

## 8.2. Sorgenti sismogenetiche

L'Istituto Nazionale di Geofisica e di Vulcanologia ha diffuso, nell'ambito del Progetto DISS3, le informazioni riguardanti la distribuzione spaziale e le caratteristiche sismico-tettoniche delle Sorgenti Sismogenetiche presenti sul territorio nazionale.

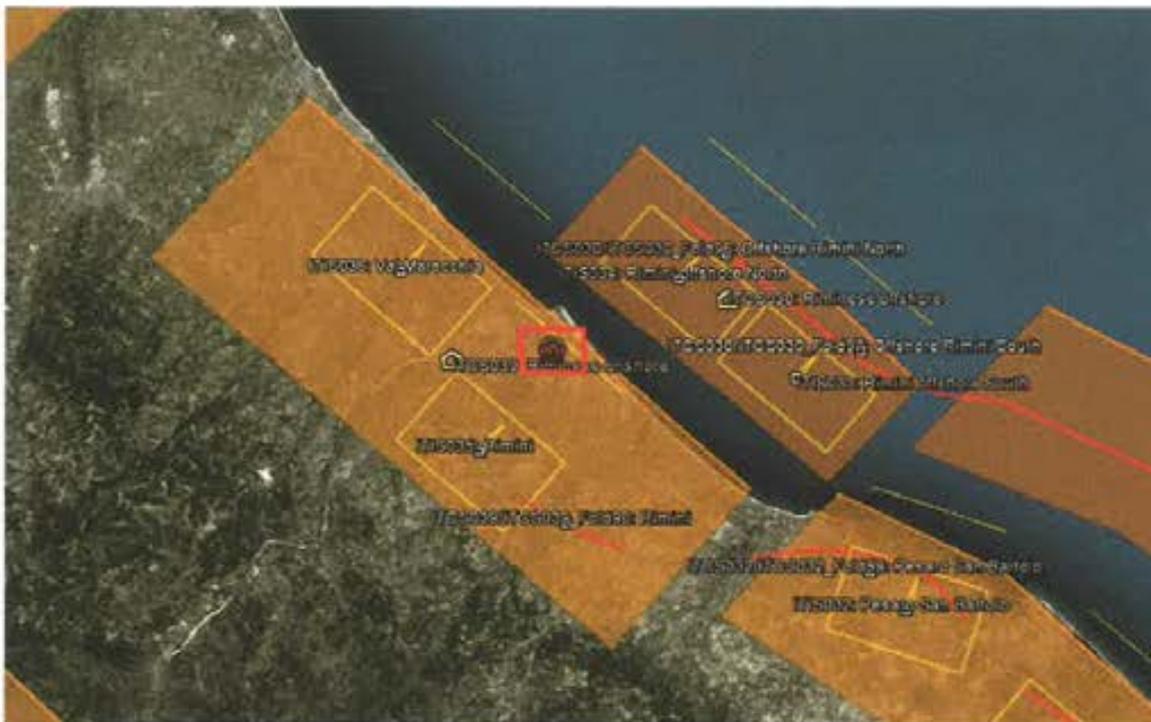


Figura 3.1 - Distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute in DISS 3.1. Le sigle numeriche corrispondono alle "zone" sismogenetiche desunte dalla ZS9; le sigle ITCS corrispondono a "Sorgenti Composite" mentre le sigle ITIS corrispondono a "sorgenti individuali" sismogenetiche della B/D DISS versione 3.1.

Più nel dettaglio la banca dati DISS 3.1 indica che il territorio di Rimini si colloca a Sud-Ovest di due aree sismogenetiche: la ITCS039 – "Riminese onshore" e la ITCS030 – "Riminese onshore" indicate sulla figura precedente.

A queste aree sismogenetiche vengono attribuite le magnitudo massime di  $M_w = 5.7$  per la prima e  $M_w = 5.9$  per la seconda e dunque l'area è caratterizzata da terremoti storici che hanno raggiunto elevate intensità.

Nelle tabelle seguenti, estratte da DISS, sono riportate le caratteristiche di entrambe le aree sismogenetiche.

DISS 3.1.1: Seismogenic Source ITC5039 - Riminese onshore

[Source Info Summary](#)

[Commentary](#)

[References](#)

[Pictures](#)

General information

**Code** ITC5039  
**Name** Riminese onshore  
**Compiled By** Basili, R., U. Fracassi and S. Mariano  
**Latest Update** 03/08/2006

Parametric information

Parameter	Qual.	Evidence
<b>Min Depth (km)</b>	3	OD Based on geological data.
<b>Max Depth (km)</b>	7	OD Based on geological data.
<b>Strike (deg)</b>	120 - 140	OD Based on geological data from various authors.
<b>Dip (deg)</b>	25 - 35	OD Based on geological data from various authors.
<b>Rake (deg)</b>	80 - 100	OD Based on geological data.
<b>Slip Rate (mm/y)</b>	0.1 - 0.5	EJ Derived from geological data concerning adjacent structures.
<b>Max Magnitude (Mw)</b>	5.7	LD Derived from maximum magnitude of associated individual source(s).

**Q-keys:** LD = Literature Data; OD = Original Data; ER = Empirical Relationship; AR = Analytical Relationship; EJ = Expert Judgement

Associated Active Faults or Folds

#	Type	Name	Reference
90	Fold	Rimini	Vannoli et al. [2004]

DISS 3.1.1: Seismogenic Source ITC5030 - Riminese offshore

[Source Info Summary](#)

[Commentary](#)

[References](#)

[Pictures](#)

General information

**Code** ITC5030  
**Name** Riminese offshore  
**Compiled By** Basili, R., and S. Mariano  
**Latest Update** 24/09/2007

Parametric information

Parameter	Qual.	Evidence
<b>Min Depth (km)</b>	3	OD Based on geological data.
<b>Max Depth (km)</b>	7	OD Based on geological data.
<b>Strike (deg)</b>	120 - 140	LD Based on geological data from various authors.
<b>Dip (deg)</b>	25 - 35	LD Based on geological data from various authors.
<b>Rake (deg)</b>	80 - 100	EJ Inferred from geological data.
<b>Slip Rate (mm/y)</b>	0.1 - 0.5	EJ Derived from geological data concerning adjacent structures.
<b>Max Magnitude (Mw)</b>	5.9	LD Derived from the strongest earthquake occurred in the region.

**Q-keys:** LD = Literature Data; OD = Original Data; ER = Empirical Relationship; AR = Analytical Relationship; EJ = Expert Judgement

Associated Active Faults or Folds

#	Type	Name	Reference
97	Fold	Offshore Rimini South	Basili and Barba [2007]
96	Fold	Offshore Rimini North	Basili and Barba [2007]

In conclusione l'area in oggetto entro 50 km risulta interessata storicamente da epicentri sismici di intensità significativa e si può considerare la pericolosità sismica generale sul valore "medio-alto".

Per quanto scritto sopra le eventuali verifiche della probabilità di liquefazione e dei cedimenti post sismici si dovrebbe assumere una magnitudo di riferimento riferita al suolo e quindi ottenuta dai dati di disaggregazione (vedi § 11.1 – tabella 5 – Mw=5.13) e non dall'intensità della sorgente sismogenetica che in questo caso è pari a Mw=5.9 se non conoscendo le relazioni di attenuazione locale in funzione della distanza dell'epicentro.

## 8. ANALISI SISMICA

### 8.1. Normativa Regionale

Per lo studio sismico del sito, con finalità di microzonazione sismica, si devono applicare le procedure definite nella delibera dell'Assemblea Regionale Legislativa della Liguria DGR 471/2010 "Criteri e linee guida regionali, ai sensi dell'art. 1, comma 1 della l.r. 29/83 per l'approfondimento degli studi geologico-tecnici e sismici a corredo della strumentazione urbanistica comunale – Allegato A".

Sulla base quindi delle indagini sismiche eseguite, il sito indagato appartiene alla **Categoria C** di suolo di fondazione, così definita:

Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 e 360 m/s

Sulla base della tabella in allegato 2 della norma di indirizzo regionale si ottengono i seguenti Fattori di Amplificazione riferiti al suolo C come previsto dall'Eurocodice 8 parte 1.

Essendo il valore di  $V_{s30} = 185$  m/sec (DH1) e  $V_{s30} = 200$  m/sec (DH2) si utilizza una approssimazione per entrare nelle tabelle A2.1.1. considerando un valore di  $V_s = 200$  m/sec.

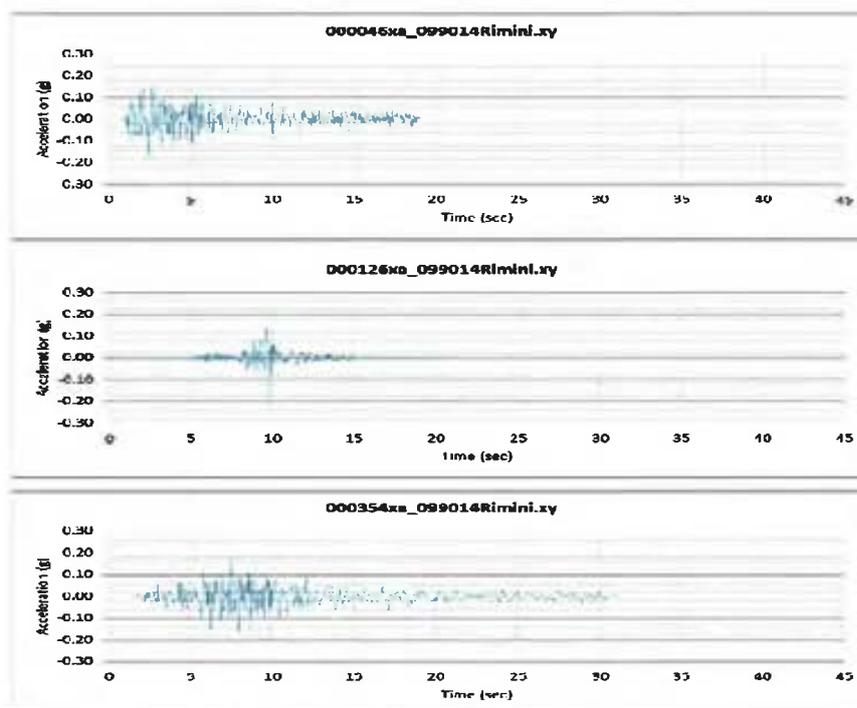
Il sito è configurabile quindi come substrato  $>100$  m dal p.c. per cui dalla tabella A2.1.1. Costa 3, si ottengono i seguenti Fattori di Amplificazione in P.G.A. (Peak Ground Acceleration) e SI (Intensità di Housner);

<b>P.G.A.</b>		<b>1.8</b>
<b>SI</b>	<b>0.1 s – To – 0.5 s</b>	<b>2.2</b>
<b>SI</b>	<b>0.5 s – To – 1.0 s</b>	<b>2.5</b>

In base alla tabella 2 dell'allegato A4 della norma di indirizzo regionale, Rimini presenta un valore di accelerazione massima orizzontale di picco al bedrock, per  $T=0$  di  $a_{refg} = 0.183$  g, parametro che deve essere utilizzato per la normalizzazione della terna accelerometrica fornita dalla regione stessa.

000046xa\_099014Rimini.xy  
000126xa\_099014Rimini.xy  
000354xa\_099014Rimini.xy

## Accelerogrammi al bedrock



### 8.2. Definizione del modello geosismico locale

Di seguito si rappresenta schematicamente ciascun parametro utilizzato per l'analisi a cui è stato assegnato un grado di giudizio di validità.

Dati	Attendibilità	Tipologia
Litologici	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Alta	Da prove in sito
Stratigrafici	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette (stratigrafie di pozzi e sondaggi perforati nelle adiacenze)
Geomeccanici	Alta	Da indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo e prove penetrometriche dinamiche)
	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
Geofisici (Vs)	Media	Da valutazioni correlative con prove su materiali simili
	Alta	Da campioni prelevati in sito
	Limitata	Da bibliografia - dati da zone limitrofe - relazioni empiriche
	Bassa	Da prove sismiche indirette (HVSR)
Geofisici (Vs)	Media	Da prove sismiche a bassa risoluzione (MASW) o sismica a rifrazione tradizionale (metodo GRM per rifrattori o simili)
	Medio-alta	Da prove dirette a media risoluzione (Sismica tomografica)
	Alta	Da prove Down Hole o Cross Hole

L'analisi numerica viene sviluppata in monodimensionale sul punto dei sondaggi S1 e S2.

Per l'analisi è stato utilizzato un modello di rappresentazione del sottosuolo a strati continui: in questo modello il terreno è schematizzabile come un mezzo continuo multistrato, in cui ogni strato è assunto omogeneo ed a comportamento visco-elastico lineare.

Il software utilizzato è "Proshake" della Edupro Civil Systems Inc.(Washington) di cui si possiede licenza d'uso.

Le ipotesi geometriche di queste analisi (modello monodimensionale) sono state le seguenti:

- 1 Stratificazione delle unità litologiche e superficie del substrato sismico orizzontali;
- 2 Volume di terreno considerato sufficientemente lontano dai fianchi di unità la pendenza dei quali deve risultare modesta in modo da rendere minimi gli effetti monodimensionali;
- 3 Dimensioni orizzontali delle unità elevate rispetto allo spessore.

In seguito verranno descritti i risultati ottenuti utilizzando il software indicato, rappresentati da spettri di risposta elastici per smorzamento strutturale del 5% e fattori di amplificazione ricavati sulla base dei dati in precedenza indicati per l'analisi sismica di sito.

Come input dati vengono utilizzati gli accelerogrammi presentati al § precedente, viene richiesto l'input del log Vs, G e densità oltre alla colonna stratigrafica dei materiali discretizzate tramite le curve caratteristiche  $G/\gamma$  e  $D/\gamma$ .

I grafici utilizzati in Vs, G e densità sono riportati nelle figure seguenti estratti da S1/DH e S2/Dh per orizzonti discreti in funzioni dei livelli litologici e geofisici significativi.

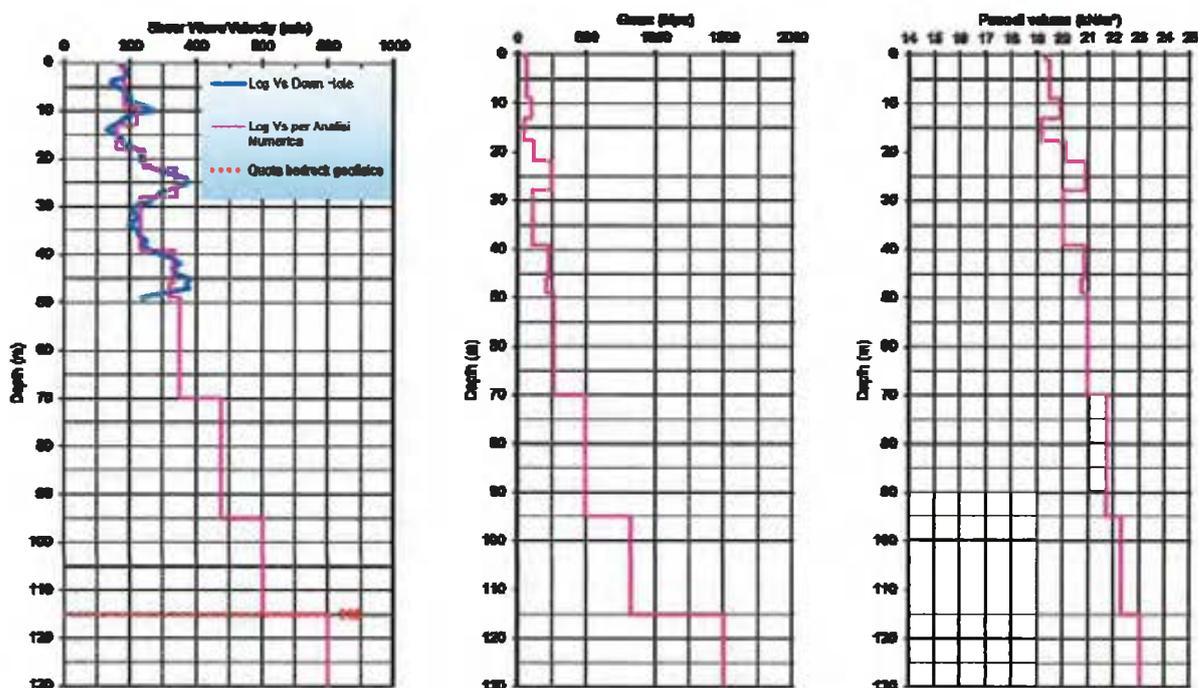
## 8.2.1. ANALISI NUMERICA IN S1/DH1

### Log sismico

Per l'analisi puntuale viene utilizzata la seguente parametrizzazione sismica relativa a vari orizzonti su una interfaccia basale (bedrock geofisico) posta a 115 m e  $V_s$ =variabile.

La curva del Log  $V_s$  è stata calcolata tenendo in considerazione i valori ottenuti dalla prova del Down Hole (in grassetto blu nel grafico sottostante) a cui è seguita una curva polinomiale di gradiente (tratteggio rosso) tale da far convergere il tratto terminale dei valori del cono sismico con l'interfaccia a 115 m ottenuta dalle prove HVSR in accordo con la stratigrafia locale.

Entrambe le curve sono state poi sottoposte a partizione per ottenere gli strati per l'input formazionale per Proshake (spezzata in magenta).



Per quanto riguarda la caratterizzazione geotecnica dei terreni si sono ricostruite le curve di decadimento del Modulo di taglio normalizzato ( $G/G_0$ ) e dello smorzamento ( $D\%$ ) per i materiali di sito, cioè limi argillosi prevalenti, utilizzando le prove di laboratorio effettuate, in particolare quelle della Colonna Risonante, almeno fino a 50 m, e poi in seguito curve di letteratura utilizzate per materiali alluvionali di età analoga (curve di Sun e Idriss).

## Input in Proshake

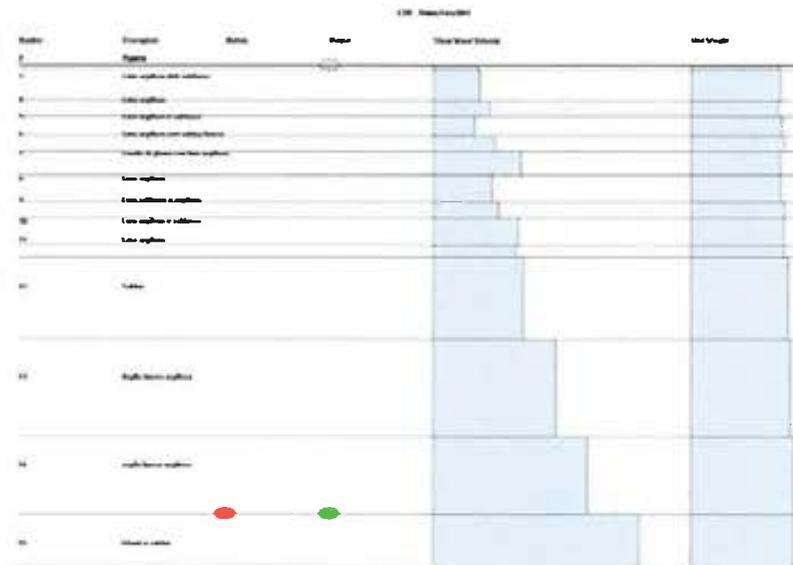
Summary Data | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

Layer No.	Material Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Comp. (kPa)	V <sub>v</sub> (%)	Mod. Reduction Curve	Mod. Parameters	Damping Curve
2	Argilla	1.0	19.2	56.7	17.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C1		CLAY - Rimini FIERA S1 C1
3	Limo argilloso dab. sabbioso	6.0	19.7	65.0	18.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C1		CLAY - Rimini FIERA S1 C1
4	Limo argilloso	4.0	19.0	53.7	22.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C1		CLAY - Rimini FIERA S1 C1
5	Limo argilloso e sabbioso	5.0	19.5	51.8	18.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C1		CLAY - Rimini FIERA S1 C1
6	Limo argilloso con sabbia finosa	4.0	21.6	121.1	28.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C1		CLAY - Rimini FIERA S1 C1
7	Livello di ghiaia con limo argilloso	6.0	19.8	232.8	38.0	Gravel (Seed et al.)		Gravel (Seed et al.)
8	Limo argilloso	7.0	19.8	108.3	23.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C1		CLAY - Rimini FIERA S1 C1
9	Limo sabbioso e argilloso	4.0	21.6	131.0	25.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C2		CLAY - Rimini FIERA S1 C2
10	Limo argilloso e sabbioso	7.0	20.5	227.4	30.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C2		CLAY - Rimini FIERA S1 C2
11	Limo argilloso	3.0	20.7	256.0	32.0	CLAY - Rimini FIERA S1 C2		CLAY - Rimini FIERA S1 C2
12	Sabbia	21.0	21.4	267.4	30.0	Gravel (Seed et al.)		Sand (Seed & Rubin) - Avallone
13	Argilla limosa argillosa	23.0	22.8	585.8	47.0	Clay - (P&S) (Sun et al.)		Clay - Upper Bound (Sun et al.)
14	Argilla limosa argillosa	23.0	22.7	631.2	68.0	Clay - (P&S) (Sun et al.)		Clay - Upper Bound (Sun et al.)
15	Ghiaia e sabbia	Infinito	22.7	1478.6	80.0	Gravel (Seed et al.)		Gravel (Seed et al.)

La profondità della tavola d'acqua viene prevista a circa 1 m dalla quota piano di riferimento

Questa quota non è molto significativa in quanto i parametri massimi fanno sempre riferimento alle accelerazioni orizzontali.

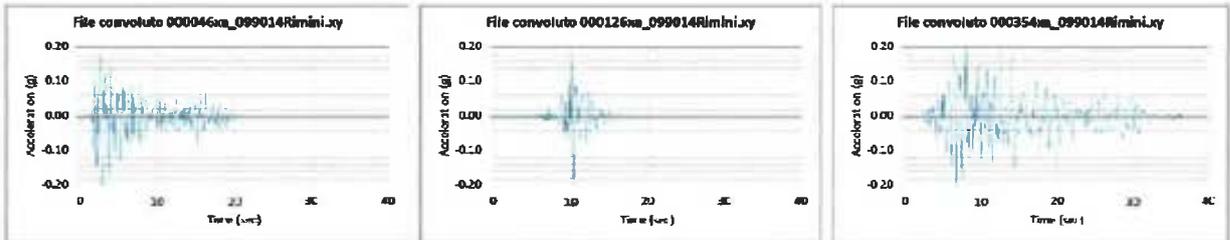
In Proshake l'output è stato calcolato al piano campagna mentre il punto in rosso corrisponde alla quota dell'input sismico (accelerogrammi); viene inoltre richiesta una risposta a questa quota allo scopo di ottenere i parametri numerici e le curve di amplificazione e gli spettri di risposta di sito.



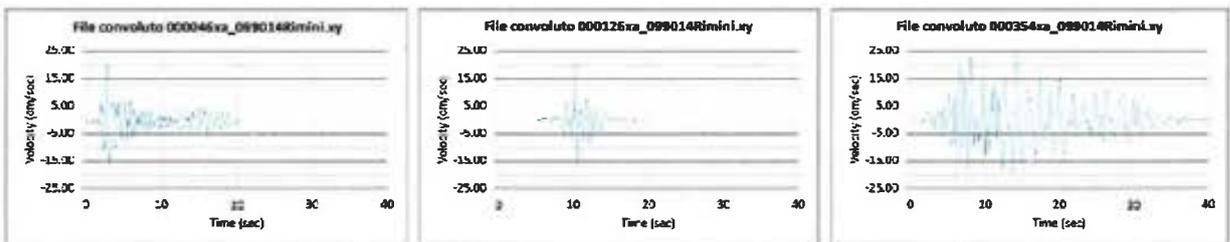
Alle pagine successive è riportato il report delle analisi numeriche eseguite.

