

# COMUNE DI FERRARA

OGGETTO: VARIANTE AL PIANO PARTICOLAREGGIATO DI INIZIATIVA PRIVATA  
APPROVATO CON DELIBERAZIONE N° G.C. N.2013/342  
IN DATA 18/06/2013, P. G. 2013/50135

ZONA INTERVENTO: VIA COMACCHIO 711, COCOMARO DI CONA - FERRARA (FE)

COMMITTENTE: CONSORZIO POLYART IMPRESE

PROPRIETA': GAMBALE IMMOBILIARE S.R.L.

PROGETTISTA: STUDIO A4+ - ARCH. ENRICO PUGGIOLI  
Collaboratori: ARCH. GIOVANNI MAGRI  
DOTT. ARCH. MASCIA MIGLIARI  
VIA DARSENA, 67 - 44122 FERRARA (FE)

PROGETTO SPECIALISTICO: EDILGEO - STUDIO TECNICO GEOLOGICO  
DR. GEOL. MILENA MARTINUCCI

ELABORATO:

INDAGINE SISMICA CON LA TECNICA DEI  
MICROTREMORI (SPAC E RAPPORTO SPETTRALI)  
PER LA DETERMINAZIONE DELLA VS30  
E DELLA FREQUENZA DI RISONANZA

ISI

DATA CONSEGNA: 20.07.2017

AGGIORNAMENTO: --

DATA AGGIORNAMENTO: ----

CODICE COMMESSA:

CODICE ELABORATO:

LIVELLO DI PROGETTAZIONE:

VARIANTE N.:



**Indagine sismica con la tecnica dei  
microtremori (SPAC e rapporto spettrali)  
per la determinazione della Vs30 e della  
frequenza di risonanza nell'area del  
cantiere sito in Via Comacchio 711 a  
Ferrara (FE)**

**Novembre 2011**

**Committente: Studio Geologico EDILGEO  
(Ferrara)**

**EDILGEO** geologia sostenibile

Studio Tecnico Geologico dr.geol.Marilena Martinucci  
via Pontegradella 11- 44100 Ferrara tel 335 6815433  
e.mail: edilgeo.fe@email.it marilena.martinucci@email.it

---

## I N D I C E

<b>1.</b>	<b>PREMESSA</b> _____	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>TECNICHE D'INDAGINE</b> _____	<b>1</b>
	<b>2.1. Refraction Microtrtemors (Re.Mi.)</b> _____	<b>1</b>
	<b>2.2. Rapporti spettrali (H/V)</b> _____	<b>3</b>
	<b>2.2.1. Il metodo HVSR (Horizontal vertical spectral ratio)</b> _____	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>ACQUISIZIONE DATI</b> _____	<b>6</b>
	<b>3.1. Dati Microtremori</b> _____	<b>6</b>
<b>4.</b>	<b>ANALISI DATI</b> _____	<b>9</b>
	<b>4.1. Dati Microtremori</b> _____	<b>9</b>
	<b>4.2. Dati rapporti spettrali (H/V)</b> _____	<b>11</b>
<b>5.</b>	<b>RISULTATI</b> _____	<b>11</b>
	<b>5.1. Prova Microtremori</b> _____	<b>11</b>
	<b>5.1. Prove dei rapporti spettrali (H/V)</b> _____	<b>14</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONI</b> _____	<b>17</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> _____	<b>19</b>

## ELENCO DELLE FIGURE E TABELLE

Figura 1. Profilo sismico tipo SPAC con geometria ad L.....	7
Figura 2. Esempio di acquisizione dati lungo il profilo sismico 1. Le linee verticali rappresentano il treno d'onda registrato da ciascun geofono. ...	8
Figura 3. tracce sismiche registrate (rapporti spettrali). ....	9
Figura 3. Curva di dispersione del profilo sismico (cerchi), linea tratteggiata indica la qualità dei dati in termini della coerenza. A destra è riportato lo spettro di potenza (velocità di fase – frequenza).....	10
Figura 5. esempio di un data set di rumore sismico acquisito in campo libero V: componente verticale, NS: componente orizzontale in direzione N-S e EW: componente orizzontale in direzione E-W. Le barre verticali evidenziate in verde sono i tratti di registrazione, selezionati secondo il codice SESAME, per una corretta valutazione del rapporto HVSR. ....	11
Figura 5. Il profilo verticale $G_{max}$ (modulo di rigidità dinamica) dell'area indagata dal profilo sismico, ottenuto dal profilo di velocità ( $V_s$ ) mediante l'equazione $\mu = \rho * V_s^2$ .....	13
Figura 8. Spettri prove dei rapporti spettrali (H/V) effettuate in campo libero nell'area. Le frecce indicano le frequenze di risonanza rilevate (F1, F2, F3 e F4). ....	15
Mentre in Figura (10) si riporta l'analisi direzionale dei rapporti spettrali che conferma l'assenza di direzionalità in relazione alle frequenze di risonanza specifiche per il sito studiato.....	16
Figura 9: relazione tra frequenza di risonanza di edifici in c.a. e n. di piani degli stessi. ....	16
Figura 10. analisi direzione dei rapporti spettrali (H/V).....	17
Tabella 1. Dati tecnici dei profili sismici.....	6
Tabella 2. Modello sismico (Onde S) del sottosuolo investigato. ....	12
Tabella 2: elenco delle frequenze di risonanze ottenute dalle prove HVSR.	16

### **Avvertenze**

*I dati forniti nella presente relazione si riferiscono esclusivamente alla situazione esistente al periodo di indagine.*

*La precisione dei metodi impiegati è limitata dagli errori sistematici delle procedure di indagine.*

*L'autore della presente relazione garantisce la riservatezza dei dati e delle informazioni contenute e si riserva, previa autorizzazione del committente dell'indagine, il diritto esclusivo della loro pubblicazione su riviste scientifiche nazionali ed internazionali.*

## **1. PREMESSA**

Su incarico dello studio Geologico EDILGEO di Ferrara (FE) è stata effettuata, nel periodo 22.10.2011 e 29-10-2011, una campagna d'indagine geofisica nell'area del cantiere sito a Ferrara in località Cocomaro di Cona in Via Comacchio, 711 (Tavola 1). Scopo dell'indagine è stato quello di determinare sia la velocità di propagazione delle onde S, fino alla profondità di 30 metri, sia la frequenza di risonanza dei terreni. A tale fine è stata impiegata la tecnica del rumore ambientale (Spatial Autocorrelation "SPAC") per la determinazione della sequenza sismica delle onde di taglio nel sottosuolo, mentre è stata impiegata la tecnica dei rapporti spettrali H/V per la determinazione della(e) frequenza(e) di risonanza.

