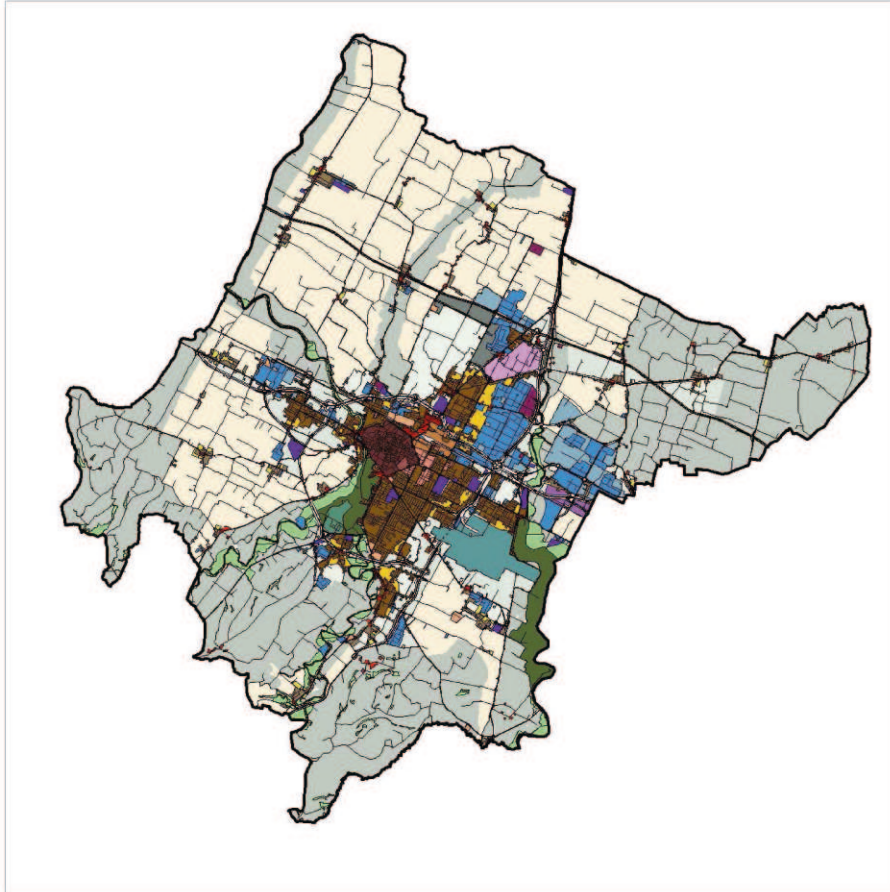




COMUNE DI FORLÌ



2012

PSC

Piano Strutturale Comunale

L.R. 20/2000

Delibera di Giunta Regionale n. 112/2007

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione geofisica e prove sismiche in array

RE-2

SINDACO
Roberto Balzani

SEGRETARIO GENERALE
Margherita Campidelli

ASSESSORE URBANISTICA
Paolo Rava

ASSESSORE AMBIENTE
Alberto Bellini

SERVIZIO PIANIFICAZIONE URBANISTICA E SVILUPPO ECONOMICO

DIRIGENTE
Ercole Canestrini

RESPONSABILE
Mara Rubino

UNITA' PIANIFICAZIONE URBANISTICA - UNITA' GEOLOGICA - UNITA' SITL

COORDINAMENTO GRUPPO DI LAVORO

Marcello Arfelli

CONSULENTI

Università di Bologna - prof. E. Farabegoli

Università di Bologna - prof. S. Castellaro

PROGEO s.r.l. Forlì

COLLABORATORI

Andrea Lugli

STAFF OPERATIVO

Monica Gabbarrini

Paolo Maestri

Mirco Milandri

Lorella Minoccheri

Antonella Simoncelli

Valerio Zoli

CONFERENZA DI PIANIFICAZIONE	ADOZIONE	CONTRODEDUZIONI	PRESA D'ATTO INTESA e APPROVAZIONE
Indizione	Delibera di C.C.	Delibera di C.C.	Delibera di C.C.
09/01/2012	n. 121 del 27/11/2012		

MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I e II

COMUNE DI FORLI'

RELAZIONE GEOFISICA

SILVIA CASTELLARO

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA E GEOLOGICO-AMBIENTALI
silvia.castellaro@unibo.it

29 gennaio 2012

INDICE

RELAZIONE GEOFISICA	1
INDICE.....	2
PREMESSA	5
INTRODUZIONE	6
1. LA BASE DATI GEOFISICA	7
INDAGINI ESISTENTI E DI NUOVA ESECUZIONE	7
PROFONDITA' DELLE INDAGINI.....	8
2. PATTERN DI RISPOSTA SISMICA LOCALE NEL TERRITORIO COMUNALE	10
PIANURA (1).....	11
PIANURA (2).....	12
FASCIA APPENNINICA.....	12
STUDIO SEMPLIFICATO DI RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	13
MODELLI DI SOTTOSUOLO E INPUT SISMICO	13
FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE	15
SPETTRO DI RISPOSTA	15
3. MAPPE TEMATICHE	17
CARTA DELLE FREQUENZE DI RISONANZA (f_0 e f).....	17
CARTA V_{sH} - V_{s30}	19
CARTA F_a - F_V	20
CARTA F_{aPGA0} , $F_{a0.1-0.5s}$, $F_{a0.5-1s}$	22
ALTRE NOTE.....	24
4. ANALISI DI STRUTTURE EDILIZIE RILEVANTI.....	26
MODI DI VIBRARE	26
RIMOZIONE DELL'EFFETTO DEL SOTTOSUOLO.....	26
SMORZAMENTO	27
SERBATOIO ROMAGNA-ACQUE, CORSO DIAZ.....	28
SEDE DEL DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE PROVINCIALE, VIA CADORE 75	31
5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI.....	33
BIBLIOGRAFIA	35

APPENDICE A	36
INDAGINI DI NUOVA ACQUISIZIONE.....	36
STRUMENTAZIONE IMPIEGATA E GEOMETRIE.....	36
MASW, ReMi ed ESAC.....	37
MISURE IN CAMPO LIBERO A STAZIONE SINGOLA.....	37
FO 01: località Bagnolo, via Borgo Sisa.....	39
FO 02: località Bagnolo, incrocio via Borgo Sisa con via Narsete	42
FO 03: via Narsete	43
FO 04: via Tassinara 4-6.....	44
FO 05: via del Santuario 10.....	45
FO 06: via Manumisso 22/a.....	46
FO 07: via Ridotta 2	48
FO 08: via Ca' Bertini 5	49
FO 09: via dei Benedettini 6	50
FO 10: via Mezzadrini	51
FO 11: via 13 Novembre 1944.....	54
FO 12: via dei Portolani	55
FO 13: via Palustro 3.....	56
FO 14: via Rio Becca 8.....	57
FO 15: via Pitagora 17.....	58
FO 16: incrocio via Ossi con via Mazzacavallo	61
FO 17: via Castel Leone 1.....	62
FO 18: via Castel Leone 15.....	63
FO 19: via del Partigiano.....	64
FO 20: via Crocetta	65
FO 21: via Malguaia	66
FO 22: via dell'Appennino 775	69
FO 23: via Para 22.....	71
FO 24: via Maglianella, agriturismo La Sarzola	72
FO 25: viale Bidente 273.....	73
FO 26: via Tibano 1	74
FO 27: viale Roma, incrocio con Tangenziale Est.....	77
FO 28: via Giulio II.....	78
FO 29: via Monte San Michele 12 (vecchia Eridania)	79
FO 30: via Dandolo 11	82

FO 31: via Curte 8	83
FO 32: viale Bologna 2-4.....	84
FO 33: via Giovanni dalle Bande Nere 4	87
FO 34: via Marsala 8	88
FO 35: via Gioppi	89
FO 36: via Castel Falcino 10	90
FO 37: via Lughese 73.....	91
FO 38: incrocio tra via Erbosa e via Donnasanta	92
FO 39: via Erbosa	93
FO 40: via Sarachieda 5	94
FO 41: serbatoio Romagna Acque, Corso A. Diaz	95
FO 42: dipartimento della Protezione Civile Provinciale, via Cadore 75	96
APPENDICE B.	99

PREMESSA

I risultati delle indagini e i valori dei parametri presentati in questa relazione sono intesi a solo uso della Microzonazione Sismica del territorio comunale di Forlì e pertanto ai soli fini di *pianificazione* urbanistica. In nessun caso i risultati delle indagini e i valori dei parametri potranno essere impiegati ai fini della *progettazione edilizia* in zona sismica per la quale vigono unicamente le Norme Tecniche sulle Costruzioni (NTC, 2008).

Le scale e i metodi della Microzonazione Sismica non coincidono con quelli della progettazione edilizia in zona sismica. Nessuna responsabilità potrà essere attribuita agli autori di questa relazione per l'uso improprio dei dati in essa presentati.

INTRODUZIONE

La presente relazione illustra la base-dati ed i metodi impiegati ai fini della MicroZonazione Sismica (MZS) di Livello 1 e 2 del territorio comunale di Forlì, per la sola componente geofisica. Per la componente geologica si rimanda alla relazione a cura del prof. E. Farabegoli.

Per le definizioni di Livello 1 e 2 si sono seguiti (e pertanto si rimanda a) gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (2008 e integrazione del 2011) e l'Atto di Indirizzo per la MZS in Emilia Romagna (2007 e integrazione del 2011).

Saranno illustrati mezzi e metodi che hanno permesso di compilare:

- 1) le carte delle frequenze di amplificazione per risonanza dei terreni,
- 2) la carta delle velocità "mediate"¹ delle onde di taglio fino al bedrock (V_sH) o fino a 30 m (V_{s30}) nei casi di bedrock non raggiunto dalle indagini,
- 3) le carte dei fattori di amplificazione:

Secondo gli ICMS (2008):

- F_a fattore di amplificazione dello spettro dell'accelerazione a basso periodo (in prossimità del periodo proprio al quale si verifica il massimo della risposta in accelerazione)
- F_v fattore di amplificazione dello spettro di velocità a periodo proprio, per il quale si verifica la massima risposta in pseudovelocità.

Secondo l'Atto di Indirizzo per la MZS in Emilia Romagna (2007):

- $F_{a_{PGA_0}}$ fattore di amplificazione di PGA_0 , (Peak Ground Acceleration, accelerazione sismica di picco al bedrock),
- $F_{a_{0.1-0.5s}}$ dell'intensità spettrale I_s nell'intervallo di periodo 0.1-0.5 s,
- $F_{a_{0.5-1s}}$ dell'intensità spettrale I_s nell'intervallo di periodo 0.5-1 s.

¹ Non si tratta in realtà di velocità medie ma di velocità dello strato omogeneo equivalente ad uno spessore H .

1. LA BASE DATI GEOFISICA

INDAGINI ESISTENTI E DI NUOVA ESECUZIONE

Nel Comune di Forlì sono state raccolte 272 indagini geofisiche volte alla definizione della velocità delle onde sismiche di taglio (Vs) nel sottosuolo e/o alla misurazione delle frequenze di risonanza. In particolare, sono state raccolte:

- 177 prove sismiche a stazione singola elaborate con tecnica H/V. Di queste, 135 erano pre-esistenti mentre 42 sono state effettuate appositamente per questo studio e sono state ripetute in ciascun sito per 2 volte.
- 81 prove sismiche multicanale basate su onde di superficie (ReMi, MASW, ESAC ecc. Si veda pag. 37 per le definizioni). Di queste, 70 erano pre-esistenti mentre 11 sono state effettuate appositamente per questo studio.
- 3 prove cross-hole,
- 3 prove down-hole,
- 4 prove di tipo “cono-sismico”
- 2 tomografie sismiche a rifrazione in onde S
- 2 prove sismiche a rifrazione in onde S

Tutti gli elaborati raccolti sono stati rianalizzati al fine di assicurare una omogeneità interpretativa e sono state scartate le prove la cui elaborazione o interpretazione non era chiara o era nettamente sovrainterpretata. Nello specifico, sono state scartate:

- 15 prove sismiche a stazione singola H/V
- 27 prove sismiche multicanale basate su onde di superficie

Il numero di prove effettivamente utilizzate ai fini del presente studio è riassunto in Tabella 1 e la loro ubicazione è indicata in Figura 1.

Tipo di prova	Numero
H/V	162
Multicanale a onde di superficie	54
Cross-hole	3
Down-hole	3
Cono sismico	4
Tomografia sismica (S)	2
Rifrazione (S)	2

Tabella 1. Numero e tipo di prove geofisiche effettivamente impiegate per la MZS del Comune di Forlì. Le prove che presentavano dubbi esecutivi o interpretativi sono state scartate.

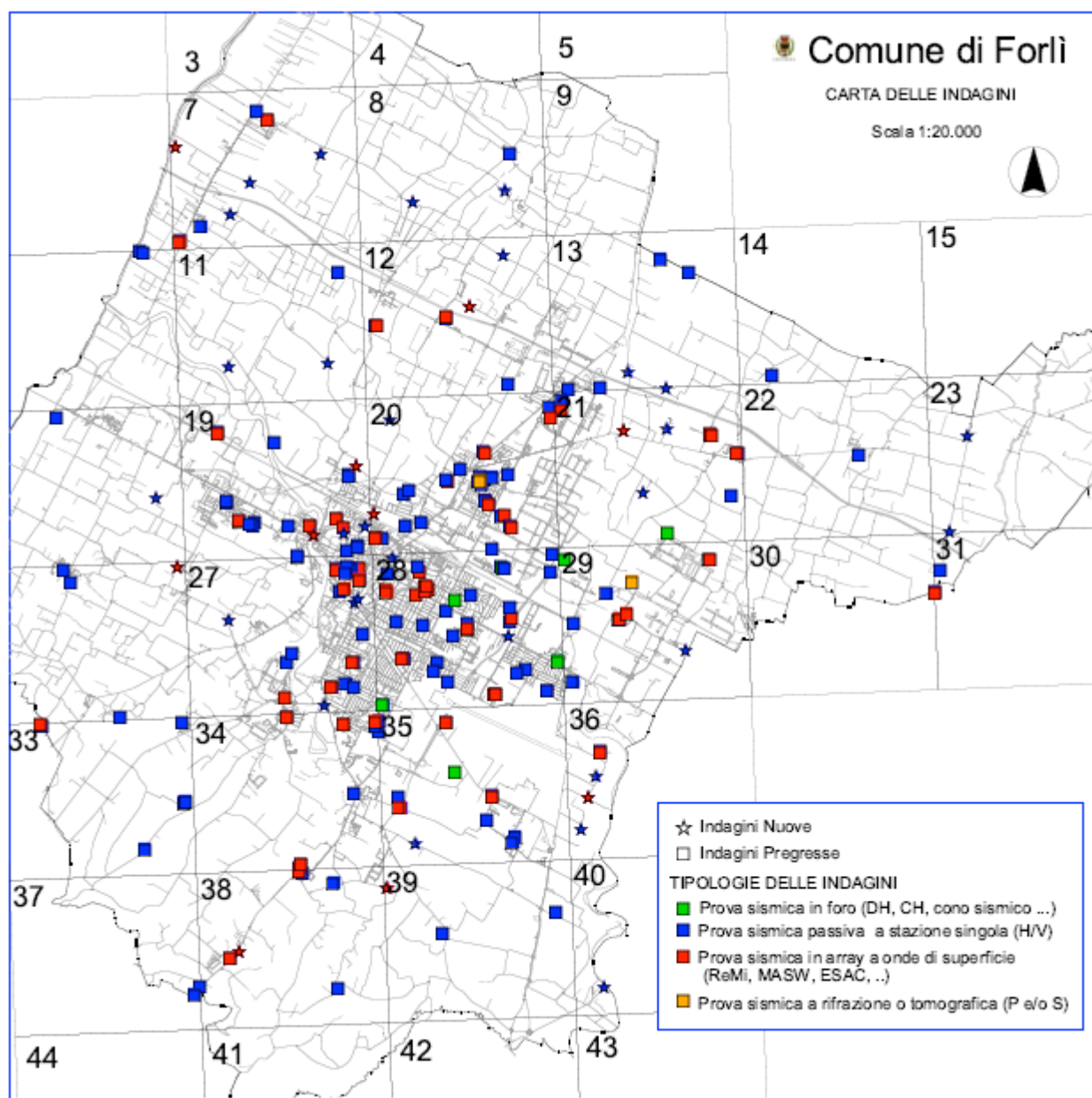


Figura 1. Ubicazione delle indagini e loro distinzione tra prove pre-esistenti questo studio (quadretti) e prove effettuate appositamente per questo studio (stelle). Le prove sono raggruppate per categoria. Verde: prove sismiche in foro, blu: prove sismiche passive a stazione singola, rosso: prove sismiche in array a onde di superficie, giallo: prove sismiche a rifrazione e/o tomografiche.

PROFONDITA' DELLE INDAGINI

Per ciascuna prova è stata rivalutata la profondità raggiunta dall'indagine. Mentre questa è 'scontata' nel caso delle prove in foro, appare più difficile da definire per le prove in superficie. In particolare, per le prove sismiche passive a stazione singola si sono distinte:

- prove in cui la curva H/V veniva riportata solo sopra 1 Hz (nel qual caso è stata attribuita una profondità arbitraria ma ragionevole, considerate le Vs in gioco, di 100 m di profondità. Queste rappresentano il 34% del totale, 48 su 162),

- prove in cui la curva veniva riportata da 0.1 Hz in su (nel qual caso è stata attribuita una profondità di indagine > 100 m). Queste rappresentano il 66% del totale, pari a 114 prove su 162.

Per le prove sismiche multicanale a onde di superficie la profondità di indagine è compresa tra $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{3}$ della lunghezza d'onda massima riconoscibile negli spettri di velocità di fase delle onde di superficie. Pertanto si è proceduto ad effettuare questo conteggio a partire dai dati acquisiti, ignorando i valori di V_s a profondità maggiori che spesso sono riportati nelle relazioni tecniche per la necessità di fornire dati fino a 30 m, indipendentemente dal fatto che l'indagine fosse davvero stata in grado di raggiungerli.

L'istogramma delle profondità raggiunte dalle prove in foro e multicanale è riportato in Figura 2.

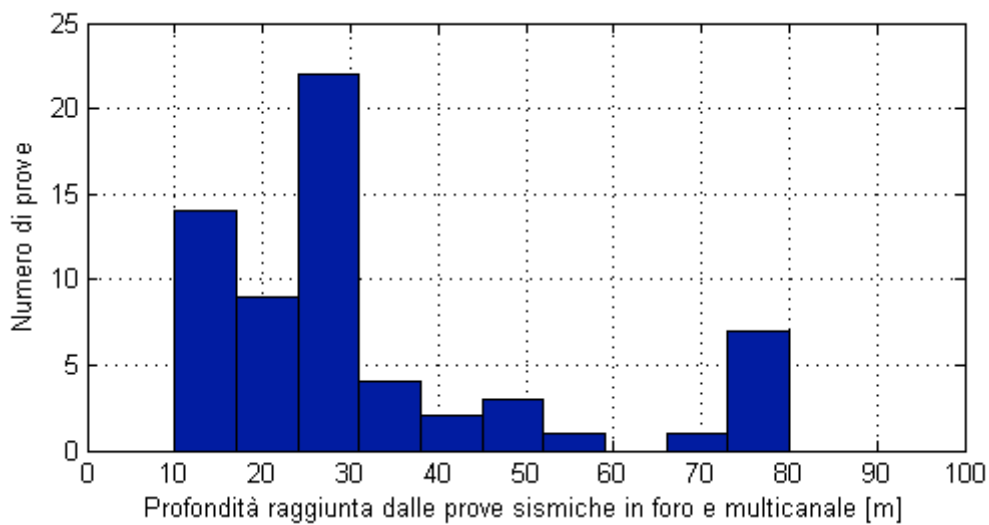


Figura 2. Istogramma delle profondità raggiunte dalle indagini in foro e multicanale (sono escluse dall'istogramma le prove a stazione singola).

2. PATTERN DI RISPOSTA SISMICA LOCALE NEL TERRITORIO COMUNALE

NOTA: le considerazioni geologiche di seguito riportate sono ridotte al minimo essenziale al fine dare un significato alle evidenze geofisiche. Per considerazioni più accurate si rimanda alla relazione geologica a cura del Prof. E. Farabegoli.

Il Comune di Forlì è caratterizzato per una ampia parte (Nord e centro) da sedimenti alluvionali fini (argille e limi, cfr. carta geologica, AES8: Sintema Emiliano-Romagnolo superiore, Subsintema di Ravenna; AES8a: unità di Modena, Sintema Emiliano-Romagnolo superiore, Subsintema di Ravenna) con intercalazioni sabbiose. Nella zona centrale, tra 5 e 30 m di profondità, compaiono le ghiaie (tetto ghiaie AES7 e AES8). Queste costituiscono un riflettore sismico relativamente rigido, in grado di generare amplificazione per risonanza nei terreni fini sovrastanti a frequenze comprese tra 3 e 20 Hz. Di fatto si tratta del riflettore sismico più importante ai fini della Microzonazione Sismica nel territorio comunale, in quanto genera risonanza a frequenze di interesse per le strutture di altezza inferiore a circa 8 piani (per ulteriori considerazioni si rimanda alla relazione geologica a cura del prof. E. Farabegoli).

In tutta la fascia centro-settentrionale del Comune, il bedrock sismico s.s. appare posizionato alla base del Sintema Emiliano-Romagnolo, ad una profondità dell'ordine dei 100 m (Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, 2004).

Nella parte meridionale del Comune affiorano o sub-affiorano le Argille Azzurre che costituiscono il bedrock sismico locale. Si tratta tuttavia di un bedrock sismico poco rigido, in cui la velocità delle onde sismiche di taglio non supera molto i 600 m/s. La zona interessata da questi litotipi appare solo marginalmente inurbata.

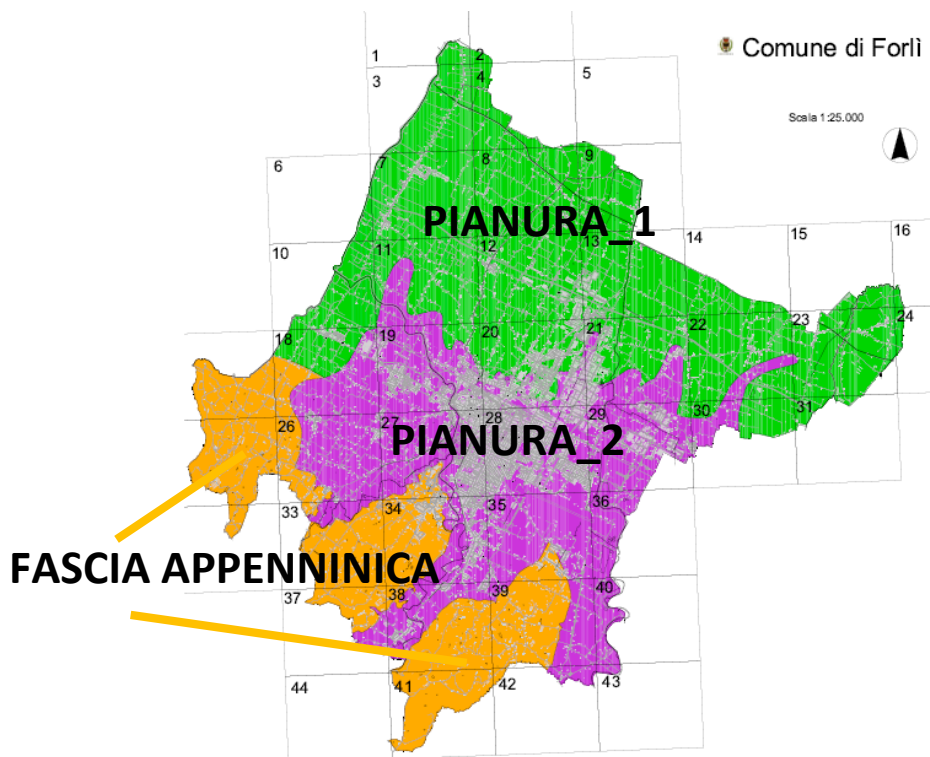


Figura 3. Perimetri delle zone PIANURA_1, PIANURA_2 e FASCIA APPENNINICA.