Gli accelerogrammi convolti al piano campagna risultano essere i seguenti in funzione dell'accelerazione (g), della velocità (cm/sec) e dello spostamento (cm):

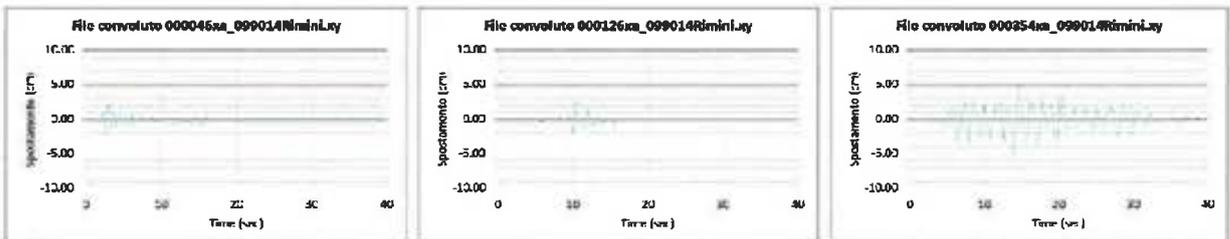
### Serie temporali convolute tempo/accelerazione



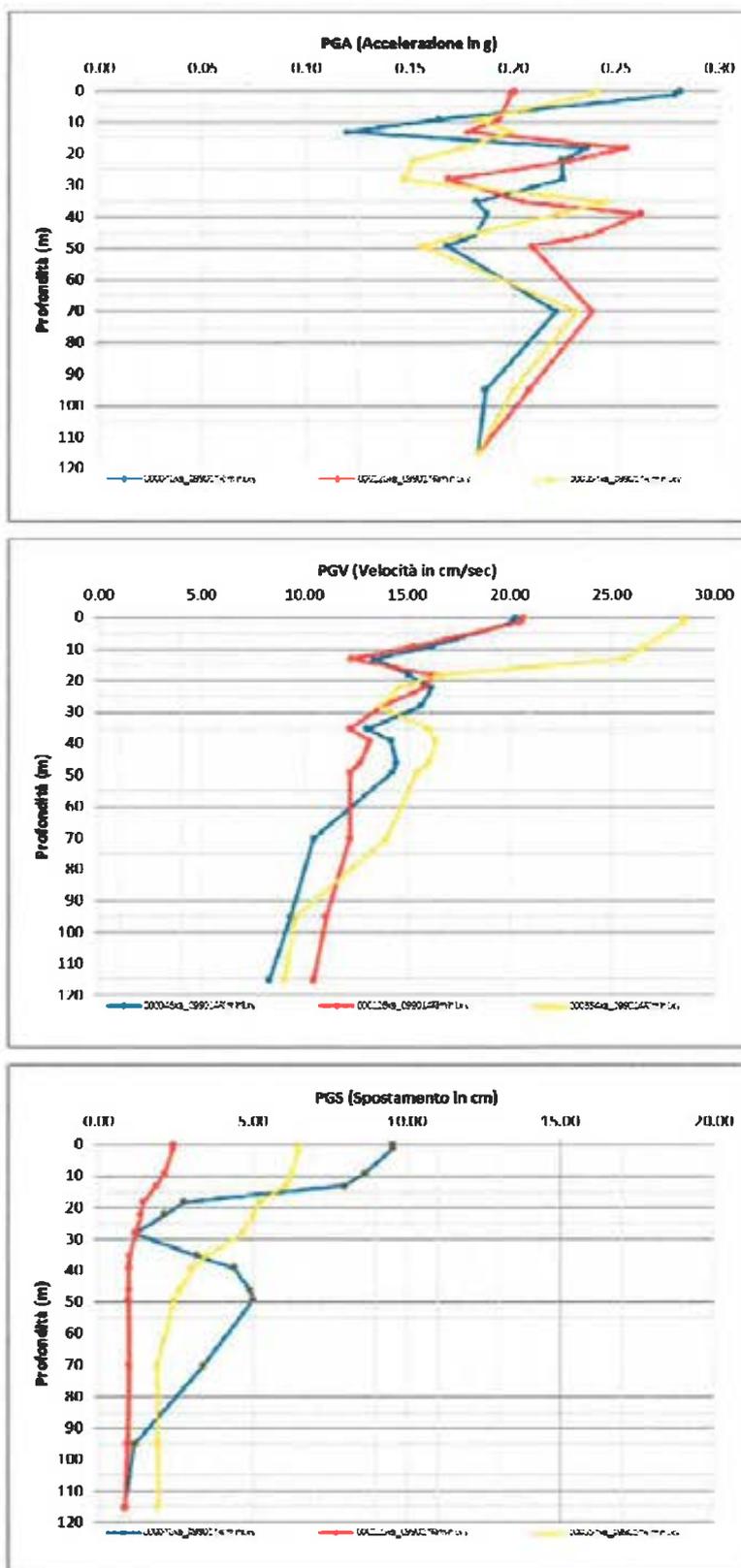
### Serie temporali convolute tempo/velocità



### Serie temporali convolute tempo/spostamento



I logs della PGA/profondità, PGV/profondità e Spostamento/Profondità dei sette sismi sono rappresentati nei grafici seguenti dove in ordinata c'è la profondità (m) ed in ascissa rispettivamente l'accelerazione (g), la velocità (cm/sec) e lo spostamento (cm).



I valori delle accelerazioni massime (**PGA**), di velocità massima (**PGV**), di spostamento e di Intensità di ARIAS relativi agli accelerogrammi convoluti per PROSHAKE alle quote di riferimento per esigenze progettuali e cioè al piano campagna ed a -3.0 m sono i seguenti:

Superficie di riferimento	Piano campagna			
Accelerogramma	PGA	PGV	PGD	ARIAS
	g	m/sec	m	m/sec
Sisma 1	0.281	0.203	0.095	0.606
Sisma 2	0.201	0.206	0.024	0.258
Sisma 3	0.241	0.285	0.065	1.412
<b>Media</b>	<b>0.241</b>	<b>0.231</b>	<b>0.061</b>	<b>0.759</b>

Per i vari sismi i valori della  $PGA_0$  al bedrock sono i seguenti (in g).

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Bedrock	0.183	0.183	0.183

I rapporti  $PGA/PGA_0$  sono i seguenti.

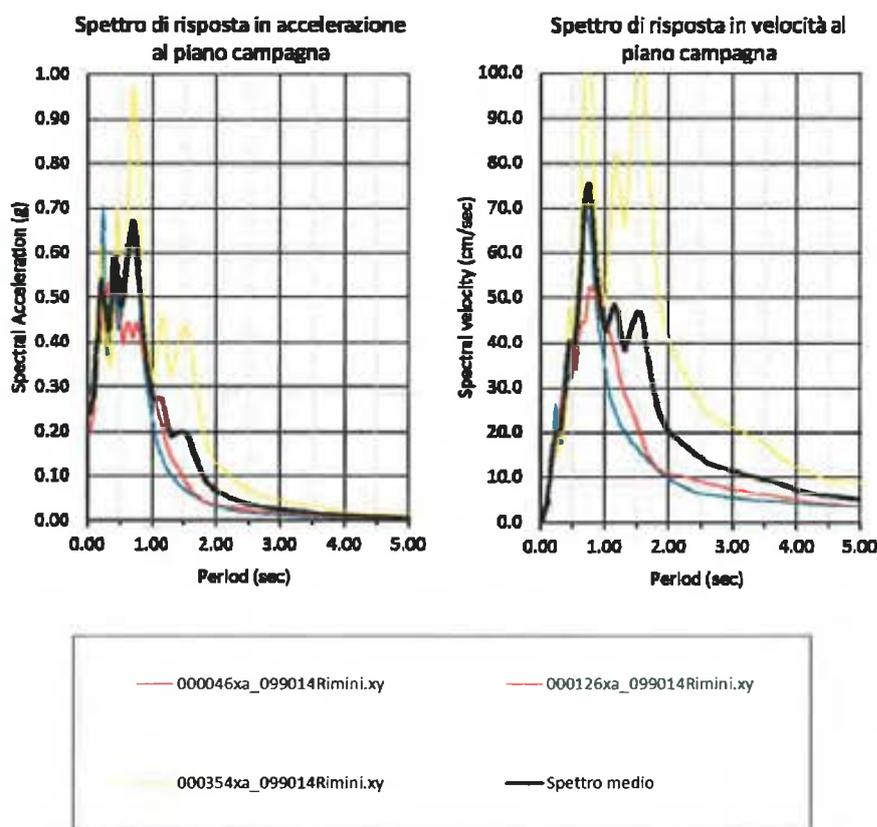
Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	1.536	1.098	1.317

Lo **spettro di risposta di sito** viene sintetizzato nei seguenti grafici per i sette sismi relativamente alla accelerazione spettrale **PSA** ed alla velocità spettrale **PSV** per uno smorzamento  $\xi = 5.0 \%$ , in nero è riportata la curva media di sintesi.

Nel grafico di sinistra sono riportati gli spettri delle accelerazioni spettrali **PSA** attraverso i diversi strati che compongono la colonna numerica utilizzata nella modellazione per diversi valori di periodo.

Il secondo grafico a destra riguarda la **PSV**, ossia la pseudovelocità spettrale, dove ne viene mostrata la variabilità il funzione del periodo.

I grafici fanno riferimento alla quota 0.



I risultati di questa analisi sono utilizzabili per il calcolo del fattore **SI**, Intensità di Housner, come richiesto per l'analisi numerica, che è definito dalla relazione:

$$SI = \int_{T1}^{T2} PSV_{(\xi=5\%)} dt \quad \text{dove } PSV \text{ è lo spettro di risposta in velocità}$$

L'Intensità di Housner (**SI**) è un indicatore della pericolosità sismica ed è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudo velocità in un intervallo prefissato di frequenze ed è direttamente correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto, e quindi espressione del possibile grado di danneggiamento subito dagli edifici.

Proshake fornisce il valore dell'Intensità di Housner nell'intervallo tra **0.1 e 2.5 sec** (tra 0.4 Hz e 10 Hz) con smorzamento  $\xi$  del 5% integrando lo spettro in pseudovelocità PSV, riportato nei grafici precedenti, in quel range di primaria importanza per le strutture.

Per i vari sismi i valori dell'**Intensità di Housner SI** sono i seguenti:

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	1.774	1.827	3.875

Per i vari sismi i valori dell'**Intensità di Housner SI<sub>0</sub>** al bedrock sono i seguenti.

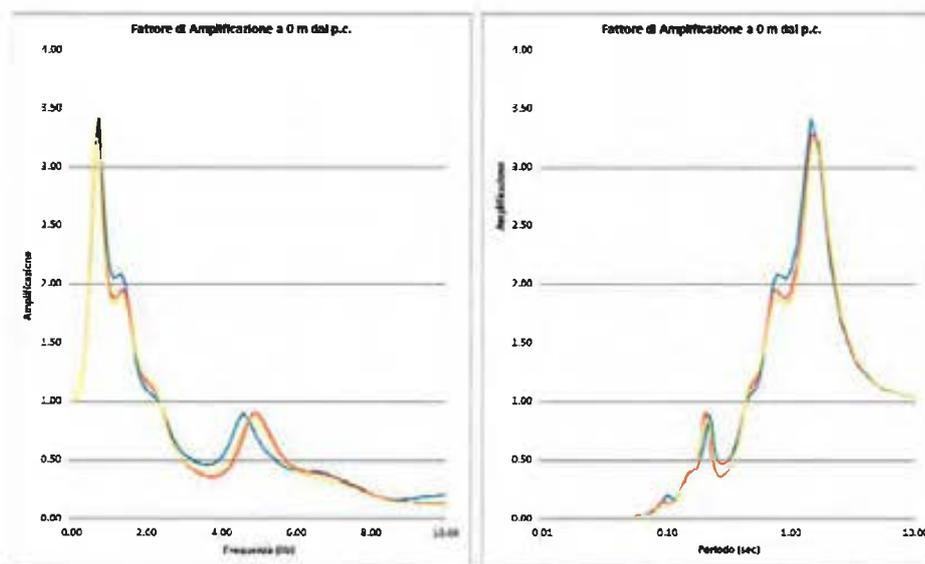
Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Bedrock	0.818	0.746	1.114

I rapporti **SI/SI<sub>0</sub>** sono i seguenti.

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	2.169	2.449	3.478

Nei grafici seguenti viene presentato il **Fattore di Amplificazione**

Superficie di riferimento = piano campagna



Per le seguenti frequenze si rilevano picchi di Fa

**f = 0.70 hz**      **Fa = 3.4**      (**Fa max**)  
**f = 1.36 hz**      **Fa = 1.9**  
**f = 4.78 hz**      **Fa = 0.8**

mentre i valori massimi del Fattore di Amplificazione nei segmenti previsti dalle norme tecniche sono i seguenti:

**Fa<sub>0.1 s - T<sub>0</sub> - 0.5 s</sub> = 2.34**  
**Fa<sub>0.5 s - T<sub>0</sub> - 1.0 s</sub> = 3.40**

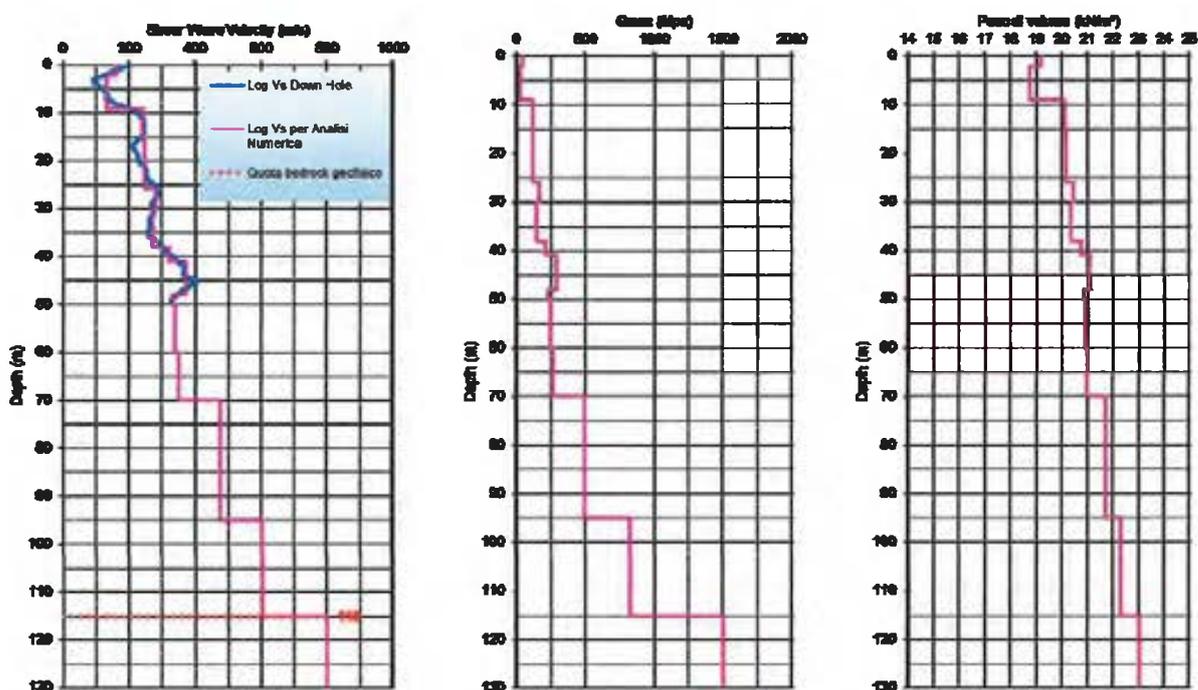
## 8.2.2. ANALISI NUMERICA IN S2/DH2

### Log sismico

Per l'analisi puntuale viene utilizzata la seguente parametrizzazione sismica relativa a vari orizzonti su una interfaccia basale (bedrock geofisico) posta a 115 m e  $V_s$ =variabile.

La curva del Log  $V_s$  è stata calcolata tenendo in considerazione i valori ottenuti dalla prova del Down Hole (in grassetto blu nel grafico sottostante) a cui è seguita una curva polinomiale di gradiente (tratteggio rosso) tale da far convergere il tratto terminale dei valori del cono sismico con l'interfaccia a 115 m ottenuta dalle prove HVSR in accordo con la stratigrafia locale.

Entrambe le curve sono state poi sottoposte a partizione per ottenere gli strati per l'input formazionale per Proshake (spezzata in magenta).



Per quanto riguarda la caratterizzazione geotecnica dei terreni si sono ricostruite le curve di decadimento del Modulo di taglio normalizzato ( $G/G_0$ ) e dello smorzamento ( $D\%$ ) per i materiali di sito, cioè limi argillosi prevalenti, utilizzando le prove di laboratorio effettuate, in particolare quelle della Colonna Risonante, almeno fino a 50 m, e poi in seguito curve di letteratura utilizzate per materiali alluvionali di età analoga (curve di Sun e Idriss).

## Input in Proshake

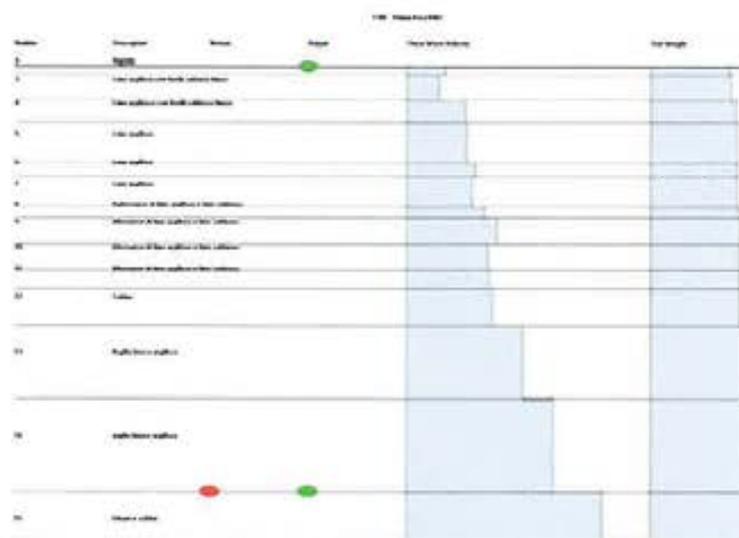
Summary Data | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

Layer No.	Material Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Layer Depth (m)	Layer Weight (kN)	V <sub>s</sub> (m/s)	Mod. Reduction Curve	Mod. Parameter	Damping Curve
2	tipaco	2.0	18.6	43.0	162.0	CLAY - FMMS2 C1		CLAY - FMMS2 C1	
3	limo argilloso con livelli sabbiosi fini	7.0	19.2	33.1	130.0	CLAY - FMMS2 C1		CLAY - FMMS2 C1	
4	limo argilloso con livelli sabbiosi fini	5.0	20.1	118.1	240.0	CLAY - FMMS2 C1		CLAY - FMMS2 C1	
5	limo argilloso	11.0	20.2	123.3	243.0	CLAY - FMMS2 C1		CLAY - FMMS2 C1	
6	limo argilloso	4.0	20.5	163.5	260.0	CLAY - FMMS2 C2		CLAY - FMMS2 C2	
7	limo argilloso	8.0	20.4	151.4	270.0	CLAY - FMMS2 C2		CLAY - FMMS2 C2	
8	Arginazione di limo sabbioso a fine	3.0	28.8	276.8	350.0	CLAY - FMMS2 C2		CLAY - FMMS2 C2	
9	Arginazione di limo sabbioso a fine	7.8	25.5	234.7	398.0	CLAY - FMMS2 C2		CLAY - FMMS2 C2	
10	Arginazione di limo sabbioso a fine	7.8	28.8	234.4	338.0	CLAY - FMMS2 C2		CLAY - FMMS2 C2	
11	Arginazione di limo sabbioso a fine	5.8	28.3	296.5	398.0	CLAY - FMMS2 C2		CLAY - FMMS2 C2	
12	Sabbia	10.0	21.8	261.3	350.0	Sand (Sand & Silty) - Average		Sand (Sand & Silty) - Average	
13	Argilla limosa sabbiosa	20.0	21.7	433.5	475.0	Clay - FA-5 (Silty) - Average		Clay - Upper Bound Disp. of (Sun et al.)	
14	argilla limosa sabbiosa	25.0	22.3	617.5	680.0	Clay - FA-5 (Silty) - Average		Clay - Upper Bound Disp. of (Sun et al.)	
15	Gravio e sabbio	Infinito	23.0	1502.3	880.0	Rock		Rock	

La profondità della tavola d'acqua viene prevista a circa 1 m dalla quota piano di riferimento

Questa quota non è molto significativa in quanto i parametri massimi fanno sempre riferimento alle accelerazioni orizzontali.

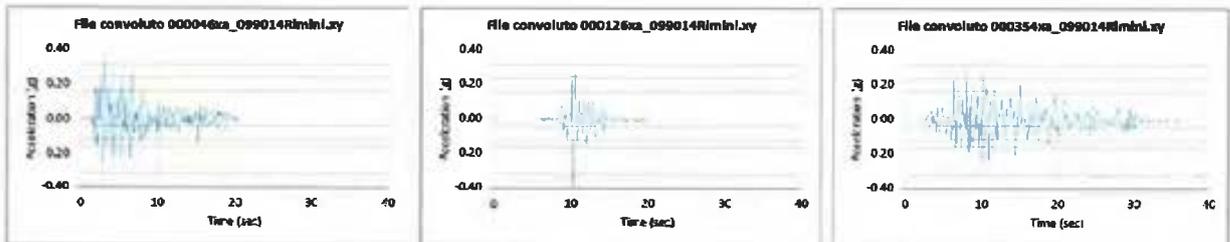
In Proshake l'output è stato calcolato al piano campagna mentre il punto in rosso corrisponde alla quota dell'input sismico (accelerogrammi); viene inoltre richiesta una risposta a questa quota allo scopo di ottenere i parametri numerici e le curve di amplificazione e gli spettri di risposta di sito.



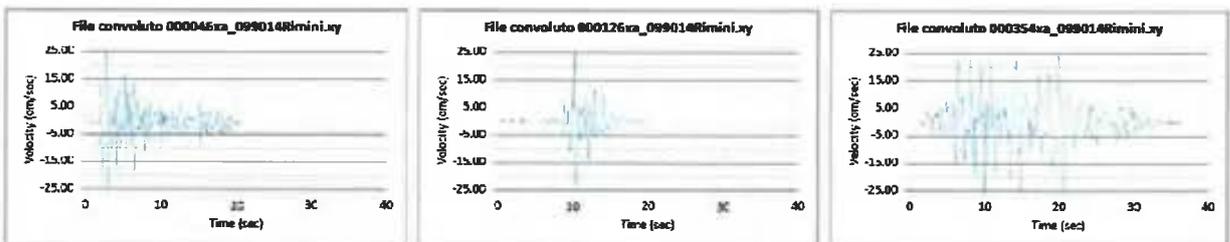
Alle pagine successive è riportato il report delle analisi numeriche eseguite.