## **2. TECNICHE D'INDAGINE**

### **2.1. REFRACTION MICROTRTEMORS (RE.MI.)**

La risposta dinamica dei terreni sottoposti a sollecitazioni può essere ottenuta mediante l'analisi delle onde elastiche che si trasmettono nel sottosuolo. Come è noto, le sollecitazioni dinamiche generano diversi tipi di onde riconducibili a:

- a) onde di volume (P ed S) e
- b) onde superficiali (Rayleigh "R" e Love "L").

Le onde di maggiore interesse nella soluzione di molti problemi geotecnici legati al sistema sottosuolo-fondazione-struttura sono quelle comunemente indicate come onde di taglio di tipo "S", "R" e "L". Tali tipi di onde producono vibrazioni nelle particelle dei materiali costituenti il sottosuolo che al passaggio del treno d'onda risultano polarizzate lungo un piano perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione dell'onda stessa. Ciò comporta la comparsa di sforzi di taglio successivamente trasmissibili alle

strutture in superficie ed, in alcuni casi, ad un conseguente danno alle stesse.

Il D.M. del 14 gennaio 2008 dal titolo “Norme tecniche per le costruzioni”, impone di classificare i terreni, su cui saranno eseguite opere edili di una certa rilevanza, sulla base del parametro  $V_{s30}$ . La classificazione dei terreni riporta cinque categorie, definite con simbologia alfanumerica da A ad E e successive integrazioni S1 e S2, a cui corrisponde una valutazione quantitativa della risposta sismica dei terreni sottoposti ad una accelerazione sismica attesa, predefinita per ciascuna classe. Il parametro  $V_{s30}$  rappresenta la media ponderata dei valori delle velocità dell’onda di taglio “S” nei primi 30 m di sottosuolo indagato, matematicamente espressa da (eq. 1);

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad eq.1$$

dove,

$V_{s30}$  : velocità media ponderata delle onde di taglio “S”,

$h_i$  : spessore dello strato  $i$ esimo,

$v_i$  : velocità delle onde di taglio “S” nello strato  $i$ esimo.

Le tecniche geofisiche comunemente utilizzate per la determinazione di tale parametro sono essenzialmente di tre tipi:

- 1) prove in foro singolo (Down-Hole) o doppio (Cross-Hole),
- 2) sismica di superficie (rifrazione e riflessione) con energizzazione di onde polarizzate (SH),
- 3) tecniche mediante onde superficiali “R” e “L” (SASW, MASW e Microtremori).

Le prime richiedono l’esecuzione di un sondaggio per permettere la determinazione del parametro. Le seconde, più costose, forniscono risultati

di elevata qualità ma sono facilmente influenzate da rumori antropici che ne degradano le caratteristiche. Le ultime sono realizzate, ad eccezione della tecnica SASW, con procedure operative simili a quelle impiegate nella sismica a rifrazione.

La prova geofisica adottata per questa indagine appartiene alla terza categoria ed è consistita nell'applicazione della tecnica dei microtremori (Refraction Microtremors "ReMi") che permette di ottenere con minor costo di processo il profilo verticale della velocità media delle onde di taglio "S" e contemporaneamente di raggiungere profondità superiori a 30 m favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock - così come definito dalla normativa ( $V_s > 800$  m/s) - coadiuvando contemporaneamente l'interpretazione delle eventuali variazioni di rigidità sismica ( $V_s^2 \times \rho$ ) dei terreni investigati.

Attraverso l'analisi delle onde superficiali "R" che costituiscono un particolare tipo di onde superficiali trasmesse sulla superficie libera di un mezzo si ricava indirettamente la velocità delle onde di taglio "S" secondo l'equazione

$$V_R = \left( \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \right) \times V_S \quad eq.2$$

$$V_R \cong 0.92 V_S$$

dove,

$V_R$ : velocità di fase dell'onda Rayleigh

$V_S$ : velocità di propagazione dell'onda di taglio

$\nu$  : rapporto di Poisson

## 2.2. RAPPORTI SPETTRALI (H/V)

La risposta dinamica dei terreni sottoposti a sollecitazioni può essere ottenuta mediante l'analisi delle onde elastiche che si trasmettono nel sottosuolo. Come è noto, le sollecitazioni dinamiche generano diversi tipi di onde riconducibili a:

c) onde di volume (P ed S) e

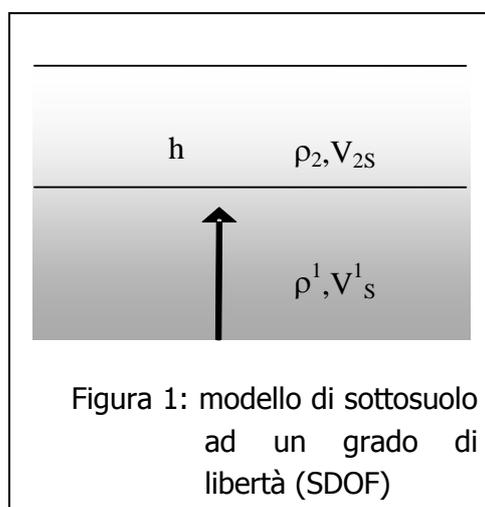
d) onde superficiali (Rayleigh “R” e Love “L”).

Le onde di maggiore interesse nella soluzione di molti problemi geotecnici legati al sistema sottosuolo-fondazione-struttura sono quelle comunemente indicate come onde di taglio di tipo “S”, “R” e “L”. Tali tipi di onde producono vibrazioni nelle particelle dei materiali costituenti il sottosuolo che al passaggio del treno d’onda risultano polarizzate lungo un piano perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione dell’onda stessa. Ciò comporta la comparsa di sforzi di taglio successivamente trasmissibili alle strutture in superficie ed, in alcuni casi, ad un conseguente danno alle stesse.

Siccome la frequenza di risonanza propria dei terreni dipende dalla sequenza dei contrasti di impedenza acustica presenti nel sottosuolo è possibile utilizzare la tecnica dei rapporti spettrali per risalire a tale parametro. Il lavoro fondamentale su questa specifica procedura fu pubblicato da Nakamura nel 1989; per questo motivo è chiamato anche “metodo di Nakamura” (Nakamura, 1989).

