

VIA CAMIN (F° 3 – M.N. 523)
URBANIZZAZIONE DI UN'AREA INSERITA NELLA PEREQUAZIONE PER19
CARATTERIZZAZIONE GEOFISICA DEL SOTTOSUOLO TRAMITE H.V.S.R.
1
GIUGNO 2013

ELABORATO IDENTIFICATO AL SUB A)
D.G. n. 376 del 26/11/13 di Adozione



IL RESPONSABILE P.O.
Chiara Strazzabosco
Chiara Strazzabosco

ELABORATO IDENTIFICATO AL SUB A)
D.G. n. 246 del 12.9.2014 di Approvazione



IL RESPONSABILE P.O.
Chiara Strazzabosco
Chiara Strazzabosco

Committente: V.A.R.G. snc – c/o Studio geom. Diego Fabris – Schio (Vicenza)
di Vanzo Diego & C.

Geologo BERNARDINO ZAVAGNIN

STUDIO DI GEOLOGIA E GEOTECNICA
Via Baratto 4/a , 36015 Schio (VI) - bzavagn@tin.it - tel. 0445\527009 – fax 0445\505519



1. PREMESSA

Su incarico del Sig. geom. Diego Fabris, per conto del Signor Diego Vanzo, è stata determinata la categoria di sottosuolo mediante prospezioni sismiche effettuate nell'area compresa tra Santa Giustina e Liviera del Comune di Schio.

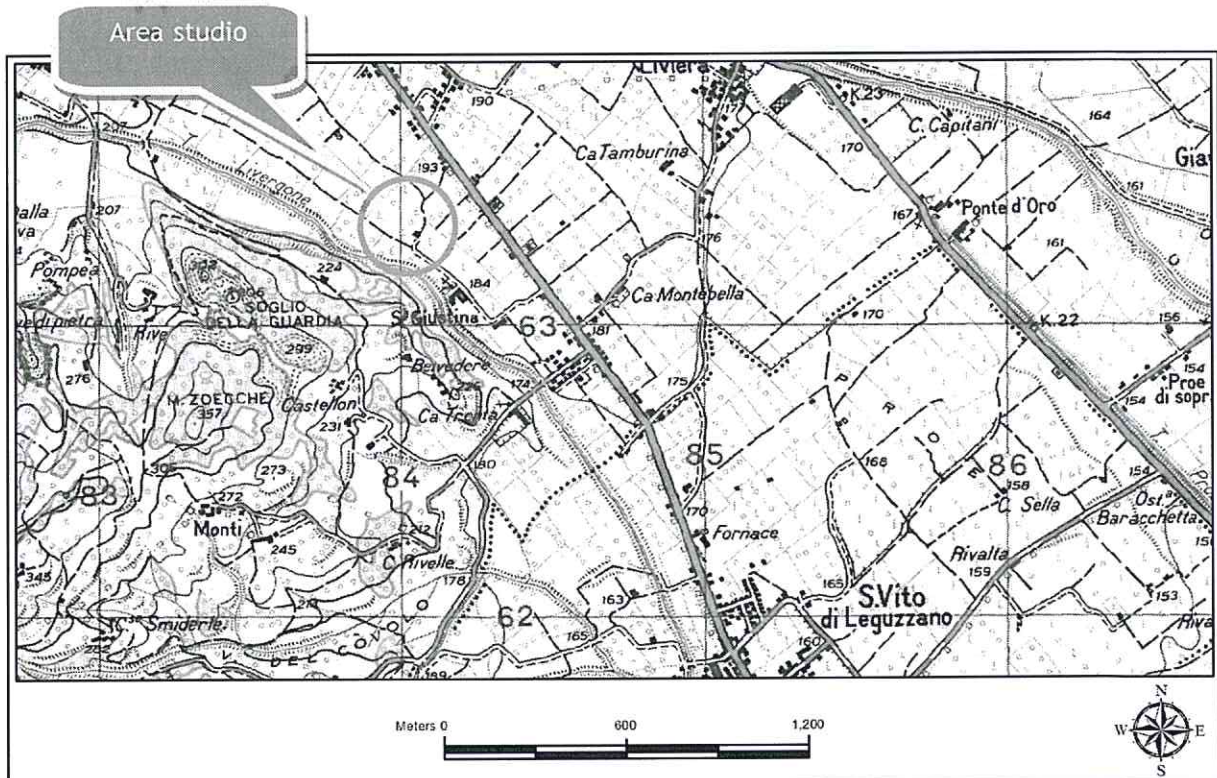


Fig. 1 - Corografia alla scala 1:25.000, estratto da I.G.M.

