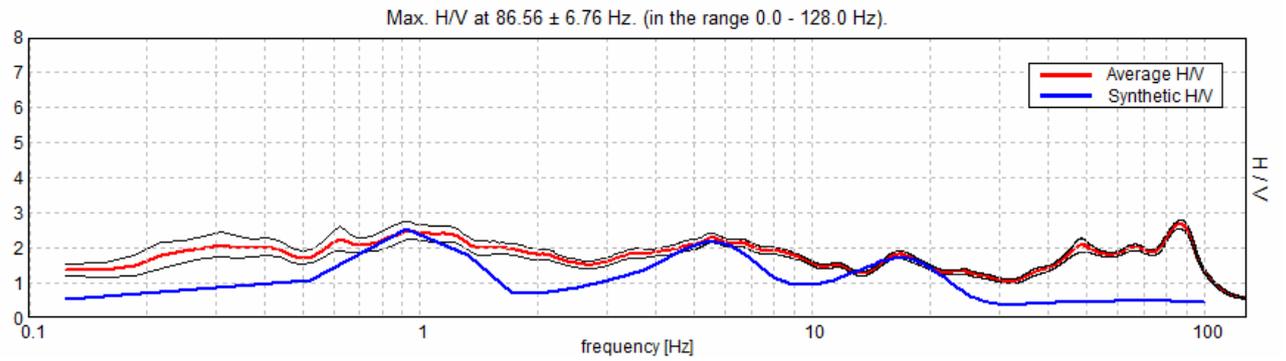
Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

Questa metodologia (*fit congiunto*) permette di vincolare tra loro i dati delle due curve e quindi riduce notevolmente l'errore dell'interprete, fornendo in tal modo un risultato nettamente più preciso sia dal punto di vista delle Vs30, sia della sismostratigrafia.