### 2.2.1. Il metodo HVSR (Horizontal vertical spectral ratio)

È ben noto che quando un’onda elastica che si propaga nel sottosuolo passando da un mezzo con impedenza acustica  $Z_1 = \rho_1 v_1$  (dove  $\rho$  è la densità e  $v$  la velocità di un’onda di volume -P o S-) ad un mezzo con impedenza acustica  $Z_2 = \rho_2 v_2$ , se  $Z_2 < Z_1$  l’ampiezza dell’onda trasmessa nel secondo mezzo aumenta. Questo fenomeno dipende soltanto dall’angolo d’incidenza e non dalla frequenza per le onde P, cioè tutte le singole componenti sinusoidali dell’onda vengono amplificate nella stessa misura. Per le onde S si dimostra



invece che ha luogo un fenomeno di risonanza. Dato un sottosuolo formato da una copertura omogenea elastica di spessore  $h$ , poggiante su un substrato rigido (nella pratica un substrato è considerato rigido quando la sua  $V_{1S}$  supera 800 m/s), come in Figura 1, tali frequenze di risonanza sono date da (v. p. es. Lanzo e Silvestri, 1999):

$$f_n = \frac{V_{2S}(2n-1)}{4h}, n = 1, 2, \dots, \infty.$$

Ad esempio, per una copertura elastica spessa 50 m con  $V_{2S}$  di 200 m/s (velocità tipica di un sedimento sciolto),  $f_1=1$  Hz,  $f_2= 3$  Hz e così via. Si tratta di campi di frequenze coincidenti con quelli delle costruzioni. L'ampiezza di oscillazione alle frequenze di risonanza tende all'infinito per un mezzo puramente elastico. È da notare che ciò non avviene mai nella pratica in quanto tutti i mezzi materiali hanno un comportamento visco-elastico. Ciò comporta uno smorzamento progressivo dell'ampiezza trasmessa  $A(f_n)$  alla frequenza di risonanza, al crescere di questa, secondo la relazione:

$$A(f) = \frac{2}{(2n-1)} \cdot \frac{\mu}{\pi^2 \eta f},$$

dove  $\mu$  è il modulo di rigidità e  $\eta$  il coefficiente di viscosità.

Poiché sia le onde di Love che la componente orizzontale delle onde di Rayleigh si formano per interferenza costruttiva delle onde S, quanto detto vale con ottima approssimazione anche per tali onde, purchè il sottosuolo sia tabulare, cioè a strati piano/paralleli. Questo è un fatto particolarmente fortunato perché significa che basta registrare il rumore sismico ambientale, dove è ampiamente prevalente l'energia associata alle onde superficiali, per avere un'informazione precisa (nei limiti summenzionati) delle frequenze di risonanza. Questa infatti si ottiene con 3 semplici passaggi:

1. registrando in un punto per un certo tempo le 3 componenti del moto delle particelle del terreno (la verticale  $V(t)$  e due orizzontali ortogonali tra loro:  $NS(t)$ ,  $EW(t)$ ) con un sismometro a frequenza propria inferiore al campo di frequenze di interesse;

2. calcolandone i rispettivi spettri di Fourier  $V(f)$ ,  $NS(f)$  e  $EW(f)$ <sup>1</sup>

$$\frac{\sqrt{|NS(f)|^2 + |EW(f)|^2}}{|V(f)|}$$

3. facendo il rapporto detto per l'appunto HVSR, acronimo di Horizontal over Vertical Signal Ratio.

Si richiama l'attenzione del lettore su 2 fatti:

1. che non è possibile, conoscendo soltanto la frequenza di risonanza, determinare contemporaneamente la  $V_S$  dello strato elastico e la profondità  $h$  del substrato rigido: questi due parametri del sottosuolo compaiono in un prodotto, e quindi la loro determinazione è impossibile senza informazioni di altra origine;
2. trattandosi di un metodo statistico, l'ampiezza alla frequenza di risonanza può essere affetta da un ampio margine di incertezza. L'ampiezza effettiva può essere stimata solo utilizzando un segnale deterministico, come quello di un terremoto.

### 3. ACQUISIZIONE DATI

#### 3.1. DATI MICROTREMORI

L'area oggetto di indagine è stata investigata in data 22 ottobre 2011 mediante l'esecuzione di n.1 profilo sismico "SPAC" (**Tavola 1**) della lunghezza complessiva di 69 metri (Tabella 1/Fig. 1).

Tabella 1. Dati tecnici dei profili sismici.

Sigla	Lunghezza (m)	Passo intergeofonico (m)	Orientazione
Profilo 1	69.0*	3.0	N24E-N116E 44°48'40" 11°41'12"
Geometria del profilo sismico non lineare (a forma di L)			

<sup>1</sup> È d'uso indicare con la stessa lettera maiuscola la trasformata di Fourier di una funzione, indicata con la lettera minuscola.

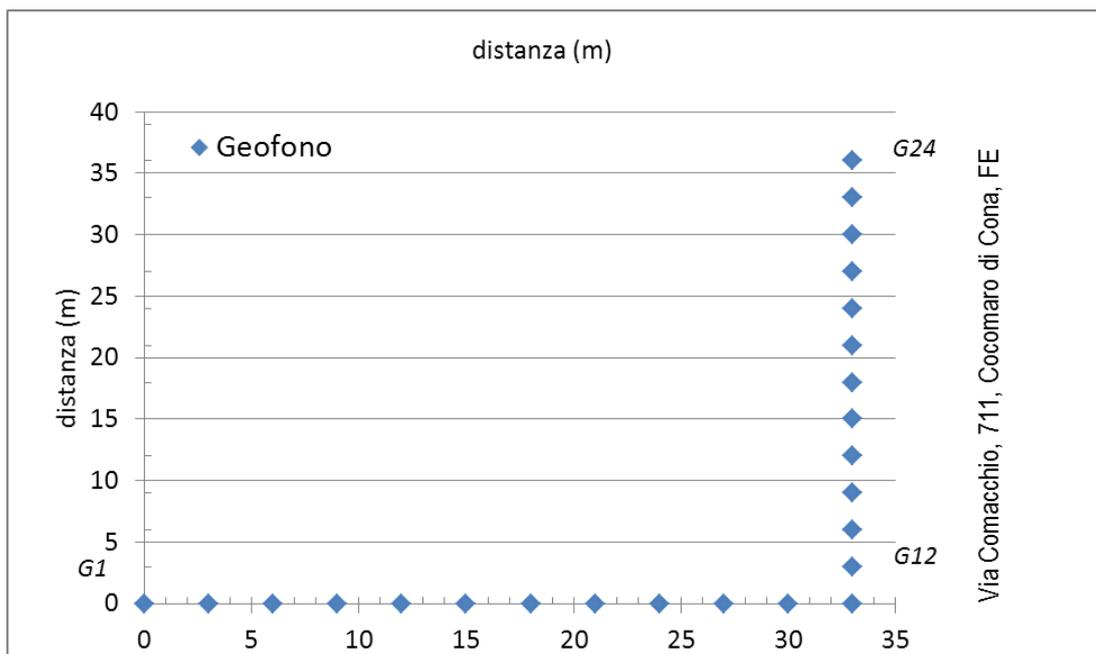


Figura 1. Profilo sismico tipo SPAC con geometria ad L.