2. CENNI TEORICI E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., Horizontal to Vertical Spectral Ratio) si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né stendimenti di cavi, né energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza caratteristica di risonanza del sito** che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Ciò al fine di adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericoloso per la stabilità degli stessi;
- la **velocità media delle onde di taglio V_s** calcolata tramite un apposito codice di calcolo, in modo da valutare la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle *Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 gennaio 2008*.
- la **stratigrafia del sottosuolo**.

Il rumore sismico ambientale, 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* poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

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

Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato.

Questo significa che se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore.

Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni.

Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, H.V.S.R. che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta Micromed S.r.L. modello "Tromino ENGY - PLUS".

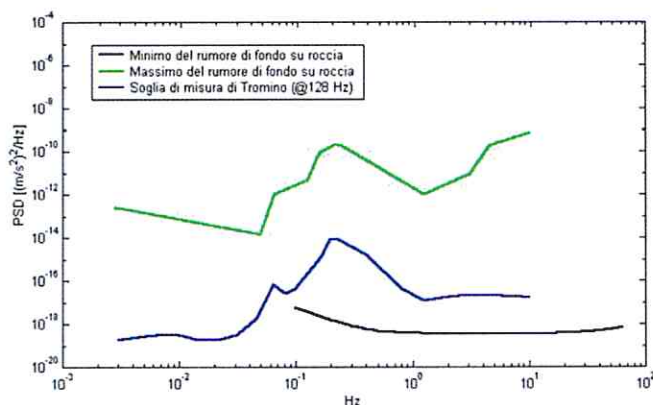
Esso racchiude al suo interno due terne velocimetriche con i sensori ortogonali tra loro e con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. Nella



figura seguente si riporta la curva di rumore di "Tromino" a confronto con i modelli standard di rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra.

Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.

Per la determinazione delle velocità delle onde di taglio si utilizza un codice di



calcolo appositamente creato per interpretare i rapporti spettrali (H.V.S.R.) basati sulla simulazione del campo d'onde di superficie (Rayleigh e Love) in sistemi multistrato a strati piani e paralleli secondo la teoria descritta in AKI (1964) e Ben-Menahem e Singh (1981).

Operativamente si costruisce un modello teorico H.V.S.R. avente tante discontinuità sismiche quante sono le discontinuità evidenziate dalla registrazione eseguita. Successivamente, tramite uno specifico algoritmo, si cercherà di adattare la curva teorica a quella sperimentale; in questo modo si otterranno gli spessori dei sismostrati con la relativa velocità delle onde Vs.

Per eseguire la procedura sopra descritta in maniera univoca è necessario conoscere la profondità di un riflettore acustico individuabile nello spettro sismico registrato.

3. EVOLUZIONE NORMATIVA E CENNI DI INGEGNERIA SISMICA

Le attuali norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. D.M. - 14 gennaio 2008) ereditano gran parte dei contenuti dell'O.P.C.M. n°3274 in merito alla progettazione in zone sismiche; tuttavia rispetto a quest'ultimo documento sono anche stati apportati importanti cambiamenti, di cui forse il più rilevante riguarda la definizione dell'**azione sismica**. Per comprendere pienamente il significato della nuova normativa è necessario rifarsi al concetto di **risposta sismica locale**.

Dal punto di vista strettamente fisico, per effetto di sito (risposta sismica locale) s'intende l'**insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base (R), subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie (S)**.

Nella presente indagine si è sfruttata la teoria di Nakamura che relaziona lo spettro di risposta del substrato roccioso (rapporto spettrale $H / V = 1$) con quello effettivamente misurato in superficie.