Le misure H/V condotte suggeriscono la suddivisione nel territorio in 3 zone a comportamento sismico distinto. Inoltre, sebbene vada prestata molta attenzione al significato fisico del parametro Vs30, la sua distribuzione (Figura 16) suggerisce una suddivisione all'incirca analoga in 3 zone con andamento Appenninico NW-SE che saranno descritte nel seguito.

PIANURA (1)

Questa zona, con orientamento NW-SE e ubicata prevalentemente a Nord del centro storico di Forlì, è caratterizzata da terreni a bassa velocità che mostrano un lento aumento con la profondità, senza contrasti di impedenza rilevanti ($V_s < 200$ m/s in superficie, $V_{s30} < 240$ m/s). Questo si traduce nell'assenza di picchi nelle curve H/V sopra 1-2 Hz.

In tutta l'area è invece ben visibile una amplificazione delle curve H/V a 0.8-1 Hz, legata alla risonanza dei terreni fini sovrastanti uno strato rigido ($V_s \approx 600$ m/s) posto a profondità variabile tra 80 e 150 m, interpretato come la base del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore di età inferiore ai 0.45 Ma.

Un profilo tipico di V_s caratteristico di questa zona è mostrato in Figura 4 e una curva H/V tipica di questa zona è mostrata in Figura 5.

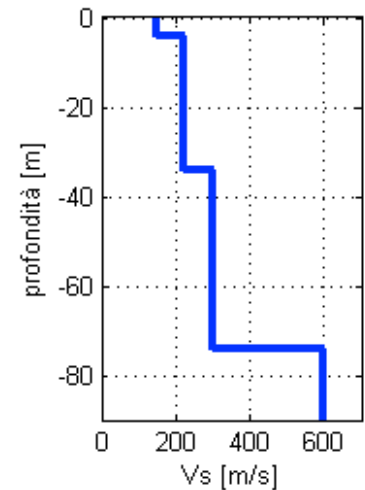


Figura 4. Tipico profilo di V_s misurabile nella zona PIANURA_1.

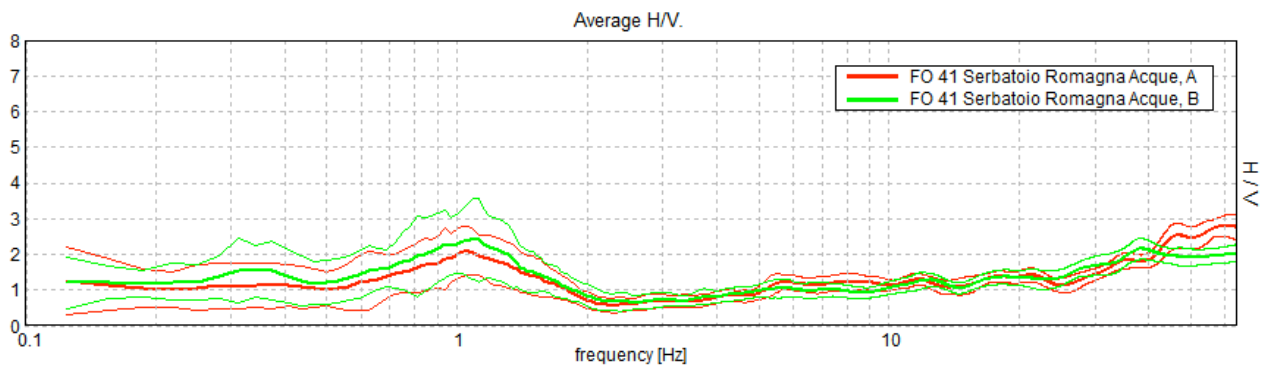


Figura 5. Tipico H/V misurabile nella zona denominata PIANURA_1.

PIANURA (2)

Questa zona, con estensione NW-SE ed ubicata nella fascia centrale del territorio comunale, è caratterizzata da alcuni metri (5-30 m) di terreni fini a bassa velocità ($V_s \approx 200$ m/s) seguiti da terreni granulari più rigidi (sabbie e ghiaie, $V_s > 300$ m/s). Questa configurazione determina delle moderate amplificazioni per risonanza delle coperture fini a frequenze mediamente superiori a 3 Hz. I valori di V_{s30} si assestano tra 240 e 300 m/s).

In tutta l'area è ancora visibile una modesta amplificazione delle curve H/V a frequenze < 1 Hz, legata alla risonanza delle coperture sovrastanti uno strato rigido ($V_s \approx 600$ m/s) posto a profondità variabile tra 80 e 150 m.

Un profilo tipico di V_s caratteristico di questa zona è mostrato in Figura 6 e una curva H/V tipica di questa zona è mostrata in Figura 7.

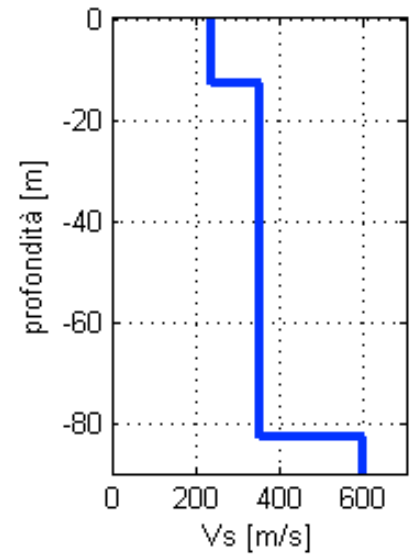


Figura 6. Tipico profilo di V_s misurabile nella zona PIANURA_2.

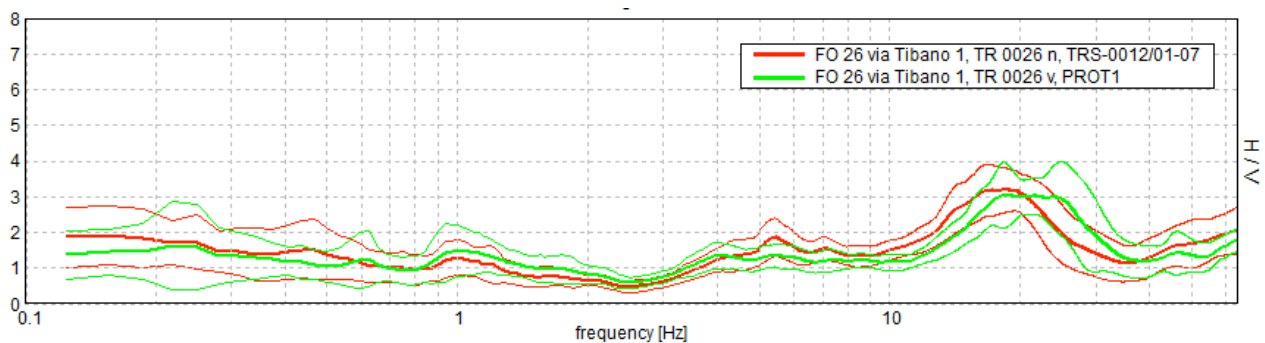


Figura 7. Tipico H/V misurabile nella zona denominata PIANURA_2.

FASCIA APPENNINICA

Questa zona, ubicata nella fascia meridionale del territorio comunale, è caratterizzata dalla presenza del bedrock sismico affiorante o sub-affiorante (Argille Azzurre, $V_s \approx 300$ m/s nella parte superficiale, crescenti fino a 600 m/s in profondità). In questa zona i valori di V_{s30} si assestano sopra i 300 m/s e V_{sH} si assesta tra i 200 e i 300 m/s.

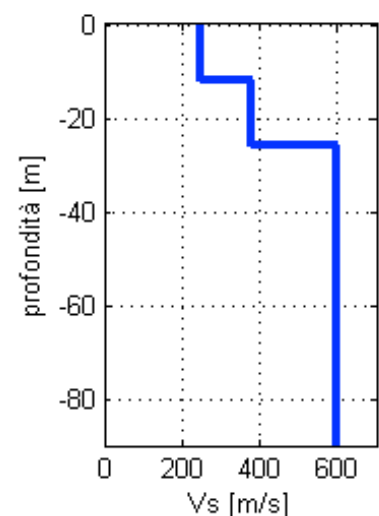


Figura 8. Tipico profilo di V_s misurabile nella zona FASCIA APPENNINICA.

Il contrasto di impedenza tra le coperture e il bedrock (generalmente prima alterato) dà luogo a picchi H/V di modesta ampiezza a frequenze > 2 Hz, in funzione della profondità del bedrock. Le ampiezze di questi picchi sono sempre inferiori a 4 (e nella maggior parte dei casi inferiori anche a 3) al punto che si possono osservare contrasti di impedenza maggiori nella zona PIANURA_2 (legati alle ghiaie) rispetto a quelli che si osservano nella zona FASCIA APPENNINICA.

Un profilo tipico di Vs caratteristico di questa zona è mostrato in

e una curva H/V tipica di questa zona è mostrata in Figura 9.

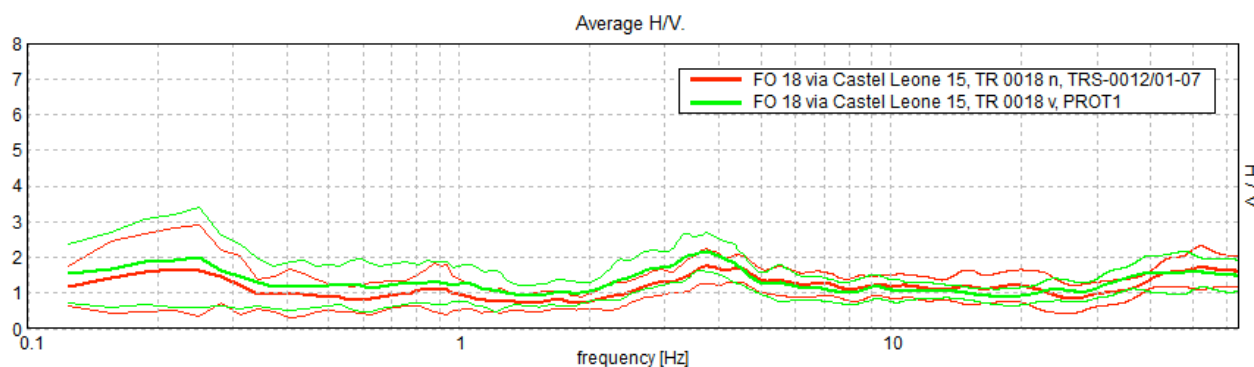


Figura 9. Tipico H/V misurabile nella zona denominata FASCIA APPENNINICA.

STUDIO SEMPLIFICATO DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Al fine di schematizzare la risposta sismica attesa nelle 3 zone appena definite, abbiamo condotto una analisi lineare equivalente 1D usando un codice standard (EERA, 2000). Tale analisi si articola secondo lo schema seguente:

- 1) definizione del modello geotecnico del sottosuolo,
- 2) selezione di un moto di input (terremoto “caratteristico”) al bedrock,
- 3) stima dell’ amplificazione del moto in superficie rispetto al bedrock, in funzione della frequenza,
- 4) stima dello spettro di risposta dell’oscillatore armonico tipo (edificio) a un grado di libertà in termini di accelerazioni massime attese in funzione del periodo proprio della struttura per uno smorzamento assunto pari al 5%.

MODELLI DI SOTTOSUOLO E INPUT SISMICO

I modelli di sottosuolo per le 3 zone sono già stati definiti a pag. 10-12. In particolare, i profili di sottosuolo impiegati in termini di Vs sono riprodotti in Figura 10.

Le curve del modulo di taglio adottate sono quelle riportate da Seed e Sun (1989) per le argille e da Seed e Idriss (1970) per le sabbie. Le curve di smorzamento adottate sono quelle proposte da Idriss (1990).

Nei modelli relativi ai siti di pianura la tavola d’acqua è stata posta in corrispondenza del passaggio tra primo e secondo strato (4-12 m).

Al fine di ridurre al minimo le variabili del modello, come funzione di input (terremoto) abbiamo impiegato delle Ricker wavelet (Figura 11, sinistra) a frequenza variabile tra 0.1 e 2 Hz, per simulare terremoti di

diverse dimensioni. In Figura 11 (destra) si può infatti osservare che il contenuto in frequenza dei terremoti decade rapidamente (in termini di spettro di spostamento) sopra la così detta *corner-frequency*. Questo implica che in termini di spettro di velocità il contenuto è massimo attorno a questa frequenza. Si osserva dal grafico che la *corner-frequency* è compresa tra 0.1 e 1 Hz per eventi di magnitudo M_s (magnitudo delle onde di superficie) compresa tra 3 e 7.

La prassi di usare una ondina di Ricker per simulare la fase S dei sismogrammi è comune in sismologia. Va infatti ricordato che i codici 1D di simulazione di risposta sismica locale prevedono che l'input sia una onda S polarizzata sul piano orizzontale che oscilla in verticale dal bedrock alla superficie e viceversa e che – nei casi monostrato di spessore H su bedrock – va pertanto in risonanza alle frequenze che sono i multipli dispari della funzione $V_s / (4 H)$.

Se impiegassimo come input delle nostre modellazioni la componente orizzontale di un sismogramma reale o simulato, introdurremmo una grande percentuale di onde che non sono onde S ma onde di superficie. E' noto infatti (NMSOP, 2002) che ad eccezione dei terremoti molto profondi, che generano poche onde di superficie, la massima parte del sismogramma sia per durata che per ampiezza è costituita da onde di superficie, di cui i modelli semplificati come quelli su cui si basa la MZS di Livello I e II non possono tenere conto.

Nella modellazione, il valore di picco dell'accelerazione sismica al bedrock è stato assunto pari a $|PGA_0| = 0.2 \text{ g}$ come dettato dall'Atto di Indirizzo per la MZS in Emilia Romagna (2007).

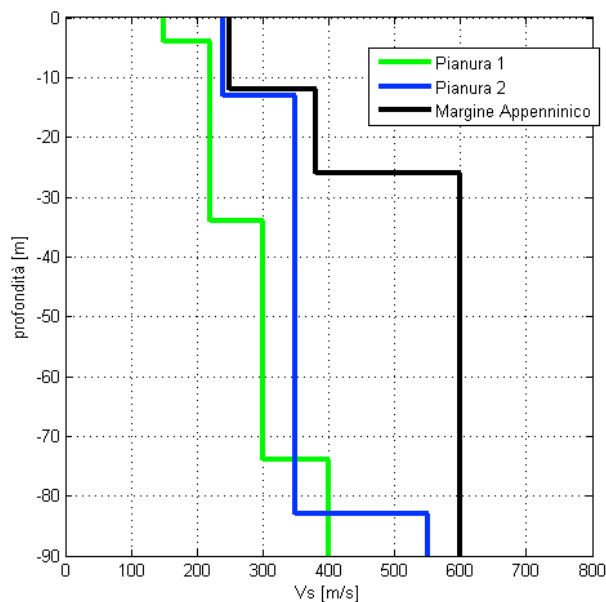


Figura 10. Profili di V_s impiegati per la modellazione semplificata della risposta di sito.

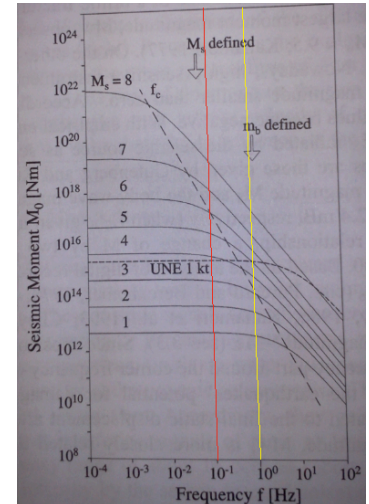
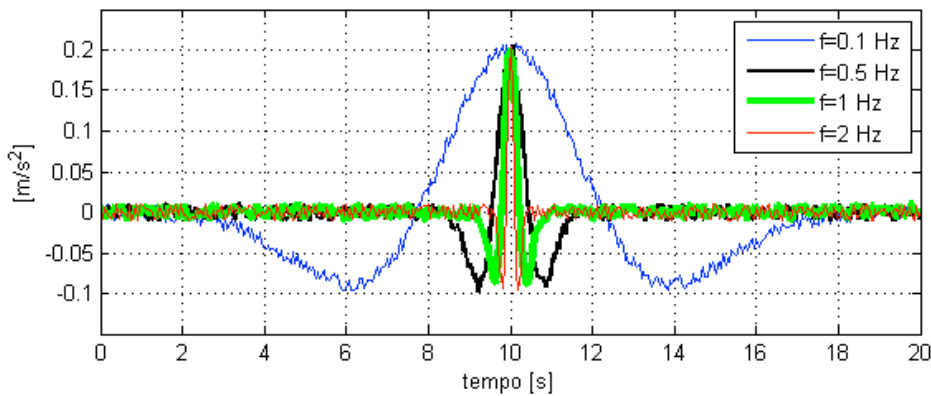


Figura 11. *Sinistra*: funzioni usate come input nello studio di risposta sismica locale. Si tratta di Ricker wavelet con frequenza 2, 1, 0.5 e 0.1 Hz per simulare terremoti di magnitudo crescente. *Destra*: andamento del momento sismico scalare M_0 con la frequenza per terremoti di diverse magnitudo delle onde di superficie M_s (NMSOP, 2002).

FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE

Le funzioni di amplificazione del moto del suolo in superficie rispetto al bedrock ottenute dall'analisi, sono illustrate in Figura 12 (alto) per i 3 modelli di sottosuolo (PIANURA_1, PIANURA_2 e FASCIA APPENNINICA) e per i 4 terremoti di input. Si osserva una sostanziale somiglianza di queste curve con le curve H/V tipiche dei 3 siti.

In particolare, nei siti PIANURA_1 e PIANURA_2 prevale l'amplificazione a frequenze inferiori ad 1 Hz.

Nei siti PIANURA_2 possono esserci amplificazioni modeste ma non trascurabili anche sopra 2 Hz, in particolare per i terremoti di piccole dimensioni, come già evidenziato dall'analisi H/V.

Nei siti FASCIA APPENNINICA prevale infine l'amplificazione in alta frequenza (> 2 Hz) per la presenza del bedrock poco profondo.

SPETTRO DI RISPOSTA

Lo spettro di risposta rappresenta la massima accelerazione (o spostamento, o velocità) a cui sarà sottoposto un oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà (edificio) di periodo proprio T_0 e smorzamento convenzionalmente assunto pari al 5%. In Figura 12 (basso) riportiamo tali funzioni distinte per i 3 tipi di sottosuolo (PIANURA_1, PIANURA_2 e FASCIA APPENNINICA) e per i diversi terremoti di input.

A differenza delle funzioni di trasferimento bedrock-superficie che sono fortemente dipendenti dal tipo di sottosuolo, gli spettri di risposta risentono molto della funzione di input (terremoto). In particolare, lo spettro risulta avere la massima ampiezza a periodi centrati attorno a quelli del terremoto di input, ossia tanto più lunghi quanto maggiore è il momento del terremoto simulato.

Dalla Figura 12 (basso) si osserva che nei terreni di PIANURA_1 le pseudo accelerazioni spettrali attese per le strutture crescono da 0.5 a 0.7 g al diminuire del contenuto in frequenza del terremoto mentre il trend opposto è atteso nei siti della FASCIA APPENNINICA.

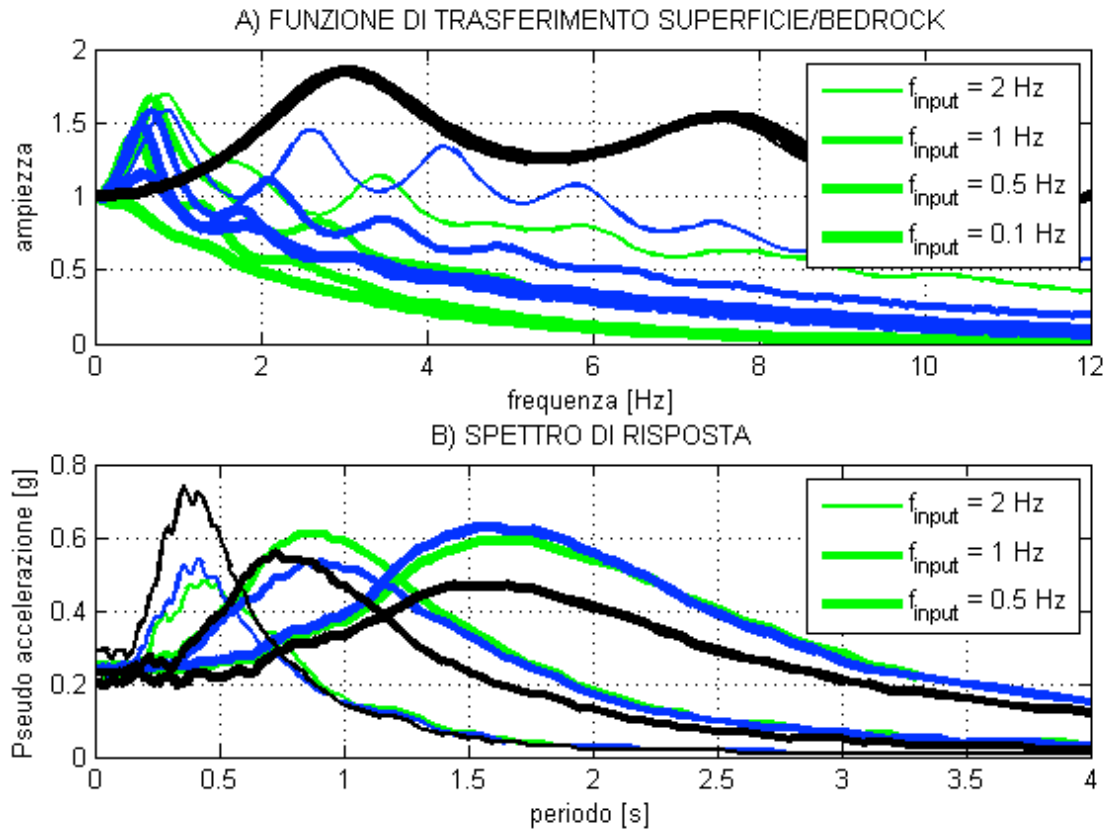


Figura 12. *Alto*: funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 4 input di Figura 11 e per i 3 modelli di terreno impiegati. Verde per PIANURA_1, blu per PIANURA_2 e nero per FASCIA APPENNINICA.

Basso: spettro di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad 1 gradi di libertà e smorzamento 5% in funzione del moto di input (Figura 11) e per i 3 modelli di terreno impiegati. Verde per PIANURA_1, blu per PIANURA_2 e nero per FASCIA APPENNINICA.

3. MAPPE TEMATICHE

Gli esiti delle indagini sperimentali pregresse e di nuova acquisizione saranno ora discussi suddivisi per tema.