Per l'acquisizione dei dati è stato impiegato un sismografo digitale RAS 24 – Seistronix (ABEM) con 24 geofoni verticali equidistanziati 3.0 m. La lunghezza temporale di ogni registrazione è stata pari a 32 secondi con passo di campionamento di 2 ms (in figura 2 è riportato un esempio di acquisizione, composto da 24 tracce sismiche).

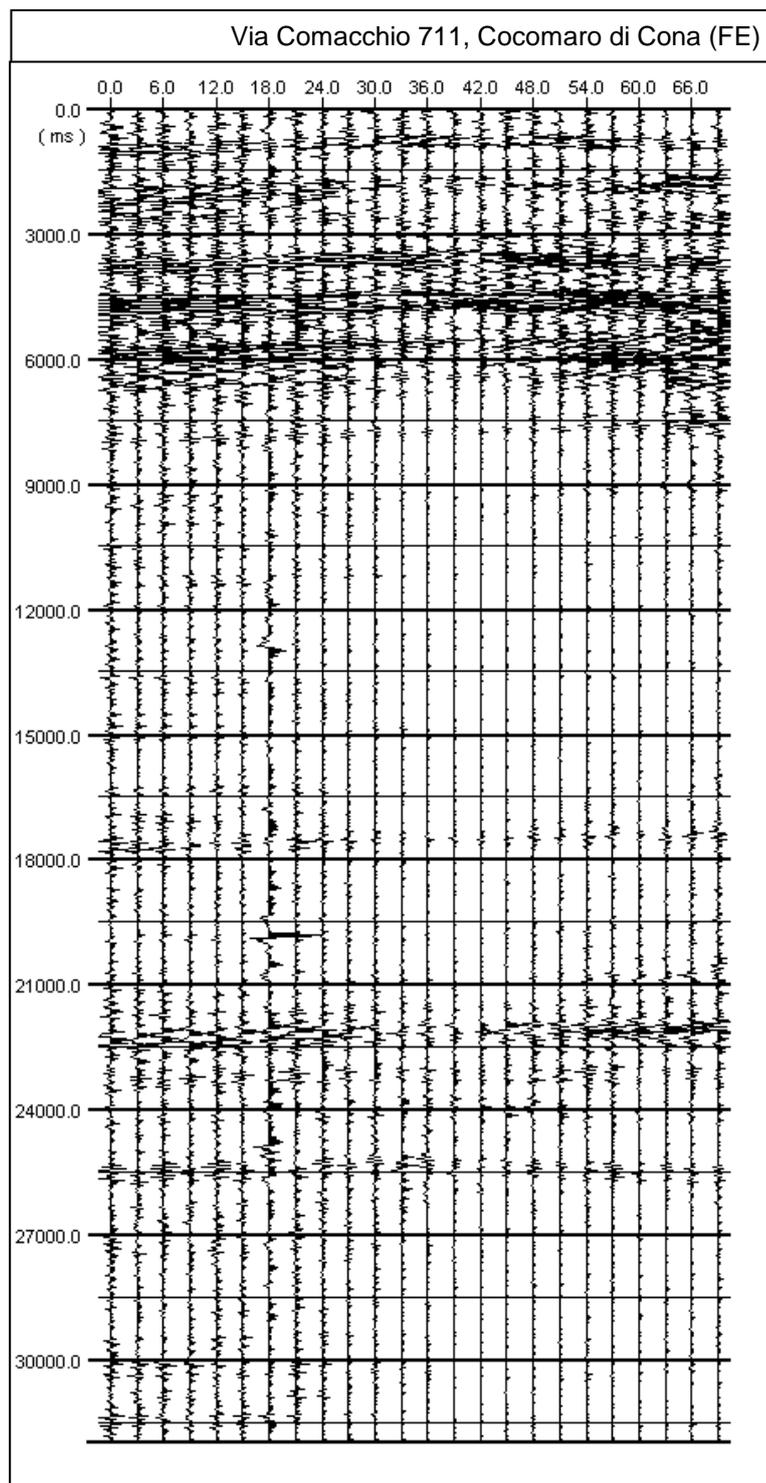


Figura 2. Esempio di acquisizione dati lungo il profilo sismico 1. Le linee verticali rappresentano il treno d'onda registrato da ciascun geofono.

L'area oggetto di indagine è stata investigata in data 29 ottobre 2011 mediante l'esecuzione di n.1 prova H/V effettuata nell'area (Fig. 3/TAV-1). Per l'acquisizione dati è stato impiegato una data logger a 16 bit collegato ad un sismometro 3D tipo Mark Products. La lunghezza temporale di ogni registrazione è stata pari a 40 minuti con passo di campionamento di 125 Hz (in figura 5 un esempio di acquisizione).

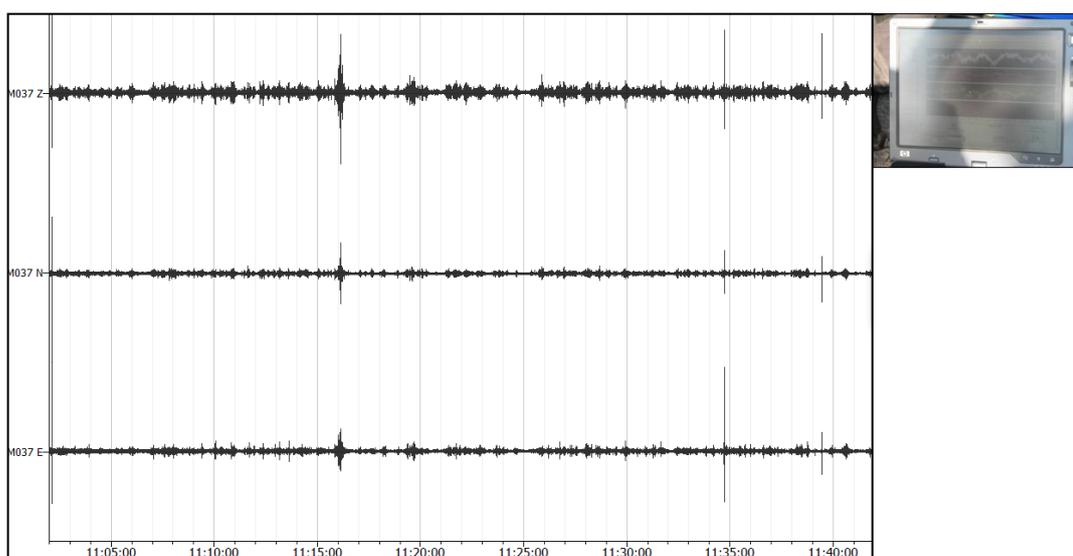


Figura 3. tracce sismiche registrate (rapporti spettrali).