Il moto sismico è amplificato in corrispondenza di determinate frequenze che corrispondono alle frequenze naturali f_n di vibrazione del deposito:

$$f_n = 1 / T_n = (V_s \cdot (2n - 1)) / (4 \cdot H) \quad \text{con } n = 1, 2, \dots, \quad [3.1]$$

mentre risulta ridotto di amplificazione alle frequenze elevate a causa dello smorzamento del terreno. Di particolare importanza è la prima frequenza naturale di vibrazione del deposito denominata frequenza fondamentale di risonanza:

$$f_1 = 1 / T_1 = V_s / 4H \quad [3.2]$$

E' quindi necessario porre estrema attenzione a fenomeni di "**doppia risonanza**", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei manufatti ivi edificati in quanto le azioni sismiche su di essi sarebbero, a dir poco, gravose.

Dal punto di vista empirico, è noto che la **frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):**

$$\text{freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani.} \quad [3.3]$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{freq. naturale edificio} \approx \text{freq. fondamentale di risonanza del sito} \quad [3.4]$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché da luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

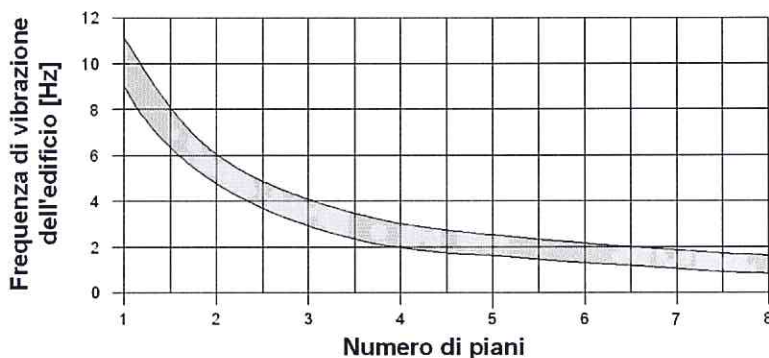


Figura - Frequenza di vibrazione degli edifici rapportata al numero di piani

Per una corretta ricostruzione sismica del sottosuolo e una buona stima delle onde Vs è necessario adottare una modellizzazione numerica che può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$\hat{v}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad [3.5]$$

- Vs = valore di velocità delle onde di taglio [m/s];
- H = profondità alla quale si desidera stimare Vs [m] (30 m in caso di Vs,30);
- hi = spessore dello strato i - esimo [m];
- vi = velocità delle onde Vs all'interno dello strato i - esimo [m/s].

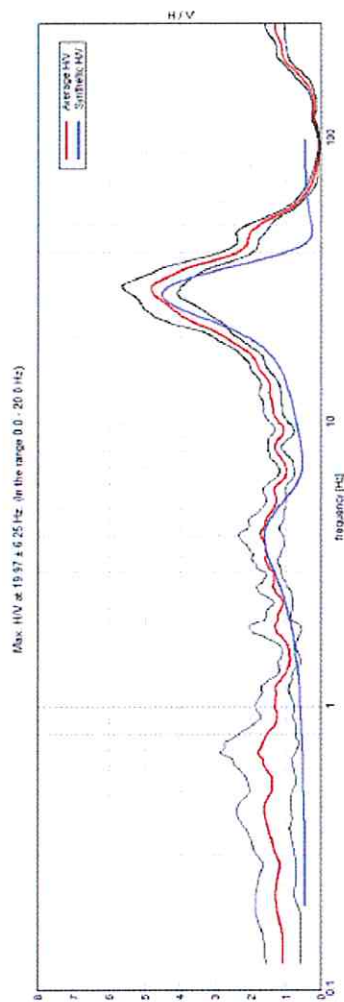
In via puramente indicativa, al fine di correlare le velocità delle onde di taglio ad un tipo di suolo, si riportano i valori tabulati da Borchardt (1992; 1994) assieme a quelli ottenuti sperimentalmente in diversi ambienti sedimentari da altri autori (Budny, 1984; Ibs von Seht e Wohlenberg, 1999; Delgado et al., 2000 a, b; Parolai et al., 2002; Scherbaum et al., 2003; D'Amico et al., 2004, 2006; Hinzen et al., 2004).