CARTA DELLE FREQUENZE DI RISONANZA (f_0 e f)

Per frequenza fondamentale di risonanza f_0 si intende la frequenza minima osservabile in ciascun sito. Tale frequenza non coincide sempre con quella di principale interesse né per ampiezza né per valore proprio, in quanto può trovarsi molto lontana dalle frequenze proprie delle strutture in esame.

In molti siti del territorio del Comune di Forlì è stata misurata più di una frequenza di risonanza degna di nota. A partire dall'osservazione che, quando esistevano due frequenze di risonanza, la prima era sempre a $f < 2.5$ Hz, al fine di segnalarle entrambe sono state elaborate due carte (Figura 13 e Figura 14):

CARTA DELLE FREQUENZE DI RISONANZA		
Suddivisa negli intervalli		
$0.6 \leq f \leq 2.5$ Hz	$0.6 \leq f < 1.5$ Hz	$1.5 \leq f < 2.5$ Hz
$2.5 < f \leq 10$ Hz	$2.5 \leq f < 5$ Hz	$5 \leq f < 10$ Hz

Tabella 2. Intervalli di frequenza usati per le carte delle frequenze di sito.

Si è volutamente evitata una eccessiva differenziazione in classi di frequenza poiché nell'intero territorio i contrasti di impedenza sono modesti e generano picchi mediamente marcati o solo poco marcati nelle curve H/V, col risultato che le incertezze nella definizione della posizione del picco sono di qualche decimo di Hz e non ha quindi senso ambire a classificazioni di dettaglio quando le incertezze connesse ai valori medi sono larghe.

NOTA: in tutto il territorio comunale è stata misurata una blanda amplificazione a 0.25 Hz (legata ad un riflettore sismico rigido profondo diverse centinaia di metri). Questa non viene riportata nelle carte poiché presente ovunque e lontana dalle frequenze di interesse ingegneristico per la maggior parte delle strutture del territorio ma va comunque segnalata.

Per quanto riguarda la carta delle frequenze $0.6 \leq f \leq 2.5$ Hz, si può osservare (Figura 13) che nelle fasce denominate PIANURA_1 e PIANURA_2 prevale la risonanza a $f \leq 1.5$ Hz mentre nella FASCIA APPENNINICA, si assiste ad un aumento della frequenza, legato alla presenza del bedrock subaffiorante.

Per quanto riguarda la carta delle frequenze $2.5 < f \leq 10$ Hz, si può osservare (Figura 14) la dominanza di alte frequenze (> 5 Hz) che trova spiegazione nella risonanza delle coperture sovrastanti le ghiaie entro i 30 m di profondità nella fascia centro-settentrionale del territorio comunale e nella superficialità del bedrock nella FASCIA APPENNINICA. Si osserva che in questi casi i valori di ampiezza dei picchi H/V sono marcati (> 4).

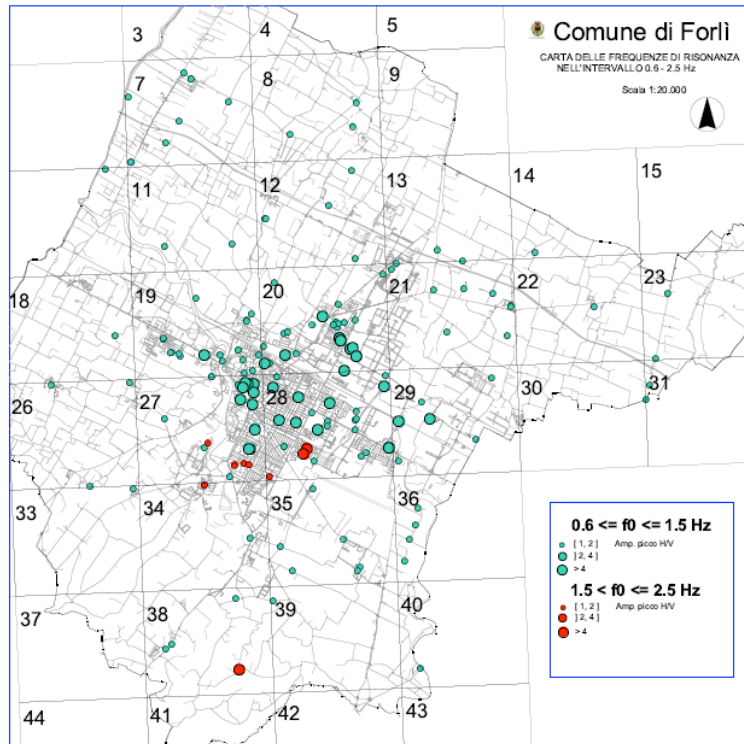


Figura 13. Miniatura della carta delle frequenze di risonanza nell'intervallo $0.6 \leq f \leq 2.5$ Hz. I diametri dei cerchi sono proporzionali all'ampiezza dei picchi H/V come indicato in legenda.

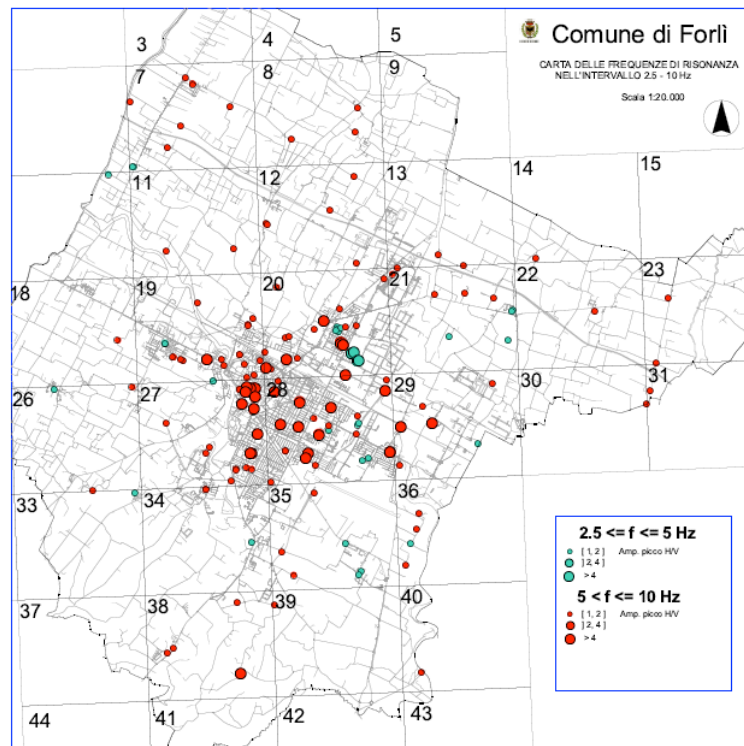


Figura 14. Miniatura della carta delle frequenze di risonanza nell'intervallo $2.5 < f \leq 10$ Hz. I diametri dei cerchi sono proporzionali all'ampiezza dei picchi H/V come indicato in legenda. Nella parte centro-settentrionale del comune le risonanze sono legate al tetto delle ghiaie entro le prime decine di metri di profondità, nella parte meridionale del comune le risonanze sono legate al bedrock (Argille Azzurre) superficiale.

CARTA VsH - Vs30

Le carte sopra descritte mostrano che la massima ampiezza dei picchi H/V non si riscontra nella FASCIA APPENNINICA, in cui il contrasto di impedenza è dato dal contatto tra coperture e bedrock (Argille Azzurre) ma nelle zona di pianura, in corrispondenza dei contrasti di impedenza tra coperture fini e ghiaie. In entrambi i casi ghiaie e bedrock non si configurano come substrati rigidi, per cui effettueremo una prima classificazione basata su V_{s30}^2 .

La carta a contour dei valori di V_{s30} è riportata in Figura 16 e suggerisce – come già accennato a pag. 10 – una divisione del territorio in 3 zone:

- 1) PIANURA_1 ($V_{s30} \leq 240$ m/s): zona ad andamento NW-SE ubicata prevalentemente a nord del centro storico,
- 2) PIANURA_2 ($240 < V_{s30} \leq 300$ m/s): zona caratterizzata da presenza di ghiaie nel sottosuolo che aumentano la rigidità media dei terreni ma sono responsabili di amplificazioni marcate nella fascia $3 \leq f \leq 10$ Hz,
- 3) FASCIA APPENNINICA ($V_s > 300$ m/s): zona a Sud del territorio comunale, caratterizzata da bedrock (Argille Azzurre) affiorante o subaffiorante

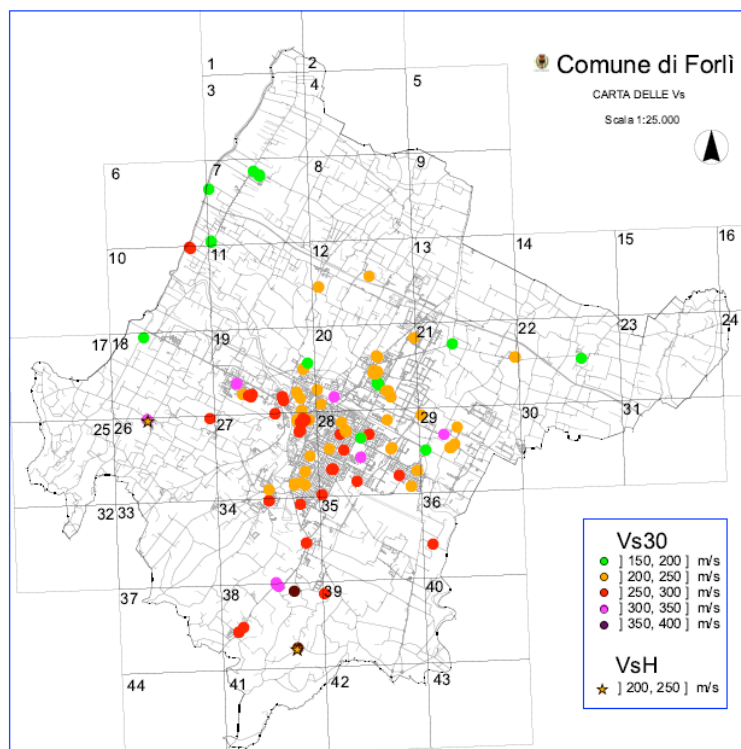


Figura 15. Miniatura della carta dei valori di Vs30 e VsH.

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^{30} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

2 Dove h_i è la profondità dello strato i -esimo e V_{s_i} è V_s dello strato i -esimo. La sommatoria si intende fino a 30 m. Nel caso di VsH si sostituisca 30 con H e la sommatoria sarà condotta fino alla profondità H.

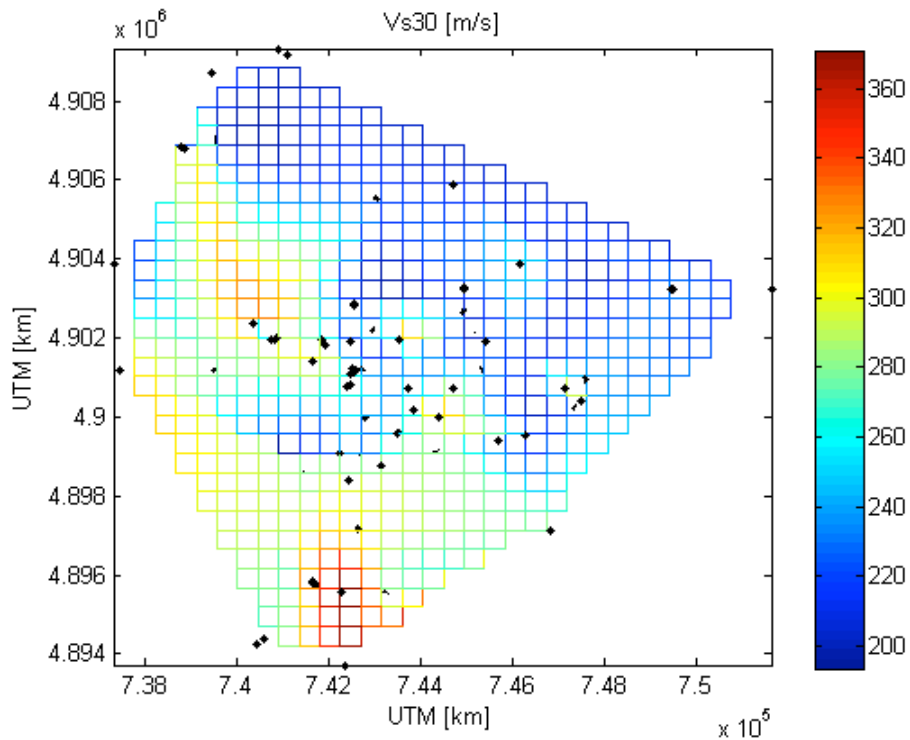


Figura 16. Carta a contour del parametro Vs30 nel territorio comunale di Forlì. I colori rappresentano i valori di Vs30 in m/s. Le coordinate rappresentano i valori del reticolato chilometrico UTM. I punti neri rappresentano l'ubicazione delle indagini che è stato effettivamente possibile sfruttare per definire i valori di Vs30.

CARTA Fa-FV

A partire dai profili di Vs disponibili, è stata compilata la carta dei fattori di amplificazione definiti secondo gli ICMS (2008) come segue:

- Fa fattore di amplificazione dello spettro dell'accelerazione a basso periodo (in prossimità del periodo proprio al quale si verifica il massimo della risposta in accelerazione),
- Fv fattore di amplificazione dello spettro di velocità a periodo proprio, per il quale si verifica la massima risposta in pseudovelocità.

Si sono adottate le tabelle semplificate presenti negli ICMS (2008) per $PGA_0 = 0.18$ g, profilo di velocità "lineare con pendenza intermedia", terreno superficiale di tipo argilloso e bedrock sismico a profondità di ≈ 100 m, salvo i casi in cui questo era nettamente diverso (siti di FASCIA APPENNINICA).

Questo ha portato alla suddivisione del territorio nelle già citate 3 zone, i cui margini sono riportati in Figura 17. In particolare, alla zona PIANURA_1 viene associato un fattore $Fa = 1.2$, alla zona PIANURA_2 un $Fa = 1.4$ e alla FASCIA APPENNINICA $Fa = 1.3$.

Al contrario si osservano fattori di amplificazione Fv massimi in zona di PIANURA_1 ($Fv = 2$) e minimi nelle zone di PIANURA_2 ($Fv = 1.9$) e FASCIA APPENNINICA ($Fv = 1.6-1.7$).

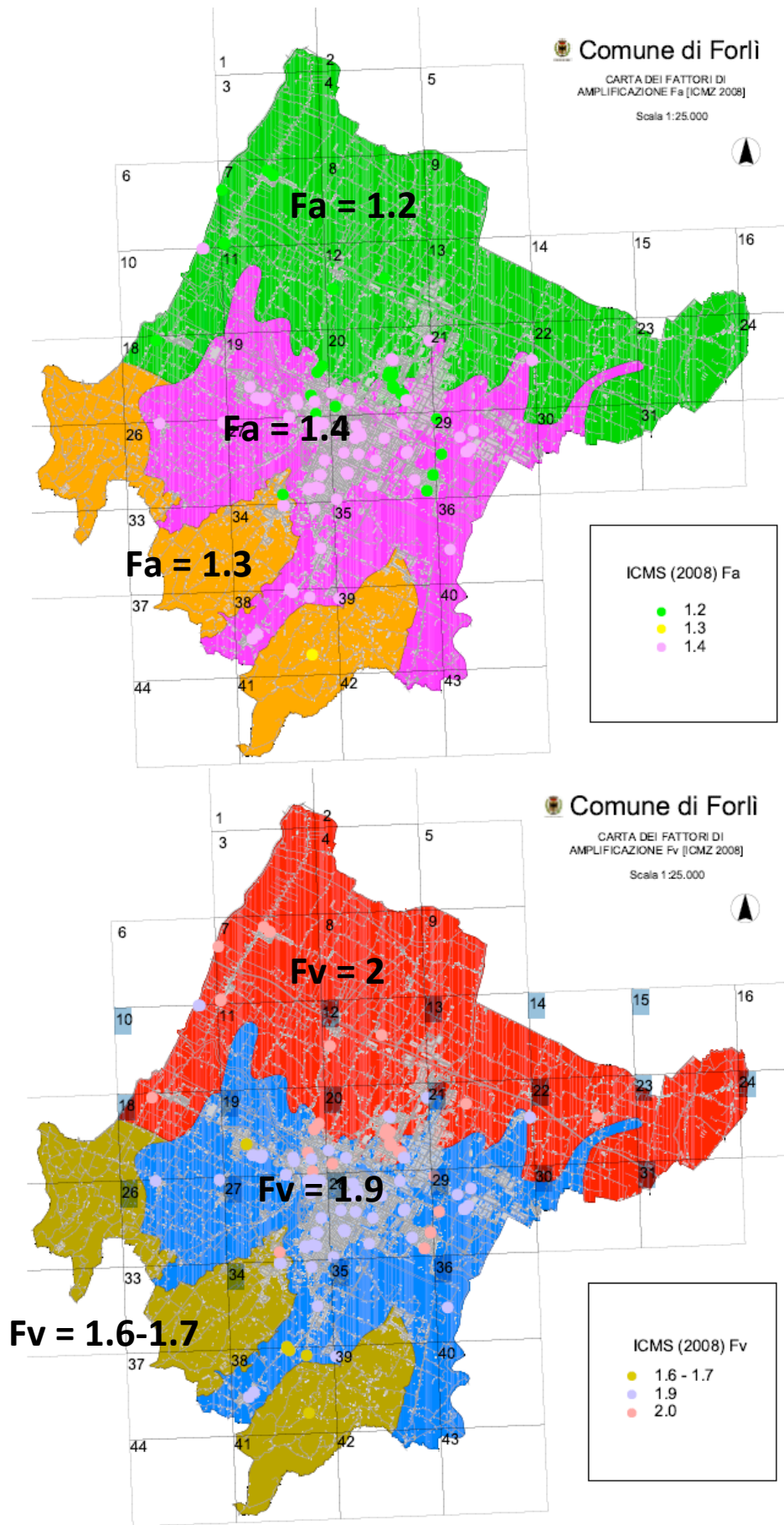


Figura 17. Fa e Fv definiti per le zone PIANURA_1, PIANURA_2 e FASCIA APPENNINICA secondo ICMS (2008).

CARTA $F_{a_{PGA0}}$, $F_{a_{0.1-0.5s}}$, $F_{a_{0.5-1s}}$

A partire dai profili di V_s e V_sH disponibili, è stata poi compilata la carta dei fattori di amplificazione definiti secondo l'Atto di Indirizzo per la MZS in Emilia Romagna (2007) come segue:

- $F_{a_{PGA0}}$, fattore di amplificazione di PGA_0 , (Peak Ground Acceleration, accelerazione sismica di picco al bedrock),
- $F_{a_{0.1-0.5s}}$ dell'intensità spettrale I_s nell'intervallo di periodo 0.1-0.5 s,
- $F_{a_{0.5-1s}}$ dell'intensità spettrale I_s nell'intervallo di periodo 0.5-1 s,

I fattori sono stati ottenuti dalle tabelle semplificate fornite in *ibid.* e rispettivamente 1) dalla tabella APPENNINO E MARGINE APPENNINICO-PADANO ($V_{s_{bedrock}} < 800$ m/s) per la FASCIA APPENNINICA e 2) dalla tabella PIANURA 2 per i siti in ambito di pianura caratterizzati da profilo stratigrafico costituito da alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, con intercalazioni di orizzonti di ghiaie (di spessore anche decine di metri), con substrato profondo (≥ 100 m da p.c.). I risultati ottenuti sono riportati in Figura 18-Figura 20, dove sono messi a confronto con i perimetri delle 3 zone definite in precedenza (aree con diverso riempimento in toni di grigio sullo sfondo).

Si osserva che i valori di $F_{a_{PGA0}}$ non mostrano una sostanziale diversificazione nel territorio (Figura 18). Alla maggior parte dei siti di indagine sono associati $F_{a_{PGA0}} = 1.5$ con poche variazioni verso $F_{a_{PGA0}} = 1.4$ a sud del territorio.

Maggior differenziazione è fornita dalla carta dei $F_{a_{0.1-0.5s}}$, con una tendenza dei valori a diminuire verso sud (Figura 19).

La carta che meglio descrive le 3 zone a diversa amplificazione descritte per il territorio è la carta dei $F_{a_{0.5-1s}}$ (Figura 20). Questa mostra massima amplificazione (2.5) del parametro in oggetto nella zona PIANURA_1, amplificazione intermedia (2.3) nella zona PIANURA_2 e amplificazione minore nella FASCIA APPENNINICA (1.5-2).

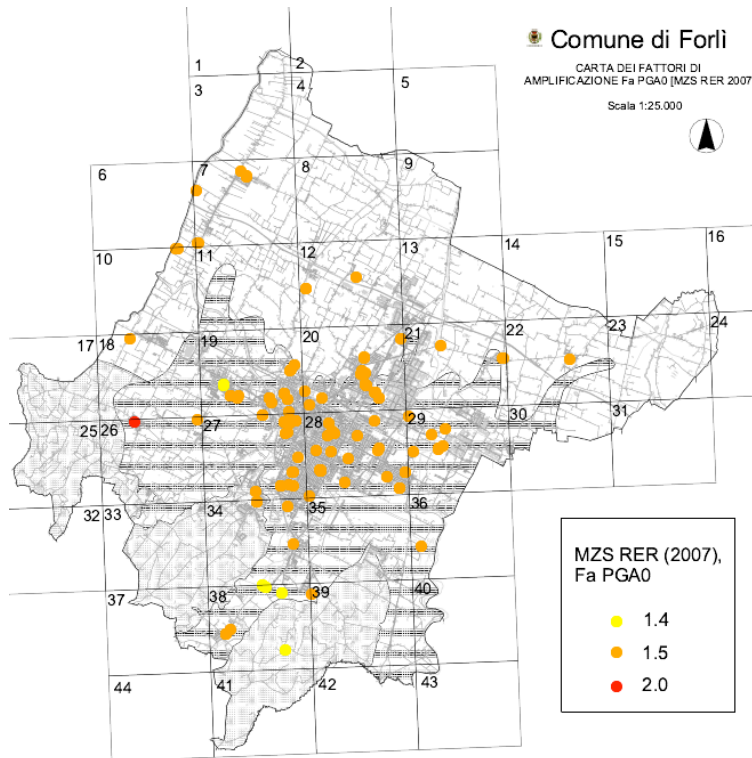


Figura 18. Carta del parametro Fa_{PGA0} secondo l'Atto di Indirizzo per la MZS della Regione Emilia Romagna (2007). Le aree con diversi toni di grigio dello sfondo si riferiscono alle zone PIANURA_1, PIANURA_2 e FASCIA APPENNINICA descritte nel testo (Figura 3).