## 4. ANALISI DATI

### 4.1. DATI MICROTREMORI

L'analisi delle tracce sismiche registrate è basata sull'impiego della tecnica di analisi denominata "autocorrelazione spaziale (SPAC)". Tale tecnica considera il rumore sismico di essere generato da una distribuzione uniforme di sorgenti (cioè non esistono sorgenti dominanti).

La procedura di analisi è basata sulla teoria elaborata da Aki (1959) secondo il quale la funzione di correlazione media fra le registrazioni di un rumore isotropo effettuate su sensori verticali distribuiti nelle diverse direzioni a parità distanza  $r$  da un sensore di riferimento, ha una forma simile a quella della funzione di Bessel di ordine 0. Egli deduce che tale forma (equazione 2)

è funzione del valore della velocità di fase ( $V_R$ ) per ogni coppia di frequenza e distanza:

$$\rho(r, \omega_0) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega_0)}\right) \quad eq.3$$

dove,

$$\rho(r, \omega_0)$$

coefficiente di autocorrelazione

$J_0$ : funzione di Bessel di tipo I ed ordine zero

$C(\omega_0)$ : velocità di fase delle onde Rayleigh in funzione della frequenza

Il risultato di tale analisi rappresenta il cosiddetto spettro di potenza da cui si ottiene la curva di dispersione sperimentale delle onde “R” (figura 3) e successivamente, attraverso una procedura di modellazione numerica, la determinazione delle velocità delle onde di taglio “S” (figure 4 e 5).

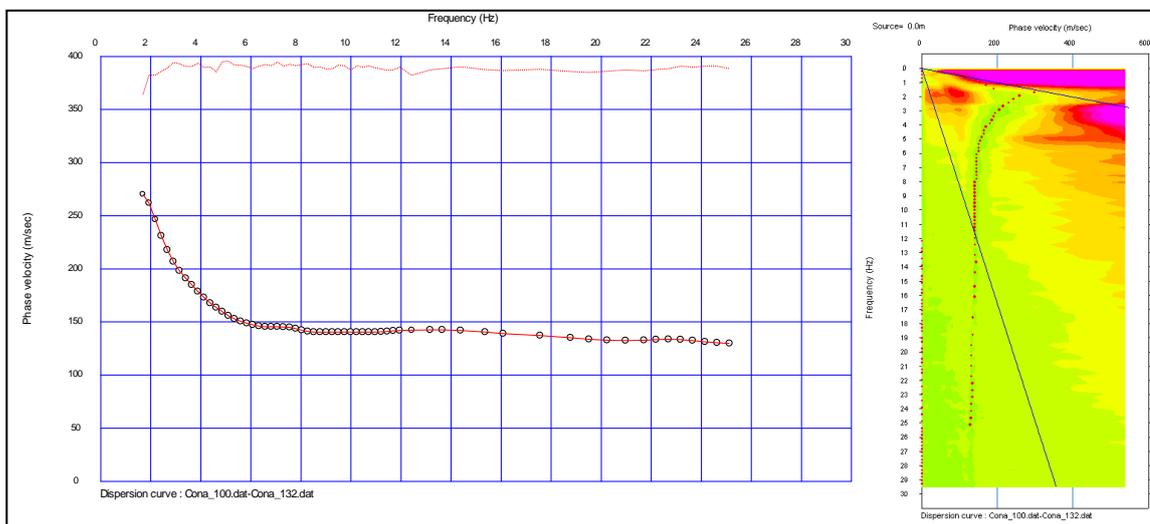


Figura 3. Curva di dispersione del profilo sismico (cerchi), linea tratteggiata indica la qualità dei dati in termini della coerenza. A destra è riportato lo spettro di potenza (velocità di fase – frequenza).

## 4.2. DATI RAPPORTI SPETTRALI (H/V)

L'analisi delle serie temporali è proceduta seguendo i punti 2 e 3 del paragrafo 2.2.1. Le figure 2a,b illustrano due esempi di serie temporali registrate in campo libero per un lunghezza minima di 30 minuti (A, B/TAV1)

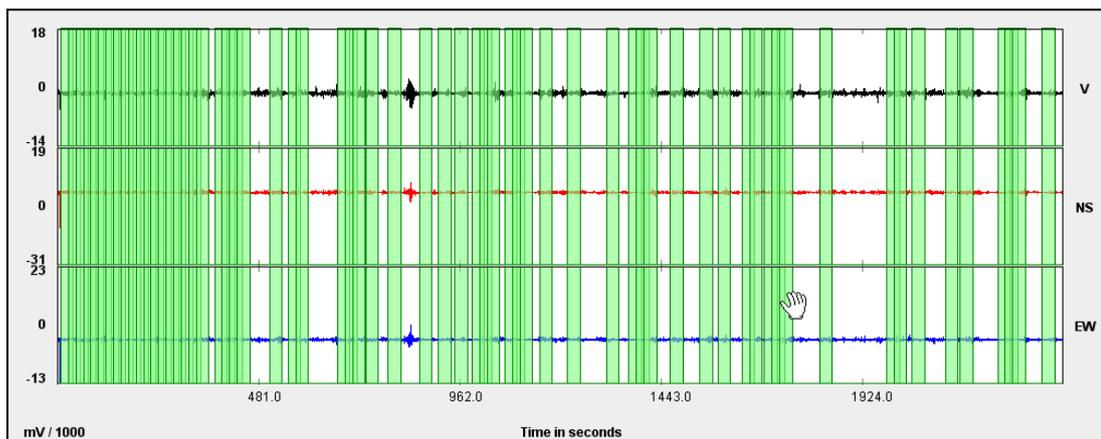


Figura 5. esempio di un data set di rumore sismico acquisito in campo libero V: componente verticale, NS: componente orizzontale in direzione N-S e EW: componente orizzontale in direzione E-W. Le barre verticali evidenziate in verde sono i tratti di registrazione, selezionati secondo il codice SESAME, per una corretta valutazione del rapporto HVSR.

## 5. RISULTATI

### 5.1. PROVA MICROTREMORI

Il modello sismico  $V_S$  ottenuto dall'interpretazione quantitativa della curva di dispersione (figura 3) e riportata in figura 4 indica la presenza di quindici sismo-strati caratterizzati da valori di " $V_S$ " compresi tra 125 m/s e 245 m/s (Tabella 2). Generalmente, il sottosuolo è caratterizzato da valori di  $V_S$  inferiori a 200 m/s per profondità inferiori di 23 m e valori di  $V_S$  intorno a 245 m/s alla massima profondità raggiunta.

Tabella 2. Modello sismico (Onde S) del sottosuolo investigato.