Gli accelerogrammi convoluti al piano campagna risultano essere i seguenti in funzione dell'accelerazione (g), della velocità (cm/sec) e dello spostamento (cm):

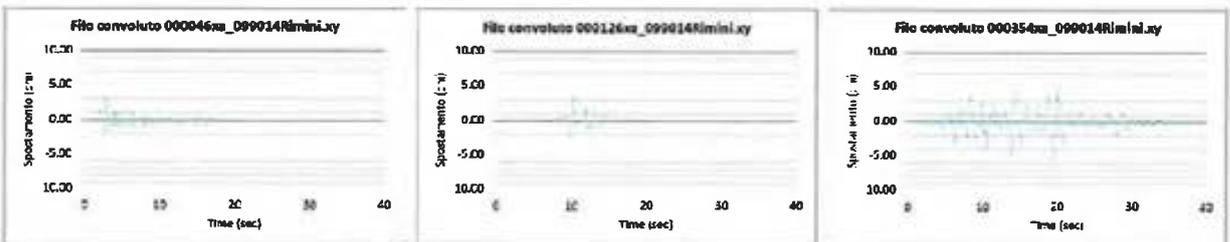
### Serie temporali convolute tempo/accelerazione



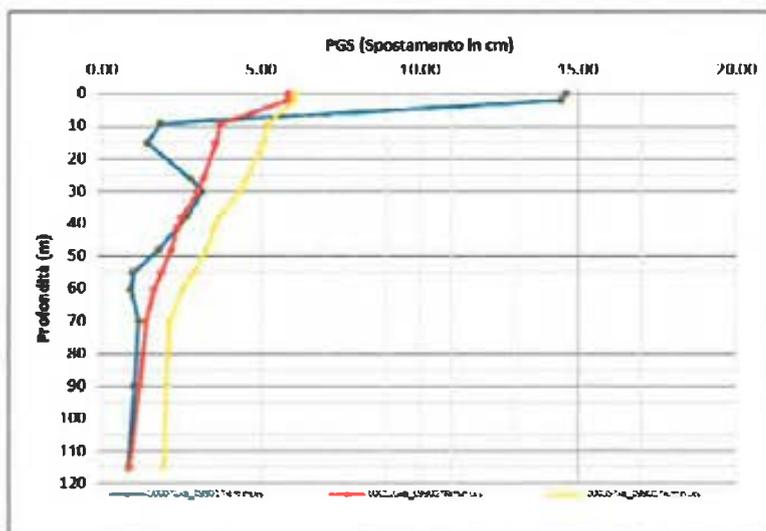
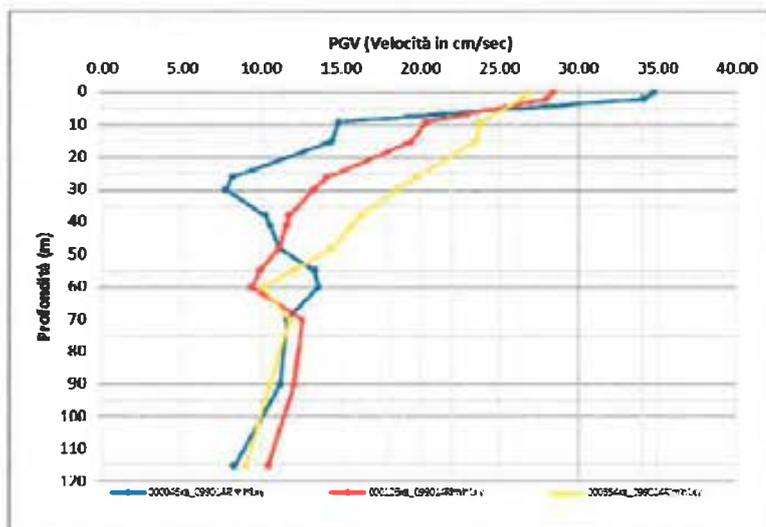
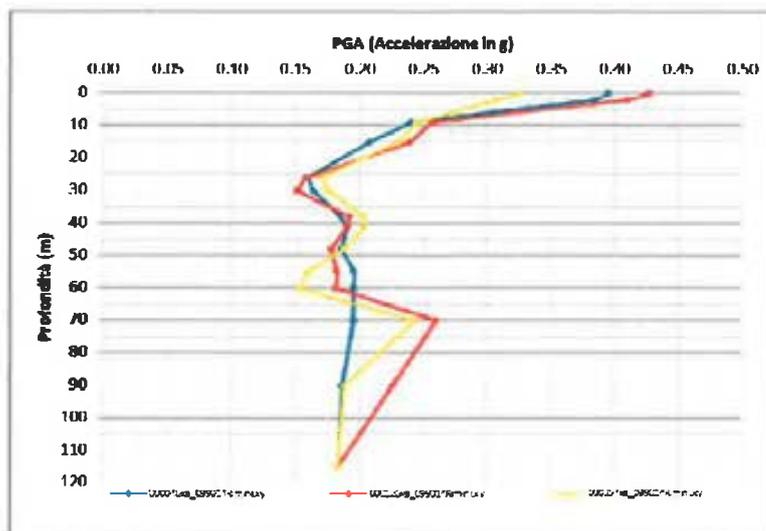
### Serie temporali convolute tempo/velocità



### Serie temporali convolute tempo/spostamento



I logs della PGA/profondità, PGV/profondità e Spostamento/Profondità dei sette sismi sono rappresentati nei grafici seguenti dove in ordinata c'è la profondità (m) ed in ascissa rispettivamente l'accelerazione (g), la velocità (cm/sec) e lo spostamento (cm).



I valori delle accelerazioni massime (PGA), di velocità massima (PGV), di spostamento e di Intensità di ARIAS relativi agli accelerogrammi convoluti per PROSHAKE alle quote di riferimento per esigenze progettuali e cioè al piano campagna ed a -3.0 m sono i seguenti:

Superficie di riferimento	Piano campagna			
Accelerogramma	PGA	PGV	PGD	ARIAS
	g	m/sec	m	m/sec
Sisma 1	0.396	0.348	0.146	2.135
Sisma 2	0.427	0.284	0.059	0.725
Sisma 3	0.324	0.269	0.061	2.559
<b>Media</b>	<b>0.382</b>	<b>0.300</b>	<b>0.089</b>	<b>1.806</b>

Per i vari sismi i valori della  $PGA_0$  al bedrock sono i seguenti (in g).

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Bedrock	0.183	0.183	0.183

I rapporti  $PGA/PGA_0$  sono i seguenti.

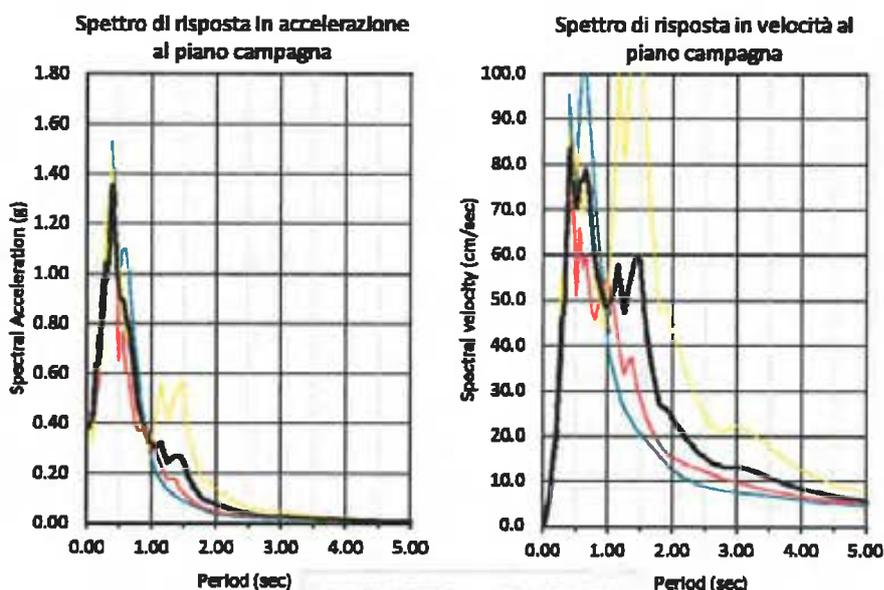
Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	2.161	2.333	1.770

Lo **spettro di risposta di sito** viene sintetizzato nei seguenti grafici per i sette sismi relativamente alla accelerazione spettrale PSA ed alla velocità spettrale PSV per uno smorzamento  $\xi = 5.0\%$ , in nero è riportata la curva media di sintesi.

Nel grafico di sinistra sono riportati gli spettri delle accelerazioni spettrali PSA attraverso i diversi strati che compongono la colonna numerica utilizzata nella modellazione per diversi valori di periodo.

Il secondo grafico a destra riguarda la PSV, ossia la pseudovelocità spettrale, dove ne viene mostrata la variabilità il funzione del periodo.

I grafici fanno riferimento alla quota 0.



I risultati di questa analisi sono utilizzabili per il calcolo del fattore **SI**, Intensità di Housner, come richiesto per l'analisi numerica, che è definito dalla relazione:

$$SI = \int_{T1}^{T2} PSV_{(\xi=5\%)} dt \quad \text{dove } PSV \text{ è lo spettro di risposta in velocità}$$

L'Intensità di Housner (**SI**) è un indicatore della pericolosità sismica ed è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudo velocità in un intervallo prefissato di frequenze ed è direttamente correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto, e quindi espressione del possibile grado di danneggiamento subito dagli edifici.

Proshake fornisce il valore dell'Intensità di Housner nell'intervallo tra **0.1 e 2.5 sec** (tra 0.4 Hz e 10 Hz) con smorzamento  $\xi$  del 5% integrando lo spettro in pseudovelocità PSV, riportato nei grafici precedenti, in quel range di primaria importanza per le strutture.

Per i vari sismi i valori dell'**Intensità di Housner SI** sono i seguenti:

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	2.621	2.434	4.253

Per i vari sismi i valori dell'**Intensità di Housner SI<sub>0</sub>** al bedrock sono i seguenti.

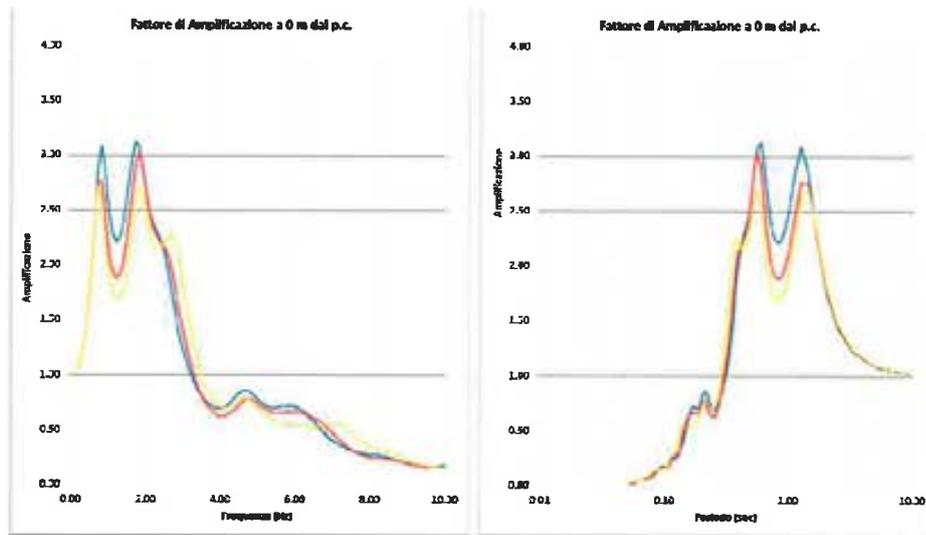
Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Bedrock	0.818	0.746	1.114

I rapporti **SI/SI<sub>0</sub>** sono i seguenti.

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	3.204	3.263	3.818

Nei grafici seguenti viene presentato il **Fattore di Amplificazione**

Superficie di riferimento = piano campagna



Per le seguenti frequenze si rilevano picchi di Fa

f = 0.82 hz	Fa = 2.9	
f = 1.84 hz	Fa = 3.0	(Fa max)
f = 4.69 hz	Fa = 0.9	

mentre i valori massimi del Fattore di Amplificazione nei segmenti previsti dalle norme tecniche sono i seguenti:

$Fa_{0.1\text{ s} - T_0 - 0.5\text{ s}} = 1.81$   
 $Fa_{0.5\text{ s} - T_0 - 1.0\text{ s}} = 3.00$

**PROGEO**  
 Dott. Maurizio Furani



Hanno collaborato:

Dott. Gabriele Pulelli  
 Dott. Andrea Fabbri  
 Dott. Stefano Tomidei



# HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr)

**CLIENT** STUDIO TI

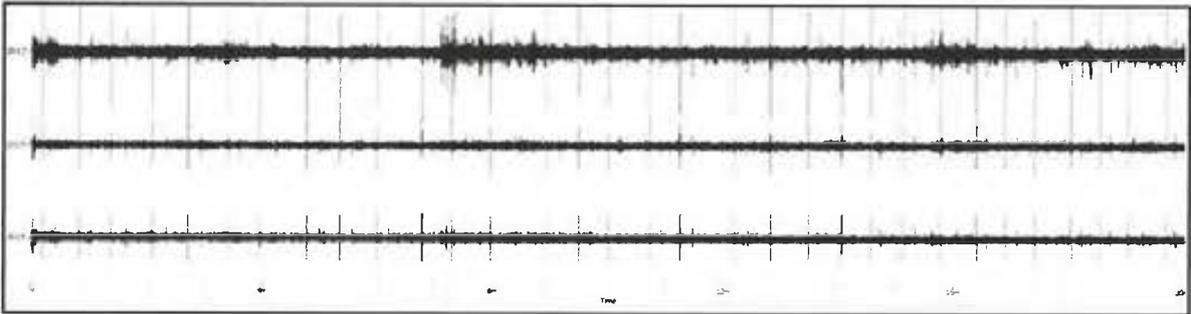
**JOB NUMBER** 1391

**TEST NUMBER** 01

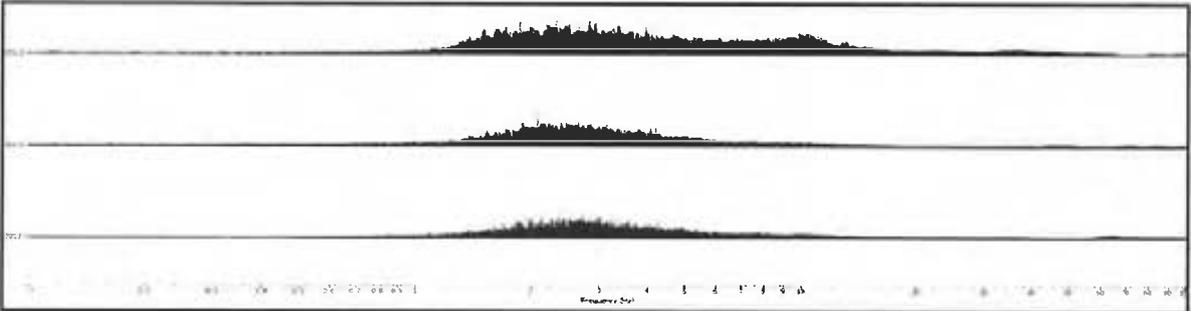
**SITE** Rimini Fiera  
**DATE** 29/01/2014  
**Longitude** 12.567268°  
**Latitude** 44.048859°  
**Height** ~10 s.l.m.

ACQUISITION DATA	
Start recording	9.24.00
End recording	9.44.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz
Weather conditions	---
Wind	---
Humidity	---

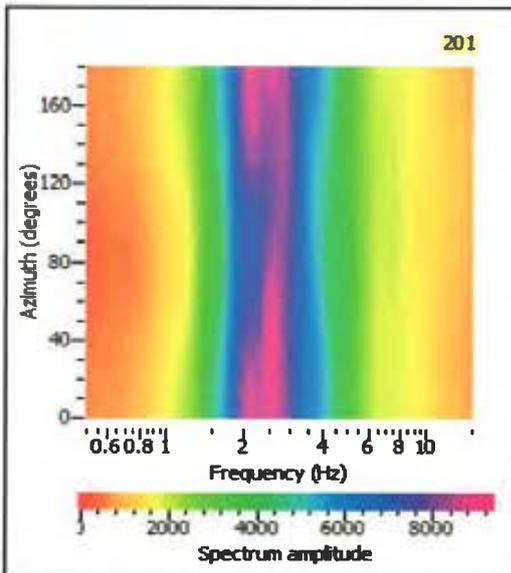
**RECORD (Time)**



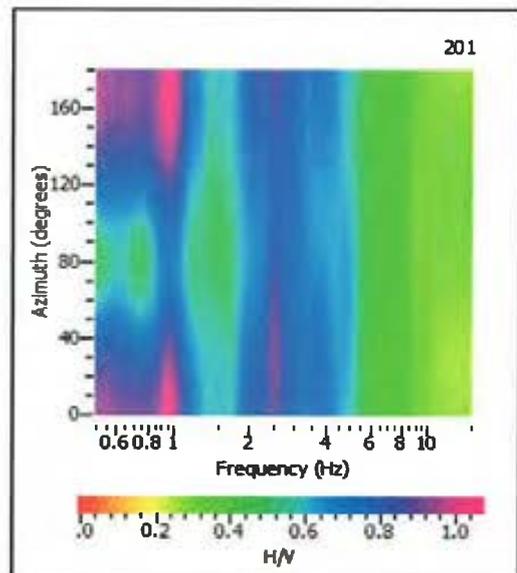
**RECORD (Frequency)**



**HORIZONTAL SPECTRUM ROTATE**



**H/V ROTATE RESULTS**





# HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr)

**CLIENT** STUDIO TI

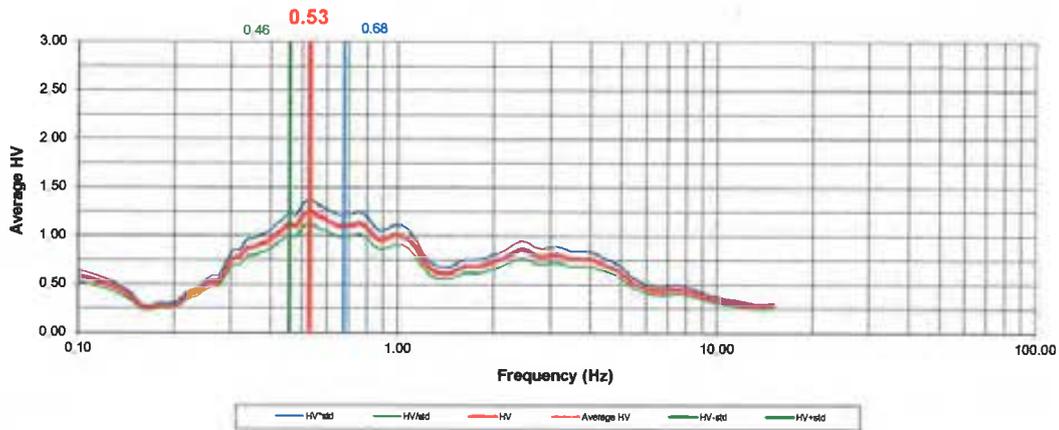
**JOB NUMBER** 1391  
**TEST NUMBER** 01  
**SITE** Rimini Fiera  
**DATE** 29/01/2014  
**Longitude** 12.567288°  
**Latitude** 44.048859°  
**Height** ~10 s.l.m.

Start recording	9.24.00
End recording	9.44.00
Trace length	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows length (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Constant	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
N° of windows	48

**Max HVSr 0.53 ± 0.11 Hz.**

## HVSr SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	0.53		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	0.53 > 10/20		<input checked="" type="checkbox"/>
nc (f0) > 200	752.6 > 200		<input checked="" type="checkbox"/>
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		<input checked="" type="checkbox"/>
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0]   AHV(f') < A0/2	0.27 Hz		<input checked="" type="checkbox"/>
Exists f'' in [4f0, f0]   AHV(f'') < A0/2	1.32 Hz		<input checked="" type="checkbox"/>
A0 > 2	1.26 > 2		<input checked="" type="checkbox"/>
fpeak [AHV(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.00132900000000002 <		<input checked="" type="checkbox"/>
σf < ε(f0)	0.110042 < 0.0795		<input checked="" type="checkbox"/>
σA(f0) < θ(f0)	0.6820815 < 2		<input checked="" type="checkbox"/>

Lw	Window length
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition of ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AHV(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AHV(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AHV(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AHV(f), σA(f) is the factor by which the mean AHV(f) curve should be multiplier or divided
clogHV(f)	Standard deviation of log AHV(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition θA(f) < θ(f0)

Freq Range [Hz]	Threshold value for σf and σA(f)				
	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f) (Hz)	0.25 f.	0.20 f.	0.15 f.	0.10 f.	0.05 f.
n(f) for σ(f)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f) for σA(f)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20



# HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr)

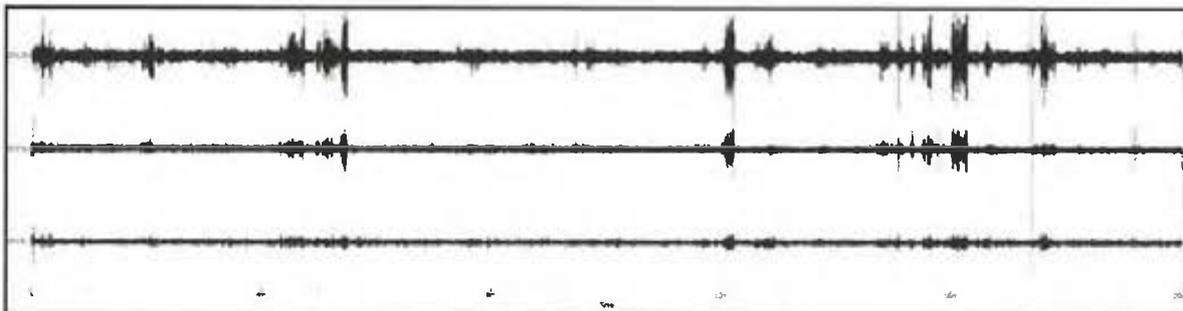
**CLIENT** STUDIO TI

**JOB NUMBER** 1391  
**TEST NUMBER** 02

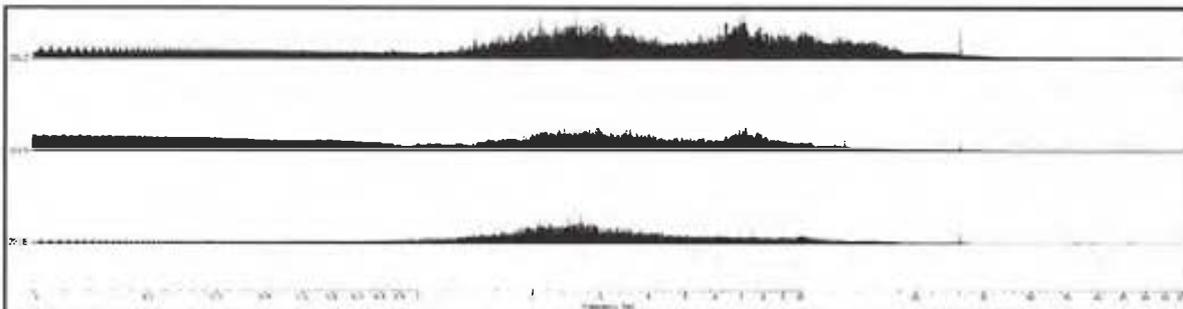
**SITE** Rimini Fiera  
**DATE** 29/01/2014  
**Longitude** 12.568650°  
**Latitude** 44.050099°  
**Height** ~10 s.l.m.

ACQUISITION DATA	
Start recording	12.24.00
End recording	12.44.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz
Weather conditions	---
Wind	---
Humidity	---

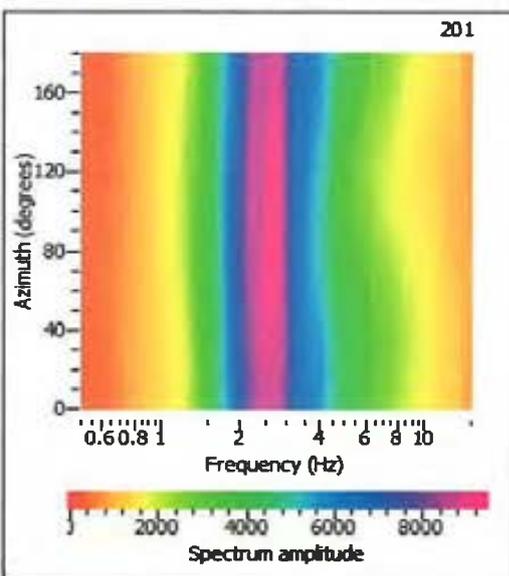
**RECORD (Time)**



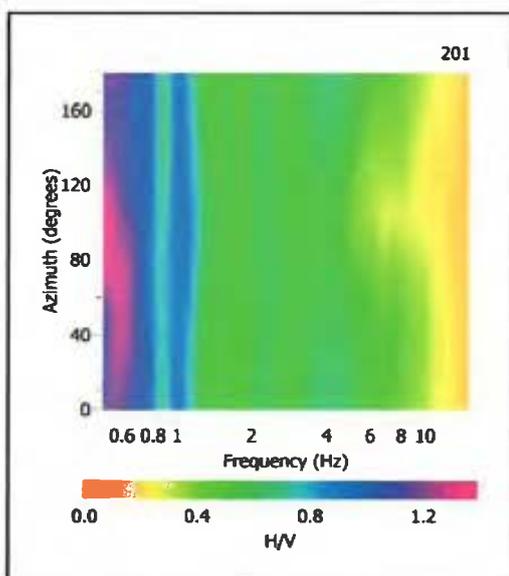
**RECORD (Frequency)**



**HORIZONTAL SPECTRUM ROTATE**



**H/V ROTATE RESULTS**





# HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSR)

CLIENT STUDIO TI

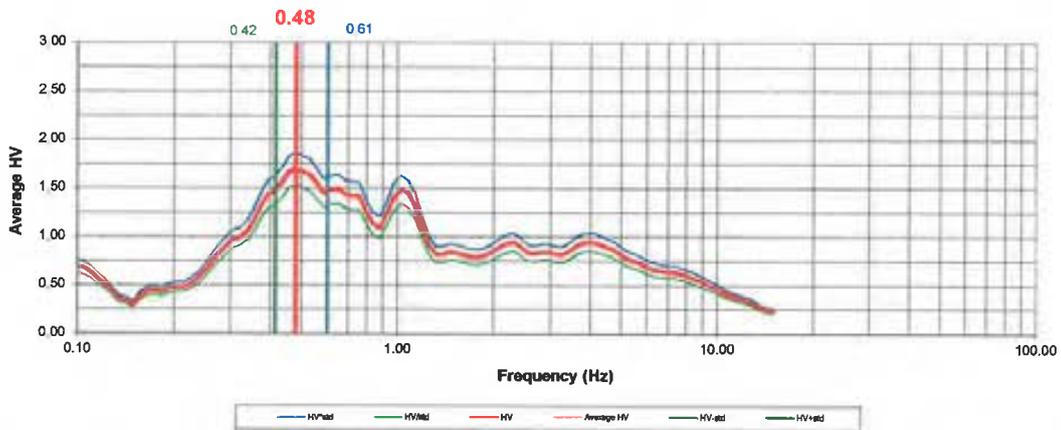
JOB NUMBER 1391  
 TEST NUMBER 02  
 SITE Rimini Fiera  
 DATE 29/01/2014  
 Longitude 12.568650°  
 Latitude 44.050099°  
 Height -10 s.l.m.