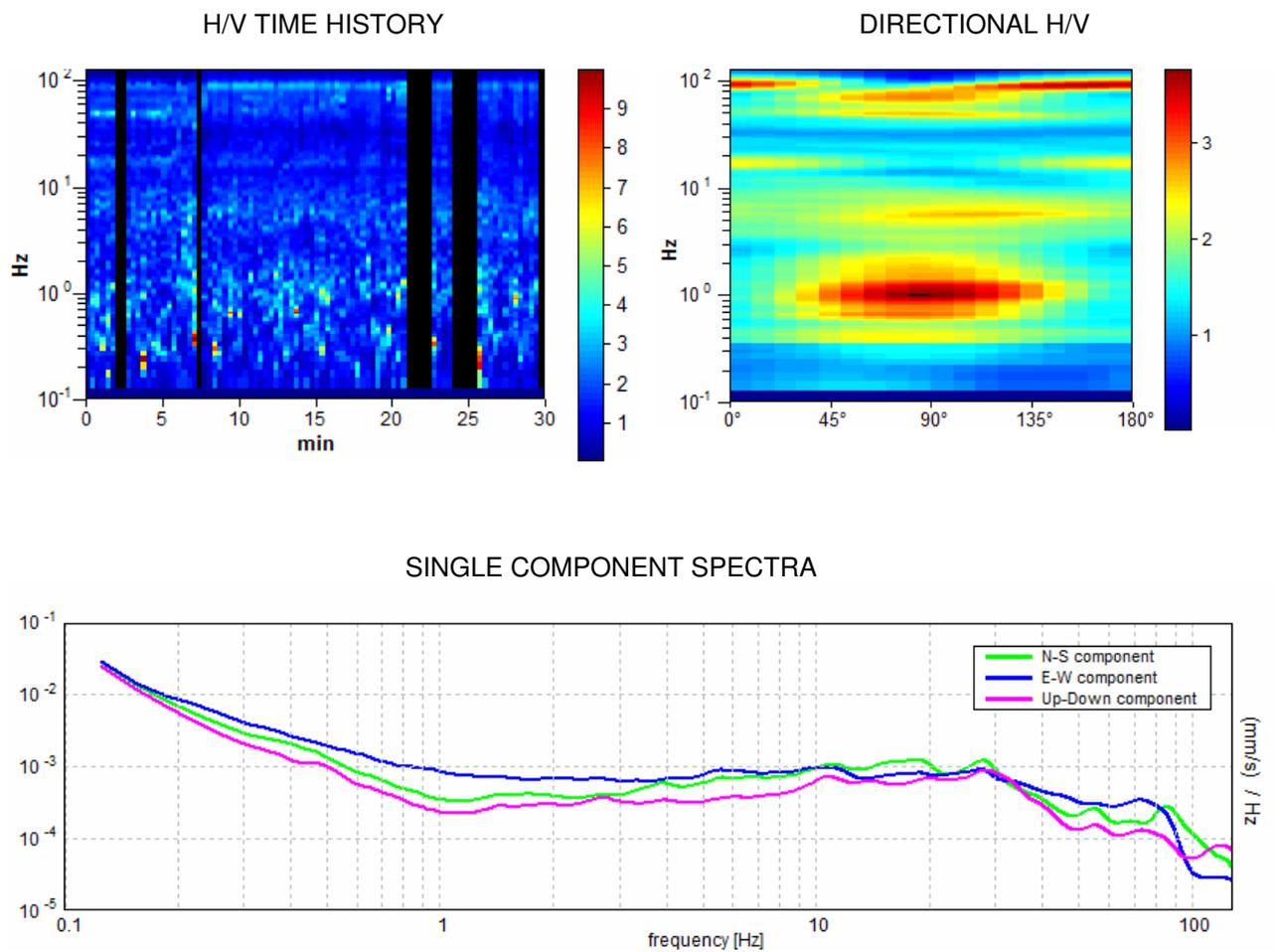


**Fig. 11** - Phase velocity spectra con picking ottenuto dalla prospezione masw effettuata

### EXPERIMENTAL VS. SYNTHETIC H/V



**Fig. 12** - Fit della curva HVSR sintetica (linea rossa) e sperimentale (linea blu)



**Fig. 13** - H/V TIME HISTORY - DIRECTIONAL H/V - SINGLE COMPONENT SPECTRA

(According to the Sesame, 2005 guidelines)

**Max. H/V at 86.56 ± 6.76 Hz. (in the range 0.0 - 128.0 Hz).**

**Criteria for a reliable HVSR curve**

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	86.56 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	131575.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 2712 times	OK	

**Criteria for a clear HVSR peak**

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	37.719 Hz	OK	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	99.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.67 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03893  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	3.36982 < 4.32813	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.0572 < 1.58	OK	

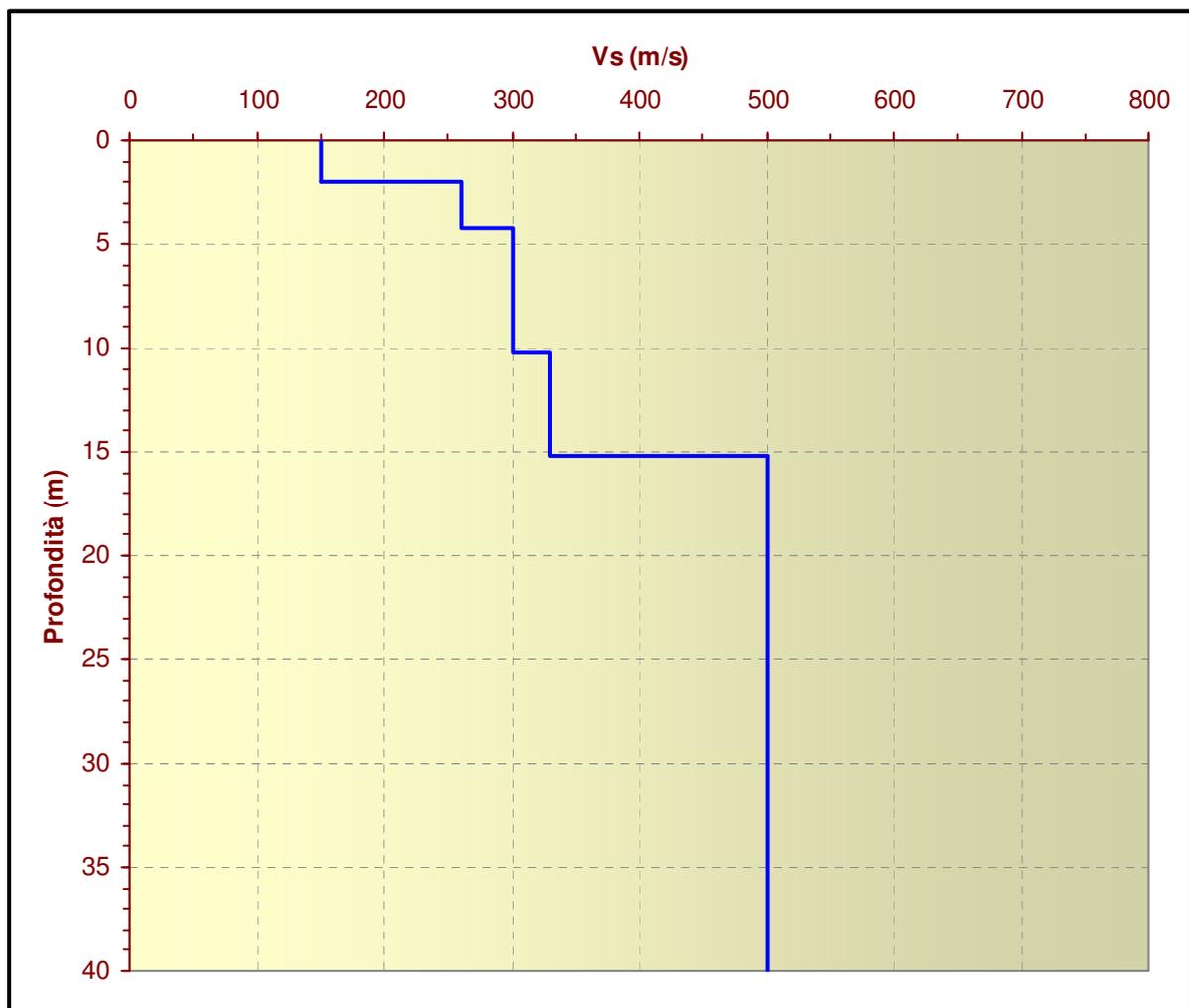
$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for  $\sigma_f$  and  $\sigma_A(f_0)$