<b>Sismo-strato</b>	<b>PROFILO Vs</b>		
	Velocità (m/s)	Profondità (m)	Spessore (m)
<b>1</b>	125.6	1.5	0.0
<b>2</b>	132.2	2.3	0.8
<b>3</b>	146.8	3.7	1.4
<b>4</b>	152.7	5.2	1.5
<b>5</b>	151.6	6.9	1.7
<b>6</b>	148.0	8.7	1.8
<b>7</b>	149.7	10.7	2.0
<b>8</b>	160.5	12.8	2.1
<b>9</b>	172.6	15.1	2.3
<b>10</b>	184.2	17.5	2.4
<b>11</b>	194.2	20.1	2.6
<b>12</b>	200.1	22.9	2.7
<b>13</b>	207.6	25.8	2.9
<b>14</b>	219.2	28.8	3.0
<b>15</b>	245.3	38.4	9.6

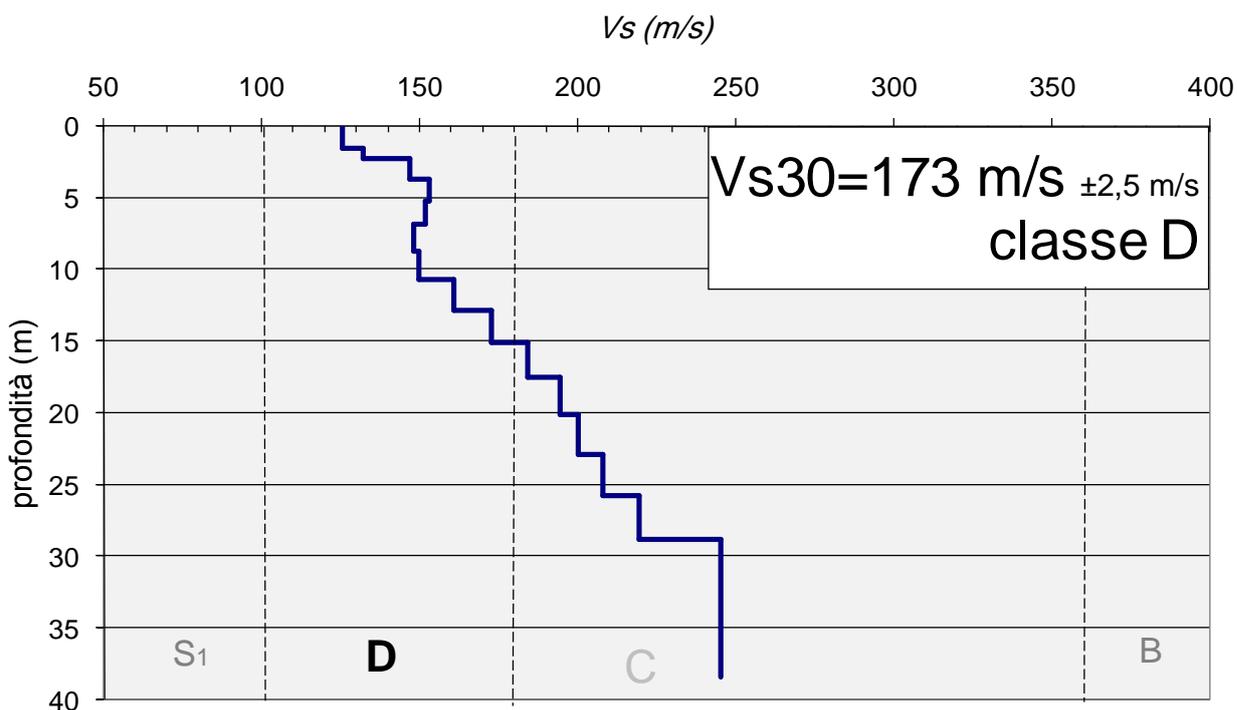


Figura 4. Il profilo verticale VS ottenuto per l'area indagata dal profilo sismico. In base al modello sismico è stata determinata la VS30 che risulta pari a 173 m/s.

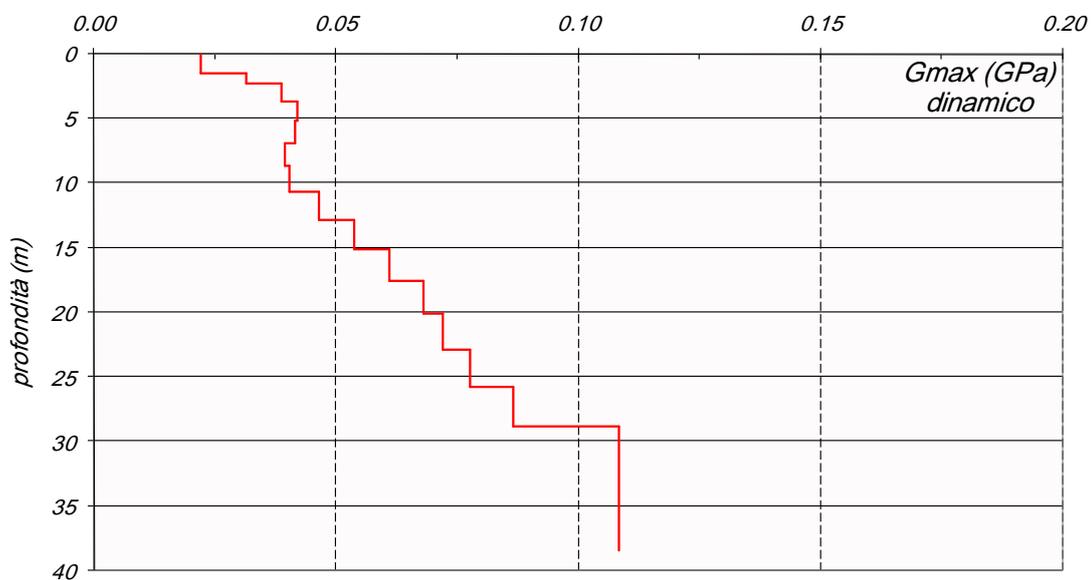


Figura 5. Il profilo verticale  $G_{max}$  (modulo di rigidità dinamico) dell'area indagata dal profilo sismico, ottenuto dal profilo di velocità ( $V_s$ ) mediante l'equazione  $\mu = \rho \cdot V_s^2$ .

I valori  $V_{S30}$  determinati per il sito, secondo l'eq.1, risultano pari a **173 m/s ± 2,5 m/s** collocando il sottosuolo in **CLASSE D** (D.M. 14 gennaio 2008).