Start recording	12.24.00
End recording	12.44.00
Trace length	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows length (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Constant	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
N° of windows	21

Max HVSR 0.48 ± 0.09 Hz.

## HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	0.48		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	0.48 > 10/20		☒
nc (f0) > 200	681.6 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0]   AHV(f') < A0/2	0.27 Hz	☑	
Exists f'' in [4f0, f0]   AHV(f'') < A0/2	1.32 Hz	☑	
A0 > 2	1.66 > 2		☒
fpeak [AHV(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.025107 < 0.05	☑	
σf < ε(f0)	0.095971 < 0.096	☑	
σA(f0) < θ(f0)	0.803745 < 2.5	☑	

Lw	Window length
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition of ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AHV(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AHV(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AHV(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AHV(f), σA(f) is the factor by which the mean AHV(f) curve should be multiplier or divided
σlogAHV(f)	Standard deviation of log AHV(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Freq Range [Hz]	Threshold value for σf and σA(f)				
	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
σf (Hz)	0.25 f	0.20 f	0.15 f	0.10 f	0.05 f
σA(f) for σf(f)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log σA(f) for σA(f)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20



**Legenda**

- Sondaggi meccanici con prove Down Hole
- Penetrometrie CPTU
- Penetrometrie CPT

Le prove di misura del rumore di fondo HVSR sono state realizzate in tutte le posizioni delle prove puntuali indicate sopra

<p><b>PRODEO S.p.A.</b>          Via Torino 104          41013 Sesto San Giovanni (MO)          Tel. +39 0521 272288          Fax +39 0521 272289          www.prodeo.it</p>	<b>Cliente:</b> STUDIO TI
	<b>Lavoro:</b> Anellati sismica del sito
	<b>Sito:</b> Area Fiera - Rimini
	<b>Titolo:</b> Planimetria indagini geognostiche
	<b>Data:</b> Febbraio 2014
<b>Figura:</b> 1	
<b>Scala:</b> 1: 1500	



**COMMITTENTE**  
**DOWN HOLE**  
 Località - Progetto  
 Data acquisizione

**STUDIO TI**  
**S1**  
 Via della Fiera (RN)  
 13/01/2014

**SISMOGRAMMI**  
 RICHIEDI SU TEMPO RIFORNIRE  
 SPOT 4.0.0 in via Sesto Mile

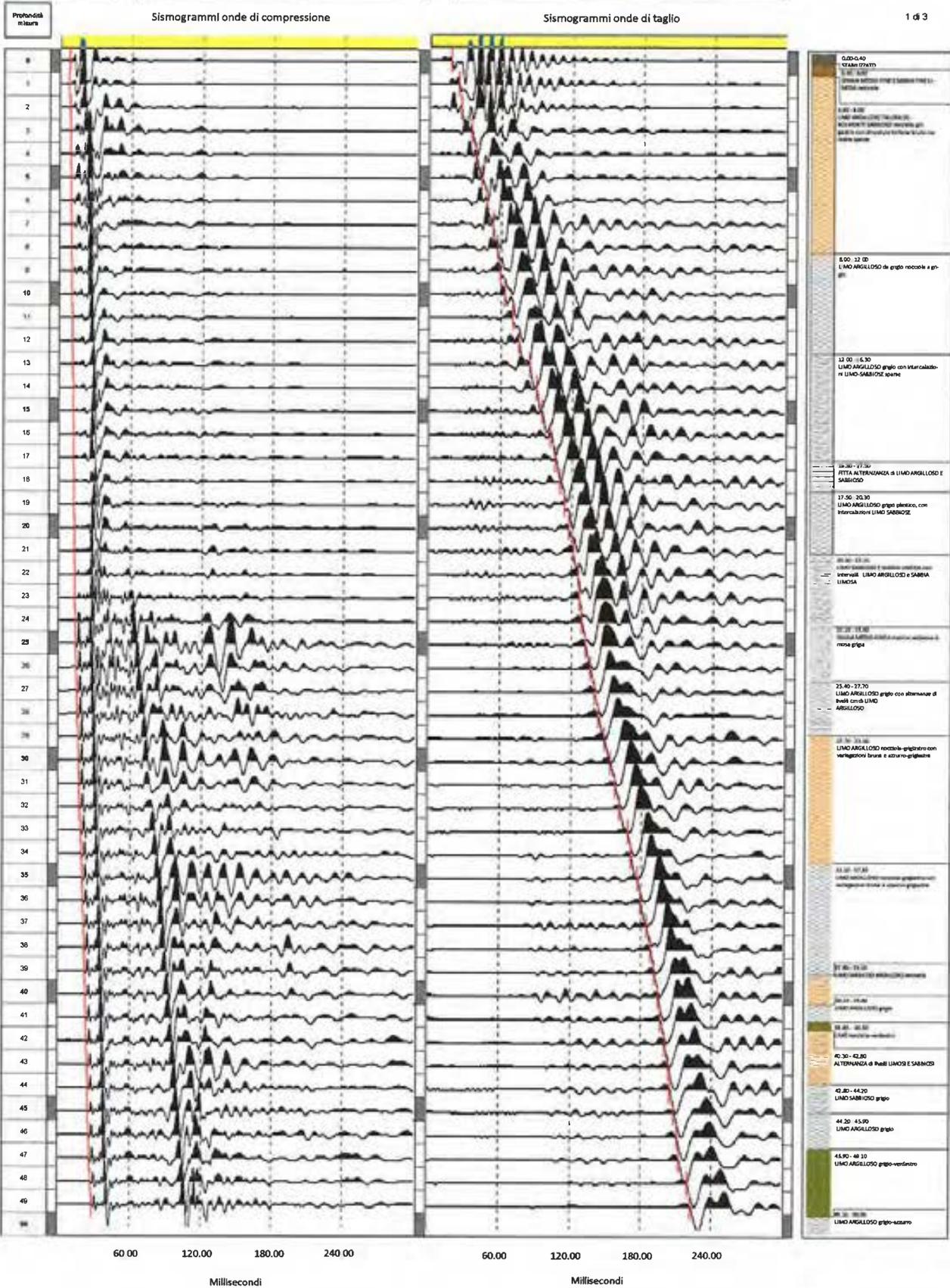


Fig. 2



<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
Località
Data acquisizione

<b>STUDIO TI</b>
<b>S1</b>
Via della Fiera (RN)
23/01/2014

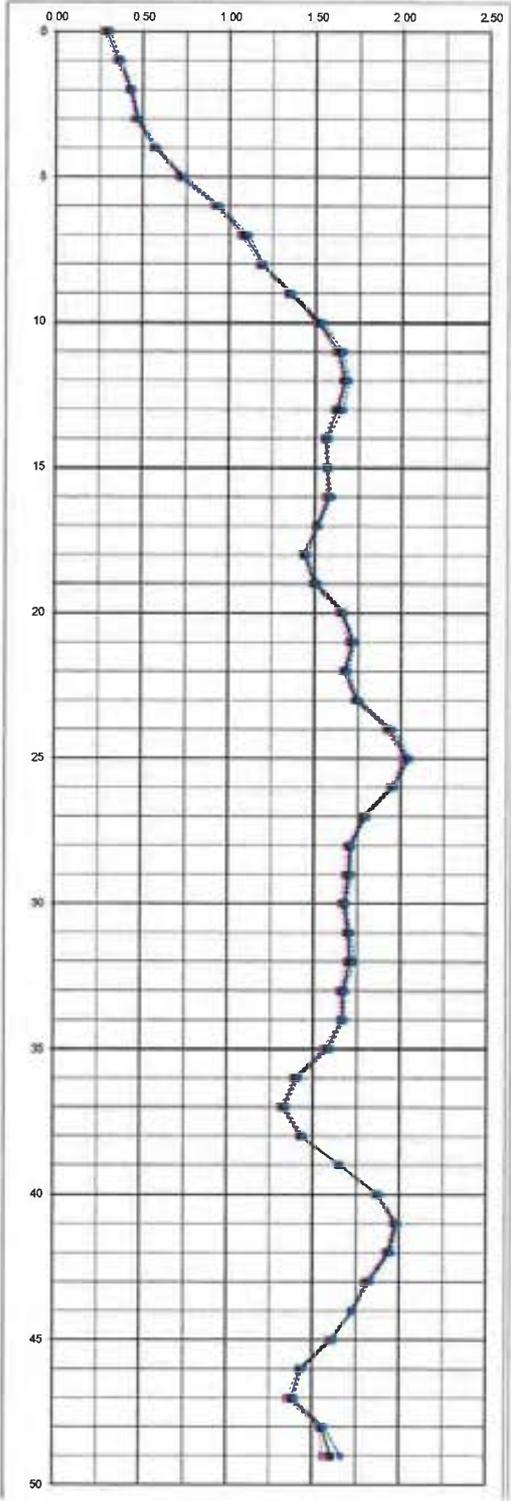
<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
INDAGINE SU TERRENO NATURALE
SHOT a 2.5 m da bocca foro



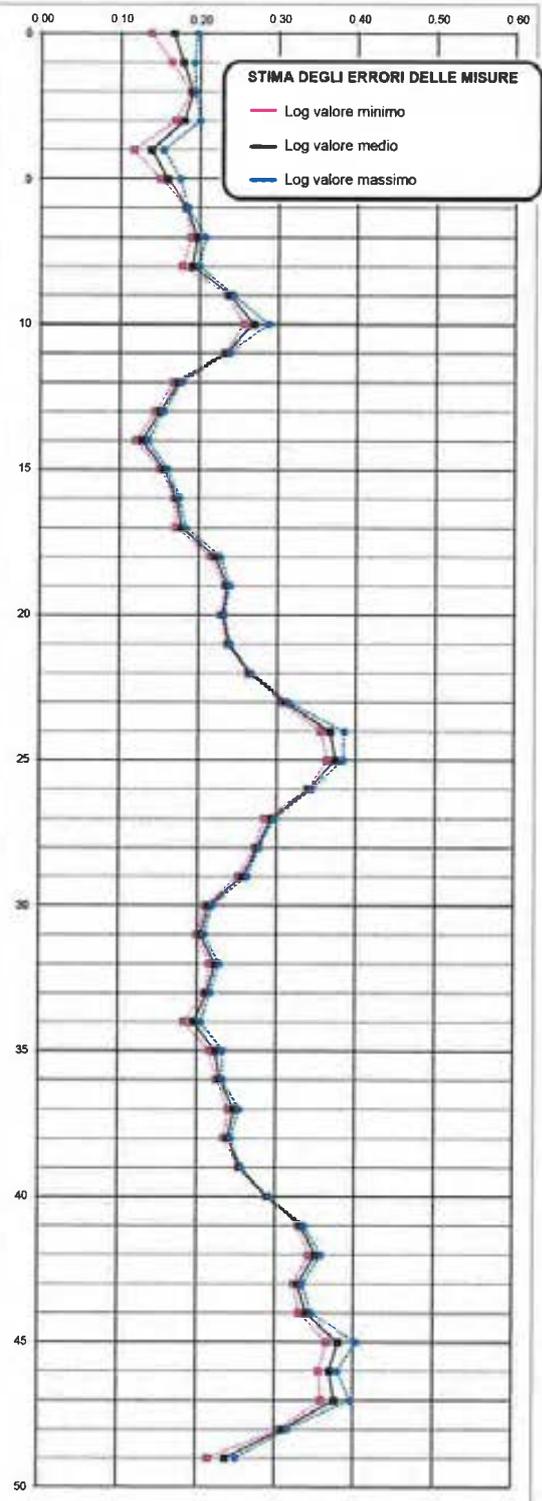
Profondità misura
----------------------

0
1
2
3
4
6
6
7
8
9
10
11
12
13
14
16
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

Velocità onde di compressione (Km/sec)



Velocità onde di taglio (Km/sec)



Stratigrafia  
sintetica



Fig. 4



COMMITTENTE	STUDIO TI
DOWN HOLE	S2
Località - Progetto	Via della Fiera (RN)
Data acquisizione	23/07/2014 Cod. 1301

TABELLA DATI
INDAGINE SU TERRENO NATURALE
SHOT a 2.5 m da bocca foro

Autodologia DH	
Differenziale	
Progressivo	
Falda n.d.	

Profondità meters	Tempi			Vp Km/sec	Vs Km/sec	γ	Edin Tm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²	STRATIGRAFIA	PARAMETRI DINAMICI PER LE COSTRUZIONI					STIMA DELLA SISMICITÀ									
	Shot a m	Shot a m	Shot a m								Vp Km/sec	Vs Km/sec	γ	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	γ	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²			
0	2.3	11.7	0.52	0.20	0.42	1.87	1855	686	3787	0.00-0.10 SOTTILEN ASPHALTO 0.10-0.40 SOTTILEN CEMENTO GRANULI	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.50	0.82	0.95	0.03	0.12	0.26	0.24	0.03
1	3.2	25.1	0.63	0.18	0.46	1.73	1380	464	6366	1.40-1.70 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.60	0.63	0.67	0.03	0.13	0.16	0.18	0.03
2	4.8	38.3	0.74	0.13	0.46	1.79	886	299	9003	1.80-2.10 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.68	0.74	0.79	0.03	0.11	0.13	0.15	0.02
3	5.6	47.9	0.83	0.09	0.49	1.73	424	142	8802	2.10-2.40 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.59	0.83	0.88	0.03	0.08	0.09	0.11	0.00
4	8.3	52.9	0.75	0.09	0.49	1.80	478	160	10215	2.40-2.70 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.75	0.75	0.78	0.02	0.08	0.09	0.11	0.00
5	7.1	68.3	0.83	0.12	0.48	1.87	830	319	15634	2.70-3.00 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.92	0.83	0.83	0.01	0.11	0.12	0.13	0.00
6	7.9	85.2	0.89	0.13	0.49	1.89	988	331	18542	3.00-3.30 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.95	0.89	1.01	0.01	0.11	0.13	0.15	0.00
7	8.8	72.8	1.06	0.13	0.48	1.91	888	330	21138	3.30-3.60 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.05	1.06	1.06	0.06	0.12	0.13	0.14	0.00
8	9.5	77.3	1.08	0.15	0.49	1.92	1205	431	21917	3.60-3.90 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.05	1.06	1.07	0.01	0.14	0.15	0.15	0.00
9	10.7	81.7	1.09	0.20	0.48	1.93	2248	757	23799	3.90-4.20 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.06	1.09	1.10	0.02	0.18	0.20	0.20	0.01
10	11.8	88.2	0.83	0.23	0.47	1.87	2880	809	16764	4.20-4.50 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.93	0.83	0.84	0.01	0.22	0.23	0.24	0.01
11	12.8	89.0	0.87	0.24	0.46	1.84	3105	1064	12887	4.50-4.80 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.96	0.87	0.87	0.03	0.22	0.24	0.25	0.01
12	14.1	83.6	0.85	0.24	0.46	1.84	3241	1114	12015	4.80-5.10 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.83	0.85	0.86	0.01	0.22	0.24	0.26	0.01
13	15.0	88.2	0.89	0.24	0.46	1.85	3205	1007	13829	5.10-5.40 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	0.87	0.89	0.92	0.00	0.23	0.24	0.25	0.00
14	15.7	102.2	1.08	0.24	0.47	1.92	3415	1198	27483	5.40-5.70 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.07	1.08	1.09	0.01	0.24	0.24	0.25	0.00
15	16.2	108.1	1.28	0.24	0.48	1.89	3474	1171	31859	5.70-6.00 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.28	1.28	1.30	0.01	0.23	0.24	0.25	0.00
16	16.9	113.9	1.35	0.22	0.49	2.01	2954	994	36148	6.00-6.30 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.34	1.35	1.38	0.00	0.21	0.22	0.24	0.00
17	18.3	118.1	1.28	0.21	0.49	1.98	2911	878	33963	6.30-6.60 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.24	1.26	1.26	0.00	0.20	0.21	0.22	0.00
18	18.7	122.7	1.24	0.22	0.48	1.97	2884	865	29533	6.60-6.90 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.22	1.24	1.27	0.00	0.22	0.22	0.22	0.00
19	19.2	128.0	1.36	0.23	0.49	2.01	3092	1041	36349	6.90-7.20 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.34	1.36	1.38	0.02	0.22	0.23	0.23	0.00
20	18.8	132.4	1.53	0.23	0.49	2.06	2884	976	47748	7.20-7.50 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.51	1.53	1.58	0.02	0.22	0.23	0.23	0.00
21	20.7	135.7	1.58	0.24	0.49	2.06	3676	1138	49523	7.50-7.80 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.56	1.56	1.57	0.01	0.24	0.24	0.25	0.00
22	21.2	141.2	1.61	0.25	0.49	2.07	3802	1318	52079	7.80-8.10 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.60	1.61	1.63	0.00	0.24	0.25	0.26	0.01
23	21.4	145.8	1.75	0.25	0.49	2.11	3892	1306	64445	8.10-8.40 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.74	1.75	1.77	0.01	0.24	0.26	0.25	0.00
24	22.2	148.9	1.83	0.26	0.49	2.13	4223	1417	70893	8.40-8.70 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.80	1.83	1.85	0.01	0.25	0.26	0.26	0.00
25	22.8	153.4	1.79	0.27	0.49	2.18	4787	1688	88884	8.70-9.00 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.79	1.79	1.80	0.00	0.27	0.27	0.28	0.00
26	23.5	155.8	1.77	0.28	0.49	2.18	5085	1710	88302	9.00-9.30 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.76	1.77	1.78	0.01	0.28	0.28	0.29	0.00
27	23.8	160.3	1.70	0.29	0.49	2.10	5177	1743	88023	9.30-9.60 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.66	1.70	1.73	0.02	0.28	0.28	0.29	0.01
28	24.4	161.2	1.79	0.28	0.49	2.12	4858	1633	86718	9.60-9.90 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.78	1.79	1.79	0.00	0.27	0.28	0.28	0.00
29	25.0	168.7	1.86	0.27	0.49	2.13	4657	1581	73161	9.90-10.20 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.84	1.86	1.87	0.01	0.26	0.27	0.27	0.00
30	25.4	172.5	1.94	0.27	0.49	2.14	4872	1626	77282	10.20-10.50 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.88	1.81	1.92	0.01	0.27	0.27	0.28	0.00
31	25.8	178.8	1.80	0.27	0.49	2.14	4827	1620	78905	10.50-10.80 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.87	1.80	1.93	0.02	0.27	0.27	0.28	0.00
32	26.7	181.6	1.81	0.26	0.49	2.12	4510	1514	68851	10.80-11.10 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.80	1.81	1.83	0.00	0.26	0.26	0.27	0.00
33	27.2	184.4	1.85	0.28	0.49	2.09	4307	1465	56258	11.10-11.40 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.83	1.85	1.88	0.02	0.26	0.26	0.27	0.00
34	27.9	189.5	1.86	0.27	0.49	2.09	4487	1509	51006	11.40-11.70 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.84	1.86	1.87	0.01	0.27	0.27	0.27	0.00
35	28.2	195.1	1.88	0.28	0.49	2.09	4176	1482	88881	11.70-12.00 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.88	1.89	1.89	0.00	0.25	0.28	0.27	0.00
36	28.7	198.0	1.70	0.28	0.49	2.10	4300	1447	60086	12.00-12.30 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.89	1.79	1.74	0.00	0.25	0.26	0.27	0.01
37	30.0	200.8	1.52	0.29	0.46	2.05	5085	1716	45894	12.30-12.60 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.51	1.52	1.52	0.00	0.25	0.26	0.29	0.00
38	30.8	204.8	1.40	0.30	0.48	2.02	5522	1871	87086	12.60-12.90 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.38	1.40	1.44	0.03	0.29	0.30	0.31	0.01
39	31.0	207.2	1.42	0.31	0.47	2.02	5859	1886	38610	12.90-13.20 LIMO ARGILLOSO con noduli argilla massiccia	0.83	0.48	0.48	1.73	1988	473	8542	1.39	1.42	1.43	0.00	0.30	0.31	0.33	0.01

<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
Località
Data acquisizione

<b>STUDIO TI</b>
<b>S2</b>
Via della Fiera (RN)
23/01/2014

LOG DEI PARAMETRI ELASTICI
INDAGINE SU TERRENO NATURALE
SHOT a 2.5 m da bocca foro