TIPO DI SUOLO	Vs min [m/s]	Vs media [m/s]	Vs max [m/s]
ROCCE MOLTO DURE (es. rocce metamorfiche molto - poco fratturate)	1400	1620	-
ROCCE DURE (es. graniti, rocce ignee, conglomerati, arenarie e argilliti, da mediamente a poco fratturate)	700	1050	1400
SUOLI GHIAIOSI e ROCCE DA TENERE A DURE (es. rocce sedimentarie ignee tenere, arenarie, argilliti, ghiaie e suoli con > 20% di ghiaia)	375	540	700
ARGILLE COMPATTE e SUOLI SABBIOSI - GHIAIOSI (es. ghiaie e suoli con < 20% di ghiaia, sabbie da sciolte a molto compatte, limi e argille sabbiose, argille da medie a compatte e argille limose)	200	290	375
TERRENI TENERI (es. terreni di riempimento sotto falda, argille da tenere a molto tenere)	100	150	200

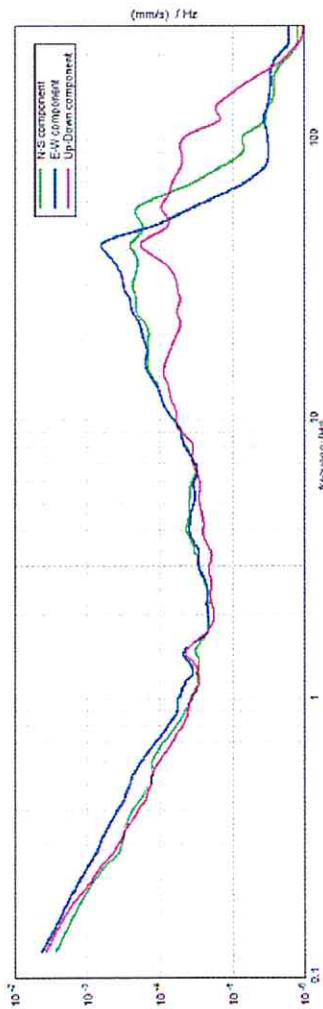
4. INTERPRETAZIONE DELLE MISURE ESEGUITE

Nel caso specifico del sito in esame, si è cercato di correlare i valori di picco dello spettro di risposta H.V.S.R. con le frequenze fondamentali di risonanza di sito. Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si sono potute ricavare le frequenze relative ad ogni discontinuità sismica.

Sapendo che i valori di picco sono proporzionali ai contrasti di rigidità si è estrapolata una stratigrafia sismica del sottosuolo.



Curva H/V acquisita ed elaborata

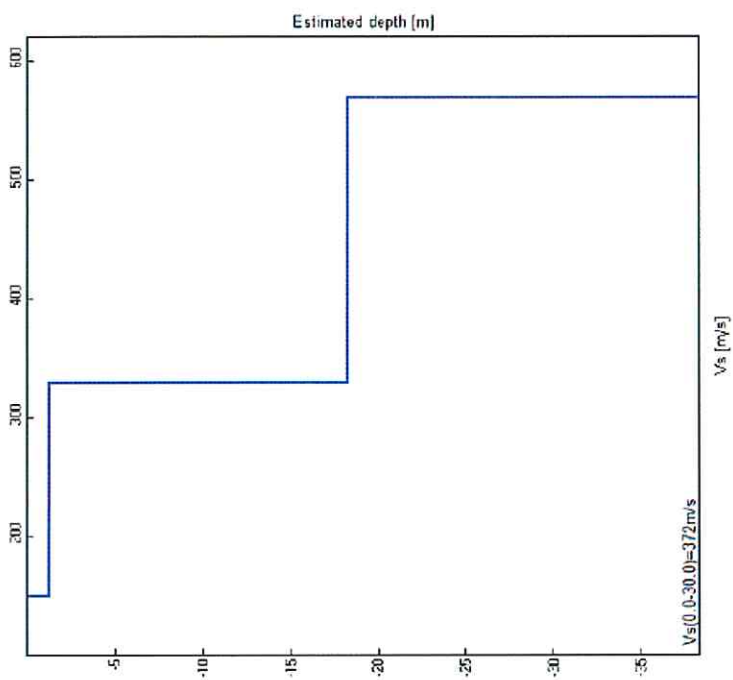


Andamento delle tre componenti del moto sismico

Valori di Vs,30 calcolati

0 m p.c.	1 m p.c.	2 m p.c.	3 m p.c.
372 m/s	396 m/s	409 m/s	416 m/s

Categoria B di Sottosuolo



Profilo verticale onde S (Vs)