### 5.1. PROVE DEI RAPPORTI SPETTRALI (H/V)

I risultati ottenuti, utilizzando la catena software J-SESAME-Matlab, in termini di curve dei rapporti spettrali H/V ottenute sono riportati in figure 8a,b,c. La figura (8a) si riporta la curva media, mentre le altre due figure (8b,c) riportano, rispettivamente, le curve dei rapporti spettrali della componente  $H_{EW/V}$  e quella della componente  $H_{NS/V}$ . I picchi riscontrati sono evidenziati con un freccia sugli grafici di figure (8a,b,c) e numericamente sono riportati in Tabella 2. I picchi sono l'espressione della presenza, nel sottosuolo, di superficie di discontinuità caratterizzati da proprietà fisiche differenti (cioè  $V_s$  e densità diversi). Frequenze < al 1 Hz indicano presenza di discontinuità a profondità maggiori di 100/150 metri, mentre quelle intorno all'1 Hz indicano la presenza di discontinuità a profondità inferiori. L'analisi dei risultati permette quanto segue:

1. le frequenze di risonanze ottenute per l'area, in campo libero, risultano comprese tra 0,4999 Hz e 1,6 Hz [*periodo 0,625 e 2,0 secondi*] e divise in quattro categorie (F<sub>1</sub>-F<sub>4</sub>),
2. le frequenze a maggiore ampiezza sono denominate (F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub>/Tabella 2) e risultano comprese tra 1,133/1,166 e 0,9664 Hz corrispondenti ai periodi compresi tra (0,8576/0,8826 e 1,0348 secondi),
3. le frequenze a minore ampiezza sono denominate (F<sub>3</sub>-F<sub>4</sub>/Tabella 2) e risultano essere pari a 0,7331/0,7665 e 1,566/1,6 Hz corrispondenti, rispettivamente, ai periodi pari a compresi tra 1,3641/1,3046 e 0,625/0,6386 secondi.

Si ritiene utile ricordare il lettore dell'importanza della determinazione della frequenza di risonanza dei terreni di fondazione per la pianificazione urbanistica/progettazione. A questo proposito si riporta in Figura (9) la relazione semplificata tra il numero dei piani e la frequenza di risonanza degli

stessi. Se la frequenza di risonanza dei terreni di fondazione coincide con quella dei fabbricati avviene il fenomeno della risonanza degli stessi fabbricati che può portare al loro collasso se non propriamente progettate.

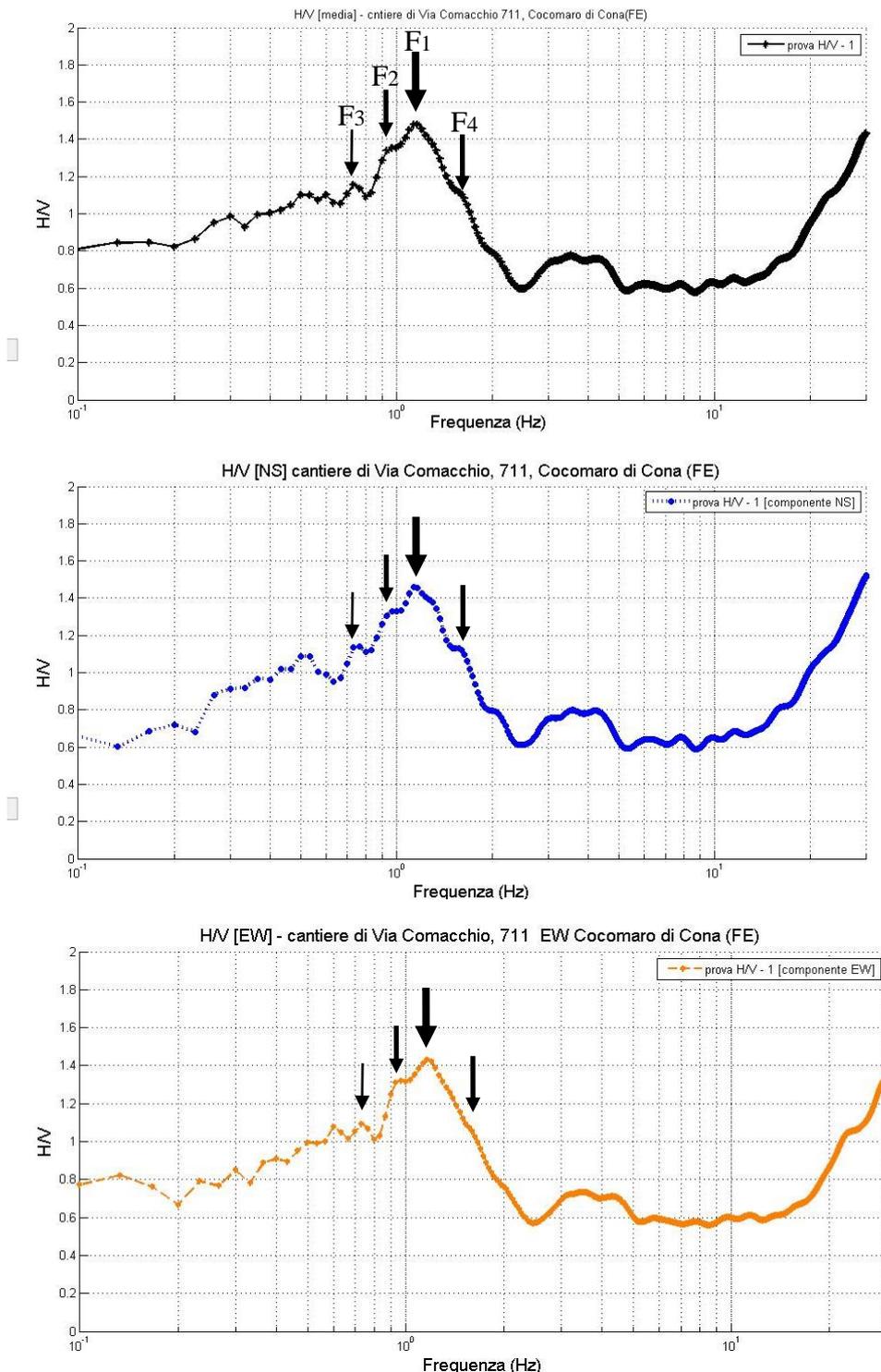


Figura 8. Spettri prove dei rapporti spettrali (H/V) effettuate in campo libero nell'area. Le frecce indicano le frequenze di risonanza rilevate (F1, F2, F3 e F4).

Mentre in Figura (10) si riporta l'analisi direzionale dei rapporti spettrali che conferma l'assenza di direzionalità in relazione alle frequenze di risonanza specifiche per il sito studiato.