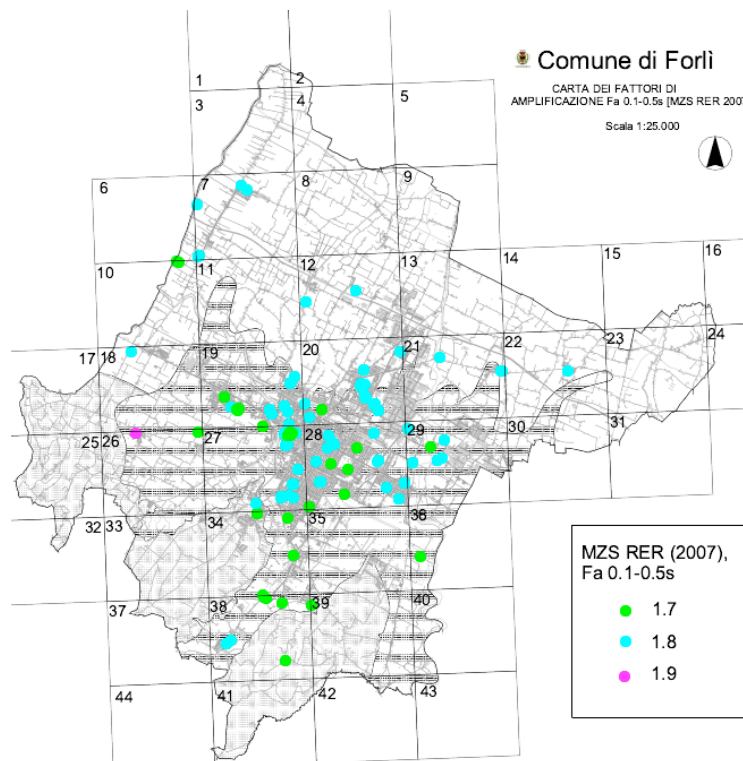


Figura 19. Carta del parametro $Fa_{S[0.1,0.5]s}$ secondo l'Atto di Indirizzo per la MZS della Regione Emilia Romagna (2007). Le aree con diversi toni di grigio dello sfondo si riferiscono alle zone PIANURA_1, PIANURA_2 e FASCIA APPENNINICA descritte nel testo (Figura 3).

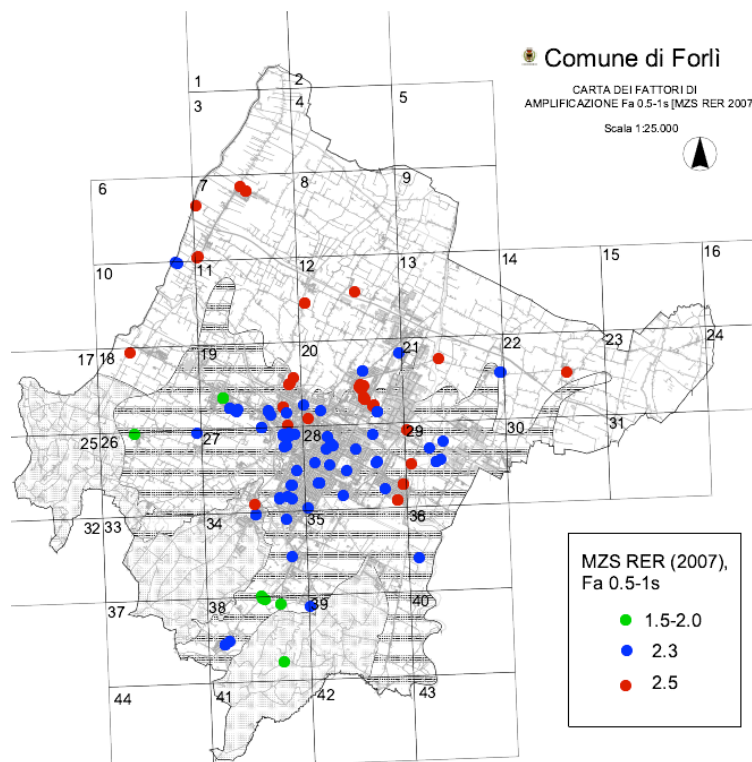


Figura 20. Carta del parametro $Fa_{IS[0.5,1]s}$ secondo l'Atto di Indirizzo per la MZS della Regione Emilia Romagna (2007). Le aree con diversi toni di grigio dello sfondo si riferiscono alle zone PIANURA_1, PIANURA_2 e FASCIA APPENNINICA descritte nel testo (Figura 3).

ALTRE NOTE

Nel territorio comunale (siti PIANURA_1 e PIANURA_2) sono numerosi i banchi di sabbie a pochi metri di profondità e sotto falda. Tuttavia tutte le relazioni geotecniche scrutinate durante la fase di raccolta dati escludono la possibilità di liquefazione per questi livelli, essenzialmente perché non si tratta di sabbie sufficientemente pulite. Le relazioni riportanti le verifiche alla liquefazione – effettuate con diversi metodi presentati nella letteratura internazionale – sono 29 e sono ubicate nel territorio come mostrato in Figura 21. Sulla base di queste indagini si ritiene pertanto di poter escludere in generale il fenomeno della liquefazione, fermo restando che questa indicazione non riguarda la progettazione delle singole strutture (per le quali la verifica alla liquefazione deve essere condotta secondo i requisiti delle NTC, 2008) ma riguarda la pianificazione urbanistica a grande scala.

Nel territorio non si sono osservate inversioni di velocità o effetti 2D di dimensioni tali da giustificare approcci di stima dei fattori di amplificazione diversi da quelli semplificati forniti dagli ICMS (2008) e dall'Atto di Indirizzo per la Microzonazione Sismica della Regione Emilia Romagna (2007). Tuttavia non va dimenticato che i valori di Fa , Fv , Fa_{PGA0} , $Fa_{IS[0.1,0.5]s}$ e $Fa_{IS[0.5,1]s}$ non indicano il valore assoluto di amplificazione attesa nei vari siti ma vanno interpretati semplicemente come una scala di "pericolosità" relativa tra punti.

Stante quanto appena riportato in merito alla liquefazione e alle inversioni di velocità, considerata la mole di dati geofisici e geotecniche disponibili, considerato che le aree problematiche (zone appenniniche in frana ecc.) sono già escluse da interventi di urbanizzazione e considerato che le amplificazioni misurate nel

territorio sono da intermedie a modeste, non si ritengono necessarie verifiche di terzo livello ai soli fini della suddivisione del territorio in zona a comportamento sismico omogeneo (Microzonazione Sismica).

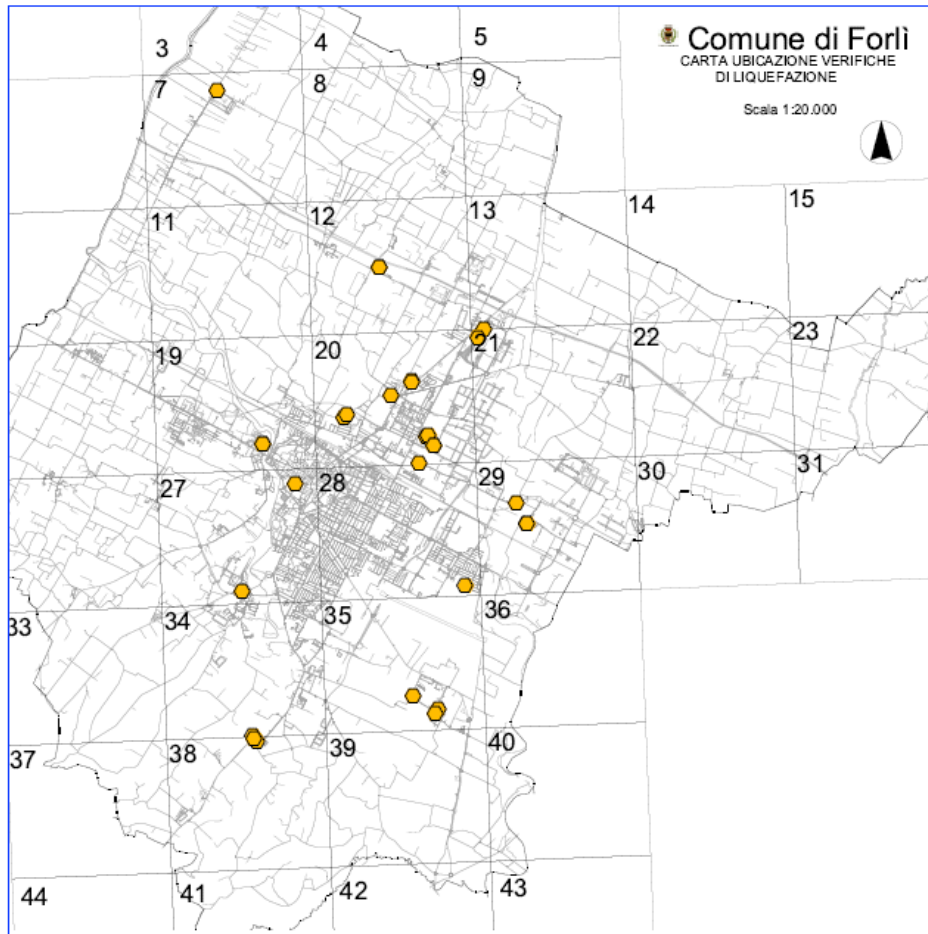


Figura 21. Ubicazione delle verifiche alla liquefazione analizzate nel territorio (rosso) rispetto alle indagini geofisiche disponibili (nero).

4. ANALISI DI STRUTTURE EDILIZIE RILEVANTI

Esistono essenzialmente due tipi di test per la caratterizzazione strutturale dinamica di un edificio: 1) test in condizioni di vibrazioni forzate, 2) test in condizioni di vibrazioni libere ambientali.

Nel primo caso la struttura viene sollecitata da mezzi artificiali, come degli oscillatori o la caduta di pesi. Nel secondo caso la vibrazione è indotta dall'eccitazione ambientale, sempre presente in natura in tutto l'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico e fornita da attività antropica o naturale (perturbazioni atmosferiche).

Studi sperimentali (es. Hans *et al.*, 2005) hanno mostrato che dalle piccole ampiezze delle vibrazioni ambientali alle ampiezze molto maggiori raggiunte sottoponendo gli edifici a shock artificiali che non portano a danneggiamento strutturale, le strutture rispondono seguendo lo stesso comportamento quasi elastico. Ne consegue che le misure di vibrazioni sotto la condizione di microtremore ambientale sono sufficienti per identificare il comportamento della struttura nell'intero dominio quasi-elastico.

In due siti di interesse strategico per il Comune in esame (serbatoio di Romagna Acque sito in Corso Diaz e Dipartimento della Protezione Civile Provinciale in via Cadore 75) sono state condotte analisi anche sulle strutture, oltre che sul suolo, al fine di identificare:

- le frequenze dei modi di vibrare
- la deformata del modo fondamentale flessionale
- lo smorzamento del modo fondamentale flessionale

secondo le procedure descritte nel seguito.

MODI DI VIBRARE

Per mettere in evidenza le risposte spettrali e le relative frequenze dei modi di vibrare dell'edificio in esame sono state effettuate misure di microtremore sui diversi livelli della struttura, sulla stessa verticale e con lo stesso orientamento, per la durata di 6-8 min su ciascun piano. Le serie temporali così registrate sono state analizzate secondo la procedura seguente:

- a) la serie temporale viene suddivisa in tratti di 20 s. Per ciascun tratto si esegue:
 - i. la correzione per la linea di base (*detrending*),
 - ii. un *tapering*, secondo finestra di Bartlett,
 - iii. un padding opportuno,
 - iv. la trasformata veloce di Fourier (FFT)
- b) lo spettro finale è dato dalla media degli spettri ottenuti su ciascun tratto.

In questo lavoro gli spettri sono lisciati all'1% della frequenza centrale.

RIMOZIONE DELL'EFFETTO DEL SOTTOSUOLO

Prima di enunciare le frequenze dei modi dell'edificio, è necessario rimuovere l'effetto del sottosuolo. Accade infatti che le frequenze proprie di risonanza di quest'ultimo siano misurabili anche all'interno della struttura e vadano pertanto rimosse per mettere in evidenza il solo effetto legato all'edificio.

A questo scopo si applica il metodo del *sito di riferimento* che consiste nell'assumere come riferimento le misure effettuate al piano di fondazione (ossia al piano in cui l'effetto dell'edificio è minimo e l'effetto del

sottosuolo è massimo) e nell'eseguire il rapporto tra le componenti spettrali omologhe dei vari piani e quelle del sito di riferimento.

Per misure effettuate in modo sincrono o sotto la condizione di rumore ambientale stazionario è possibile ricostruire anche la deformata del primo modo flessionale della struttura a partire dalle ampiezze spettrali.

SMORZAMENTO

Lo smorzamento delle strutture viene calcolato come il decremento logaritmico dell'ampiezza della vibrazione, in termini di spostamento, cui è soggetta la struttura in un periodo.

In assenza di impulsi trasmessi all'edificio *ad hoc*, disponendo di strumenti sufficientemente sensibili è possibile stimare lo smorzamento anche dal microtremore sismico ambientale. La tecnica principe per la stima dello smorzamento a partire dai dati di microtremore, nota con il termine RandomDec, fu introdotta da Cole negli anni '60-'70 e diffusa da Vandivier *et al.* (1982).

La tecnica consiste nel

- 1) rimuovere le componenti che non interessano applicando un filtro passabanda stretto attorno alla frequenza del modo di vibrazione in esame,
- 2) per ogni classe di soglia con ampiezza x' (in termini di spostamento), calcolare la funzione RandomDec mediando, per un tratto di lunghezza pari ad un periodo d'onda, i segmenti a partire dall'istante di superamento della condizione di trigger $x(t) = x'$, $x(t+\Delta t) - x(t) > 0$
- 3) l'espressione classica per calcolare lo smorzamento ξ sfrutta il decremento logaritmico:

$$\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{A_n}{A_{n+1}} \right| \approx \xi \quad \text{per piccoli valori di } \xi,$$

dove $|A_n|$ e $|A_{n+1}|$ sono i valori assoluti delle ampiezze misurati su un ciclo intero di periodo smorzato del sistema.

Al fine di ottenere una stima stabile occorre mediare su un numero di segmenti dell'ordine delle migliaia. Lo smorzamento dipende anche dall'ampiezza della vibrazione.

Abbiamo calcolato in prima approssimazione lo smorzamento attraverso un'altra tecnica non parametrica (Mucciarelli e Gallipoli, 2006). Essa consiste, dopo le procedure di rito di correzione ed equalizzazione del segnale, nell'integrazione dello stesso per ottenere serie temporali in termini di spostamento. Successivamente si cercano i massimi locali e si costruisce una matrice di ampiezze dei massimi $x(t_i)$ vs. istante di occorrenza t_i . Per ciascuna coppia di dati si verifica se $x(t_i) > x(t_i + 1)$ e in caso positivo si calcola la pseudofrequenza e lo smorzamento. Si ottengono così diagrammi come quelli di Figura 4 da cui si leggono le frequenze dei modi principali e lo smorzamento associato.

Questa tecnica è meno precisa della RandomDec classica ma più rapida e permette di ottenere un'informazione di larga massima sullo smorzamento anche da registrazioni di microtremore brevi, come quelle effettuate in questo studio.

SERBATOIO ROMAGNA-ACQUE, CORSO DIAZ

Su questa struttura (torre in muratura degli anni '30 rinforzata in c.a. nel secondo dopoguerra, altezza 33.5 m) sono state effettuate misure di microtremore su 5 livelli (dal seminterrato alla cima, secondo le quote di Figura 24) che hanno permesso di individuare i modi descritti in Tabella 3. Le misure sono state effettuate sulla stessa verticale in prossimità della parete esterna NW (Figura 22) poiché la parte centrale dei solai è occupata da una scala. L'asse NS strumentale è indicato dalla freccia rossa in Figura 22.

Stante la pianta circolare della struttura, era atteso un comportamento simile nelle direzioni indagate. La frequenza del primo modo flessionale è in effetti molto simile nelle due direzioni mentre emergono differenze relativamente alle altre frequenze modali (Figura 23).

Nella parte inferiore di Figura 23 sono riportate le curve H/V misurate nel giardino circostante la torre a titolo di confronto delle frequenze di risonanza di struttura e sottosuolo. Si osserva che il sottosuolo ha un frequenza propria attorno ad 1 Hz e non mostra particolari amplificazioni sopra questa frequenza (pattern di PIANURA_1 definito a pag. 10). Sebbene la struttura non sia in doppia risonanza col terreno, dall'analisi semplificata sappiamo che gli spettri di risposta per terremoti medio-piccoli possono presentare un massimo di ampiezza (0.7 g) proprio a frequenze prossime a quelle della torre (0.5 s, pari a 2 Hz) (Figura 12).

In generale le risonanze del sottosuolo a frequenza immediatamente inferiore (fino al 40% circa) a quella delle strutture sono considerate un elemento di svantaggio (maggior vulnerabilità) perché qualora l'edificio subisse dei danni strutturali (per es. nelle fasi iniziali di un terremoto), le sue frequenze proprie diminuirebbero, potendo così entrare in doppia risonanza con il terreno nella fase terminale del terremoto.

modo	NS [Hz]	EW [Hz]
1° flessionale*	2.4	2.4
	9.2	5
		9

Tabella 3. Frequenze dei modi di vibrare individuati secondo due assi ortogonali nella struttura. * Indica il primo modo flessionale o combinazione del primo flessionale + rocking (Todorovska, 2009).

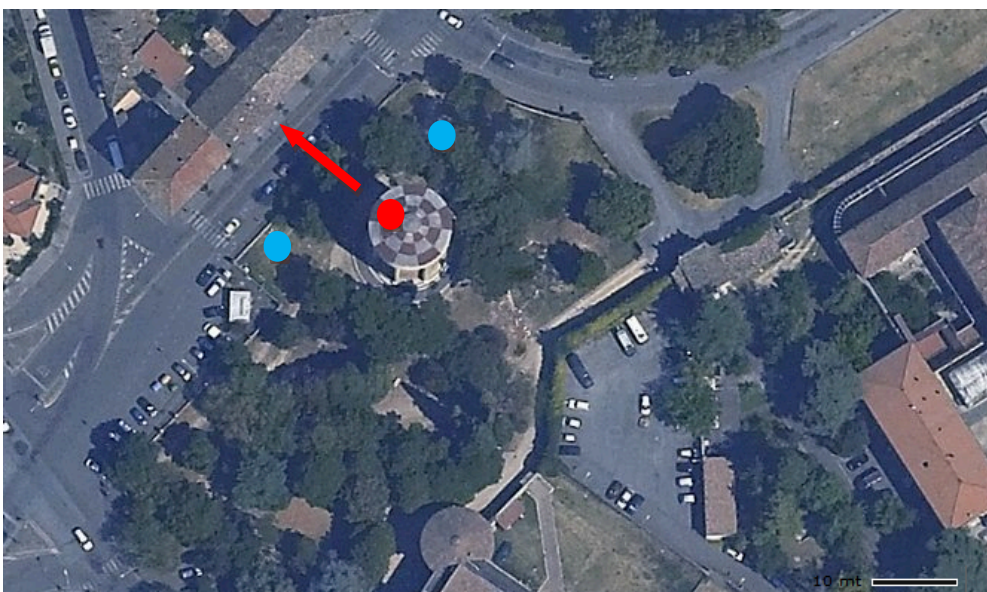


Figura 22. Rosso: ubicazione della verticale di misura all'interno della torre serbatoio d'acqua in Corso A. Diaz. La freccia indica la direzione dell'asse NS strumentale. Azzurro: punti di misura sul suolo.

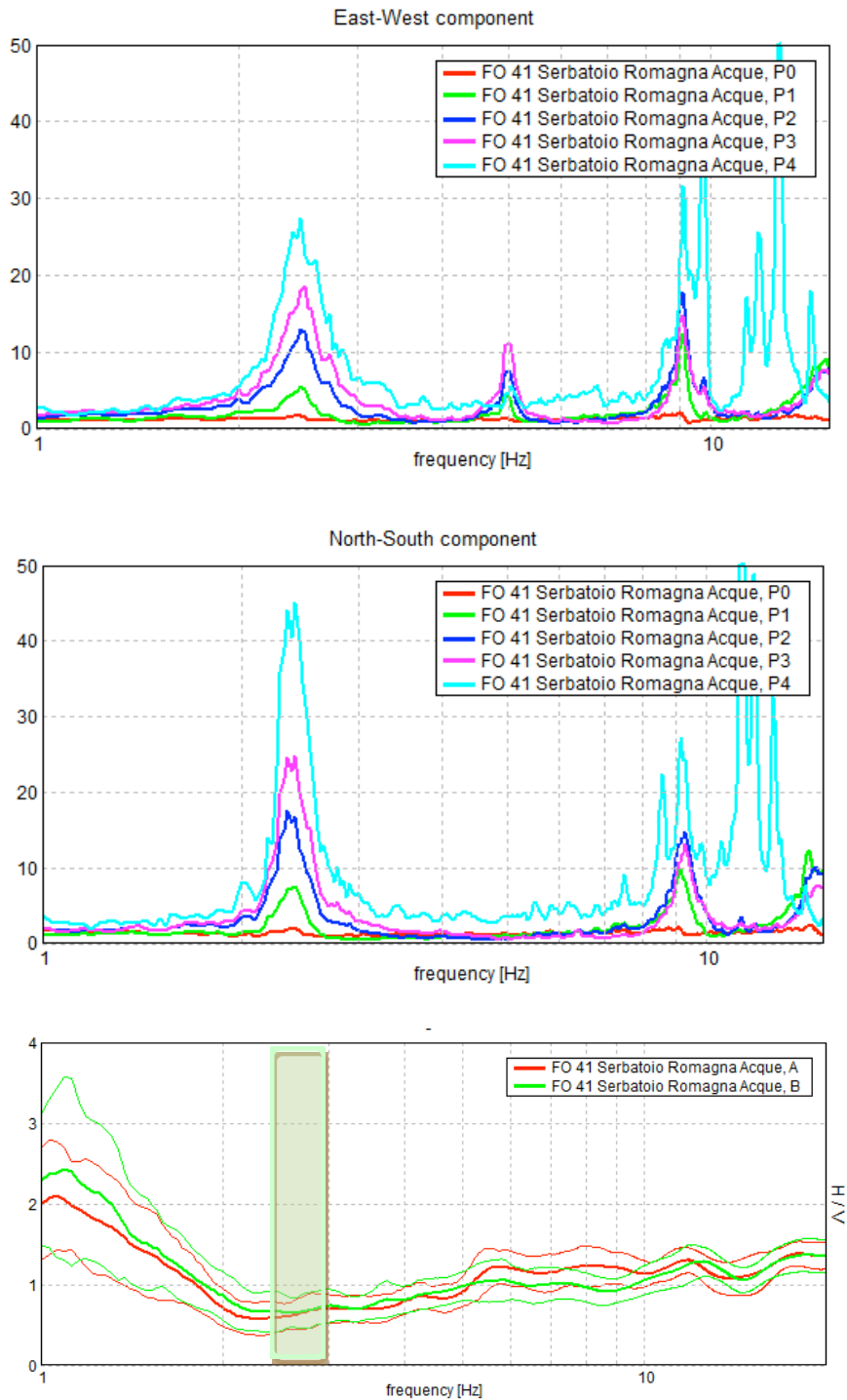


Figura 23. *Alto e centro*: rapporto tra gli spettri medi (ordinate, adimensionate) registrati ai vari livelli rispetto a quelli registrati al piano terra (sito di riferimento) in funzione della frequenza (ascissa). I rapporti mettono in evidenza le frequenze dei modi di vibrazione dell'edificio e i fattori di amplificazione del moto ai vari piani. *Alto*: componente strumentale EW. *Centro*: componente strumentale NS. *Basso*: curva H/V del sottosuolo riportata alla stessa scala di ascisse per confrontare le frequenze dei modi di vibrare di sottosuolo e struttura. Il rettangolo verde indica la frequenza del primo modo flessionale della torre.