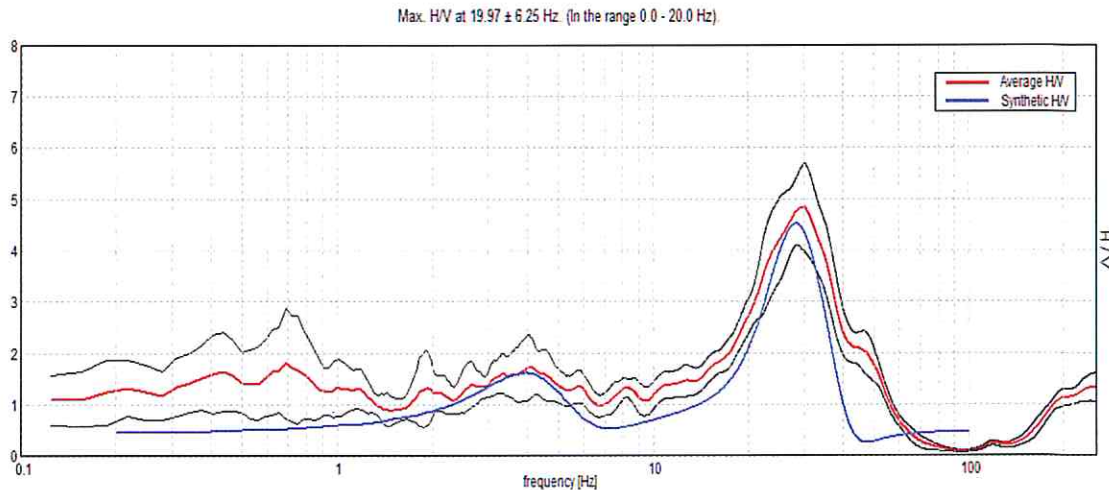
Misura sismica H.V.S.R.

La frequenza fondamentale di risonanza di sito, caratterizzata da un rapporto H/V di circa 5, è risultata di ≈ 20 Hz.

Frequenza fondamentale di risonanza registrata
$19,97 \pm 6.25$ Hz

E' ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscono le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio.

Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi lo stesso periodo di vibrazione del terreno, poiché il rapporto H/V calcolato è tale da ipotizzare un elevato fattore di amplificazione del moto sismico in superficie.



La curva spettrale rossa rappresenta l'andamento sismico registrato in campagna mentre quella blu è la curva sintetica generata dal codice di calcolo

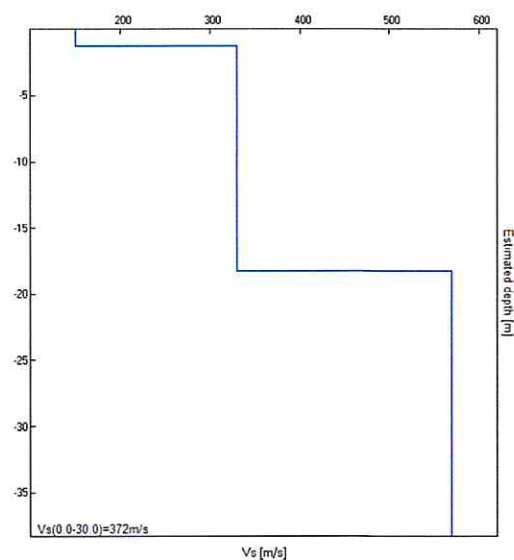
La ricostruzione sismo - stratigrafica di sito può essere schematizzata in un **sismo - strato poco addensato ($V_s \approx 150$ m/s) fino a circa 1,3 m dal p.c. locale e, per valori di profondità maggiori, da un materiale caratterizzato da V_s di circa 330 m/s (vedi *modello sismo - stratigrafico interpretativo* riportato a seguire).**

Un deciso incremento della rigidità del sottosuolo è rilevabile a circa 18 m dal p.c. locale con velocità di propagazione delle onde di taglio stabilizzata di 570 m/s.