3 di 3

Stratigrafia sintetica

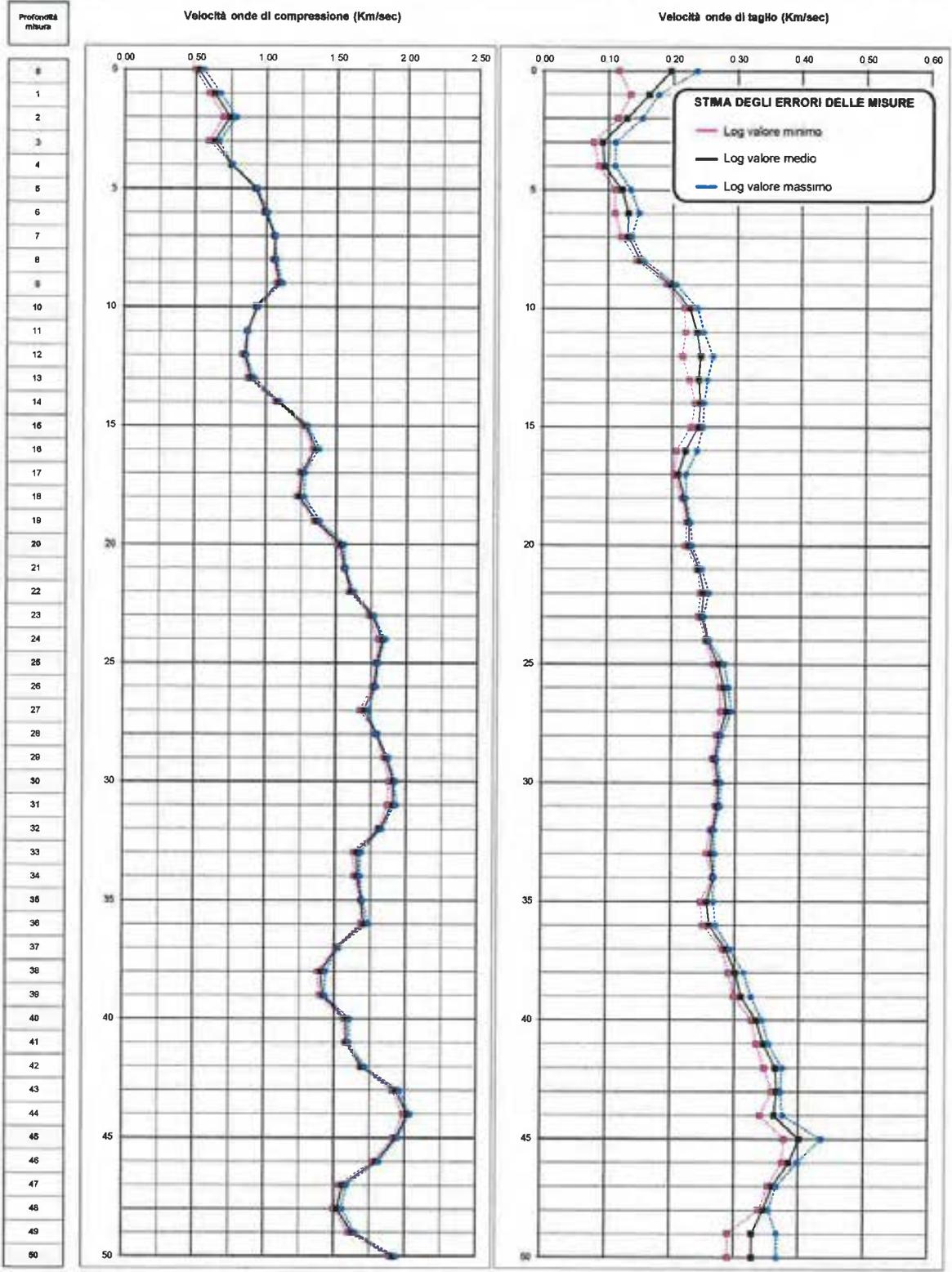
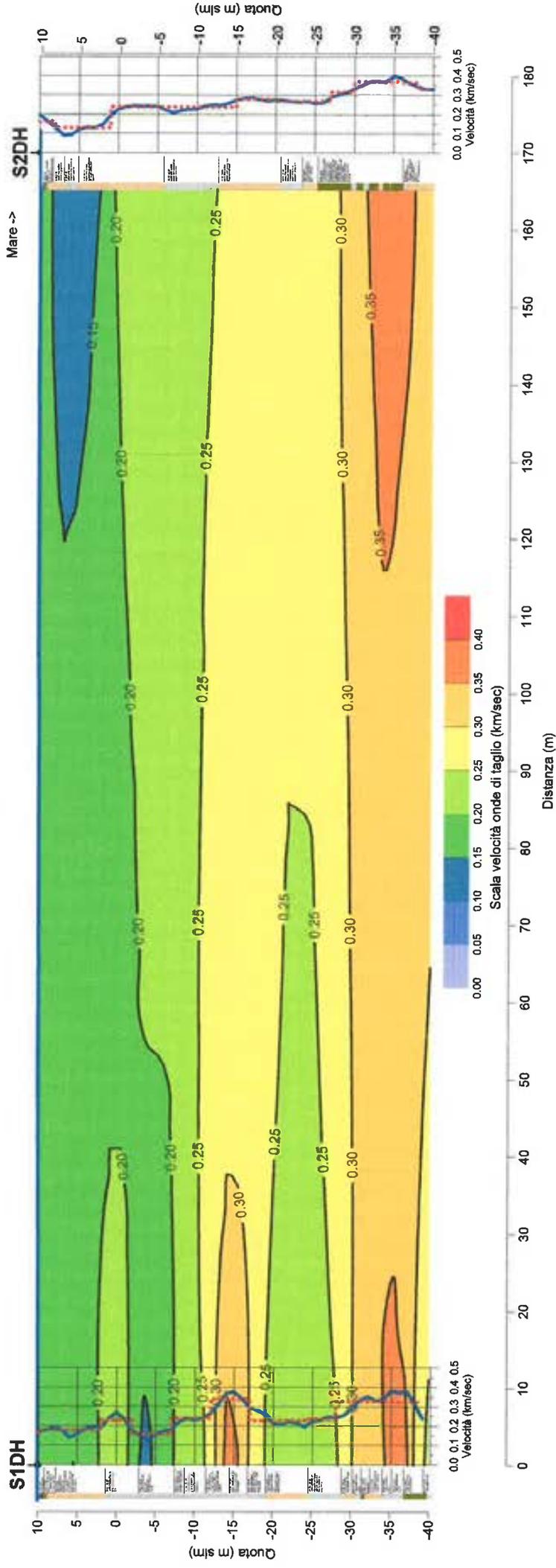


Fig. 7



Sezione sismica in Vs ottenuta interpolando i dati relativi alle prove Down Hole

### SEZIONE SISMICA [Velocità onde di taglio]



File: 1391- Sezione sismica da Down Hole.srf

Fig. 8

Scala 1:500

---

---

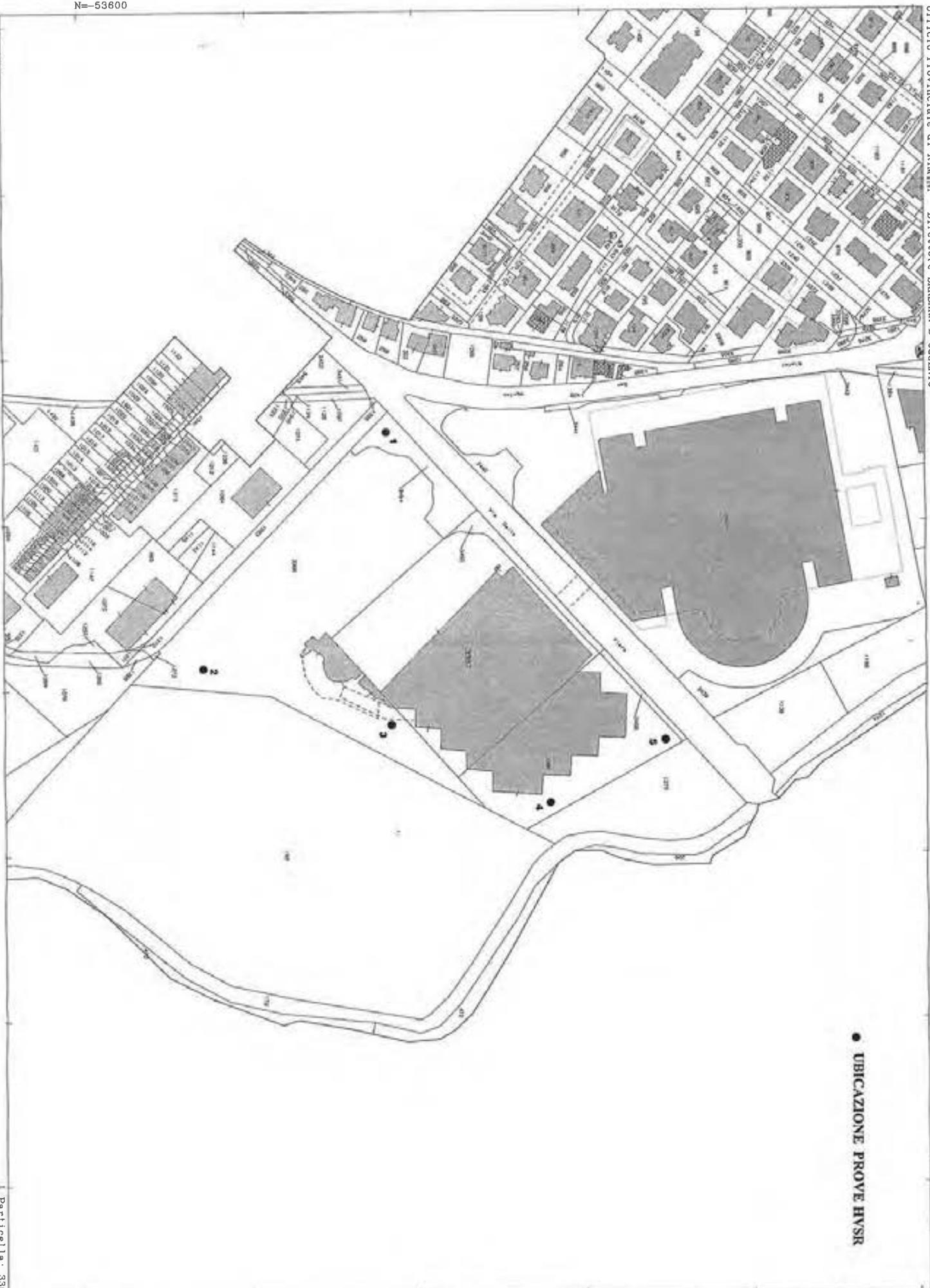
**ALLEGATO**

---

---

**Planimetria catastale scala 1 : 2000 con ubicazione prove HVSR**





● UBICAZIONE PROVE HVSIR

---

**ALLEGATO**

---

**Elaborati grafici indagini HVSR**



## **INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE TECNICA DEI RAPPORTI SPETTRALI o HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio)**

La finalità dell'indagine è la caratterizzazione sismica del sottosuolo e l'individuazione delle discontinuità sismiche e la profondità della formazione rocciosa compatta (bedrock geofisico). Con tale metodo viene stimata la propagazione delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) così come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-.

La tecnica HVSR è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di alcun tipo di perforazione, né stendimento di cavi, né energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

I risultati ottenibili da una siffatta registrazione 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 in quanto si dovranno adottare precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione per evitare l'effetto "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;

**la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio** qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. Successivamente sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;

**La velocità media delle onde di taglio  $V_{S30}$**  calcolate tramite un apposito codice di calcolo: E' necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc...) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{S30}$  e la relativa categoria del sottosuolo di fondazione come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-;

**La stratigrafia del sottosuolo** con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 mt. di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), ha raggiunto la sua massima popolarità in Giappone già nei primi anni '70 come strumento per una microzonazione sismica speditivi.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri sismici del rumore di sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) applicata da Nogoshi e Igarashi (1971).

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti di sito.

La tecnica proposta da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione delle discontinuità sismiche presenti nel sottosuolo, assume che i microtremiti (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrastante su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologia combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca **SESAME** (2005) - (Site Effects assessment using **AM**ambient **EX**citations) che si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola ed array ed a questo si rimanda per le sopra citate linee guida della tecnica H/V spectral ratio.

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni sui terreni d'indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

### - Basi teoriche

Le basi teoriche dell' HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio) in un sistema stratificato in cui I parametric variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice.

Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ).

Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1} / (4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{S1} / (4h)$$

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, 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 degli spettri orizzontali e quello verticale piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce una importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumori di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti dalle onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolari da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità delle onde di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

L'applicabilità pratica della semplice formula sopra riportata relativa alle onde S è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica sia nell'ambito ingegneristico.

Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

## **- Attrezzature e modalità**

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcuno strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né accelerometri sismologici.

Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale > 20 sec. In quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.

Indicativamente, la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e dalla rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E ed W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza di edifici, vento, ecc.... in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta del sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

- Trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza (<1-2 Hz);
- Amplificatori;
- Digitalizzatore;
- Frequenza di campionamento: > 50 Hz;
- Convertitore A/D (analogico/digitale) a 24 bit;
- Durata di registrazione: > 10 minuti;
- Collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

## **- Elaborazione dati**

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200 – 400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. operatore di smoothing (Konno & Ohmachi);
3. merging dei componenti orizzontali;
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata (>10);

## 5. valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di  $f_0$  – Frequenza/e di risonanza e la sue deviazione standard.

Il risultato finale della prova presenta:

- 1) i criteri di attendibilità della misura;
- 2) i criteri di validità del picco di  $f_0$ ;
- 3) i valori di soglia delle condizioni di stabilità;
- 4) l'analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alle frequenze del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
- 5) l'interpretazione di  $f_0$  e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Per gli scopi e finalità dell'indagine le misure di HVSR offrono la possibilità di determinare:

- 1). Valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alla frequenza di risonanza;
- 2). Spessori della coltre di copertura.

### - Frequenze

Per quanto riguarda la mappatura delle frequenze principali di risonanza, tale elaborazione permette di valutare il grado di omogeneità sulla risposta di sito relativamente alle frequenze dei materiali.

L'analisi di queste permette di definire il campo delle frequenze significative di risonanza da utilizzare direttamente nella progettazione degli edifici.

### - Spessori

L'assunzione di base è che, per un modello di suolo monodimensionale (stratificazione piana e parallela) costituito da sedimenti soffici sovrastanti il substrato, la frequenza di risonanza  $f_r$  dovuta alla propagazione di onde S incidenti perpendicolarmente la base del substrato è data dalla relazione:

$$T = \frac{4 * \sum_{I=1}^n h_i}{\sum_{I=1}^n V_{s_i} * h_i}$$
$$\frac{\sum_{I=1}^n h_i}{I=1}$$

Dove  $h$  è lo spessore dello strato dei sedimenti e  $V_s$  dipende dalla velocità delle onde di taglio nel suo interno.

In base a tale relazione quindi, a partire da valori misurati di  $f_r$  e  $V_s$ , ricavati, è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia, non essendo sempre presente la misura di  $V_s$  come profilo sismico fino al bedrock geofisico, allora si può far riferimento alla relazione di Ibs-Von Seht e Wohlemborg (1999).

Poiché l'andamento del log in  $V_s$  in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidità al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire da valori di  $V_s$  per la porzione più superficiale del terreno, è possibile

estrapolare l'andamento delle  $V_s$  a profondità più elevate tramite l'impiego di relazioni empiriche.

A questo scopo Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999) suggeriscono la seguente funzione:

$$V_s = V_0 (1 + Z)^a$$

dove  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato ed "a" un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc...).

Questa relazione, combinata con la precedente, consente infatti la stima dello spessore della coltre di sedimenti soffici:

$$Z = \frac{V_0 (1-a)^{1/(1-a)}}{4 f_r} + 1 - 1$$

Nei casi più complessi è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli teorici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

#### **- Vantaggi della caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica HVSR**

Onde consentire una resa chiara ed immediata della tecnica HVSR, di seguito vengono elencati in maniera sintetica i principali vantaggi derivanti dal confronto con altre metodologie d'indagine.

- Consente una veloce acquisizione dati in un lasso di tempo relativamente ristretto (max. 20 minuti);
- Permette di raggiungere elevate profondità d'indagine indipendentemente dalla natura dei terreni (fino 50 ÷ 70 mt. ad alta risoluzione);
- Consente di evidenziare lo spessore di alterato / fratturato della roccia;
- Non risente della eventuale presenza d'acqua (a varia concentrazione di sali) a differenza di quanto avviene con il metodo geoelettrico;
- Individua ed analizza le inversioni di velocità a differenza della sismica a rifrazione.

Si riportano inoltre i vantaggi derivanti dall'utilizzo di tomografi digitali:

- Estrema semplicità di utilizzo;
- Possibilità di equipaggiare lo strumento con GPS integrato; Elevato numero di misure registrabili nella memoria interna (circa 150);
- Sensori allocati internamente allo strumento (operatività quindi in assenza di geofoni esterni);
- La possibilità di trasferire dati tramite software specifico dall'acquisitore ad un personal computer con controllo in tempo reale delle misurazioni eseguite;
- La possibilità di svolgere in contemporanea il lavoro interpretativo con la raccolta dati, consente di velocizzare i tempi di consegna del lavoro.

## **Indagine sismica passiva a stazione singola – Località: RIMINI –RN - Via della Fiera -1.**

Inizio registrazione: 10.01.2014 ore 15:02:03 - Fine registrazione: 10.01.2014 ore 15:22:03

Durata registrazione: 0h20'00"

Analizzato 100 % tracciato (selezione manuale)

Frequenza di campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s.

Tipo di lisciamiento: Triangular window

Lisciamiento: 11 %.

Con la determinazione delle onde di taglio  $V_s$  i terreni indagati vengono inseriti in una delle seguenti categorie del sottosuolo (N.T.C. 2008- Tabella 3.2.II e Tabella 3.2.III):

### **Categorie di sottosuolo**

- A- **Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  superiori a 800 m/s comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 metri;
- B- **Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti**, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{SPT} > 50$ , o coesione non drenata  $c_u > 250$  kPa);
- C- **Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensati o di argille di media consistenza** con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 180 e 360 m/s ( $15 < N_{SPT} < 50$ ;  $70 < c_u < 250$  kPa);
- D- **Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti**, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 180$  m/s ( $N_{SPT} < 15$ ;  $c_u < 70$  kPa);
- E- **Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali** con valori di  $V_{S30}$  simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 mt. giacenti su di un substrato di materiale più rigido con  $V_{S30} > 800$  m/s.

### **Categorie aggiuntive di sottosuolo.**

**S1-** Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 mt. di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ( $IP > 40$ ) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 100$  m/s ( $10 < c_u < 20$  kPa);

**S2-** depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

Dall'analisi dell'indagine HVSR si può affermare che il sito è caratterizzato da una velocità delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) di 381 m/s, corrispondente ad un terreno di **tipo C**:

<b>Profondità alla base dello strato (mt.)</b>	<b>Spessore (mt.)</b>	<b><math>V_s</math> (m/s)</b>
0.50	0.50	110
18.00	17.50	180
121.00	103.00	280
Inf.	Inf.	490

## RIMINI, VIA DELLA FIERA -1-

Strumento: TRZ-0129/01-10

Inizio registrazione: 10/01/14 15:02:03 Fine registrazione: 10/01/14 15:22:03

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

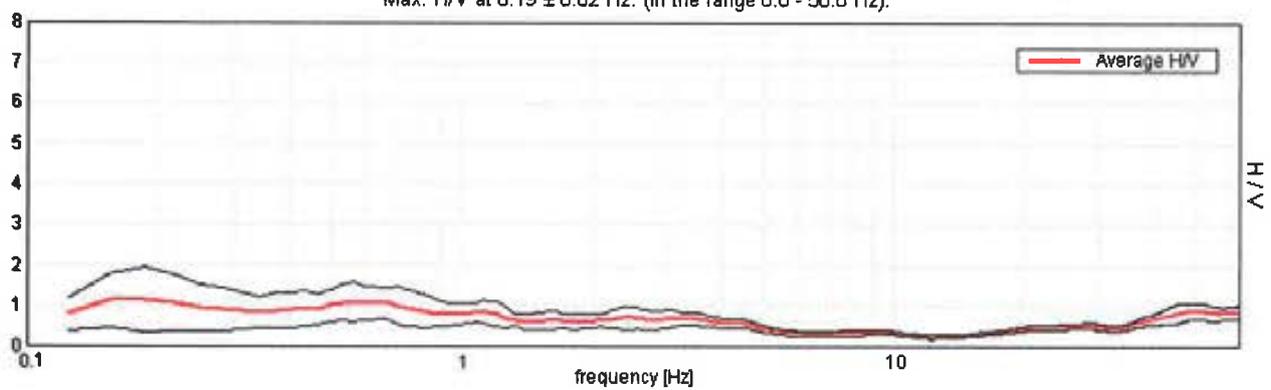
Lunghezza finestre: 24 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

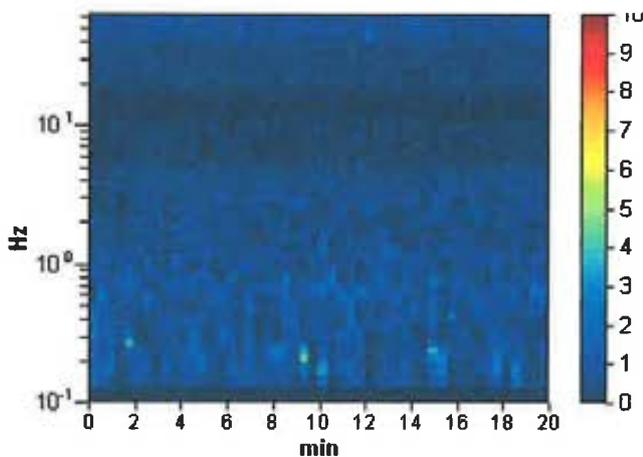
Lisciamento: 11%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

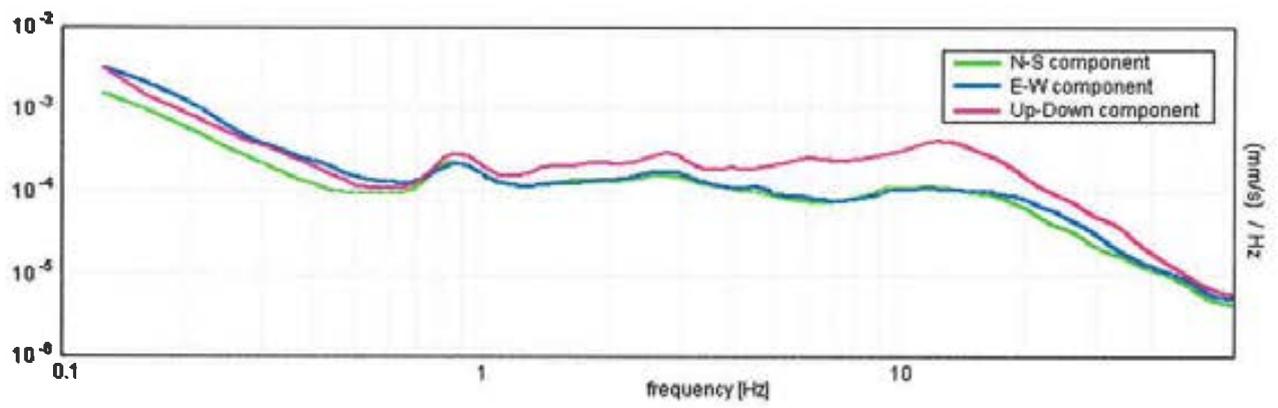
Max. H/V at  $0.19 \pm 0.02$  Hz. (In the range 0.0 - 50.0 Hz).



### SERIE TEMPORALE H/V

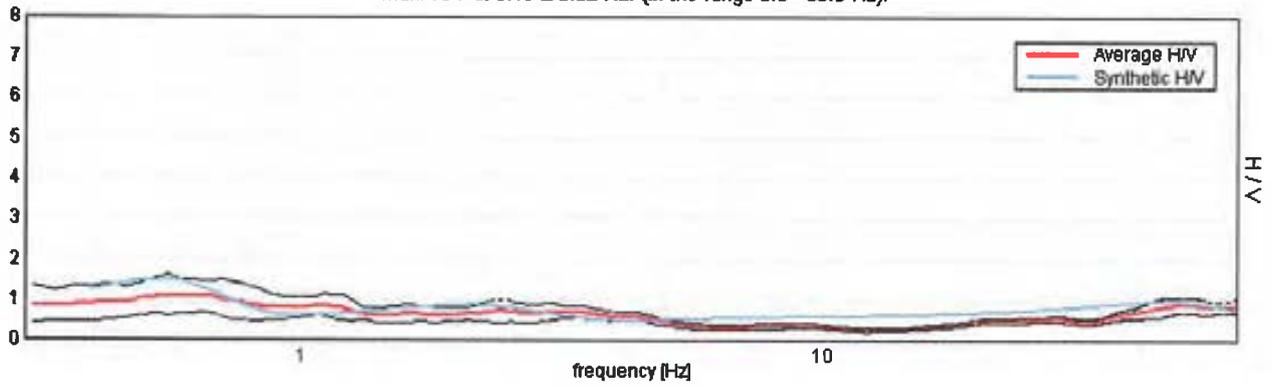


### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



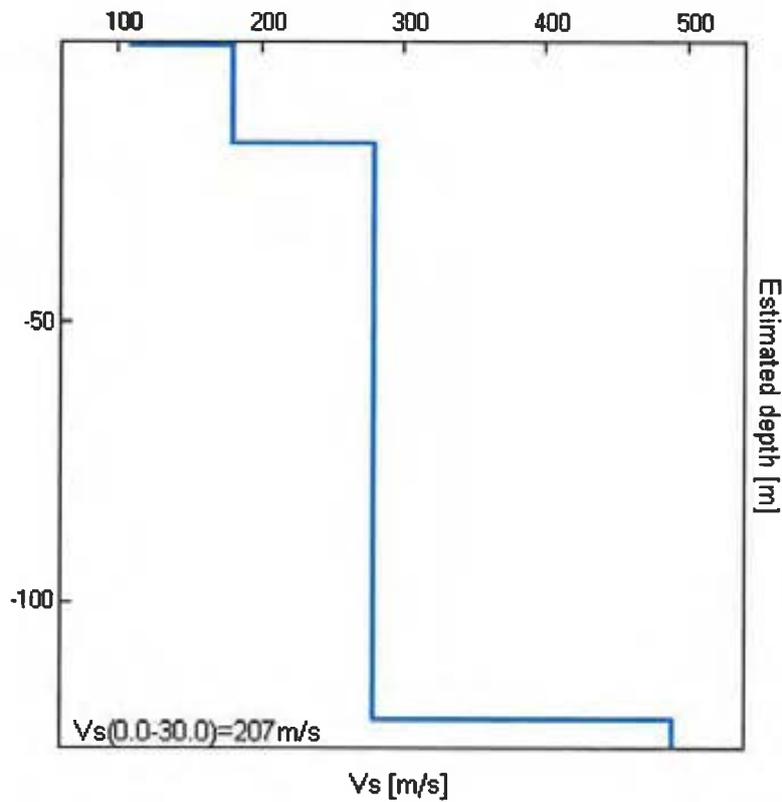
**H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO**

Max. H/V at  $0.19 \pm 0.02$  Hz. (In the range 0.0 - 50.0 Hz).