Freq.range [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 $f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

L'analisi della **phase velocity spectra** e della **curva HVSR** consente in questo modo 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 e della curva HVSR si ottiene il seguente modello medio di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità (tab. 2; fig.14), rappresentativo dell'area investigata (stendimento complessivo di 39,5 m):

<b>Tab.2 - MODELLO MEDIO DI VELOCITA' DELLE ONDE SISMICHE DI TAGLIO</b>			
<i>Strato</i>	<i>Profondità alla base dello strato [m]</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Vs [m/s]</i>
1	2	2	150
2	4,2	2,2	260
3	10,2	6	300
4	15,2	5	330
5	75,2	60	500
6	145,2	70	600
7	inf,	inf,	970



**Fig. 14-** Andamento delle  $V_s$  con la profondità fino a 40 m dal p.c.

A partire dal modello sismico monodimensionale, è possibile calcolare il valore delle  $V_{s30}$ , 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  $V_{s30}$  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*”):

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

Dove:

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

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

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore (quota iniziale = profondità fondazione posizionata a 5 m dal p.c.):

$$V_{s(5.0-35.0)}=416\text{m/s}$$

a cui corrisponde la **categoria di suolo di fondazione di tipo B**

CATEGORIE DI SUOLO DI FONDAZIONE	
Categoria	Descrizione
<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>Depositati 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>Depositati 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).

## 6. BIBLIOGRAFIA

**BEN-MENAHM A. & SINGH S.J.** (1981) - *Seismic waves and sources*. Springer-Verlag, New York, 1108 pp.

**CASTELLARO S. & MULARGIA F.** (2007) – *Stime di Vs30 a stazione singola tramite misure HVSR vincolate*. GNGTS – Sessione 2.2, 329 – 331.

**CASTELLARO S, MULARGIA F. & BIANCONI L.** (2005) – *Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, veloce ed economica*. *Geologia tecnica & ambientale*, **3**, 76-102.

**IBS-VON SEHT M. & WOHLBERG J.** (1999)- *Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments*. *Bull. Seismol. Soc. America*, **89**, 250-259.

**MUCCIARELLI M. & GALLIPOLI M.R.** (2001)- *A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique*. *Bollettino di Geofisica Teoria ed Applicata*, **42**, 255-266.

**MULARGIA F., CASTELLARO S. & Rossi P.L.** (2007) - *Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica*. *Il Geologo dell'Emilia Romagna*, 25-38.

**NAKAMURA Y.** (1989)- *A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface*. *QR of RTRI*, **30**, 25-33.