Tabella 2: elenco delle frequenze di risonanze ottenute dalle prove HVSR.

prova H/V	Frequenza F <sub>1</sub> (Hz)	Periodo T <sub>1</sub> (sec)	Frequenza F <sub>2</sub> (Hz)	Periodo T <sub>2</sub> (sec)	Frequenza F <sub>3</sub> (Hz)	periodo T <sub>3</sub> (sec)	Frequenza F <sub>4</sub> (Hz)	periodo T <sub>4</sub> (sec)
H/V <sub>m</sub>	1,133/ 1,166	0,883/ 0,857	0,966	1,035	0,733	1,364	1,566/ 1,6	0,625/ 0,638
H/V <sub>EW</sub>	1,166	0,857	0,966	1,035	0,733	1,364	-	
H/V <sub>NS</sub>	1,133	0,883	0,966	1,035	0,766	1,305	1,566/ 1,6	0,625/ 0,638

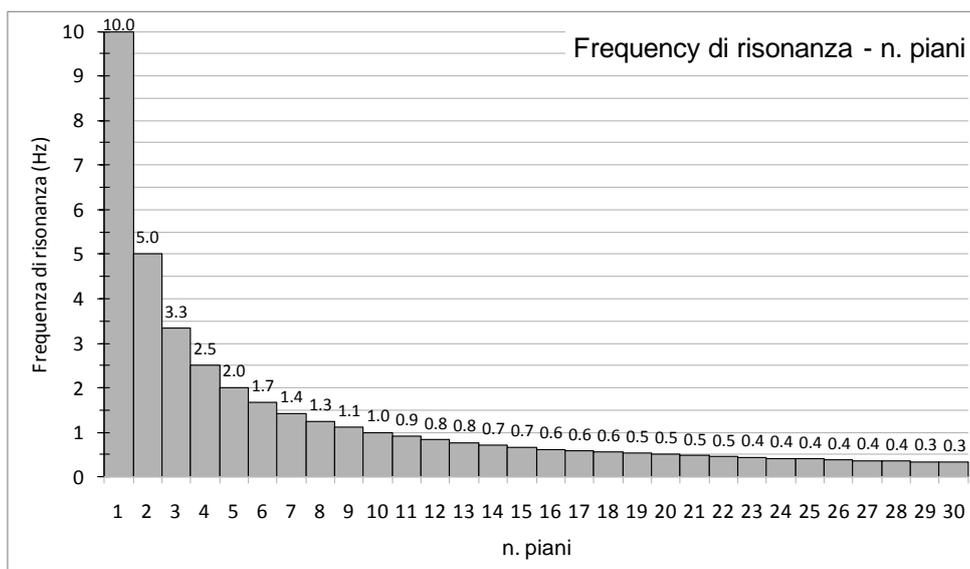


Figura 9: relazione tra frequenza di risonanza di edifici in c.a. e n. di piani degli stessi.

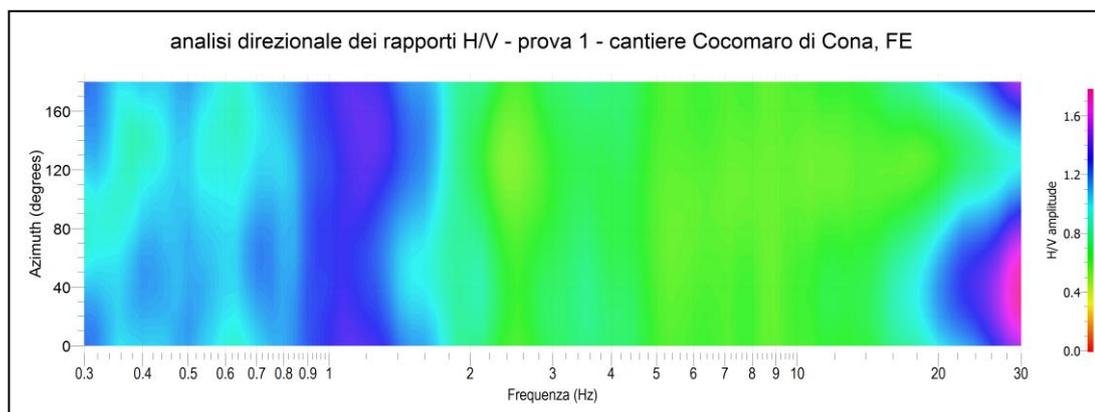


Figura 10. analisi direzione dei rapporti spettrali (H/V).

## 6. CONCLUSIONI

Le indagini geofisiche effettuate nel periodo 21 e 29 ottobre 2011 con le tecniche dei microtremori: “SPAC” e rapporti spettrali (H/V), ha consentito di ricostruire il quadro sismico del sottosuolo dell’area indagata fino alla massima profondità d’indagine raggiunta (circa 38 m) e di determinare la frequenza di risonanza dei terreni.

L’analisi del modello sismico evidenzia la presenza di quindici sismo-strati (figura 6) contraddistinti da valori di velocità di propagazione delle onde di taglio inferiori a 200 m/s per profondità inferiori a 23 m e di valori di  $V_s$  poco superiori a 200 fino alla massima profondità raggiunta.

Dal modello sismico ottenuto è stata ricavata la velocità  $V_{S30}$  risultata pari a **173 m/s  $\pm$ 2,5 m/s** che colloca il sottosuolo in **classe D** dei terreni di fondazione (“Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s,30}$  inferiori a 180 m/s (ovvero  $NSPT_{,30} < 15$  nei terreni a grana grossa e  $c_{u,30} < 70$  kPa nei terreni a grana fina”). Inoltre, si riporta in Figura 4 la variazione del modulo di rigidità dinamico ( $G_{max}$  o  $G_0$ ) ricavato dal corrispondente profilo sismico di taglio (valori di densità utilizzate sono di 1.800,0 kg/m<sup>3</sup> per tutti i sismo strati ad accessione del primo ove il valore è pari a 1.400,0 kg/m<sup>3</sup>).

L'analisi dei rapporti spettrali del rumore sismico (H/V) "Nakamura" ha consentito di determinare la frequenza di risonanza del sito che risulta essere compresa tra 0,966 e 1,166 Hz,  $F_1$  e  $F_2$ , corrispondenti a periodi di risonanza compresi tra [0,883 e 1,035 secondi]. Una seconda frequenza di risonanza ( $F_4$ ) risulta essere presente intorno a 1,566/1,6 Hz [0,625/0,638 secondi].

I valori relativi al periodo di risonanza ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_4$ ) risultano compatibili con strutture in c.a. avente periodi di risonanza intorno o superiore a 0,6 secondi cioè edifici a più di sei piani.

Tecnico:

Dr. Nasser ABU ZEID

## 7. BIBLIOGRAFIA

Matlab, 2007b: Codice di calcolo numerico, Mathworks, USA.

Nakamura Y., 1989: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR Railway Technical Research Institute, 30, 25-33.

McMechan, G. A. e Yedlin, M. J., 1981. *In situ shear wave velocities from spectral analysis of dispersive waves by wave field transformation*. Geophysics, v. 46:869-874.

Lanzo G., Silvestri F., 1999: Risposta sismica locale. Hevelius edizioni, Benevento, pp. 159.

SeisOpt® ReMi, 2006. ReMiv4.0 user's manual. Optim, Inc., N. Virginia, USA, 85 p.