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.50	0.50	110	0.35
18.00	17.50	180	0.35
121.00	103.00	280	0.35
inf.	inf.	490	0.35

Vs(0.0-30.0)=207m/s



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

**Picco H/V a  $0.19 \pm 0.02$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).**

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

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.49 > 0.42$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$225.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 10	OK	

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

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.094 Hz	OK	
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$2.15 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.04865  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.00912 < 0.04688$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3906 < 3.0$	OK	

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

**Valori di soglia per  $\sigma_f$  e  $\sigma_A(f_0)$**

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

## **INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE TECNICA DEI RAPPORTI SPETTRALI o HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio)**

La finalità dell'indagine è la caratterizzazione sismica del sottosuolo e l'individuazione delle discontinuità sismiche e la profondità della formazione rocciosa compatta (bedrock geofisico). Con tale metodo viene stimata la propagazione delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) così come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-.

La tecnica HVSR è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di alcun tipo di perforazione, né stendimento di cavi, né energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

I risultati ottenibili da una siffatta registrazione 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 in quanto si dovranno adottare precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione per evitare l'effetto "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;

**la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio** qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. Successivamente sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;

**La velocità media delle onde di taglio  $V_{S30}$**  calcolate tramite un apposito codice di calcolo: E' necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc...) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{S30}$  e la relativa categoria del sottosuolo di fondazione come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-;

**La stratigrafia del sottosuolo** con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 mt. di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), ha raggiunto la sua massima popolarità in Giappone già nei primi anni '70 come strumento per una microzonazione sismica speditivi.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri sismici del rumore di sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) applicata da Nogoshi e Igarashi (1971).

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti di sito.

La tecnica proposta da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione delle discontinuità sismiche presenti nel sottosuolo, assume che i microtremiti (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrastante su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologica combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca **SESAME** (2005) - (Site EffectS assessment using **AM**ambient **EX**citations) che si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola ed array ed a questo si rimanda per le sopra citate linee guida della tecnica H/V spectral ratio.

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni sui terreni d'indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

### - Basi teoriche

Le basi teoriche dell' HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio) in un sistema stratificato in cui I parametric variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice.

Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ).

Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1} / (4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{S1} / (4h)$$

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, 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 degli spettri orizzontali e quello verticale piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce una importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumori di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti dalle onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolari da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità delle onde di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

L'applicabilità pratica della semplice formula sopra riportata relativa alle onde S è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica sia nell'ambito ingegneristico.

Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

## **- Attrezzature e modalità**

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcuno strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né accelerometri sismologici.

Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale > 20 sec. In quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.

Indicativamente, la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e dalla rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E ed W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza di edifici, vento, ecc.... in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta del sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

- Trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza (<1-2 Hz);
- Amplificatori;
- Digitalizzatore;
- Frequenza di campionamento: > 50 Hz;
- Convertitore A/D (analogico/digitale) a 24 bit;
- Durata di registrazione: > 10 minuti;
- Collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

## **- Elaborazione dati**

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMBient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200 – 400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. operatore di smoothing (Konno & Ohmachi);
3. merging dei componenti orizzontali;
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata (>10);

## 5. valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di  $f_0$  – Frequenza/e di risonanza e la sue deviazione standard.

Il risultato finale della prova presenta:

- 1) i criteri di attendibilità della misura;
- 2) i criteri di validità del picco di  $f_0$ ;
- 3) i valori di soglia delle condizioni di stabilità;
- 4) l'analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alle frequenze del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
- 5) l'interpretazione di  $f_0$  e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Per gli scopi e finalità dell'indagine le misure di HVSR offrono la possibilità di determinare:

- 1). Valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alla frequenza di risonanza;
- 2). Spessori della coltre di copertura.

### - Frequenze

Per quanto riguarda la mappatura delle frequenze principali di risonanza, tale elaborazione permette di valutare il grado di omogeneità sulla risposta di sito relativamente alle frequenze dei materiali.

L'analisi di queste permette di definire il campo delle frequenze significative di risonanza da utilizzare direttamente nella progettazione degli edifici.

### - Spessori

L'assunzione di base è che, per un modello di suolo monodimensionale (stratificazione piana e parallela) costituito da sedimenti soffici sovrastanti il substrato, la frequenza di risonanza  $f_r$  dovuta alla propagazione di onde S incidenti perpendicolarmente la base del substrato è data dalla relazione:

$$T = \frac{4 * \sum_{I=1}^n h_i}{\sum_{I=1}^n V_{s_i} * h_i}$$

Dove  $h$  è lo spessore dello strato dei sedimenti e  $V_s$  dipende dalla velocità delle onde di taglio nel suo interno.

In base a tale relazione quindi, a partire da valori misurati di  $f_r$  e  $V_s$ , ricavati, è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia, non essendo sempre presente la misura di  $V_s$  come profilo sismico fino al bedrock geofisico, allora si può far riferimento alla relazione di Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999).

Poiché l'andamento del log in  $V_s$  in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidità al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire da valori di  $V_s$  per la porzione più superficiale del terreno, è possibile

estrapolare l'andamento delle  $V_s$  a profondità più elevate tramite l'impiego di relazioni empiriche.

A questo scopo Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999) suggeriscono la seguente funzione:

$$V_s = V_0 (1 + Z)^a$$

dove  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato ed "a" un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc...).

Questa relazione, combinata con la precedente, consente infatti la stima dello spessore della coltre di sedimenti soffici:

$$Z = \frac{V_0 (1-a)^{1/(1-a)}}{4 f_r} + 1 - 1$$

Nei casi più complessi è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli teorici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

#### **- Vantaggi della caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica HVSR**

Onde consentire una resa chiara ed immediata della tecnica HVSR, di seguito vengono elencati in maniera sintetica i principali vantaggi derivanti dal confronto con altre metodologie d'indagine.

- Consente una veloce acquisizione dati in un lasso di tempo relativamente ristretto (max. 20 minuti);
- Permette di raggiungere elevate profondità d'indagine indipendentemente dalla natura dei terreni (fino 50 ÷ 70 mt. ad alta risoluzione);
- Consente di evidenziare lo spessore di alterato / fratturato della roccia;
- Non risente della eventuale presenza d'acqua (a varia concentrazione di sali) a differenza di quanto avviene con il metodo geoelettrico;
- Individua ed analizza le inversioni di velocità a differenza della sismica a rifrazione.

Si riportano inoltre i vantaggi derivanti dall'utilizzo di tomografi digitali:

- Estrema semplicità di utilizzo;
- Possibilità di equipaggiare lo strumento con GPS integrato; Elevato numero di misure registrabili nella memoria interna (circa 150);
- Sensori allocati internamente allo strumento (operatività quindi in assenza di geofoni esterni);
- La possibilità di trasferire dati tramite software specifico dall'acquisitore ad un personal computer con controllo in tempo reale delle misurazioni eseguite;
- La possibilità di svolgere in contemporanea il lavoro interpretativo con la raccolta dati, consente di velocizzare i tempi di consegna del lavoro.

## **Indagine sismica passiva a stazione singola – Località: RIMINI –RN - Via della Fiera -2.**

Inizio registrazione: 10.01.2014 ore 15:27:06 - Fine registrazione: 10.01.2014 ore 15:47:06

Durata registrazione: 0h20'00"

Analizzato 98 % tracciato (selezione manuale)

Frequenza di campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s.

Tipo di lisciamiento: Triangular window

Lisciamiento: 14 %.

Con la determinazione delle onde di taglio  $V_s$  i terreni indagati vengono inseriti in una delle seguenti categorie del sottosuolo (N.T.C. 2008- Tabella 3.2.II e Tabella 3.2.III):

### **Categorie di sottosuolo**

- A- **Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  superiori a 800 m/s comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 metri;
- B- **Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti**, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{SPT} > 50$ , o coesione non drenata  $c_u > 250$  kPa);
- C- **Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensati o di argille di media consistenza** con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 180 e 360 m/s ( $15 < N_{SPT} < 50$ ;  $70 < c_u < 250$  kPa);
- D- **Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti**, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 180$  m/s ( $N_{SPT} < 15$ ;  $c_u < 70$  kPa);
- E- **Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali** con valori di  $V_{S30}$  simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 mt. giacenti su di un substrato di materiale più rigido con  $V_{S30} > 800$  m/s.

### **Categorie aggiuntive di sottosuolo.**

**S1-** Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 mt. di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ( $IP > 40$ ) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 100$  m/s ( $10 < c_u < 20$  kPa);

**S2-** depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

Dall'analisi dell'indagine HVSR si può affermare che il sito è caratterizzato da una velocità delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) di 381 m/s, corrispondente ad un terreno di **tipo C**:

<b>Profondità alla base dello strato (mt.)</b>	<b>Spessore (mt.)</b>	<b><math>V_s</math> (m/s)</b>
0.60	0.60	110
22.60	22.00	200
162.60	140.00	340
Inf.	Inf.	650

## RIMINI, VIA DELLA FIERA -2-

Strumento: TRZ-0129/01-10

Inizio registrazione: 10/01/14 15:27:06 Fine registrazione: 10/01/14 15:47:06

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 98% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

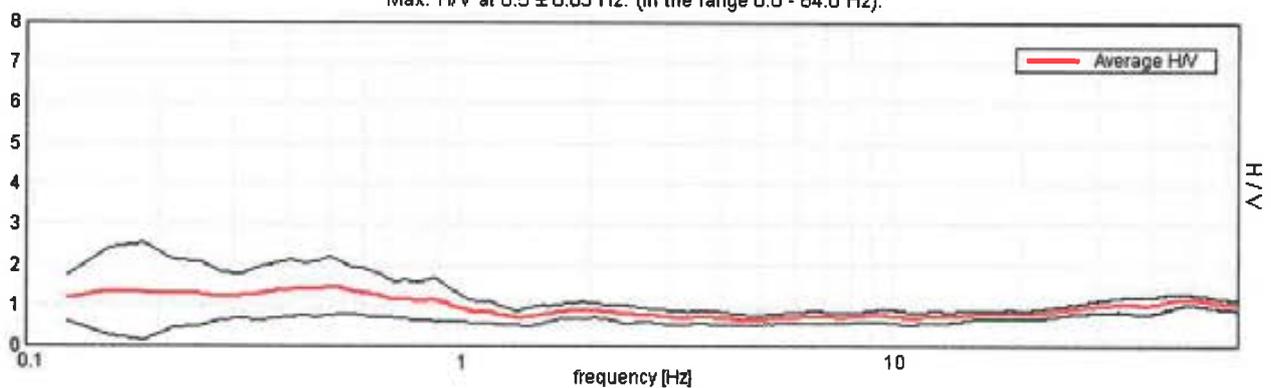
Lunghezza finestre: 25 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

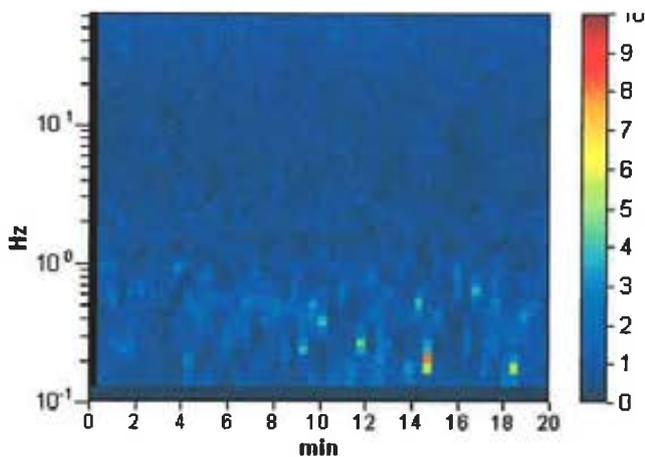
Lisciamento: 14%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

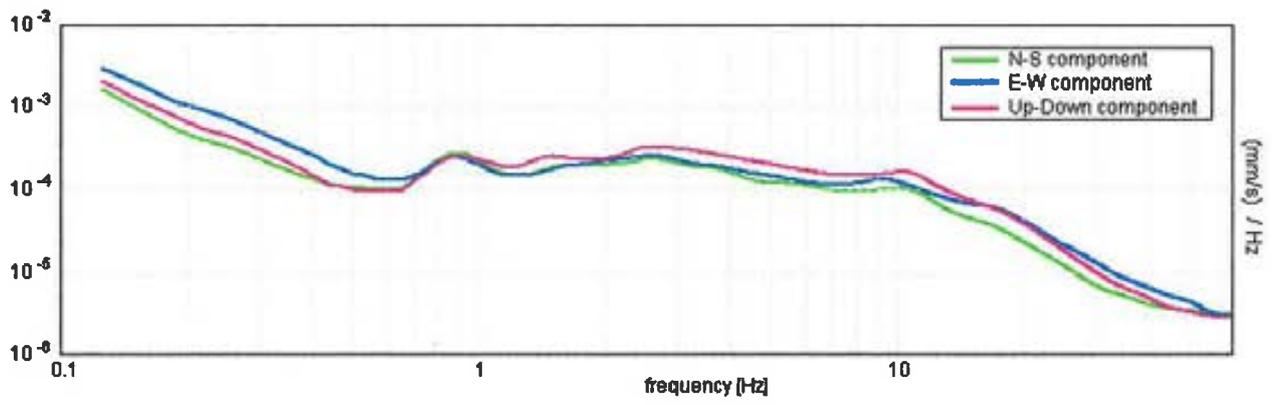
Max. H/V at  $0.5 \pm 0.03$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



### SERIE TEMPORALE H/V

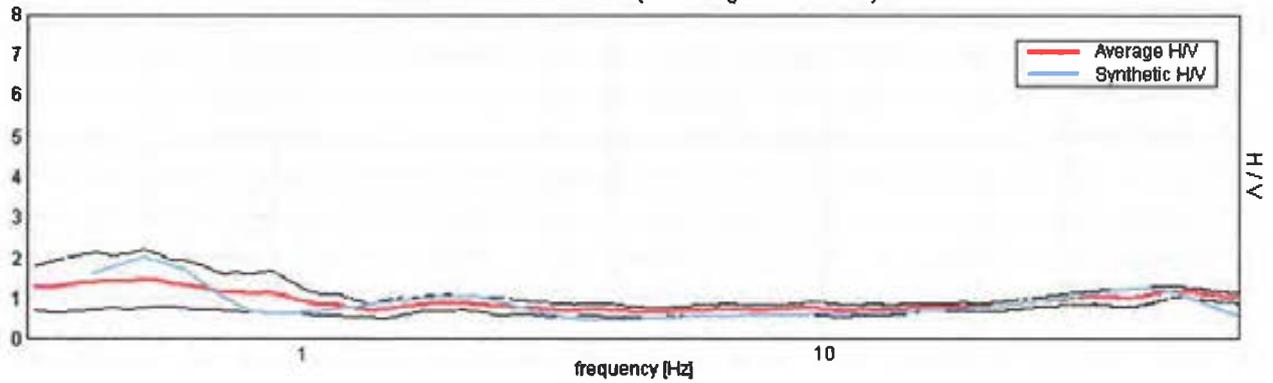


### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



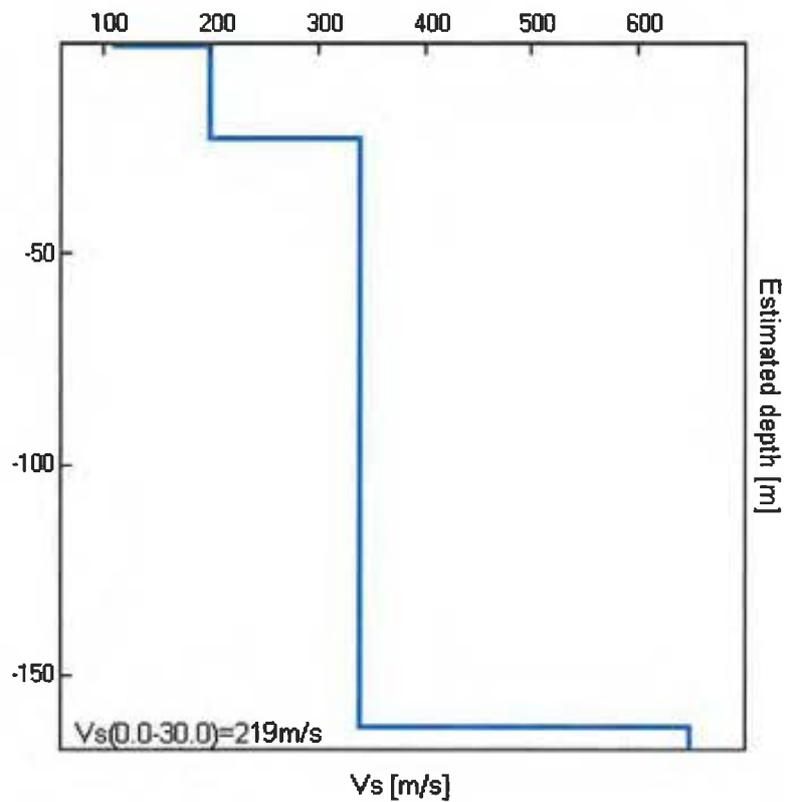
**H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO**

Max. H/V at  $0.5 \pm 0.03$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.60	0.60	110	0.35
22.60	22.00	200	0.35
162.60	140.00	340	0.35
inf.	inf.	650	0.35

Vs(0.0-30.0)=219m/s



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

**Picco H/V a  $0.5 \pm 0.03$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

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

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.50 > 0.40$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$587.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 25	OK	

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

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

<b>Esiste <math>f^-</math> in <math>[f_0/4, f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^-) &lt; A_0 / 2</math></b>			<b>NO</b>
<b>Esiste <math>f^+</math> in <math>[f_0, 4f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^+) &lt; A_0 / 2</math></b>	1.313 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.05 > 2$	OK	
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03265  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01633 < 0.075$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3581 < 2.0$	OK	

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

**Valori di soglia per  $\sigma_f$  e  $\sigma_A(f_0)$**

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

## **INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE TECNICA DEI RAPPORTI SPETTRALI o HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio)**

La finalità dell'indagine è la caratterizzazione sismica del sottosuolo e l'individuazione delle discontinuità sismiche e la profondità della formazione rocciosa compatta (bedrock geofisico). Con tale metodo viene stimata la propagazione delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) così come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-.

La tecnica HVSR è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di alcun tipo di perforazione, né stendimento di cavi, né energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

I risultati ottenibili da una siffatta registrazione 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 in quanto si dovranno adottare precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione per evitare l'effetto "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;

**la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio** qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. Successivamente sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;

**La velocità media delle onde di taglio  $V_{S30}$**  calcolate tramite un apposito codice di calcolo: E' necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc...) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{S30}$  e la relativa categoria del sottosuolo di fondazione come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-;

**La stratigrafia del sottosuolo** con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 mt. di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), ha raggiunto la sua massima popolarità in Giappone già nei primi anni '70 come strumento per una microzonazione sismica speditivi.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri sismici del rumore di sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) applicata da Nogoshi e Igarashi (1971).

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti di sito.

La tecnica proposta da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione delle discontinuità sismiche presenti nel sottosuolo, assume che i microtremiti (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrastante su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologia combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca **SESAME** (2005) - (Site EffectS assessment using **AM**ambient **EX**citations) che si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola ed array ed a questo si rimanda per le sopra citate linee guida della tecnica H/V spectral ratio.

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni sui terreni d'indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

### - Basi teoriche

Le basi teoriche dell' HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio) in un sistema stratificato in cui I parametric variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice.

Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ).

Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1} / (4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{S1} / (4h)$$

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, 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 degli spettri orizzontali e quello verticale piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce una importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumori di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti dalle onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolari da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità delle onde di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

L'applicabilità pratica della semplice formula sopra riportata relativa alle onde S è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica sia nell'ambito ingegneristico.

Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

## **- Attrezzature e modalità**

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcuno strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né accelerometri sismologici.

Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale  $> 20$  sec. In quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.

Indicativamente, la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e dalla rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E ed W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza di edifici, vento, ecc.... in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta del sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

- Trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza ( $<1-2$  Hz);
- Amplificatori;
- Digitalizzatore;
- Frequenza di campionamento:  $> 50$  Hz;
- Convertitore A/D (analogico/digitale) a 24 bit;
- Durata di registrazione:  $> 10$  minuti;
- Collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

## **- Elaborazione dati**

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMBient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200 – 400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. operatore di smoothing (Konno & Ohmachi);
3. merging dei componenti orizzontali;
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata ( $>10$ );

## 5. valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di  $f_0$  – Frequenza/e di risonanza e la sue deviazione standard.

Il risultato finale della prova presenta:

- 1) i criteri di attendibilità della misura;
- 2) i criteri di validità del picco di  $f_0$ ;
- 3) i valori di soglia delle condizioni di stabilità;
- 4) l'analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alle frequenze del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
- 5) l'interpretazione di  $f_0$  e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Per gli scopi e finalità dell'indagine le misure di HVSR offrono la possibilità di determinare:

- 1). Valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alla frequenza di risonanza;
- 2). Spessori della coltre di copertura.

### - Frequenze

Per quanto riguarda la mappatura delle frequenze principali di risonanza, tale elaborazione permette di valutare il grado di omogeneità sulla risposta di sito relativamente alle frequenze dei materiali.

L'analisi di queste permette di definire il campo delle frequenze significative di risonanza da utilizzare direttamente nella progettazione degli edifici.

### - Spessori

L'assunzione di base è che, per un modello di suolo monodimensionale (stratificazione piana e parallela) costituito da sedimenti soffici sovrastanti il substrato, la frequenza di risonanza  $f_r$  dovuta alla propagazione di onde S incidenti perpendicolarmente la base del substrato è data dalla relazione:

$$T = \frac{4 * \sum_{I=1}^n h_i}{\sum_{I=1}^n V_{S_i} * h_i}$$
$$\frac{\sum_{I=1}^n h_i}{I=1}$$

Dove  $h$  è lo spessore dello strato dei sedimenti e  $V_s$  dipende dalla velocità delle onde di taglio nel suo interno.

In base a tale relazione quindi, a partire da valori misurati di  $f_r$  e  $V_s$ , ricavati, è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia, non essendo sempre presente la misura di  $V_s$  come profilo sismico fino al bedrock geofisico, allora si può far riferimento alla relazione di Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999).

Poiché l'andamento del log in  $V_s$  in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidità al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire da valori di  $V_s$  per la porzione più superficiale del terreno, è possibile

estrapolare l'andamento delle  $V_s$  a profondità più elevate tramite l'impiego di relazioni empiriche.

A questo scopo Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999) suggeriscono la seguente funzione:

$$V_s = V_0 (1 + Z)^a$$

dove  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato ed "a" un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc...).

Questa relazione, combinata con la precedente, consente infatti la stima dello spessore della coltre di sedimenti soffici:

$$Z = \frac{V_0 (1-a)^{1/(1-a)}}{4 f_r} + 1 - 1$$

Nei casi più complessi è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli teorici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

#### **- Vantaggi della caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica HVSR**

Onde consentire una resa chiara ed immediata della tecnica HVSR, di seguito vengono elencati in maniera sintetica i principali vantaggi derivanti dal confronto con altre metodologie d'indagine.

- Consente una veloce acquisizione dati in un lasso di tempo relativamente ristretto (max. 20 minuti);
- Permette di raggiungere elevate profondità d'indagine indipendentemente dalla natura dei terreni (fino 50 ÷ 70 mt. ad alta risoluzione);
- Consente di evidenziare lo spessore di alterato / fratturato della roccia;
- Non risente della eventuale presenza d'acqua (a varia concentrazione di sali) a differenza di quanto avviene con il metodo geoelettrico;
- Individua ed analizza le inversioni di velocità a differenza della sismica a rifrazione.

Si riportano inoltre i vantaggi derivanti dall'utilizzo di tomografi digitali:

- Estrema semplicità di utilizzo;
- Possibilità di equipaggiare lo strumento con GPS integrato; Elevato numero di misure registrabili nella memoria interna (circa 150);
- Sensori allocati internamente allo strumento (operatività quindi in assenza di geofoni esterni);
- La possibilità di trasferire dati tramite software specifico dall'acquisitore ad un personal computer con controllo in tempo reale delle misurazioni eseguite;
- La possibilità di svolgere in contemporanea il lavoro interpretativo con la raccolta dati; consente di velocizzare i tempi di consegna del lavoro.