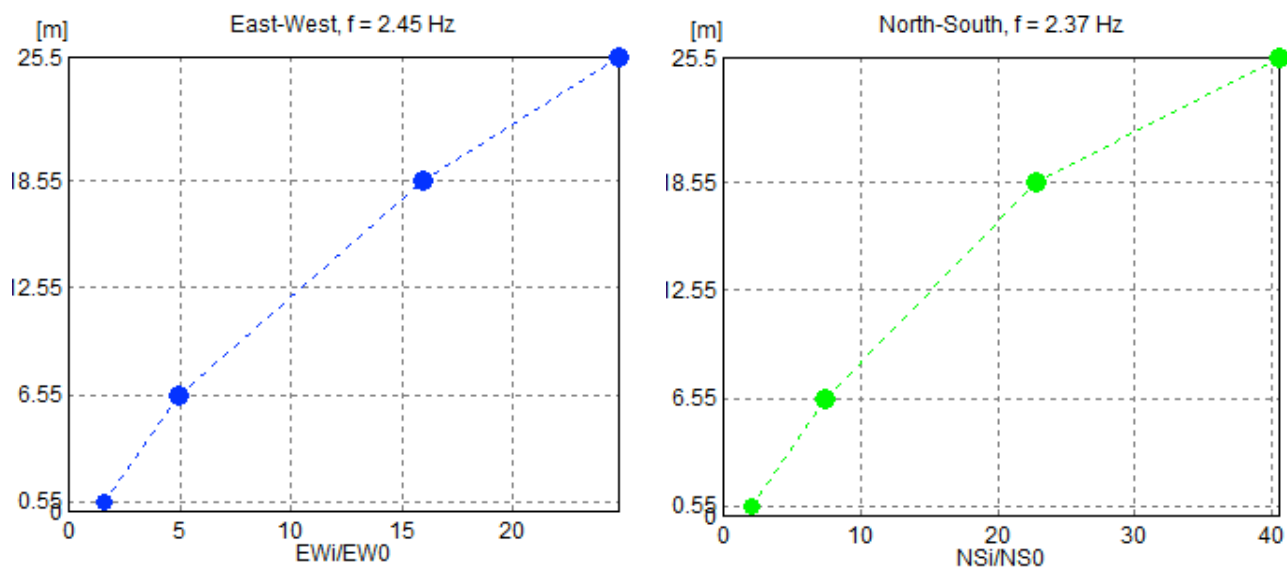


Figura 24. Deformate del primo modo flessionale in direzione longitudinale (*alto*) e trasversale (*basso*) rispetto al moto registrato al piano terra. L'ampiezza dello spostamento medio misurato in ogni piano è stata rapportata all'ampiezza dello stesso moto al piano terra e mostrata in ascissa come numero adimensionato, trattandosi di un rapporto.

Lo smorzamento associato al primo modo di vibrare appare molto basso ed esattamente poco inferiore al 2% in direzione EW (secondo Figura 22) e poco superiore al 2% in direzione NS (Figura 25).

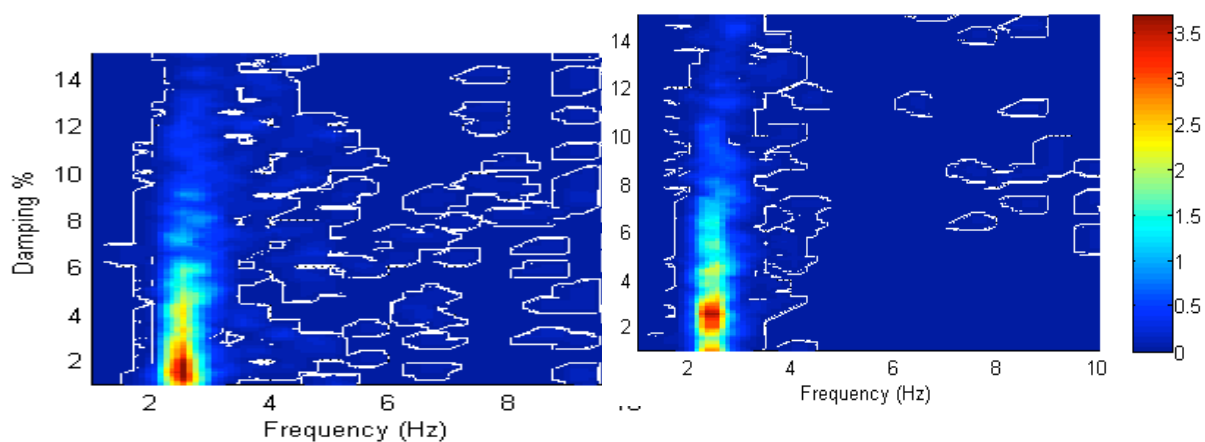


Figura 25. Smorzamento del primo modo flessionale per le componenti EW (sinistra) e NS (destra).

SEDE DEL DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE PROVINCIALE, VIA CADORE 75

In questa struttura (palazzina di 2 piani fuori terra) sono state effettuate misure di microtremore su 3 livelli che hanno permesso di individuare i modi descritti in Tabella 4. Le misure sono state effettuate sulla stessa verticale con l'orientamento degli assi strumentali indicato in Figura 26 (asse NS strumentale \equiv asse trasversale della struttura, asse EW strumentale \equiv asse longitudinale della struttura).

In Figura 27 è riportato il confronto tra i modi di vibrare della struttura nei 2 assi e le risonanze del sottosuolo misurate nell'immediato intorno.

Si osserva che anche questo sito rientra nella zona definita PIANURA_1 e presenta amplificazione per risonanza solo a frequenza < 1 Hz.

Non sussistono pertanto condizioni di doppia risonanza suolo-struttura.

modo	NS [Hz]	EW [Hz]
1° flessionale*	5.6	6.5

Tabella 4. Frequenze dei modi di vibrare individuati secondo due assi ortogonali nella struttura. * Indica il primo modo flessionale o combinazione del primo flessionale + rocking (Todorovska, 2009).

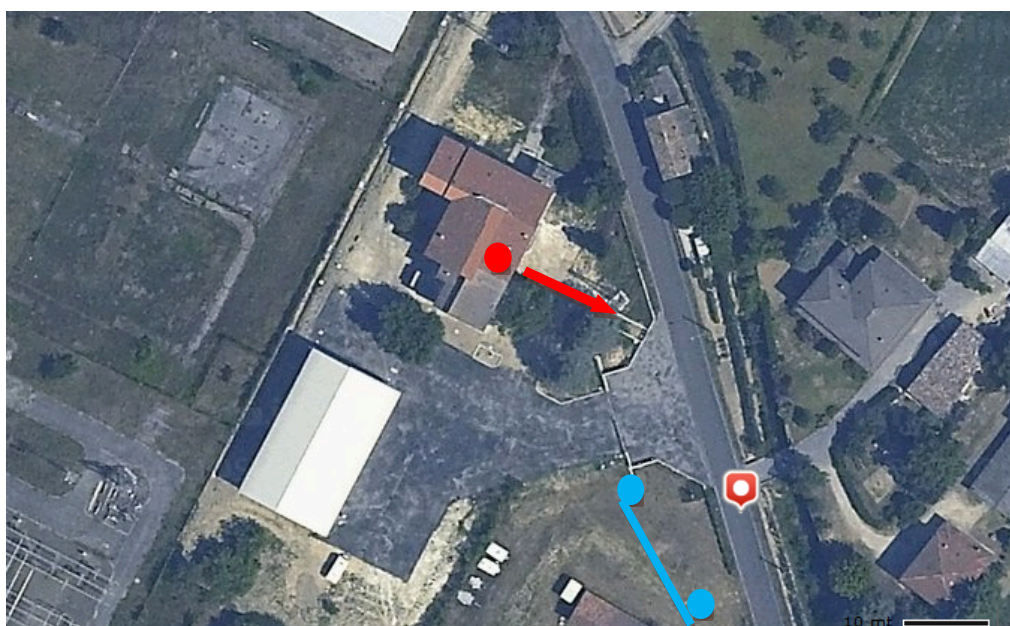


Figura 26. Rosso: ubicazione della verticale di misura all'interno del Dipartimento della Protezione Civile Provinciale. La freccia indica la direzione dell'asse NS strumentale. Azzurro: punti di misura sul suolo (cerchi per le misure H/V, linea per le misure in array).

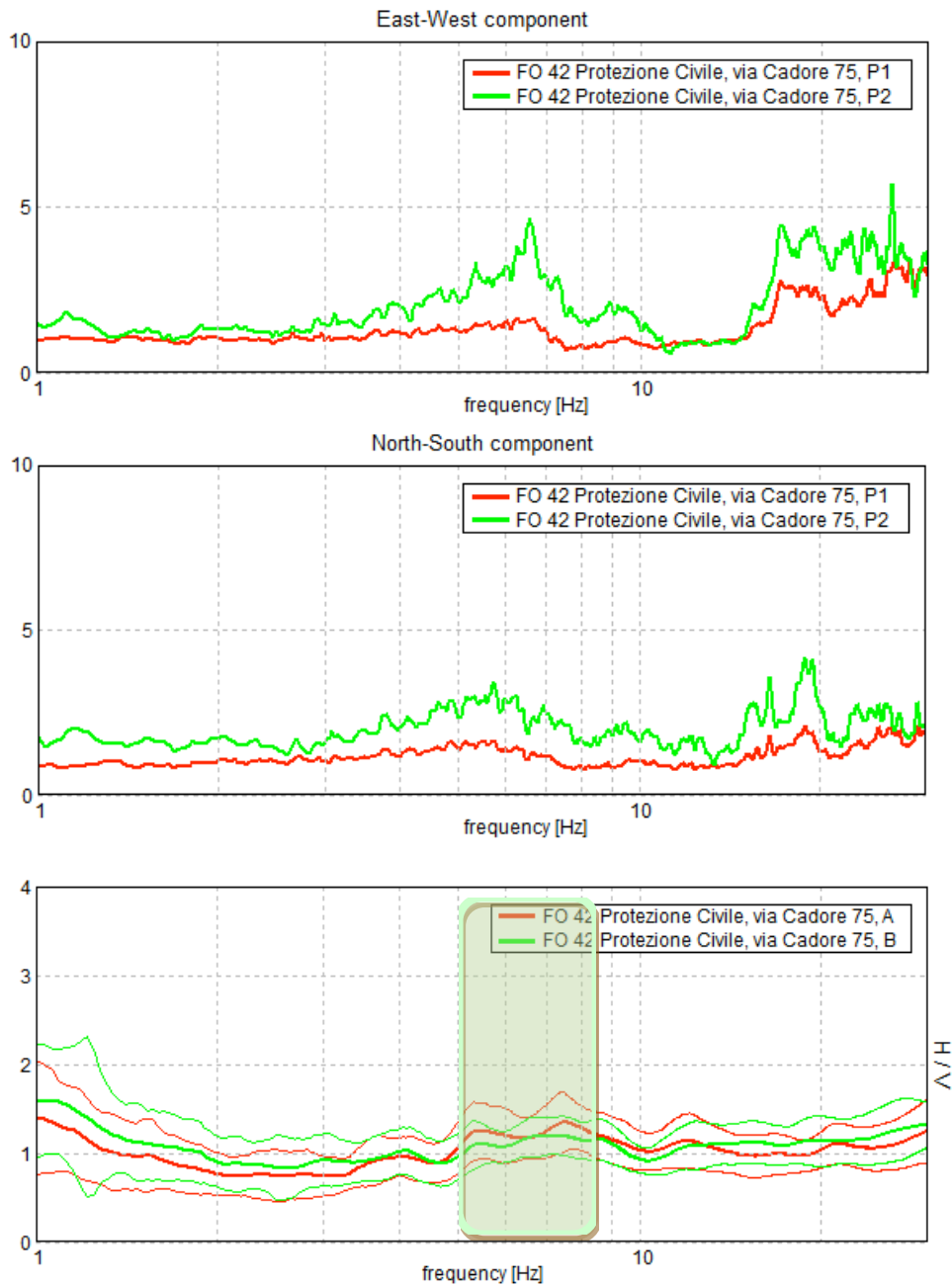


Figura 27. *Alto e centro*: rapporto tra gli spettri medi (ordinate, adimensionate) registrati ai vari livelli rispetto a quelli registrati al piano terra (sito di riferimento) in funzione della frequenza (ascissa). I rapporti mettono in evidenza le frequenze dei modi di vibrazione dell'edificio e i fattori di amplificazione del moto ai vari piani. *Alto*: direzione longitudinale. *Centro*: direzione trasversale. *Basso*: curva H/V del sottosuolo riportata alla stessa scala di ascisse per confrontare le frequenze dei modi di vibrare di sottosuolo e struttura. Il rettangolo verde indica la frequenza del primo modo flessionale della struttura.

5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Al fine di realizzare la Microzonazione Sismica di Livello 1 e 2 del Comune di Forlì, sono state reperite all'incirca 220 prove geofisiche finalizzate alla stima della rigidità dei terreni sotto forma di profilo di Vs e ne sono state acquisite 100 di nuove, ubicate in 45 siti diversi. Le indagini di precedente acquisizione sono state tutte verificate al fine di scartare quelle dubbie o palesemente sovra interpretate, in modo da garantire quanto più possibile una base dati di qualità omogenea.

In tutto il territorio comunale è stata misurata una blanda amplificazione a 0.25 Hz (legata ad un riflettore sismico rigido profondo diverse centinaia di metri). Nell'intervallo di frequenze di maggiore interesse ingegneristico, l'analisi dei dati raccolti ha suggerito di suddividere il territorio in 3 zone omogenee in prospettiva sismica (Figura 3) ed esattamente:

PIANURA_1: ubicata prevalentemente a Nord del centro storico di Forlì, caratterizzata da terreni a bassa velocità che mostrano un lento aumento con la profondità, senza contrasti di impedenza rilevanti ($V_s < 200$ m/s in superficie, $V_{s30} < 240$ m/s). Questo si traduce nell'assenza di amplificazione per risonanza sopra 1-2 Hz. In tutta l'area è invece ben visibile una amplificazione delle curve H/V a 0.8-1 Hz, legata alla risonanza dei terreni fini sovrastanti uno strato rigido ($V_s \approx 600$ m/s) posto a profondità variabile tra 80 e 150 m, interpretato come la base del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore di età inferiore ai 0.45 Ma (*per considerazioni geologiche di maggior dettaglio si rimanda alla relazione a cura del prof. E. Farabegoli*).

PIANURA_2: ubicata nella fascia centrale del territorio comunale, è caratterizzata da alcuni metri (5-30 m) di terreni fini a bassa velocità ($V_s \approx 200$ m/s) seguiti da terreni granulari più rigidi (sabbie e ghiaie, $V_s > 300$ m/s). Questa configurazione determina delle moderate amplificazioni per risonanza delle coperture fini a frequenze mediamente superiori a 3 Hz. I valori di V_{s30} si assestano tra 240 e 300 m/s. In tutta l'area è visibile una modesta amplificazione delle curve H/V a frequenze < 1 Hz, legata alla risonanza delle coperture sovrastanti uno strato rigido ($V_s \approx 600$ m/s) posto a profondità variabile tra 80 e 150 m, interpretato come la base del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore di età inferiore ai 0.45 Ma (*per considerazioni geologiche di maggior dettaglio si rimanda alla relazione a cura del prof. E. Farabegoli*).

FASCIA APPENNINICA: ubicata nella zona meridionale del territorio comunale, è caratterizzata dalla presenza del bedrock sismico affiorante o sub-affiorante (Argille Azzurre, $V_s \approx 300$ m/s nella parte superficiale, crescenti fino a 600 m/s in profondità). In questa zona i valori di V_{s30} si assestano sopra i 300 m/s e V_{sH} si assesta tra i 200 e i 300 m/s. Il contrasto di impedenza tra le coperture e il bedrock (generalmente prima alterato) dà luogo a picchi H/V di modesta ampiezza a frequenze > 2 Hz, in funzione della profondità del bedrock.

Una modellazione elementare della risposta di sito attesa nelle 3 zone ha portato all'osservazione che gli spettri di risposta risultano avere – come è naturale che sia – la massima ampiezza a periodi centrati attorno a quelli del terremoto di input, ossia tanto più lunghi quanto maggiore è il momento del terremoto simulato e che nei terreni di PIANURA_1 le pseudo accelerazioni spettrali attese per le strutture crescono da 0.5 a 0.7 g al diminuire del contenuto in frequenza del terremoto mentre il trend opposto è atteso nei siti della FASCIA APPENNINICA.

A partire dai profili di Vs disponibili e dalle conoscenze geologiche, sono state prodotte le carte dei fattori di amplificazione F_a , F_v (ICMS, 2008), e di $F_{a_{PGA0}}$, $F_{a_{0.1-0.5s}}$ e $F_{a_{0.5-1s}}$ (Atto di Indirizzo MZS Reg. Emilia R., 2007).

La carta dei fattori di amplificazione che meglio trova una rispondenza nella geologia del territorio è la mappa di F_a definita secondo gli ICMS (2008). Questa associa un fattore $F_a = 1.2$ alla zona PIANURA_1, $F_a = 1.4$ alla zona PIANURA_2 e $F_a = 1.3$ alla FASCIA APPENNINICA.

Al contrario si osservano fattori di amplificazione F_v massimi in zona di PIANURA_1 ($F_v = 2$) e minori nelle zone di PIANURA_2 ($F_v = 1.9$) e FASCIA APPENNINICA ($F_v = 1.6-1.7$).

I valori di $F_{a_{PGA0}}$ non mostrano una sostanziale diversificazione nel territorio. Alla maggior parte dei siti di indagine sono associati $F_{a_{PGA0}} = 1.5$ con poche variazioni verso $F_{a_{PGA0}} = 1.4$ a sud del territorio.

Maggior differenziazione è fornita dalla carta dei $F_{a_{0.1-0.5s}}$, con una tendenza dei valori a diminuire verso sud.

La carta dei fattori $F_{a_{0.5-1s}}$ rispecchia invece abbastanza bene le 3 zone individuate e mostra massima amplificazione (2.5) del parametro in oggetto nella zona PIANURA_1, amplificazione intermedia (2.3) nella zona PIANURA_2 e amplificazione minore nella FASCIA APPENNINICA (1.5-2).

Le circa 30 verifiche di liquefazione relative ai banchi sabbiosi rinvenuti nelle zone PIANURA_1 e PIANURA_2 hanno tutte escluso la possibilità di liquefazione per questi livelli, essenzialmente perché non si tratta di sabbie sufficientemente pulite.

Nel territorio non si sono osservate inversioni di velocità o effetti 2D di dimensioni tali da giustificare approcci di stima dei fattori di amplificazione diversi da quelli semplificati forniti dagli ICMS (2008) e dall'Atto di Indirizzo per la Microzonazione Sismica della Regione Emilia Romagna (2007). Tuttavia non va dimenticato che i valori di F_a , F_v , $F_{a_{PGA0}}$, $F_{a_{IS[0.1,0.5]s}}$ e $F_{a_{IS[0.5,1]s}}$ non indicano il valore assoluto di amplificazione attesa nei vari siti ma vanno interpretati semplicemente come una scala di "pericolosità" relativa tra punti.

Stanti le considerazioni effettuate in merito alla liquefazione e alle inversioni di velocità, considerata la mole di dati geofisici e geotecnici disponibile, considerato che le aree problematiche (zone appenniniche in frana ecc.) sono già escluse da interventi di urbanizzazione e considerato che le amplificazioni misurate nel territorio sono da intermedie a modeste, non si ritengono necessarie verifiche di terzo livello ai soli fini della suddivisione del territorio in zona a comportamento sismico omogeneo (Microzonazione Sismica).

BIBLIOGRAFIA

- Atto di indirizzo per la MZS in Emilia Romagna (2007). Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica".
- Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, 2004. A cura di Regione Emilia-Romagna (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli) e CNR (Istituto di Geoscienze e Georisorse, sezione di Firenze), scala 1:250.000.
- Castellaro S. e Mulargia F., 2009a. Vs30 estimates using constrained H/V measurements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 761-773.
- Castellaro S. e Mulargia F., 2009b. The effect of velocity inversions on H/V, *Pure Appl. Geophys.*, 166, 567-592.
- Castellaro S. e Mulargia F., 2010. How Far from a Building Does the Ground-Motion Free-Field Start? The Cases of Three Famous Towers and a Modern Building, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 2080-2094.
- EERA, 2000. Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits di Bardet, Ichii e Lin.
- Hans, S., Boutin, C., Ibraim, E. and Rousillon, P. (2005). *In situ* experiments and seismic analysis of existing buildings. Part I: Experimental investigations. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 34, 1513-1529.
- ICMS, 2008. Gruppo di lavoro MS. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome – Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e CD.
- Idriss, I. M., 1990. Response of Soft Soil Sites during Earthquakes, *Proceedings, Memorial Symposium to honor Professor Harry Bolton Seed*, Berkeley, California, Vol. II, May.
- Louie, 2001. Faster, better: shear wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 347-364.
- Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2006. Estimate of frequency and damping for large sets of buildings in dense urban areas, joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC, Geneva, Switzerland, 3-8 September.
- NMSOP, 2002. *New Manual of the Seismological Observatory Practice*, ed. P. Bormann, Potsdam.
- NTC, 2008. Norme Tecniche sulle Costruzioni, D.M. 14 gennaio 2008 pubblicato in G.U. del 4.02.2008, suppl. ord. 30.
- Ohori, 2002. A Comparison of ESAC and FK Methods of Estimating Phase Velocity Using Arbitrarily Shaped Microtremor Arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 2323, 2332.
- Park C.B., Miller R.D. e Xia J., 1999. Multichannel analysis of surface waves (MASW), *Geophys.*, 64, 800-808.
- Seed H. B. e Idriss I. M., 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 48 p.
- SESAME, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation, WP12, deliverable no. D23.12 <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/>
- Todorovska M. I. (2009). Seismic interferometry of a soil-structure interaction model with coupled horizontal and rocking response, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 611-625.
- Vandiver J. K., Dunwoody A. B., Campbell R. B., Cook M. F., 1982. A mathematical basis for the random decrement vibration signature analysis technique, *Journ. Mech. Des.*, 104, 307-313.

APPENDICE A

INDAGINI DI NUOVA ACQUISIZIONE

Le indagini di nuova esecuzione sono state condotte nel mese di novembre 2011 ed hanno riguardato i 42 punti indicati con la stella in Figura 1. In tutti i siti sono state condotte 2 prove sismiche a stazione singola alla distanza di circa 20 m l'una dall'altra, al fine di verificare l'omogeneità del sottosuolo indagato e la sussistenza di condizioni 1D necessarie per interpretare i dati acquisiti secondo tecniche in array.

In 11 dei 42 siti sono state condotte anche indagini sismiche attive e passive in array ed in particolare:

- 1) prove attive MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves, Park *et al.*, 1999),
- 2) prove passive ReMi (Refraction Microtremor, Louie, 2001),
- 3) prove passive ESAC (Extended SpatialAutoCorrelation, Ohori, 2002).
- 4) acquisizioni del microtremore ambientale a stazione singola in campo libero.

Le indagini effettuate permettono:

- a. di stimare la velocità delle onde di taglio (V_s) dei terreni a partire dalla velocità delle onde di superficie (Rayleigh nel caso del presente studio). La velocità delle onde di taglio è legata alla rigidità μ dei terreni tramite la formula: $\mu = \rho V_s^2$, dove ρ è la densità. Poiché la densità dei suoli varia relativamente poco con la profondità (almeno nelle prime decine di metri), dalla formula si evince che i valori di V_s sono i primi indicatori della rigidità di un terreno,
- b. di misurare le frequenze di risonanza dei terreni e, tramite opportuna modellazione vincolata, di ricostruire una stratigrafia sismica.