Il modello sismo – stratigrafico interpretativo è riportato nell'allegata tabella:

H.V.S.R.	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	150	1,3	0,0 - 1,3
II SISMOSTRATO	330	17	1,3 - ≈ 18
III SISMOSTRATO	570	Semisp.	≈ 18 - Semisp.

Nella tabella a piè pagina s'illustra la qualità del segnale acquisito in base al progetto **SESAME** (*Linee guida 2005*). Per l'affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri mentre per avere un chiaro e pulito segnale del picco massimo devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi. Si osserva quindi che il picco a 19,97 Hz soddisfa tutti i criteri e può pertanto essere assunto come frequenza fondamentale di risonanza del sito.



Picco H/V a 19.97 ± 6.95 Hz (nell'intervallo 0.0 - 20.0 Hz)

Criteria for a reliable HVSR curve			
$f_0 > 10 / L_w$	19.97 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	5191.9 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 960	OK	
Criteria for a clear HVSR peak			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	10.625 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	53.344 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.70 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.31305 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.0966 < 0.22813	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.3134 < 1.58	OK	

5. MODELLO SISMICO LOCALE

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale effettuando specifiche analisi o mediante un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di Categorie di Sottosuolo di riferimento.

Per definire tali categorie, il D.M. 14/01/08 prevede, il calcolo del parametro $V_{s,30}$, ovvero della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio V_s entro 30 m di profondità dal piano di posa delle fondazioni.

Categoria	Descrizione
A	<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	<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 $NSPT_{,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina)
C	<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 $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu_{,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina)
D	<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 $NSPT_{,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina)
E	<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)

La stima, tramite la formula [3.5] del parametro $V_{s,30}$, è stata effettuata, come esplicitamente richiesto dalle N.T.C. del 14 gennaio 2008, per l'assegnazione della categoria di sottosuolo.

Dalle indagini sismiche effettuate e dai modelli sismici ricavati è stato possibile calcolare le velocità di propagazione delle onde di taglio fino a 30 m dal piano di posa delle fondazioni.

A seguire si riportano i valori di $V_{s,30}$ ipotizzando varie profondità delle fondazioni:

Profondità piano di posa fondazioni	$V_{s,30}$
0 m da p.c.	$V_s (0-30) \approx 372$ m/s
1 m da p.c.	$V_s (1-31) \approx 396$ m/s
2 m da p.c.	$V_s (2-32) \approx 409$ m/s
3 m da p.c.	$V_s (3-33) \approx 416$ m/s

I valori di V_{s30} suddetti consentono l'inserimento del sito d'indagine nella **Categoria di Sottosuolo denominata B**, così definita:

Categoria B - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ 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)

Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione utilizzata e di problematiche incontrate durante la fase di acquisizione. Infine, i profili di V_s ricavati con questa metodologia, come tutti i metodi indiretti, non presentano una soluzione univoca e quindi più modelli possono fornire curve sintetiche simili tra loro.

Dalle coordinate geografiche del sito:



45° 41' 53.75" N

11° 21' 37.67" E

si sono inoltre ricavati i seguenti parametri sismici:

	SL	P_{VR}	T_R	a_g	F_o	T_c^*	S	Tb	T_c	T_D	F_v
sl	Operatività	81%	30	0,435	2,46	0,24	1,50	0,13	0,40	1,77	0,69
sl	Danno	63%	50	0,579	2,52	0,25	1,50	0,14	0,41	1,83	0,82
slu	Salv. Vita	10%	475	1,619	2,42	0,28	1,47	0,15	0,45	2,25	1,31
slu	Collasso	5%	975	2,087	2,46	0,29	1,39	0,15	0,46	2,43	1,51

con:

Salv. vita = stato limite di salvaguardia della vita

P_{VR} = probabilità di superamento al variare dello stato limite considerato

T_R = tempo definito in anni

a_g = accelerazione orizzontale massima

F_o = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale

T_c^* = periodo di inizio del tratto di velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

S = amplificazione stratigrafica

Schio, 26/06/2013