### **Indagine sismica passiva a stazione singola – Località: RIMINI –RN - Via della Fiera - 3.**

Inizio registrazione: 10.01.2014 ore 17:10:23 - Fine registrazione: 10.01.2014 ore 17:30:23

Durata registrazione: 0h20'00"

Analizzato 98 % tracciato (selezione manuale)

Frequenza di campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s.

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 15 %.

Con la determinazione delle onde di taglio  $V_s$  i terreni indagati vengono inseriti in una delle seguenti categorie del sottosuolo (N.T.C. 2008- Tabella 3.2.II e Tabella 3.2.III):

#### **Categorie di sottosuolo**

- A- **Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  superiori a 800 m/s comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 metri;
- B- **Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti**, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{SPT} > 50$ , o coesione non drenata  $c_u > 250$  kPa);
- C- **Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensati o di argille di media consistenza** con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 180 e 360 m/s ( $15 < N_{SPT} < 50$ ;  $70 < c_u < 250$  kPa);
- D- **Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti**, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 180$  m/s ( $N_{SPT} < 15$ ;  $c_u < 70$  kPa);
- E- **Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali** con valori di  $V_{S30}$  simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 mt. giacenti su di un substrato di materiale più rigido con  $V_{S30} > 800$  m/s.

#### **Categorie aggiuntive di sottosuolo.**

**S1-** Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 mt. di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ( $IP > 40$ ) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 100$  m/s ( $10 < c_u < 20$  kPa);

**S2-** depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

Dall'analisi dell'indagine HVSR si può affermare che il sito è caratterizzato da una velocità delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) di 381 m/s, corrispondente ad un terreno di **tipo C**:

<b>Profondità alla base dello strato (mt.)</b>	<b>Spessore (mt.)</b>	<b><math>V_s</math> (m/s)</b>
0.80	0.80	110
7.80	7.00	190
122.80	115.00	290
Inf.	Inf.	590

### RIMINI, VIA DELLA FIERA -3-

Strumento: TRZ-0129/01-10

Inizio registrazione: 10/01/14 17:10:23 Fine registrazione: 10/01/14 17:30:23

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 98% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

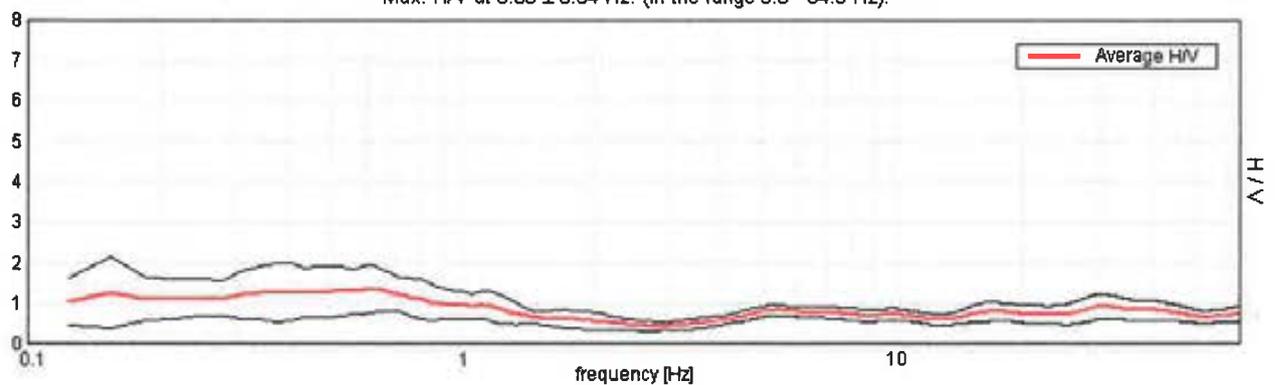
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

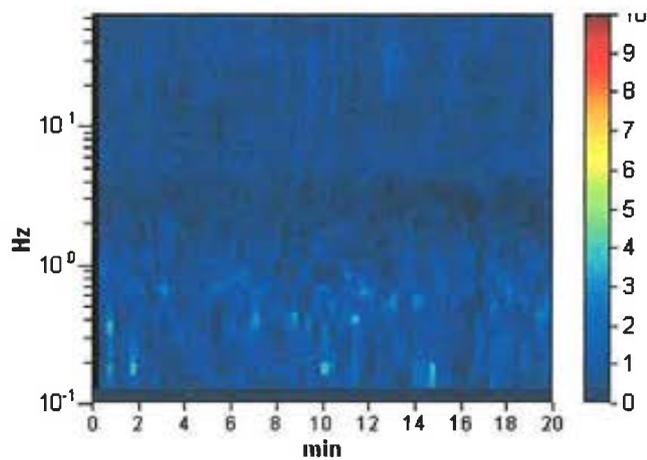
Lisciamento: 15%

#### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

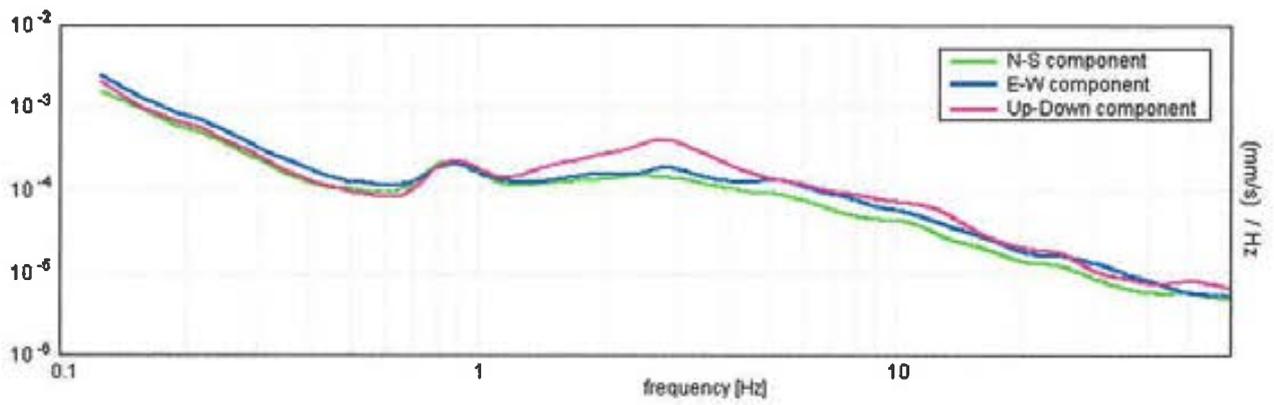
Max. H/V at 0.63 ± 0.04 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



#### SERIE TEMPORALE H/V

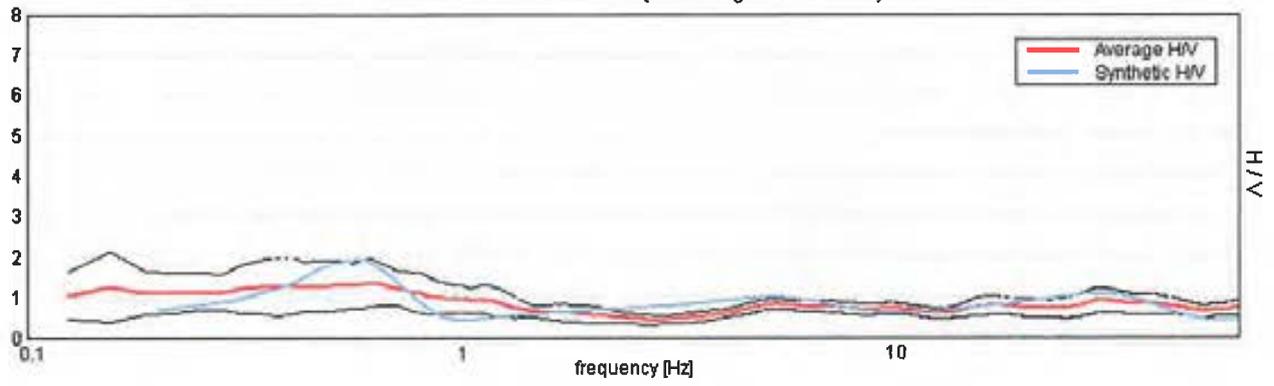


### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



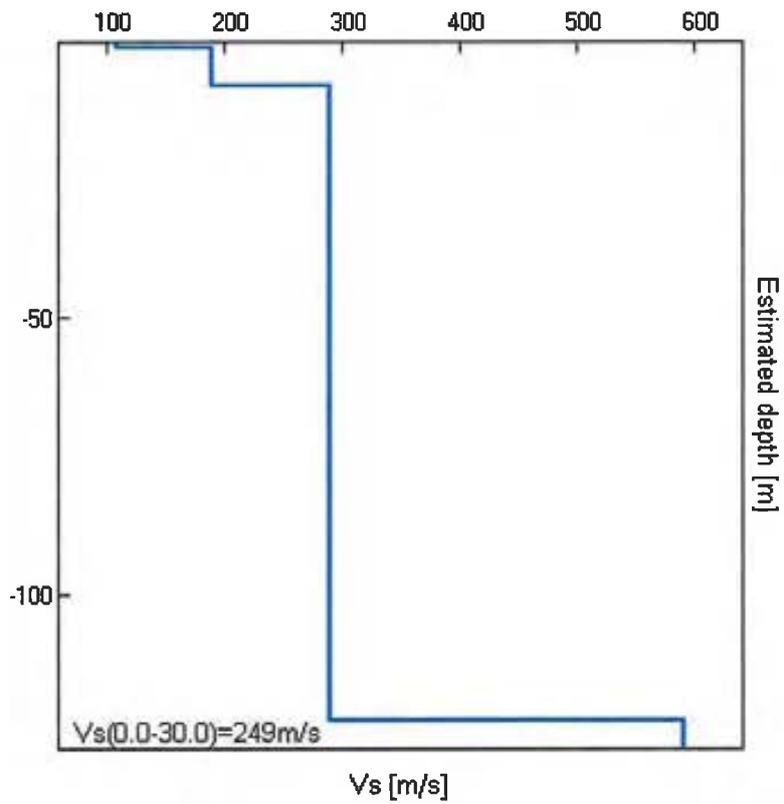
### H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

Max. H/V at  $0.63 \pm 0.04$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.80	0.80	110	0.35
7.80	7.00	190	0.35
122.80	115.00	290	0.35
inf.	inf.	590	0.35

Vs(0.0-30.0)=249m/s



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

**Picco H/V a  $0.63 \pm 0.04$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

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

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.63 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$737.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 31	OK	

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

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

<b>Esiste <math>f^-</math> in <math>[f_0/4, f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^-) &lt; A_0 / 2</math></b>			<b>NO</b>
<b>Esiste <math>f^+</math> in <math>[f_0, 4f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^+) &lt; A_0 / 2</math></b>	1.469 Hz	OK	
<b><math>A_0 &gt; 2</math></b>	$2.06 > 2$	OK	
<b><math>f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%</math></b>	$ 0.02989  < 0.05$	OK	
<b><math>\sigma_f &lt; \varepsilon(f_0)</math></b>	$0.01868 < 0.09375$	OK	
<b><math>\sigma_A(f_0) &lt; \theta(f_0)</math></b>	$0.2869 < 2.0$	OK	

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

**Valori di soglia per  $\sigma_f$  e  $\sigma_A(f_0)$**

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

## **INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE TECNICA DEI RAPPORTI SPETTRALI o HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio)**

La finalità dell'indagine è la caratterizzazione sismica del sottosuolo e l'individuazione delle discontinuità sismiche e la profondità della formazione rocciosa compatta (bedrock geofisico). Con tale metodo viene stimata la propagazione delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) così come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-.

La tecnica HVSR è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di alcun tipo di perforazione, né stendimento di cavi, né energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

I risultati ottenibili da una siffatta registrazione 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 in quanto si dovranno adottare precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione per evitare l'effetto "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;

**la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio** qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. Successivamente sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;

**La velocità media delle onde di taglio  $V_{S30}$**  calcolate tramite un apposito codice di calcolo: E' necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc...) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{S30}$  e la relativa categoria del sottosuolo di fondazione come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-;

**La stratigrafia del sottosuolo** con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 mt. di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), ha raggiunto la sua massima popolarità in Giappone già nei primi anni '70 come strumento per una microzonazione sismica speditivi.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri sismici del rumore di sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) applicata da Nogoshi e Igarashi (1971).

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti di sito.

La tecnica proposta da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione delle discontinuità sismiche presenti nel sottosuolo, assume che i microtremiti (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrastante su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologica combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca **SESAME** (2005) - (Site Effect assessment using **AM**biEnt Excitations) che si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola ed array ed a questo si rimanda per le sopra citate linee guida della tecnica H/V spectral ratio.

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni sui terreni d'indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

### - Basi teoriche

Le basi teoriche dell' HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio) in un sistema stratificato in cui I parametric variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice.

Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ).

Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1} / (4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{S1} / (4h)$$

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, 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 degli spettri orizzontali e quello verticale piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce una importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumori di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti dalle onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolari da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità delle onde di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

L'applicabilità pratica della semplice formula sopra riportata relativa alle onde S è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica sia nell'ambito ingegneristico.

Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

## **- Attrezzature e modalità**

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcuno strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né accelerometri sismologici.

Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale  $> 20$  sec. In quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.

Indicativamente, la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e dalla rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E ed W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza di edifici, vento, ecc.... in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta del sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

- Trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza ( $<1-2$  Hz);
- Amplificatori;
- Digitalizzatore;
- Frequenza di campionamento:  $> 50$  Hz;
- Convertitore A/D (analogico/digitale) a 24 bit;
- Durata di registrazione:  $> 10$  minuti;
- Collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

## **- Elaborazione dati**

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMBient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200 – 400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. operatore di smoothing (Konno & Ohmachi);
3. merging dei componenti orizzontali;
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata ( $>10$ );

## 5. valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di  $f_0$  – Frequenza/e di risonanza e la sue deviazione standard.

Il risultato finale della prova presenta:

- 1) i criteri di attendibilità della misura;
- 2) i criteri di validità del picco di  $f_0$ ;
- 3) i valori di soglia delle condizioni di stabilità;
- 4) l'analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alle frequenze del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
- 5) l'interpretazione di  $f_0$  e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Per gli scopi e finalità dell'indagine le misure di HVSR offrono la possibilità di determinare:

- 1). Valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alla frequenza di risonanza;
- 2). Spessori della coltre di copertura.

### - Frequenze

Per quanto riguarda la mappatura delle frequenze principali di risonanza, tale elaborazione permette di valutare il grado di omogeneità sulla risposta di sito relativamente alle frequenze dei materiali.

L'analisi di queste permette di definire il campo delle frequenze significative di risonanza da utilizzare direttamente nella progettazione degli edifici.

### - Spessori

L'assunzione di base è che, per un modello di suolo monodimensionale (stratificazione piana e parallela) costituito da sedimenti soffici sovrastanti il substrato, la frequenza di risonanza  $f_r$  dovuta alla propagazione di onde S incidenti perpendicolarmente la base del substrato è data dalla relazione:

$$T = \frac{4 * \sum_{I=1}^n h_i}{\sum_{I=1}^n V_{S_i} * h_i}$$

Dove  $h$  è lo spessore dello strato dei sedimenti e  $V_s$  dipende dalla velocità delle onde di taglio nel suo interno.

In base a tale relazione quindi, a partire da valori misurati di  $f_r$  e  $V_s$ , ricavati, è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia, non essendo sempre presente la misura di  $V_s$  come profilo sismico fino al bedrock geofisico, allora si può far riferimento alla relazione di Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999).

Poiché l'andamento del log in  $V_s$  in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidezza al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire da valori di  $V_s$  per la porzione più superficiale del terreno, è possibile

estrapolare l'andamento delle  $V_s$  a profondità più elevate tramite l'impiego di relazioni empiriche.

A questo scopo Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999) suggeriscono la seguente funzione:

$$V_s = V_0 (1 + Z)^a$$

dove  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato ed "a" un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc...).

Questa relazione, combinata con la precedente, consente infatti la stima dello spessore della coltre di sedimenti soffici:

$$Z = \frac{V_0 (1-a)^{1/(1-a)}}{4 f_r} + 1 - 1$$

Nei casi più complessi è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli teorici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

#### **- Vantaggi della caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica HVSR**

Onde consentire una resa chiara ed immediata della tecnica HVSR, di seguito vengono elencati in maniera sintetica i principali vantaggi derivanti dal confronto con altre metodologie d'indagine.

- Consente una veloce acquisizione dati in un lasso di tempo relativamente ristretto (max. 20 minuti);
- Permette di raggiungere elevate profondità d'indagine indipendentemente dalla natura dei terreni (fino 50 ÷ 70 mt. ad alta risoluzione);
- Consente di evidenziare lo spessore di alterato / fratturato della roccia;
- Non risente della eventuale presenza d'acqua (a varia concentrazione di sali) a differenza di quanto avviene con il metodo geoelettrico;
- Individua ed analizza le inversioni di velocità a differenza della sismica a rifrazione.

Si riportano inoltre i vantaggi derivanti dall'utilizzo di tomografi digitali:

- Estrema semplicità di utilizzo;
- Possibilità di equipaggiare lo strumento con GPS integrato; Elevato numero di misure registrabili nella memoria interna (circa 150);
- Sensori allocati internamente allo strumento (operatività quindi in assenza di geofoni esterni);
- La possibilità di trasferire dati tramite software specifico dall'acquisitore ad un personal computer con controllo in tempo reale delle misurazioni eseguite;
- La possibilità di svolgere in contemporanea il lavoro interpretativo con la raccolta dati, consente di velocizzare i tempi di consegna del lavoro.

#### **Indagine sismica passiva a stazione singola – Località: RIMINI –RN - Via della Fiera - 4.**

Inizio registrazione: 10.01.2014 ore 17:34:19 - Fine registrazione: 10.01.2014 ore 17:54:19

Durata registrazione: 0h20'00"

Analizzato 98 % tracciato (selezione manuale)

Frequenza di campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s.

Tipo di lisciamiento: Triangular window

Lisciamiento: 14 %.

Con la determinazione delle onde di taglio  $V_s$  i terreni indagati vengono inseriti in una delle seguenti categorie del sottosuolo (N.T.C. 2008- Tabella 3.2.II e Tabella 3.2.III):

#### **Categorie di sottosuolo**

- A- **Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  superiori a 800 m/s comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 metri;
- B- **Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti**, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{SPT} > 50$ , o coesione non drenata  $c_u > 250$  kPa);
- C- **Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensati o di argille di media consistenza** con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 180 e 360 m/s ( $15 < N_{SPT} < 50$ ;  $70 < c_u < 250$  kPa);
- D- **Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti**, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 180$  m/s ( $N_{SPT} < 15$ ;  $c_u < 70$  kPa);
- E- **Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali** con valori di  $V_{S30}$  simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 mt. giacenti su di un substrato di materiale più rigido con  $V_{S30} > 800$  m/s.

#### **Categorie aggiuntive di sottosuolo.**

**S1-** Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 mt. di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ( $IP > 40$ ) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 100$  m/s ( $10 < c_u < 20$  kPa);

**S2-** depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

Dall'analisi dell'indagine HVSR si può affermare che il sito è caratterizzato da una velocità delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) di 381 m/s, corrispondente ad un terreno di **tipo C**:

<b>Profondità alla base dello strato (mt.)</b>	<b>Spessore (mt.)</b>	<b><math>V_s</math> (m/s)</b>
0.50	0.50	110
19.50	19.00	190
129.50	110.00	270
Inf.	Inf.	530

## RIMINI, VIA DELLA FIERA -4-

Strumento: TRZ-0129/01-10

Inizio registrazione: 10/01/14 17:34:19 Fine registrazione: 10/01/14 17:54:19

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 98% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

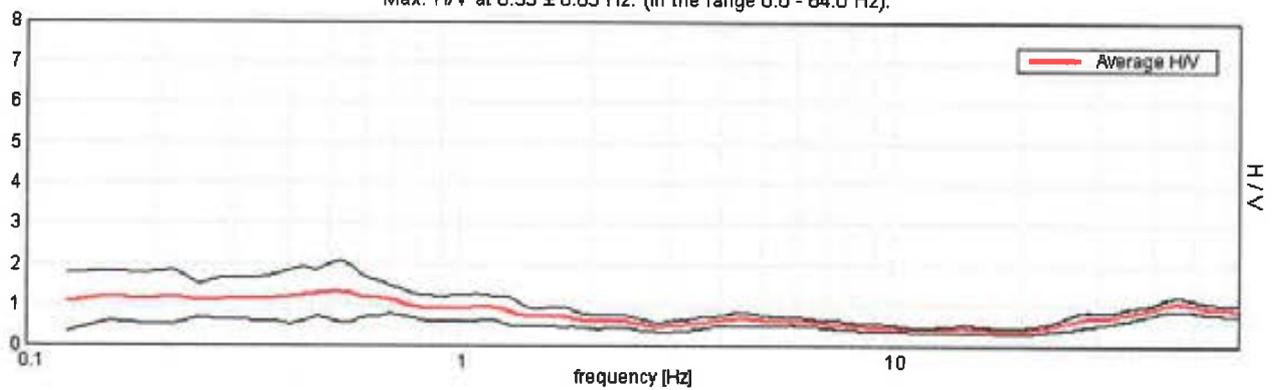
Lunghezza finestre: 21 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

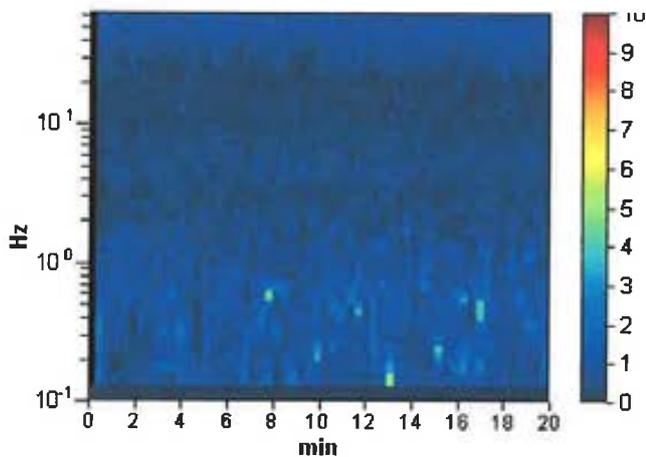
Lisciamento: 14%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

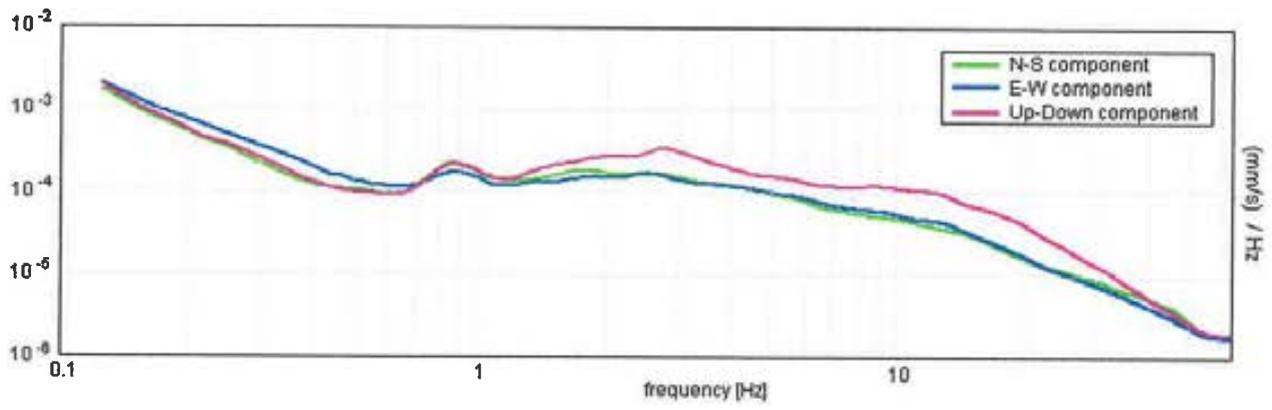
Max. H/V at  $0.53 \pm 0.03$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