Le prove 1), 2) e 3) permettono la ricostruzione di una stratigrafia sismica monodimensionale (1D) sotto la sezione indagata mentre la prova 4) dà una risposta maggiormente locale rispetto alla verticale di misura (sono indicativamente visibili riflettori/variazioni di dimensioni maggiori di λ , secondo la legge $\lambda f = V$, dove λ è la lunghezza d'onda esplorante e f la frequenza dell'onda esplorante il sottosuolo).

Il tipo di stratigrafia che le tecniche sismiche possono restituire si basa sul concetto di *contrasto di impedenza*. Per *strato* si intende cioè un'unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA E GEOMETRIE

Per la sismica passiva a stazione singola: le misure di microtremore ambientale sono state effettuata per mezzo di un tromografo digitale portatile progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico. Lo strumento (*Tromino*[®], Micromed spa) è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) ortogonali. I dati di microtremore ambientale, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti per 5 min in ciascun sito alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

Per la sismica in array: si è impiegato un array digitale (*SoilSpy Rosina*, Micromed spa), collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5 Hz. La digitalizzazione del segnale avviene direttamente sui geofoni, il che elimina la possibilità di fenomeni di cross-talk lungo il cavo, migliorando il rapporto segnale-rumore. Le

acquisizioni sono state condotte a frequenza di campionamento di 512 Hz. La spaziatura tra ricevitori utilizzata per tutte le misure è stata di 4 m.

Tutte le indagini sono state effettuate su terreno naturale o comunque evitando pavimentazioni, lastricati e simili onde evitare il loro effetto di depressione delle componenti spettrali orizzontali (Castellaro e Mulargia, 2010b).

MASW, ReMi ed ESAC

Le tre tecniche vengono presentate insieme, stanti le similitudini di processing dei dati e dei risultati che possono fornire. Per le prove MASW si è energizzato in testa allo stendimento, alla distanza di almeno 4 m dai geofoni di testa e di coda. La sorgente sismica utilizzata è consistita nella caduta di un grave (salto dell'operatore) ed è stata ripetuta per 3 volte. La durata della registrazione è stata di 2 s a partire dal superamento del valore di soglia.

Per le prove ReMi ed ESAC il microtremore sismico ambientale è stato acquisito per 4 min consecutivi. L'analisi è stata condotta su segmenti di 10 s di durata.

Le serie temporali multicanale ottenute dalle tre tecniche sono state elaborate nel dominio frequenza-velocità di fase al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

Per ogni prova, le curve di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh saranno rappresentate da un grafico a contour (MASW e ReMi) o da punti (ESAC). La propagazione delle onde di superficie è multimodale e i grafici a contour permettono di coglierne questo aspetto mentre l'analisi ESAC fornisce un solo valore per ogni frequenza e non permette di cogliere questo aspetto.

In tutte le prove, la curva di dispersione teorica che meglio approssima quella sperimentale sarà indicata da dei punti azzurri e sarà ottenuta dal fit congiunto di prove in array e H/V.

A partire dalla legge fisica $\lambda f = V$ (ove λ è la lunghezza d'onda, f la frequenza e V la velocità) e considerato che la capacità di penetrazione nel sottosuolo di questi metodi in array è all'incirca $\lambda / 2$, si può stabilire la profondità indicativa raggiunta dalla prova. Tali valori sono riportati nell'Appendice B. E' noto che le prove in array (soprattutto attivo) hanno una scarsa capacità di penetrazione e smettono di essere interpretabili tipicamente in presenza di forti contrasti di impedenza (ossia là dove le curva H/V mostrano dei picchi) o di inversioni di velocità.

Nella maggior parte dei casi di questo studio la profondità raggiunta da queste prove è dell'ordine dei 15-20 m. Quando il profilo di velocità V_s fornito supera la capacità di penetrazione dell'array, significa che la restante parte del modello di sottosuolo è stata derivata dal fit congiunto di prova H/V e prove in array.

MISURE IN CAMPO LIBERO A STAZIONE SINGOLA

La tecnica H/V è la tecnica dedicata quando si vogliono mettere in luce le frequenze di risonanza dei terreni. Dalle registrazioni del rumore sismico ambientale su terreno sono state ricavate le curve H/V, secondo la procedura classica, descritta per esempio in SESAME (2005), con parametri:

- larghezza delle finestre d'analisi 20 s,
- liscio secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale,
- rimozione dei transienti sulla serie temporale degli H/V.

Per tutti i siti in cui è stata condotta una indagine in array, la curva H/V teorica derivante dal fit congiunto di prove in array e H/V sarà illustrata in azzurro, sovrapposta alla curva H/V sperimentale. Per tutti i siti sarà mostrato anche il confronto tra le curve H/V sperimentali registrate a circa 20 m di distanza l'una dall'altra al fine di controllo incrociato della qualità delle misure e di verifica dell'assetto 1D dell'area indagata. Per ogni sito saranno presentati anche gli spettri di ampiezza (in velocità) delle singole componenti del moto di una delle due prove H/V poiché solo da questi è possibile distinguere la natura (stratigrafica o antropica) dei picchi H/V. Infatti, una risonanza di origine stratigrafica è sempre rappresentata da un minimo locale della componente verticale mentre un picco H/V di origine artefattuale presenterebbe un massimo stretto, anche con ampiezza diversa, su tutte e tre le componenti (Castellaro e Mulargia, 2010).

FO 01: località Bagnolo, via Borgo Sisa

[Prove 215 e 216 in Appendice B]

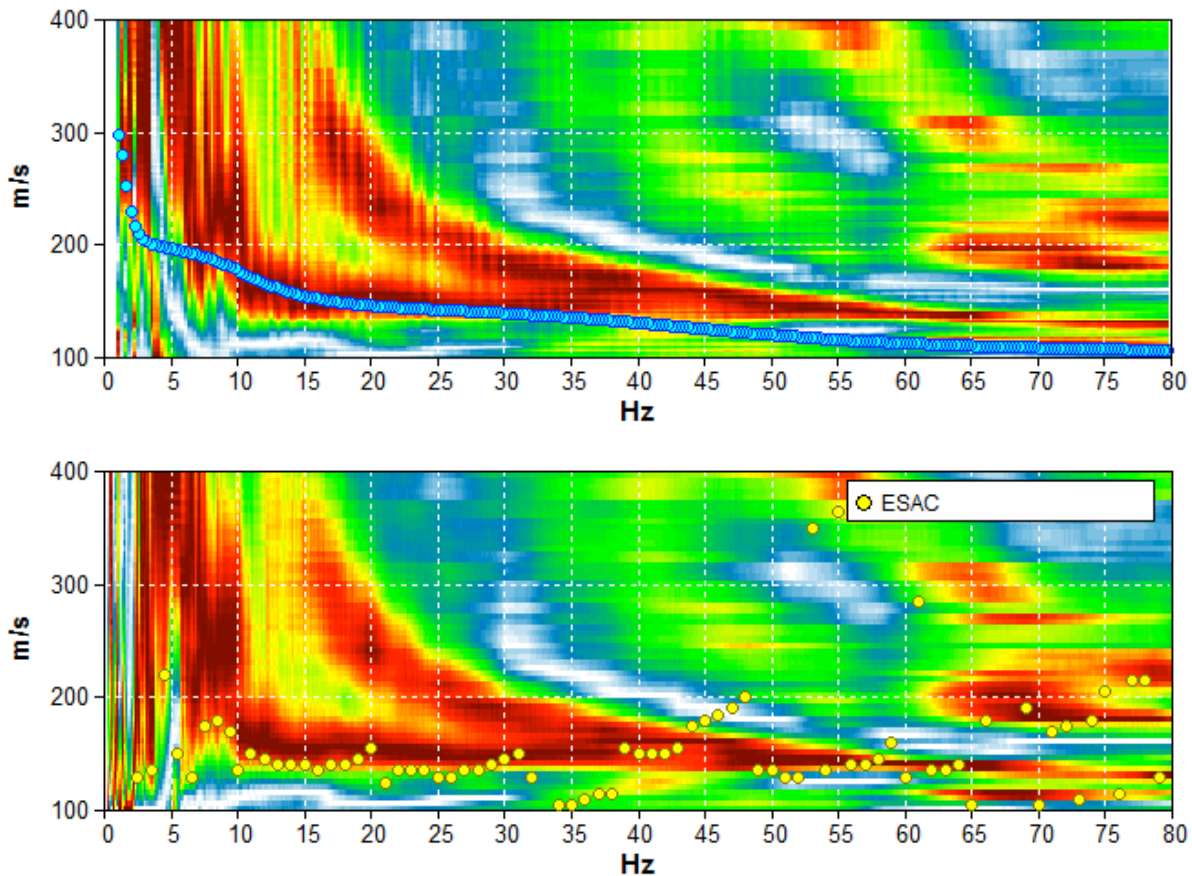


Figura 28. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

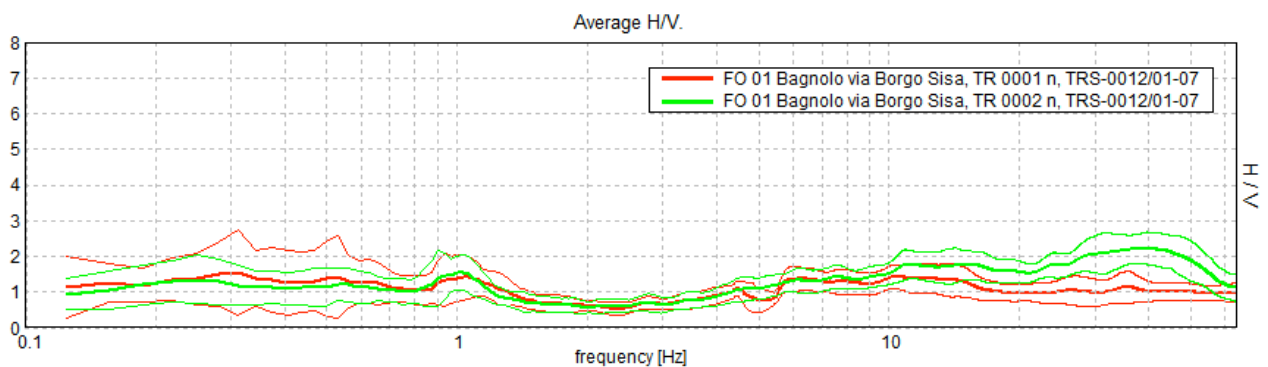


Figura 29. Confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile).



Figura 30. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.00	1.00	110	0.40
6.00	5.00	160	0.40
56.00	50.00	220	0.40
inf.	inf.	350	0.40

Tabella 5. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

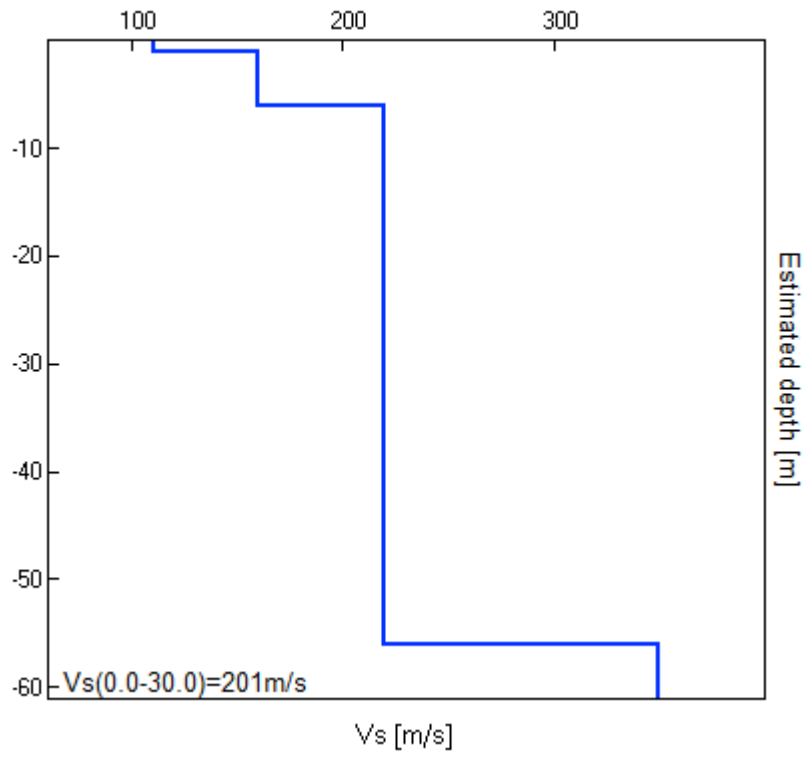


Figura 31. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 02: località Bagnolo, incrocio via Borgo Sisa con via Narsete

[Prove 217 in Appendice B]

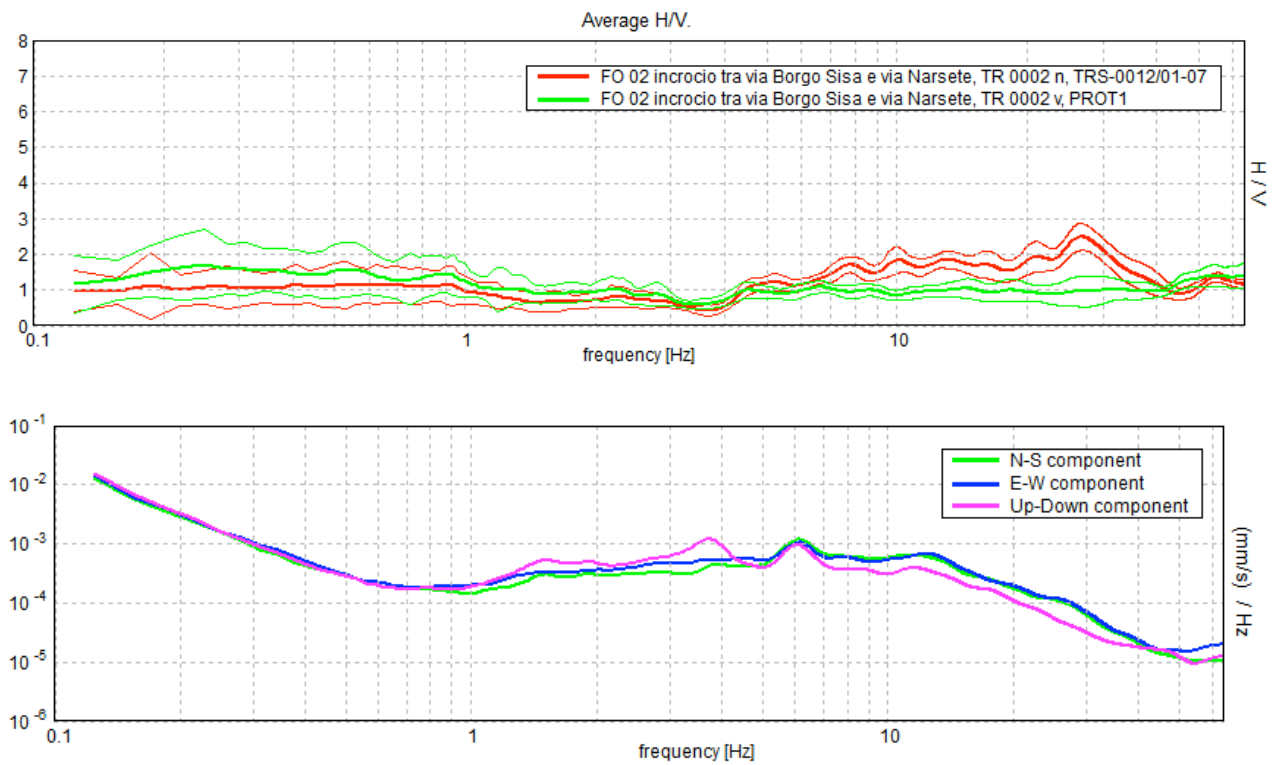


Figura 32. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 03: via Narsete

[Prove 218 in Appendice B]

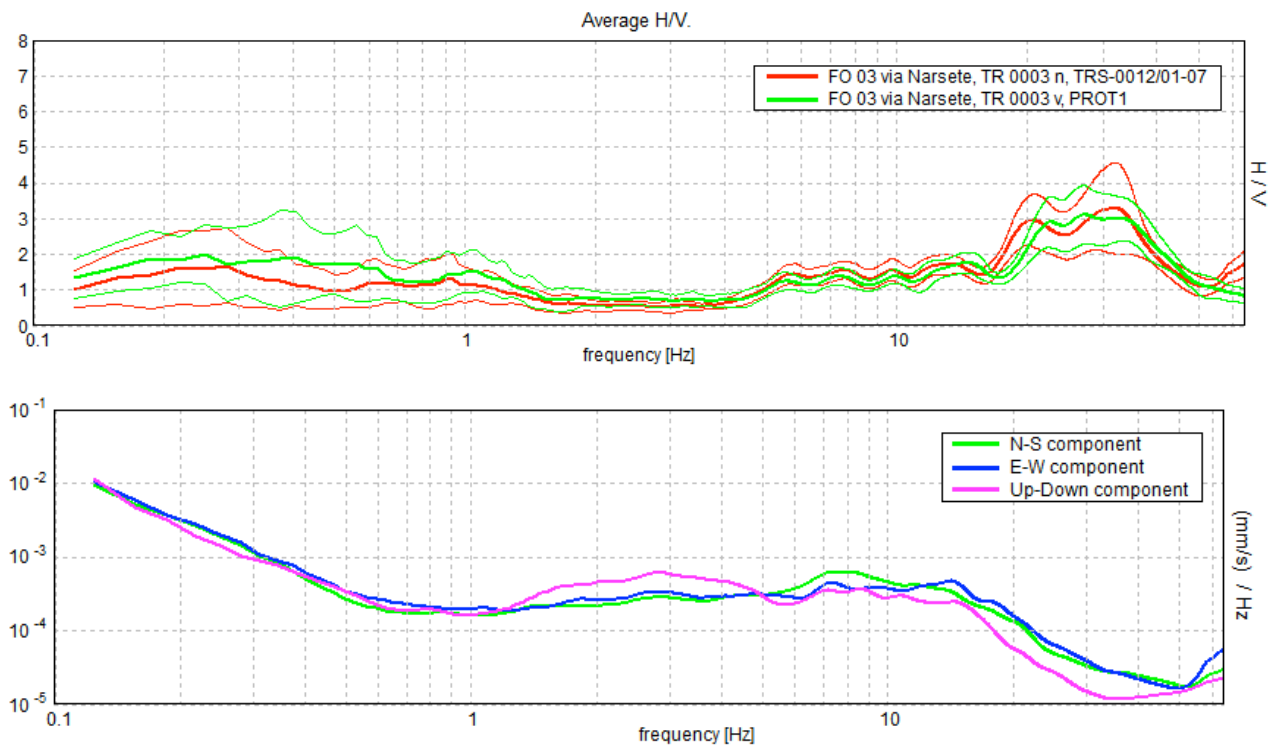


Figura 33. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 04: via Tassinara 4-6

[Prove 219 in Appendice B]

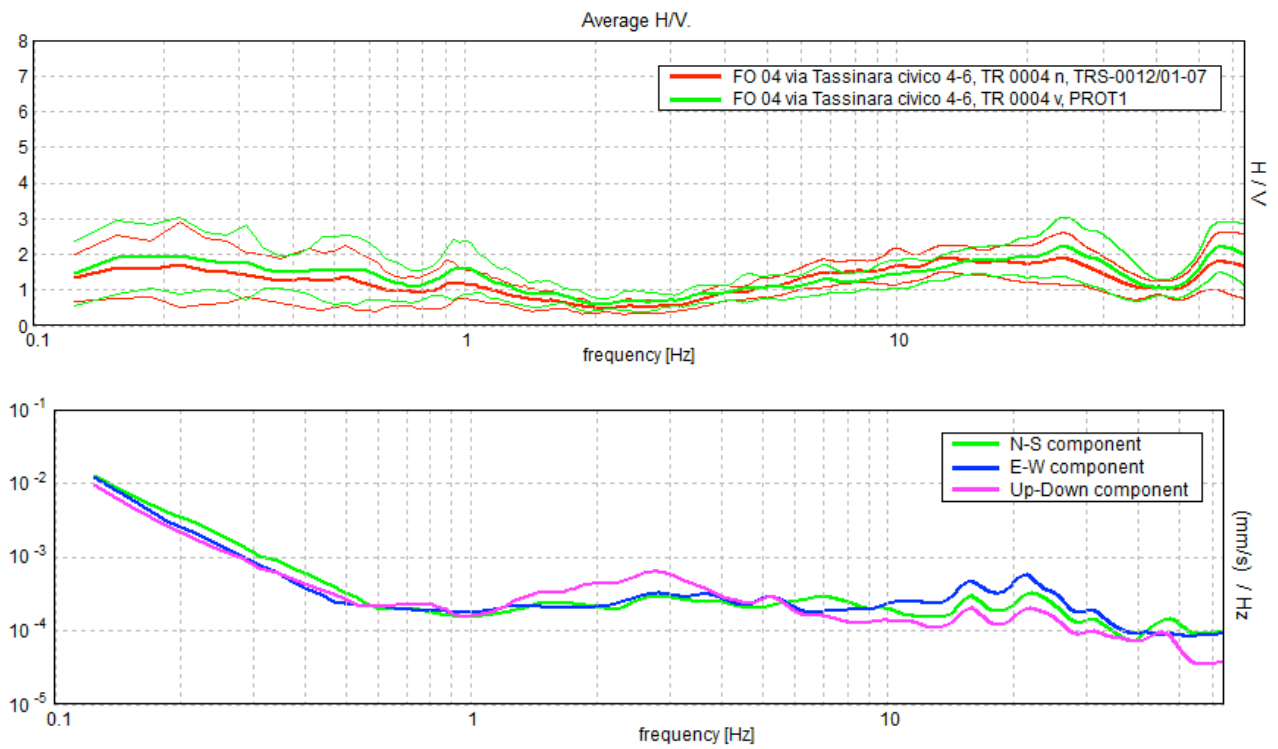


Figura 34. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 05: via del Santuario 10

[Prove 220 in Appendice B]

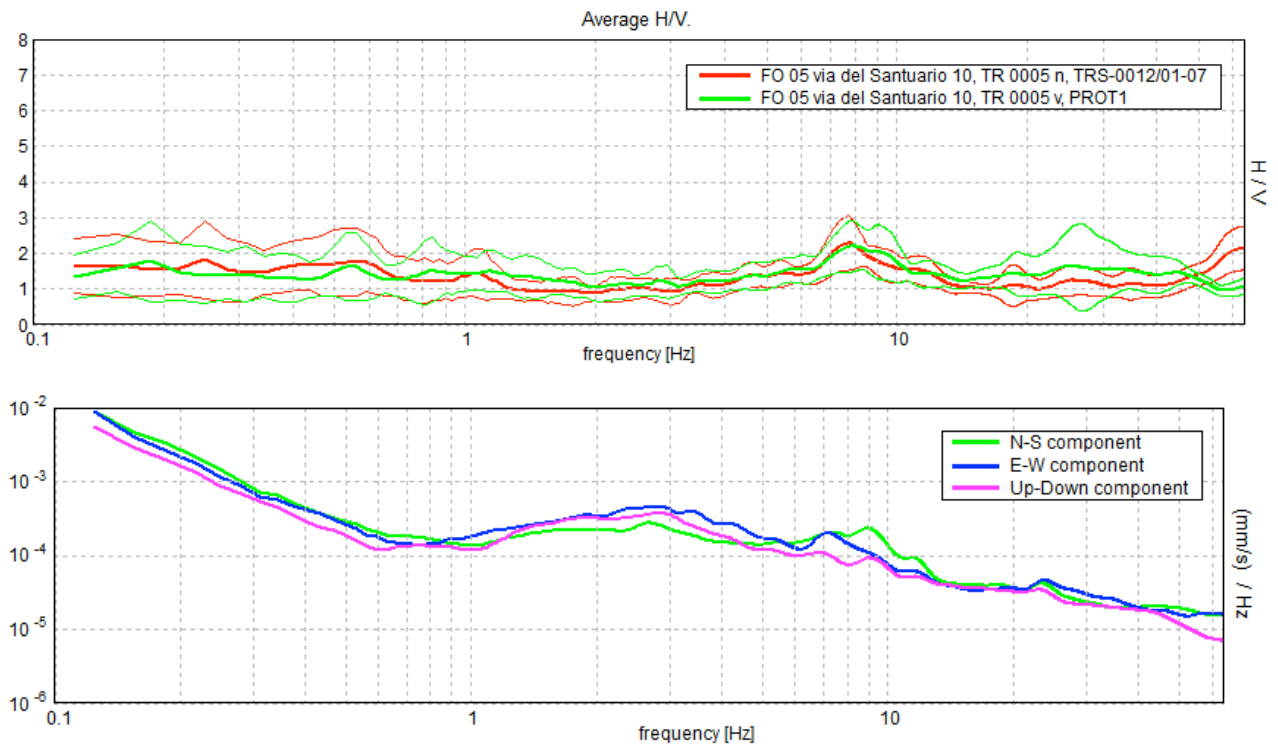


Figura 35. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 06: via Manumisso 22/a

[Prove 221 e 222 in Appendice B]

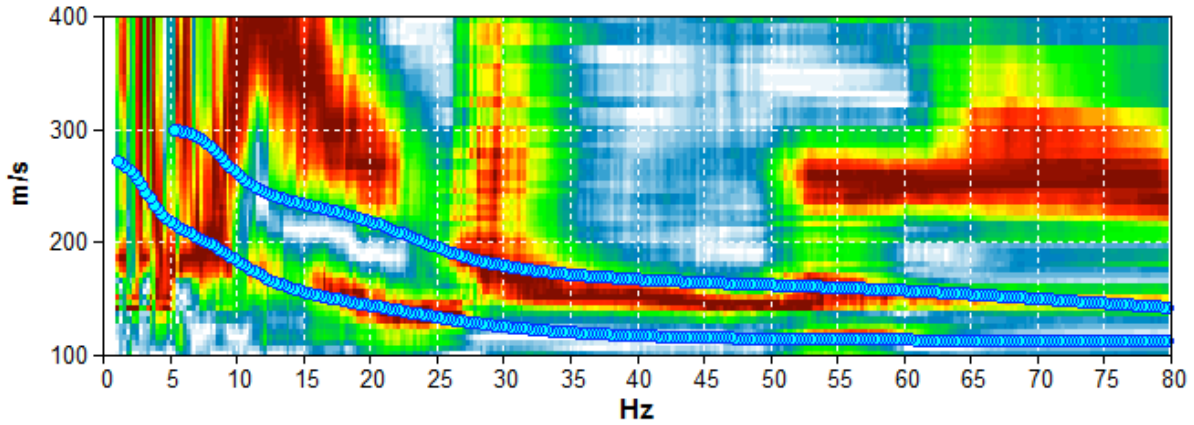


Figura 36. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

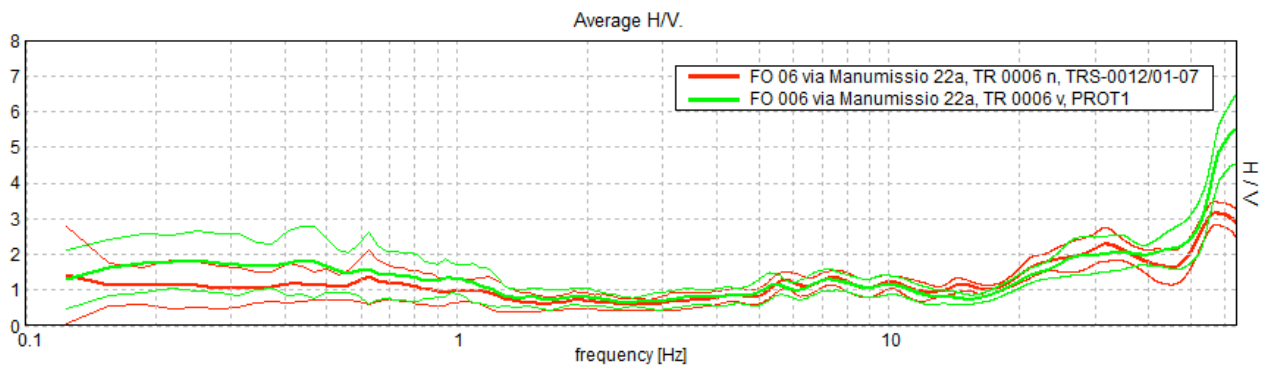
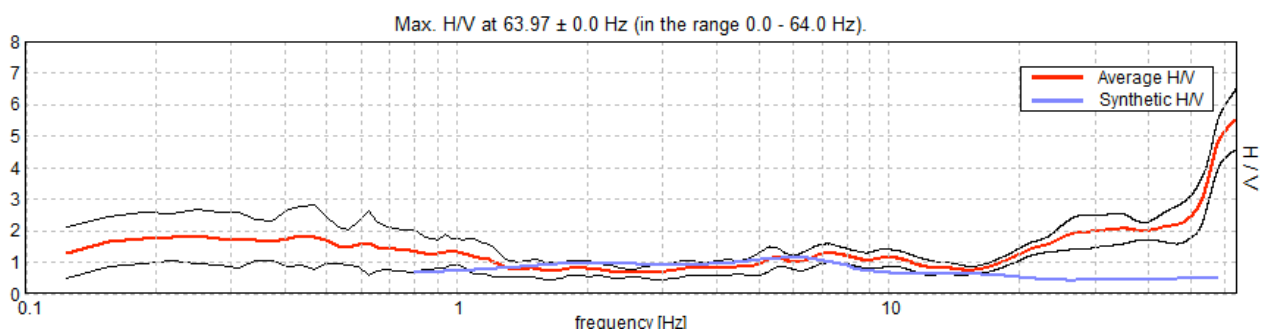


Figura 37. Confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile).



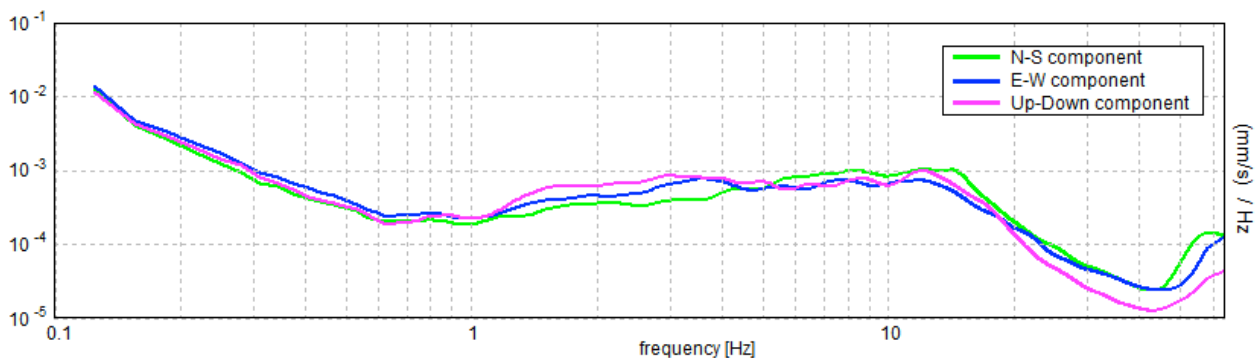


Figura 38. *Alto*: curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso*: spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
2.00	2.00	120	0.40
7.00	5.00	170	0.40
29.00	22.00	240	0.40
inf.	inf.	300	0.40

Tabella 6. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

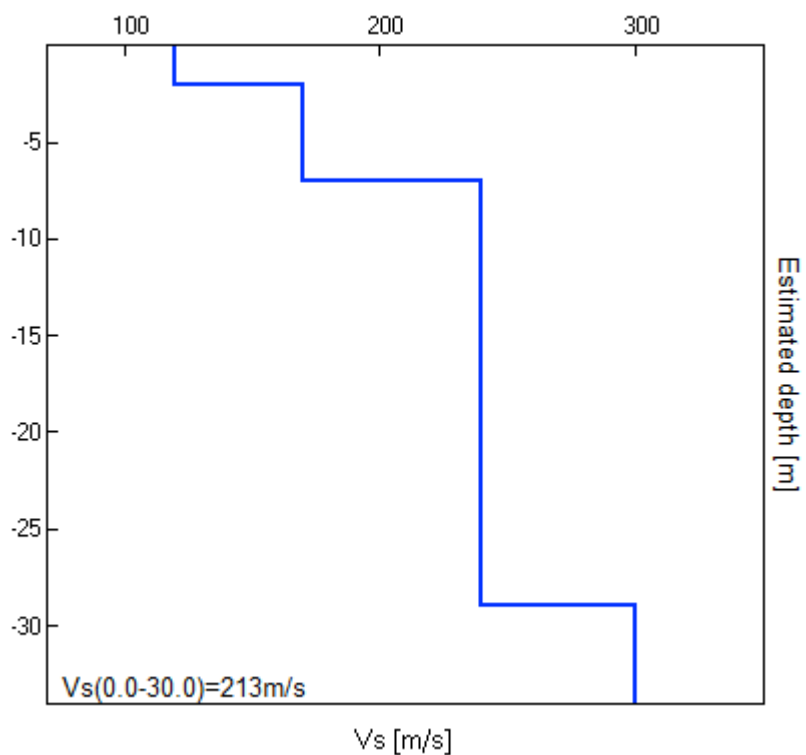


Figura 39. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 07: via Ridotta 2

[Prove 223 in Appendice B]

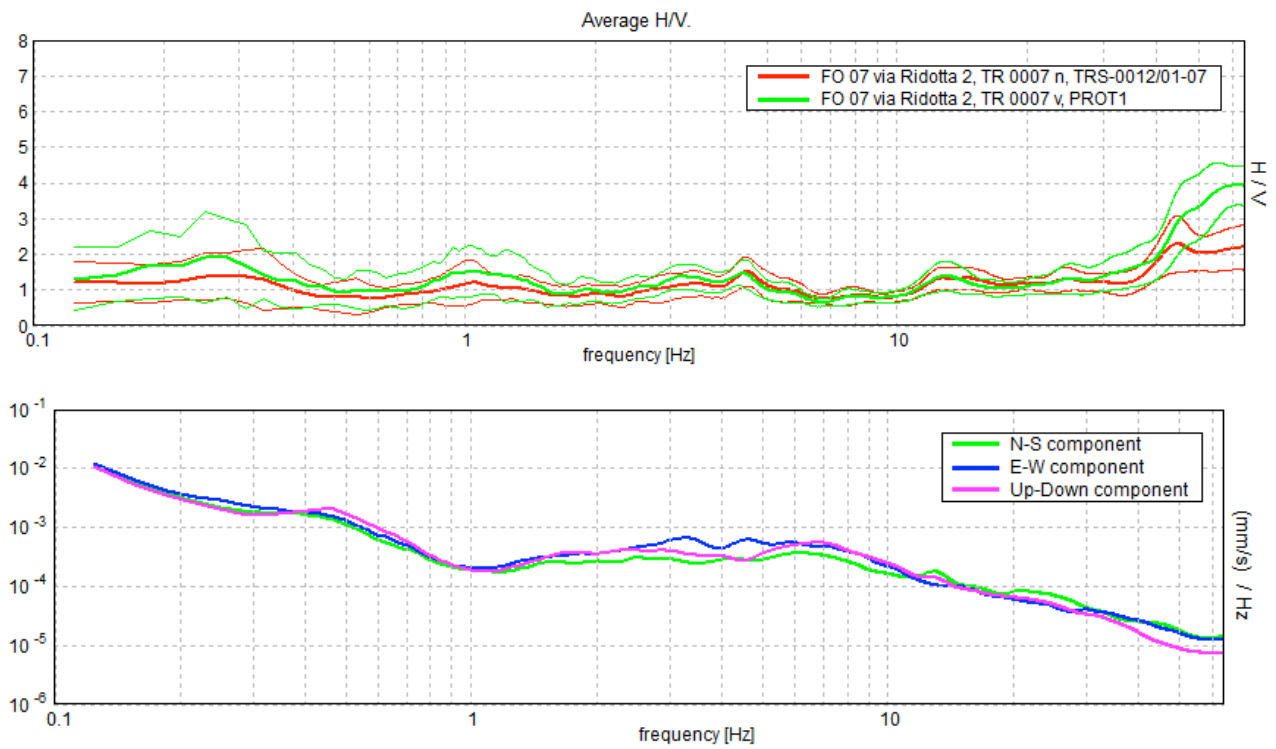


Figura 40. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 08: via Ca' Bertini 5

[Prove 224 in Appendice B]

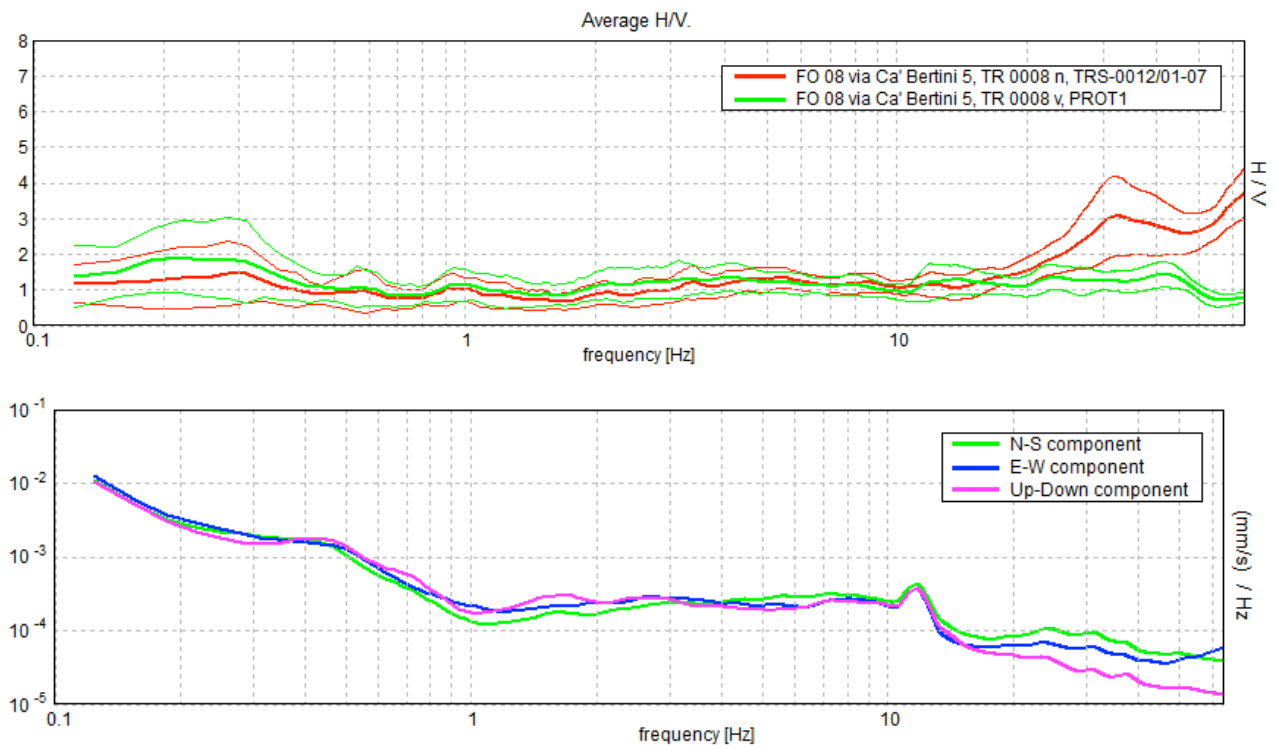


Figura 41. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 09: via dei Benedettini 6

[Prove 225 in Appendice B]

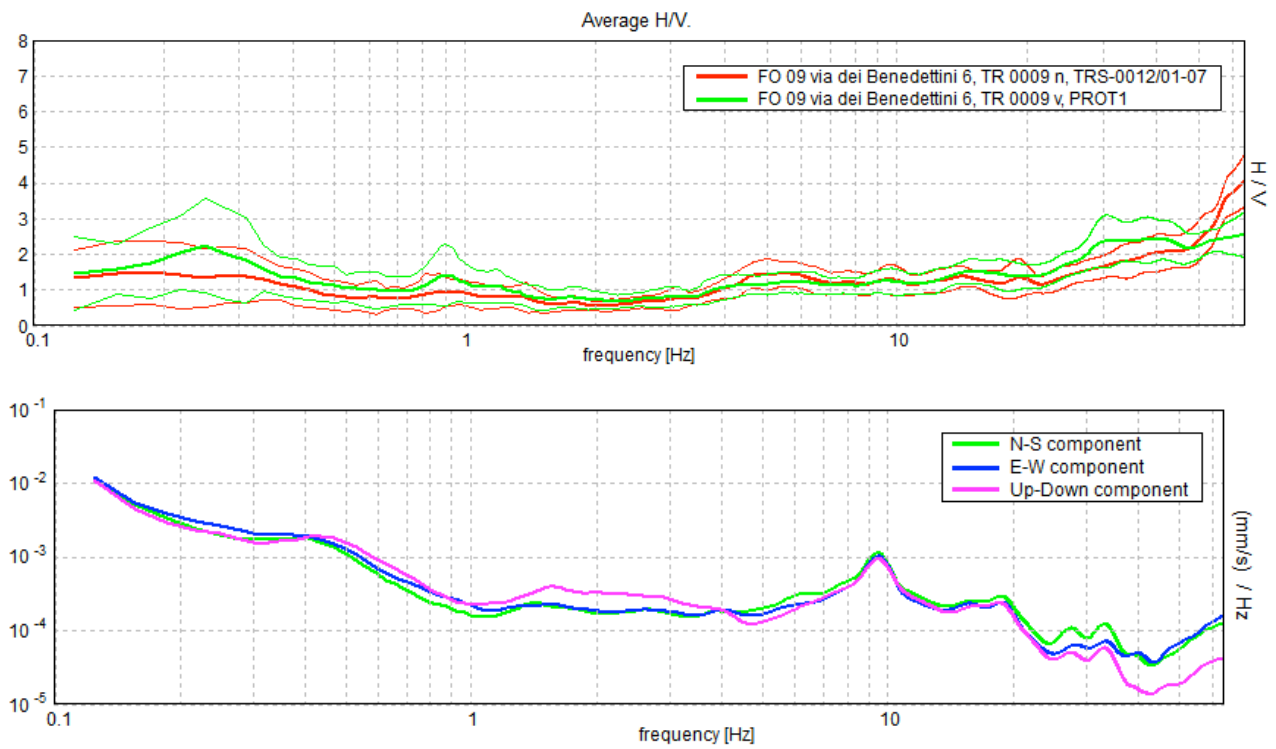


Figura 42. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 10: via Mezzadrini

[Prove 226 e 227 in Appendice B]

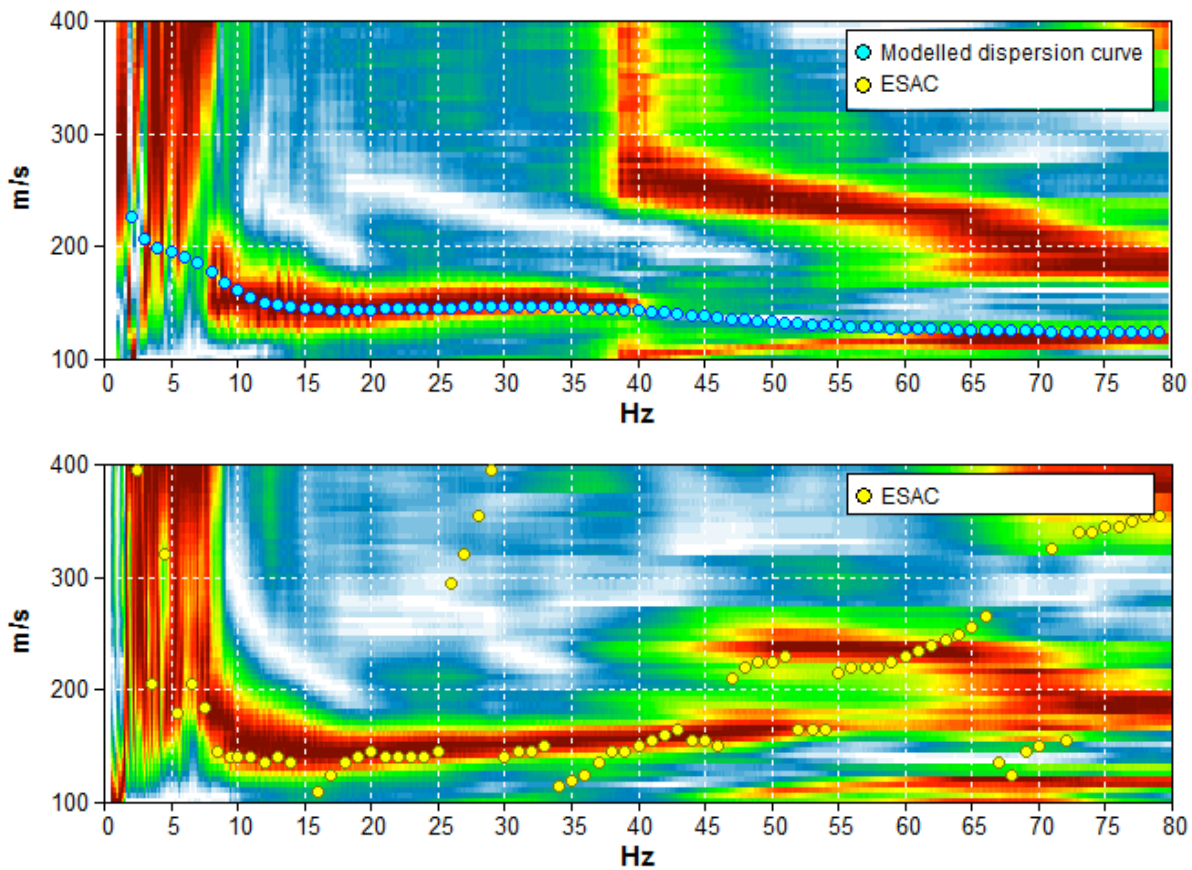


Figura 43. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

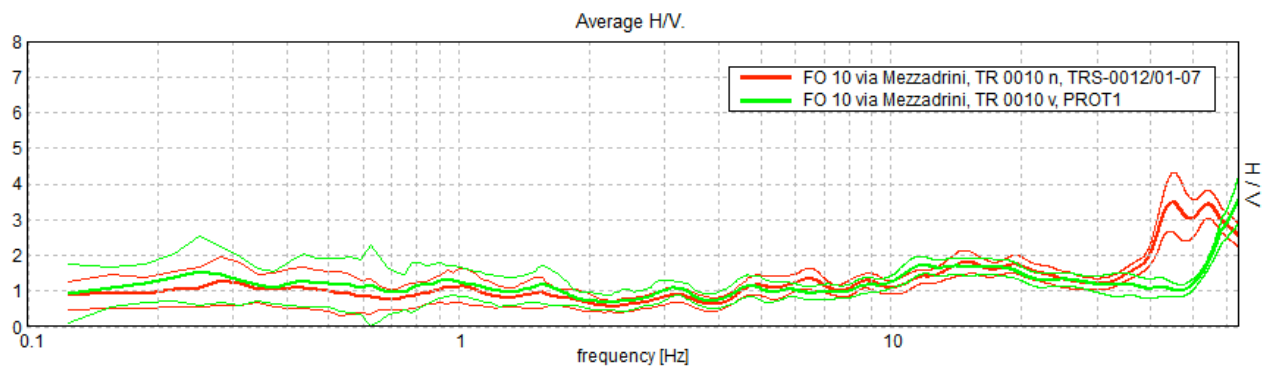


Figura 44. Confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile).