### SERIE TEMPORALE H/V

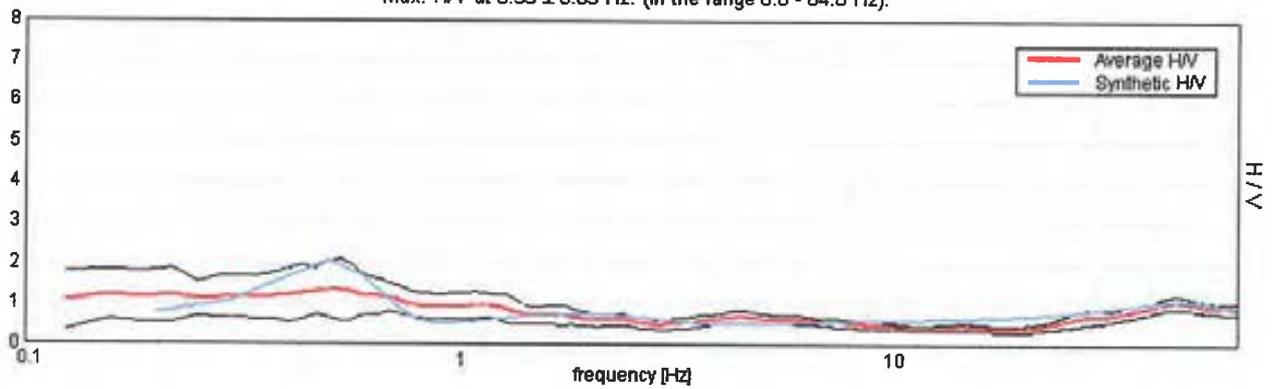


### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



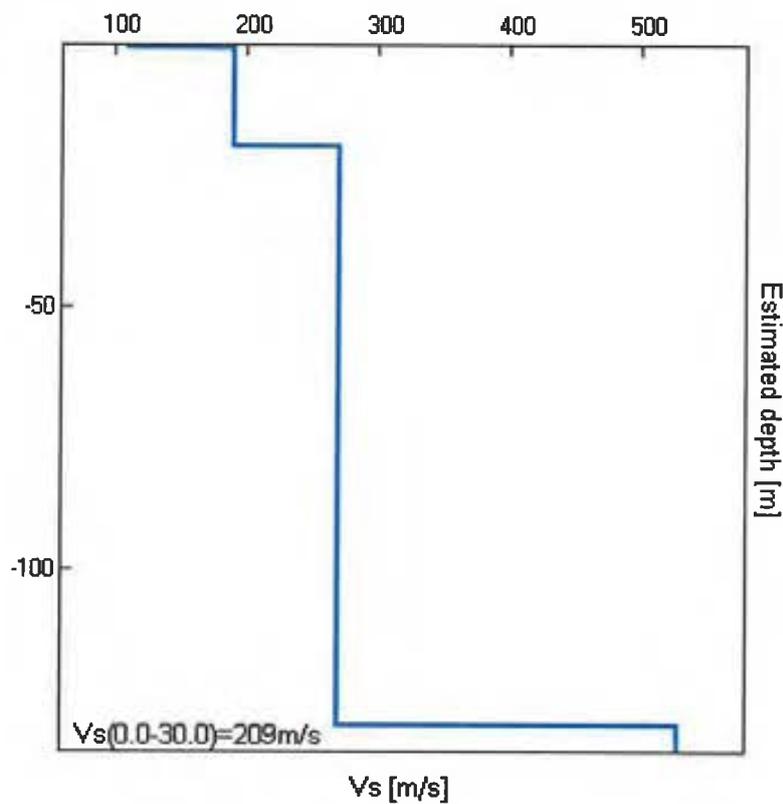
### H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

Max. H/V at 0.53 ± 0.03 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.50	0.50	110	0.35
19.50	19.00	190	0.35
129.50	110.00	270	0.35
inf.	inf.	530	0.35

Vs(0.0-30.0)=209m/s



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

**Picco H/V a  $0.53 \pm 0.03$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

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

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.53 > 0.48$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$624.8 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 26	OK	

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

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

<b>Esiste <math>f^-</math> in <math>[f_0/4, f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^-) &lt; A_0 / 2</math></b>			<b>NO</b>
<b>Esiste <math>f^+</math> in <math>[f_0, 4f_0]</math>   <math>A_{H/V}(f^+) &lt; A_0 / 2</math></b>	1.844 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.05 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.02865  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01522 < 0.07969$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3744 < 2.0$	OK	

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

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

## **INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE TECNICA DEI RAPPORTI SPETTRALI o HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio)**

La finalità dell'indagine è la caratterizzazione sismica del sottosuolo e l'individuazione delle discontinuità sismiche e la profondità della formazione rocciosa compatta (bedrock geofisico). Con tale metodo viene stimata la propagazione delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) così come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-.

La tecnica HVSR è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di alcun tipo di perforazione, né stendimento di cavi, né energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

I risultati ottenibili da una siffatta registrazione 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 in quanto si dovranno adottare precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione per evitare l'effetto "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;

**la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio** qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. Successivamente sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;

**La velocità media delle onde di taglio  $V_{S30}$**  calcolate tramite un apposito codice di calcolo: E' necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc...) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{S30}$  e la relativa categoria del sottosuolo di fondazione come richiesto dal D.M. 14-01-2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni-;

**La stratigrafia del sottosuolo** con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 mt. di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), ha raggiunto la sua massima popolarità in Giappone già nei primi anni '70 come strumento per una microzonazione sismica speditivi.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri sismici del rumore di sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) applicata da Nogoshi e Igarashi (1971).

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti di sito.

La tecnica proposta da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione delle discontinuità sismiche presenti nel sottosuolo, assume che i microtremiti (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrastante su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologia combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca **SESAME** (2005) - (Site EffectS assessment using **AM**ambient **EX**citations) che si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola ed array ed a questo si rimanda per le sopra citate linee guida della tecnica H/V spectral ratio.

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni sui terreni d'indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

### - Basi teoriche

Le basi teoriche dell' HVSR (Horizontal to vertical Spectral Ratio) in un sistema stratificato in cui I parametric variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice.

Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ).

Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1} / (4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{S1} / (4h)$$

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, 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 degli spettri orizzontali e quello verticale piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce una importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumori di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti dalle onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolari da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità delle onde di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

L'applicabilità pratica della semplice formula sopra riportata relativa alle onde S è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica sia nell'ambito ingegneristico.

Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

## **- Attrezzature e modalità**

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcuno strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né accelerometri sismologici.

Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale > 20 sec. In quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.

Indicativamente, la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e dalla rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E ed W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza di edifici, vento, ecc.... in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta del sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

- Trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza (<1-2 Hz);
- Amplificatori;
- Digitalizzatore;
- Frequenza di campionamento: > 50 Hz;
- Convertitore A/D (analogico/digitale) a 24 bit;
- Durata di registrazione: > 10 minuti;
- Collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

## **- Elaborazione dati**

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMBient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200 – 400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. operatore di smoothing (Konno & Ohmachi);
3. merging dei componenti orizzontali;
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata (>10);

## 5. valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di  $f_0$  – Frequenza/e di risonanza e la sue deviazione standard.

Il risultato finale della prova presenta:

- 1) i criteri di attendibilità della misura;
- 2) i criteri di validità del picco di  $f_0$ ;
- 3) i valori di soglia delle condizioni di stabilità;
- 4) l'analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alle frequenze del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
- 5) l'interpretazione di  $f_0$  e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Per gli scopi e finalità dell'indagine le misure di HVSR offrono la possibilità di determinare:

- 1). Valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alla frequenza di risonanza;
- 2). Spessori della coltre di copertura.

### - Frequenze

Per quanto riguarda la mappatura delle frequenze principali di risonanza, tale elaborazione permette di valutare il grado di omogeneità sulla risposta di sito relativamente alle frequenze dei materiali.

L'analisi di queste permette di definire il campo delle frequenze significative di risonanza da utilizzare direttamente nella progettazione degli edifici.

### - Spessori

L'assunzione di base è che, per un modello di suolo monodimensionale (stratificazione piana e parallela) costituito da sedimenti soffici sovrastanti il substrato, la frequenza di risonanza  $f_r$  dovuta alla propagazione di onde S incidenti perpendicolarmente la base del substrato è data dalla relazione:

$$T = \frac{4 * \sum_{I=1}^n h_i}{\sum_{I=1}^n V_{S_i} * h_i}$$

Dove  $h$  è lo spessore dello strato dei sedimenti e  $V_s$  dipende dalla velocità delle onde di taglio nel suo interno.

In base a tale relazione quindi, a partire da valori misurati di  $f_r$  e  $V_s$ , ricavati, è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia, non essendo sempre presente la misura di  $V_s$  come profilo sismico fino al bedrock geofisico, allora si può far riferimento alla relazione di Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999).

Poiché l'andamento del log in  $V_s$  in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidità al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire da valori di  $V_s$  per la porzione più superficiale del terreno, è possibile

estrapolare l'andamento delle  $V_s$  a profondità più elevate tramite l'impiego di relazioni empiriche.

A questo scopo Ibs-Von Seht e Wohleberg (1999) suggeriscono la seguente funzione:

$$V_s = V_0 (1 + Z)^a$$

dove  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato ed "a" un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc...).

Questa relazione, combinata con la precedente, consente infatti la stima dello spessore della coltre di sedimenti soffici:

$$Z = \frac{V_0 (1-a)^{1/(1-a)}}{4 f_r} + 1 - 1$$

Nei casi più complessi è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli teorici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004) usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

#### **- Vantaggi della caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica HVSR**

Onde consentire una resa chiara ed immediata della tecnica HVSR, di seguito vengono elencati in maniera sintetica i principali vantaggi derivanti dal confronto con altre metodologie d'indagine.

- Consente una veloce acquisizione dati in un lasso di tempo relativamente ristretto (max. 20 minuti);
- Permette di raggiungere elevate profondità d'indagine indipendentemente dalla natura dei terreni (fino 50 ÷ 70 mt. ad alta risoluzione);
- Consente di evidenziare lo spessore di alterato / fratturato della roccia;
- Non risente della eventuale presenza d'acqua (a varia concentrazione di sali) a differenza di quanto avviene con il metodo geoelettrico;
- Individua ed analizza le inversioni di velocità a differenza della sismica a rifrazione.

Si riportano inoltre i vantaggi derivanti dall'utilizzo di tomografi digitali:

- Estrema semplicità di utilizzo;
- Possibilità di equipaggiare lo strumento con GPS integrato; Elevato numero di misure registrabili nella memoria interna (circa 150);
- Sensori allocati internamente allo strumento (operatività quindi in assenza di geofoni esterni);
- La possibilità di trasferire dati tramite software specifico dall'acquisitore ad un personal computer con controllo in tempo reale delle misurazioni eseguite;
- La possibilità di svolgere in contemporanea il lavoro interpretativo con la raccolta dati, consente di velocizzare i tempi di consegna del lavoro.

**Indagine sismica passiva a stazione singola – Località: RIMINI –RN - Via della Fiera - 5.**

Inizio registrazione: 10.01.2014 ore 18:09:30 - Fine registrazione: 10.01.2014 ore 18:29:31

Durata registrazione: 0h20'00"

Analizzato 97 % tracciato (selezione manuale)

Frequenza di campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s.

Tipo di lisciamiento: Triangular window

Lisciamiento: 12 %.

Con la determinazione delle onde di taglio  $V_s$  i terreni indagati vengono inseriti in una delle seguenti categorie del sottosuolo (N.T.C. 2008- Tabella 3.2.II e Tabella 3.2.III):

**Categorie di sottosuolo**

- A- **Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi** caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  superiori a 800 m/s comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 metri;
- B- **Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti**, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{SPT} > 50$ , o coesione non drenata  $c_u > 250$  kPa);
- C- **Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensati o di argille di media consistenza** con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 180 e 360 m/s ( $15 < N_{SPT} < 50$ ;  $70 < c_u < 250$  kPa);
- D- **Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti**, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 180$  m/s ( $N_{SPT} < 15$ ;  $c_u < 70$  kPa);
- E- **Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali** con valori di  $V_{S30}$  simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 mt. giacenti su di un substrato di materiale più rigido con  $V_{S30} > 800$  m/s.

**Categorie aggiuntive di sottosuolo.**

**S1-** Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 mt. di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ( $IP > 40$ ) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di  $V_{S30} < 100$  m/s ( $10 < c_u < 20$  kPa);

**S2-** depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

Dall'analisi dell'indagine HVSR si può affermare che il sito è caratterizzato da una velocità delle onde di taglio ( $V_{S30}$ ) di 381 m/s, corrispondente ad un terreno di **tipo C**:

Profondità alla base dello strato (mt.)	Spessore (mt.)	$V_s$ (m/s)
0.70	0.70	100
22.70	22.00	190
122.70	100.00	300
Inf.	Inf.	560

## RIMINI, VIA DELLA FIERA -5-

Strumento: TRZ-0129/01-10

Inizio registrazione: 10/01/14 18:09:30 Fine registrazione: 10/01/14 18:29:31

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 97% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

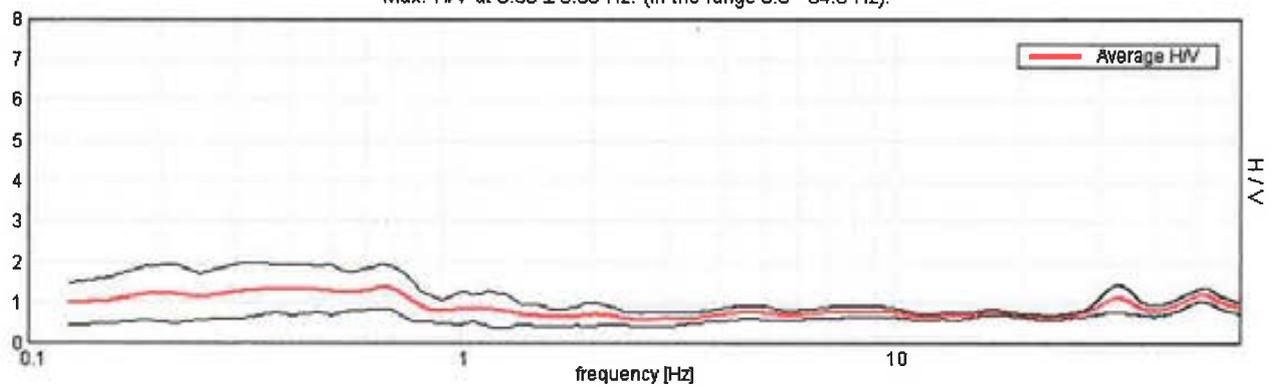
Lunghezza finestre: 18 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

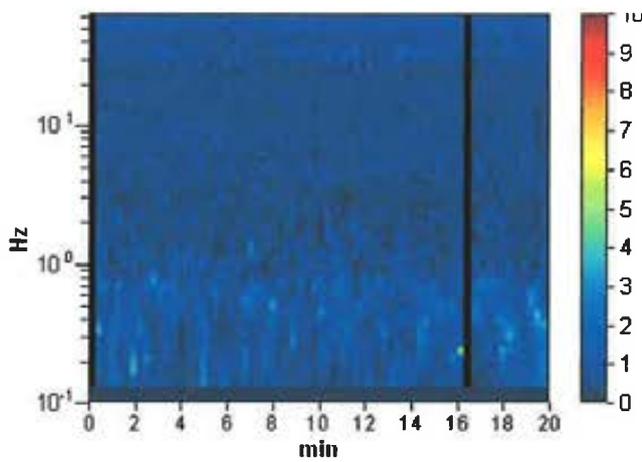
Lisciamento: 12%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

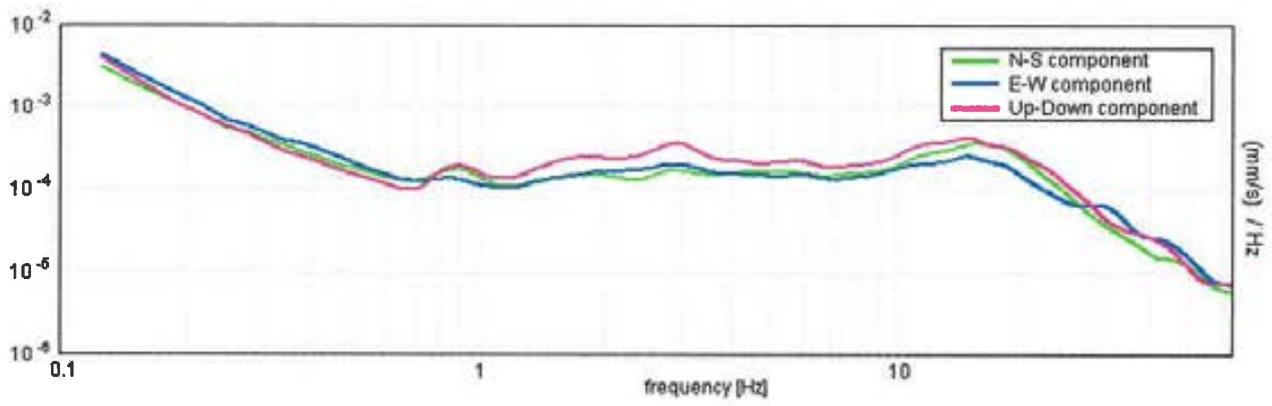
Max. H/V at  $0.66 \pm 0.03$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



### SERIE TEMPORALE H/V

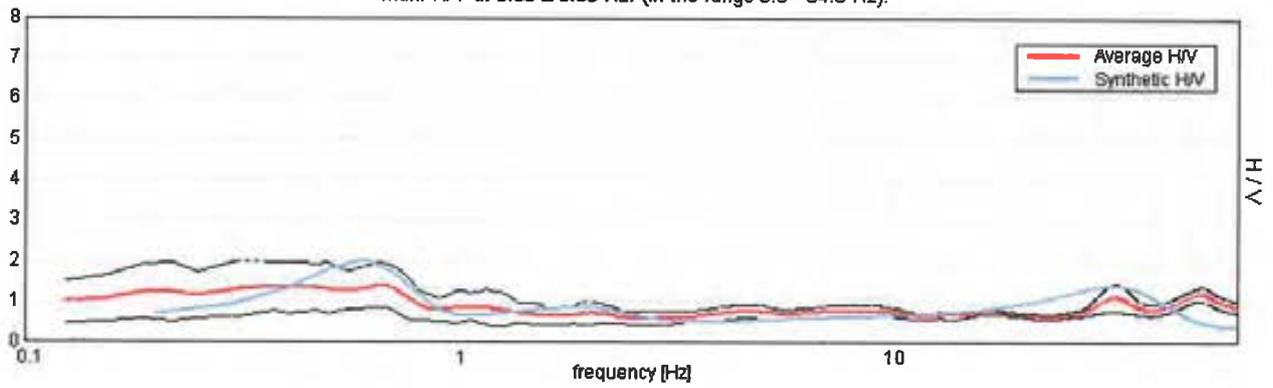


### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



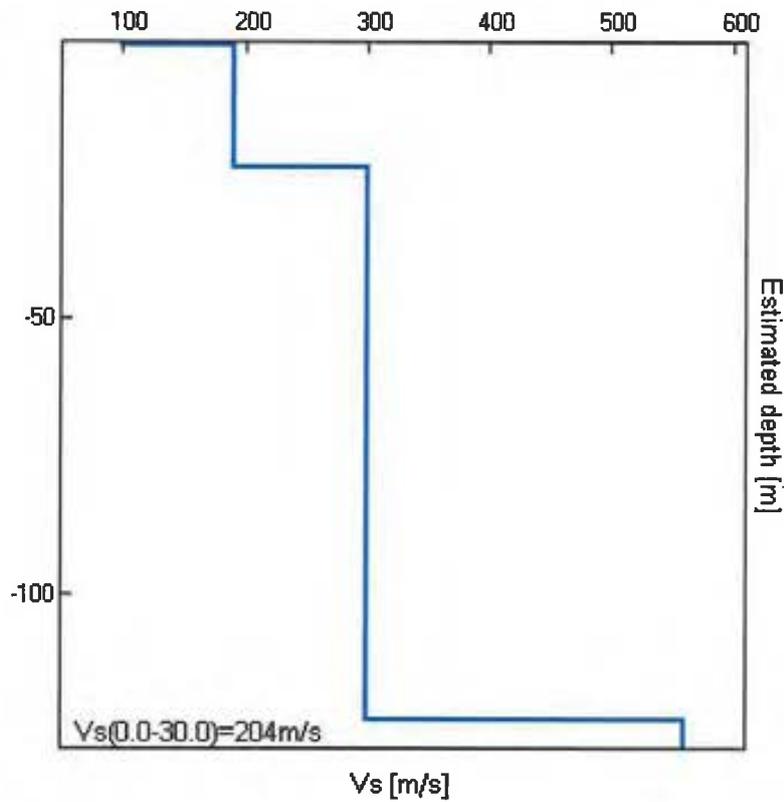
**H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO**

Max. H/V at 0.66 ± 0.03 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.70	0.70	100	0.35
22.70	22.00	190	0.35
122.70	100.00	300	0.35
inf.	inf.	560	0.35

Vs(0.0-30.0)=204m/s



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

**Picco H/V a  $0.66 \pm 0.03$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

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

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.66 > 0.56$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$756.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 32	OK	

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

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			<b>NO</b>
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.469 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.02 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.02168  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01423 < 0.09844$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2753 < 2.0$	OK	

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

**Valori di soglia per  $\sigma_f$  e  $\sigma_A(f_0)$**

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

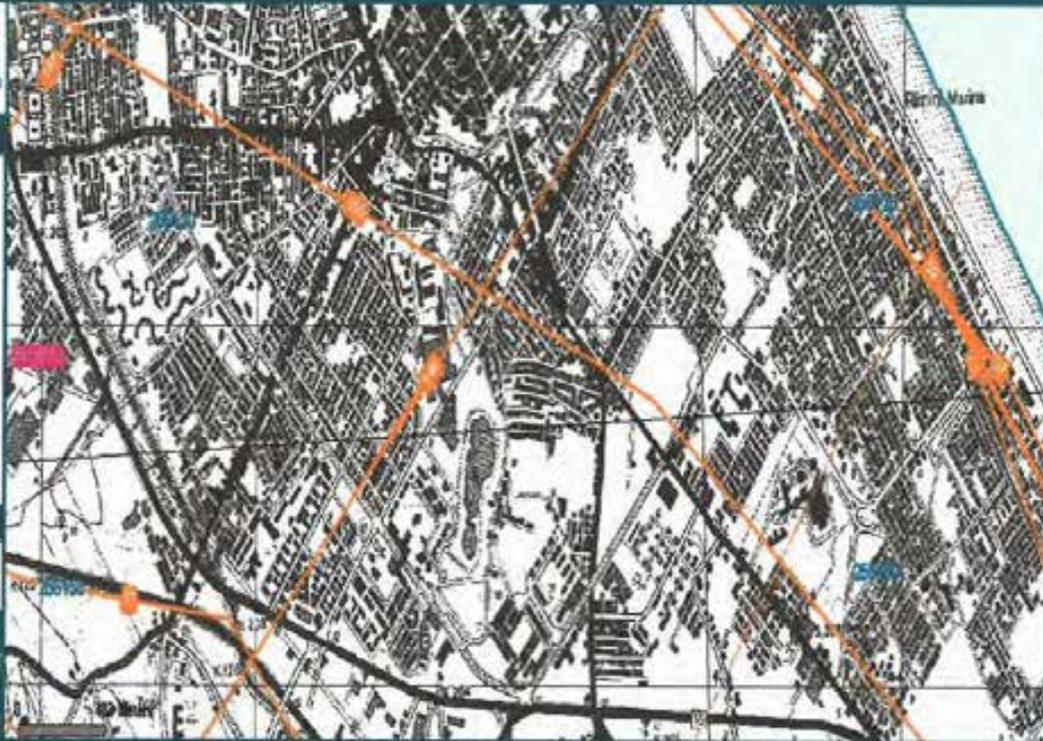


STRUMENTI



SCALA

1:15.231



SCEGLI CARTOGRAFIA **Prismi**

Sezioni Geologiche

POSIZIONE PER

- scegli criterio -

LIVELLI CARTOGRAFICI **Legend**

- Prove Geognostiche SGSS-REI
- Sondaggi
- Penetrometrie
- Datanon C14
- Pozzi Agp
- Pozzi
- Sezioni Geologiche
- Sezioni pubblicate
- Sezioni non pubblicate
- Limiti amministrativi
- Quadri di unione
- Basi topografiche

Fidisegno  automatico

Long 1 Long 2 Long 3 Long 4 Long 5 Long 6 Long 7