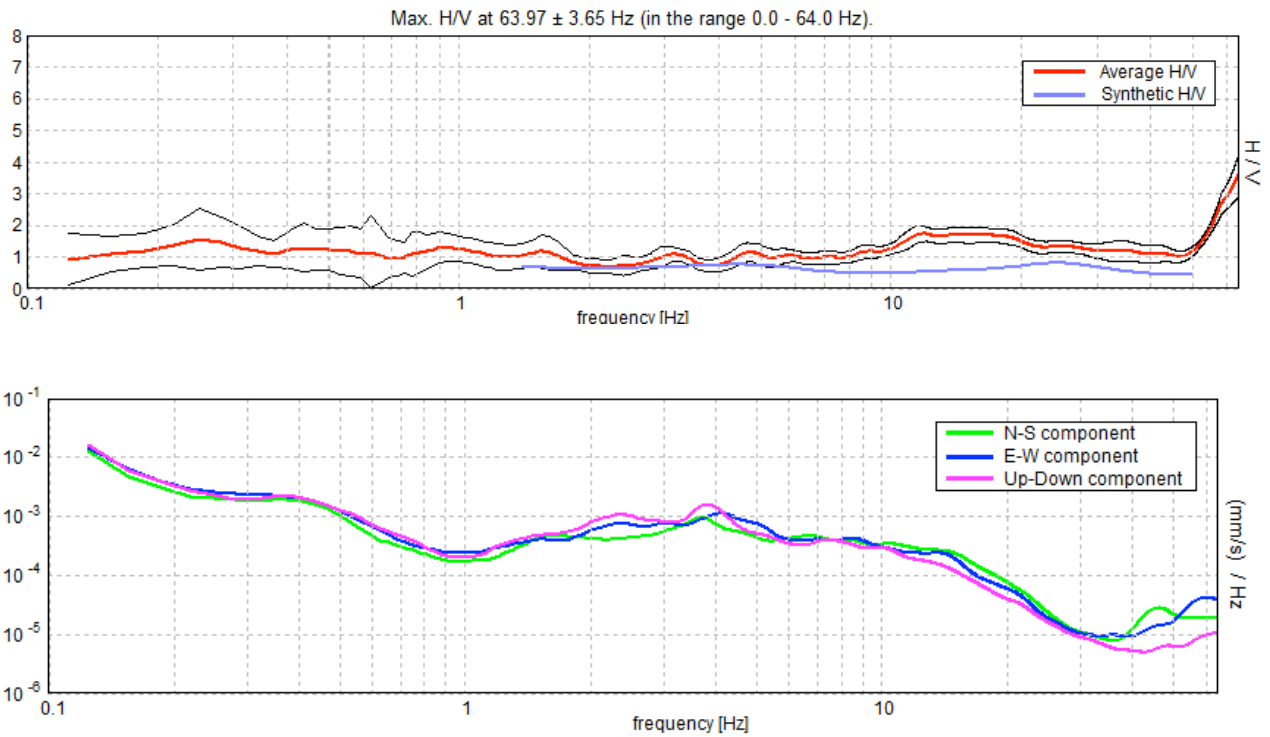


Figura 45. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.50	1.50	130	0.40
2.50	1.00	220	0.40
6.50	4.00	140	0.40
46.50	40.00	220	0.40
inf.	inf.	280	0.40

Tabella 7. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

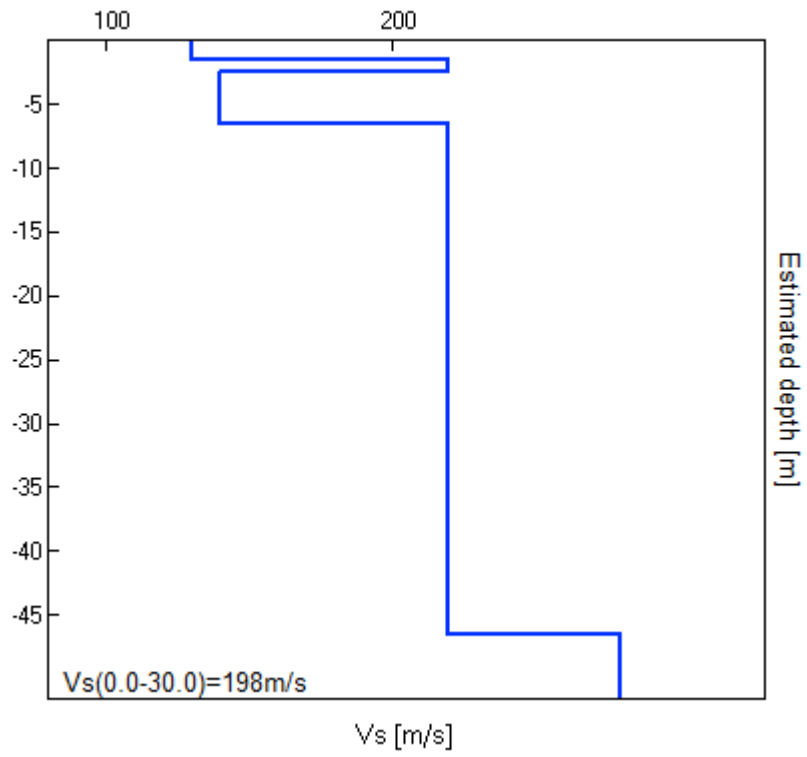


Figura 46. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 11: via 13 Novembre 1944

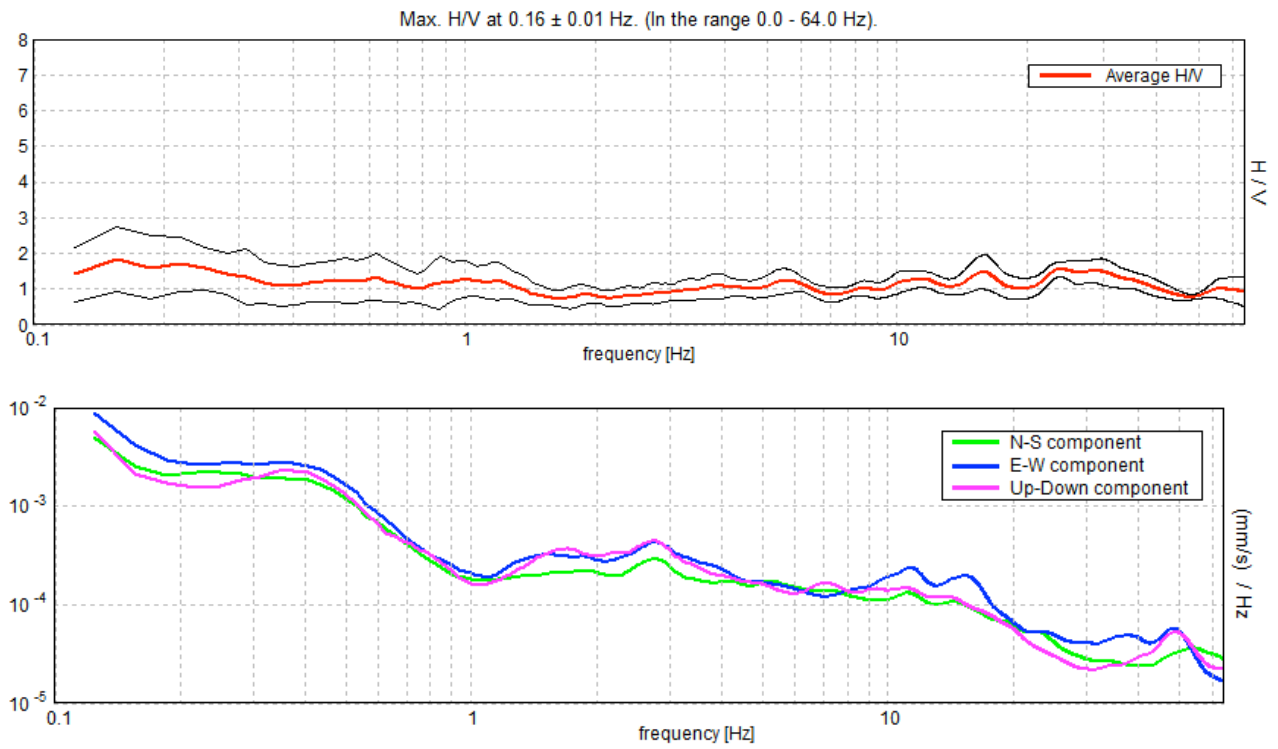


Figura 47. *Alto*: curva H/V registrata nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso*: spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

FO 12: via dei Portolani

[Prove 228 in Appendice B]

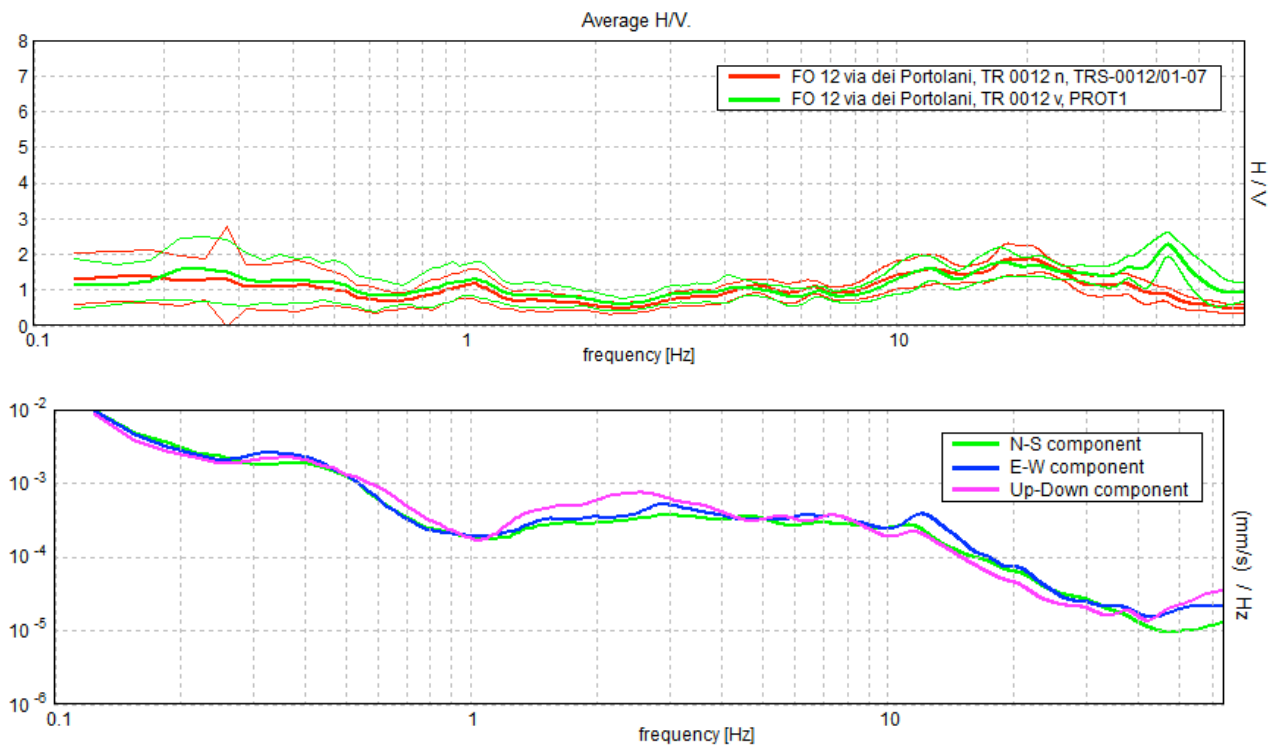


Figura 48. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 13: via Palustro 3

[Prove 229 in Appendice B]

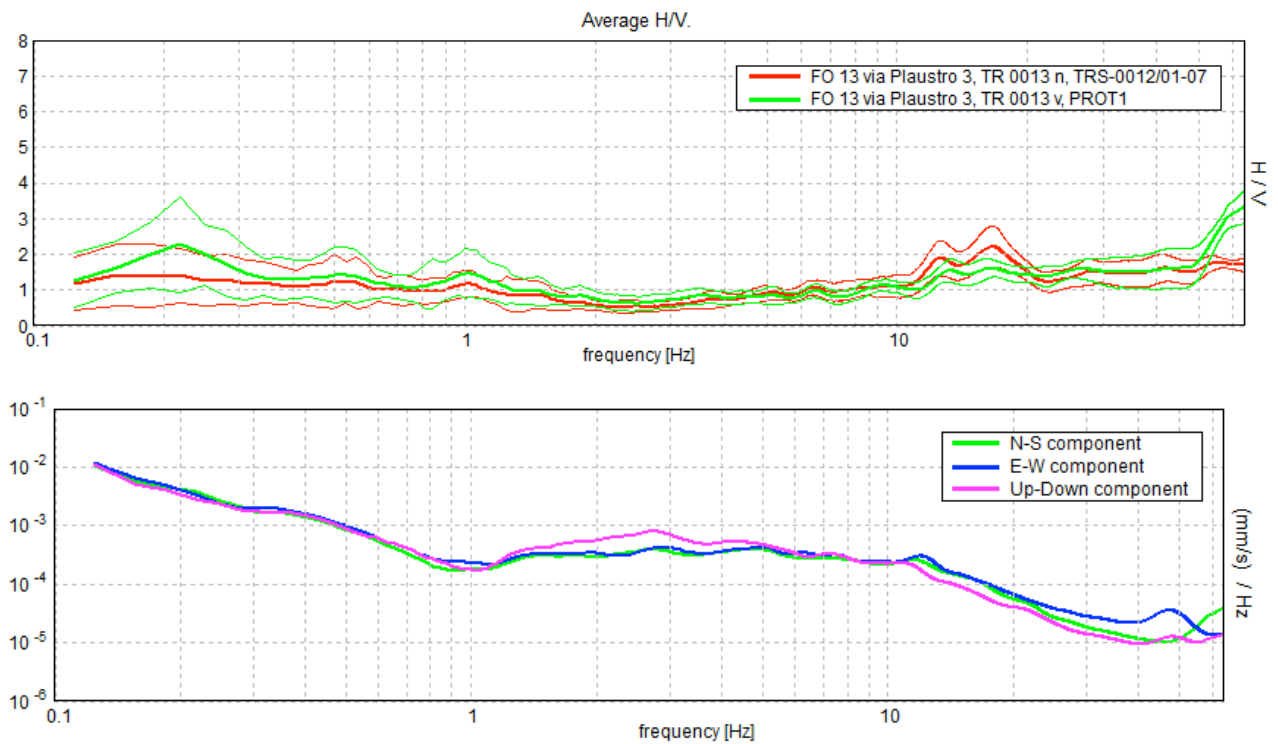


Figura 49. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 14: via Rio Becca 8

[Prove 230 in Appendice B]

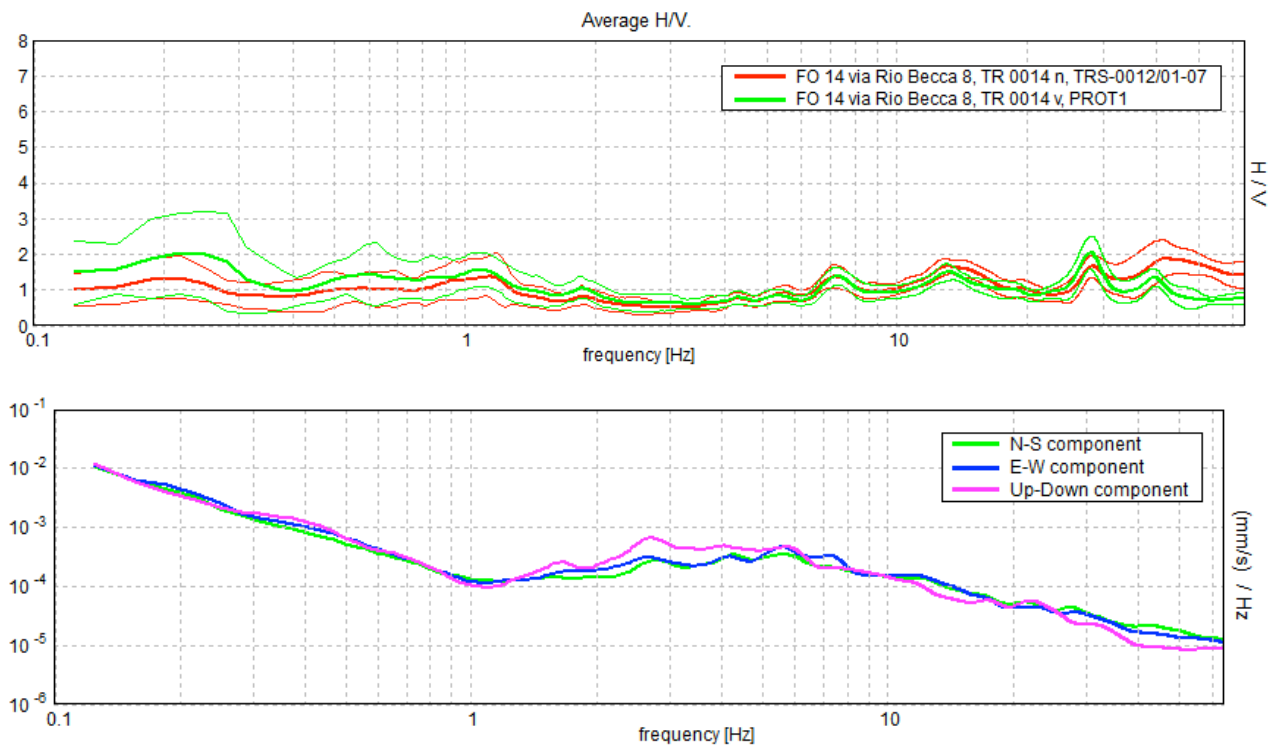


Figura 50. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 15: via Pitagora 17

[Prove 231 e 232 in Appendice B]

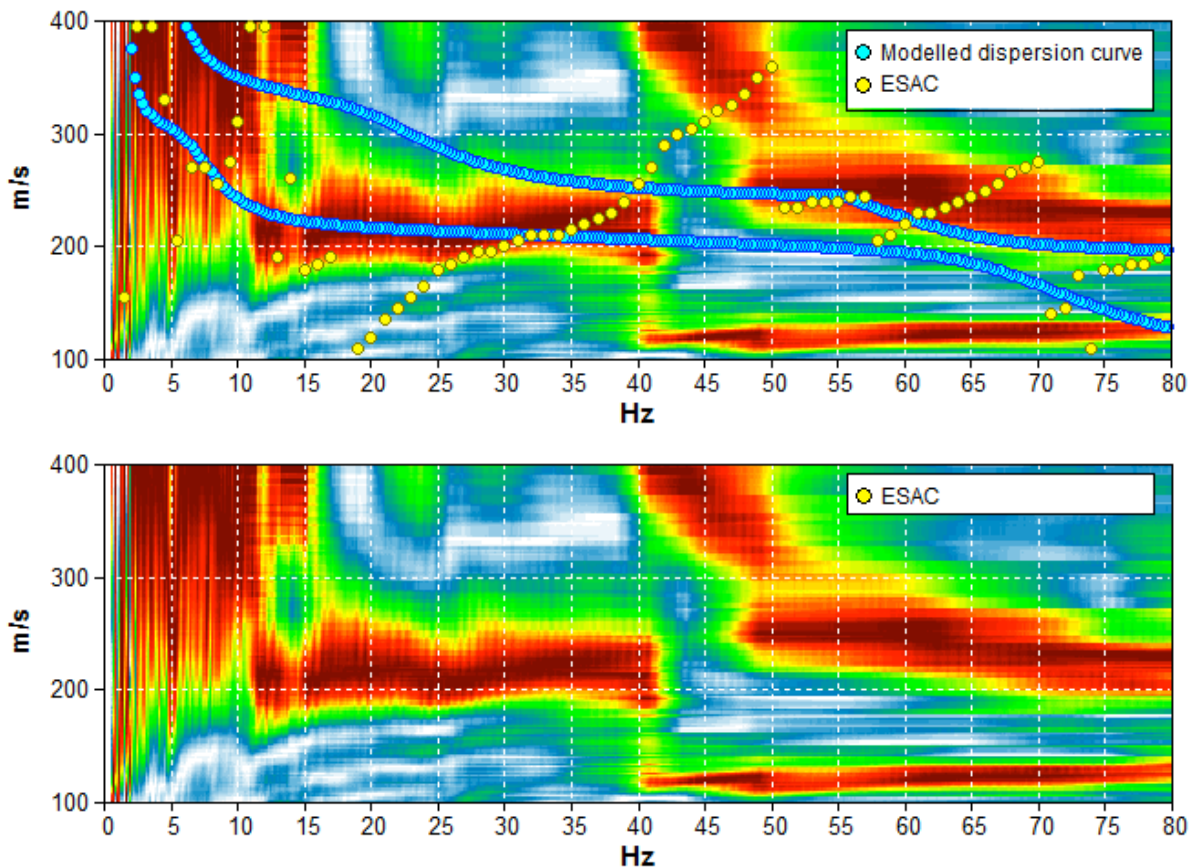


Figura 51. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

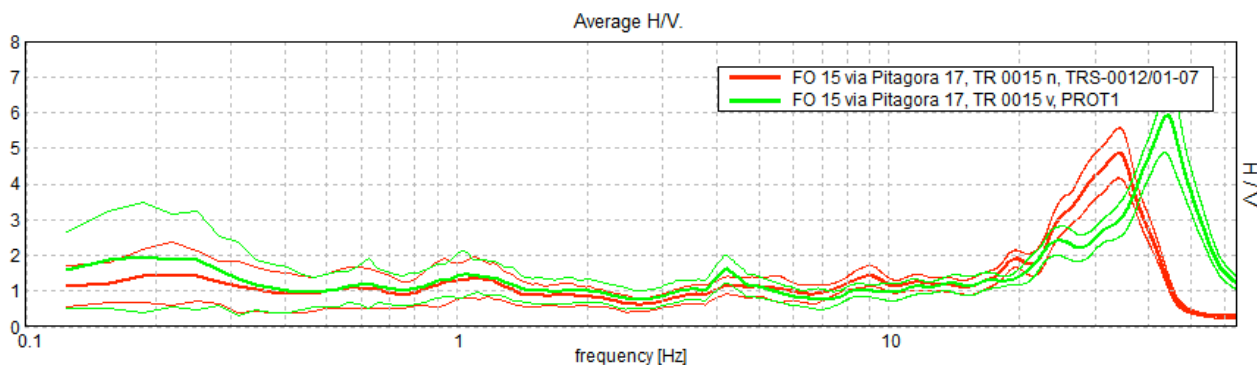


Figura 52. Confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile).

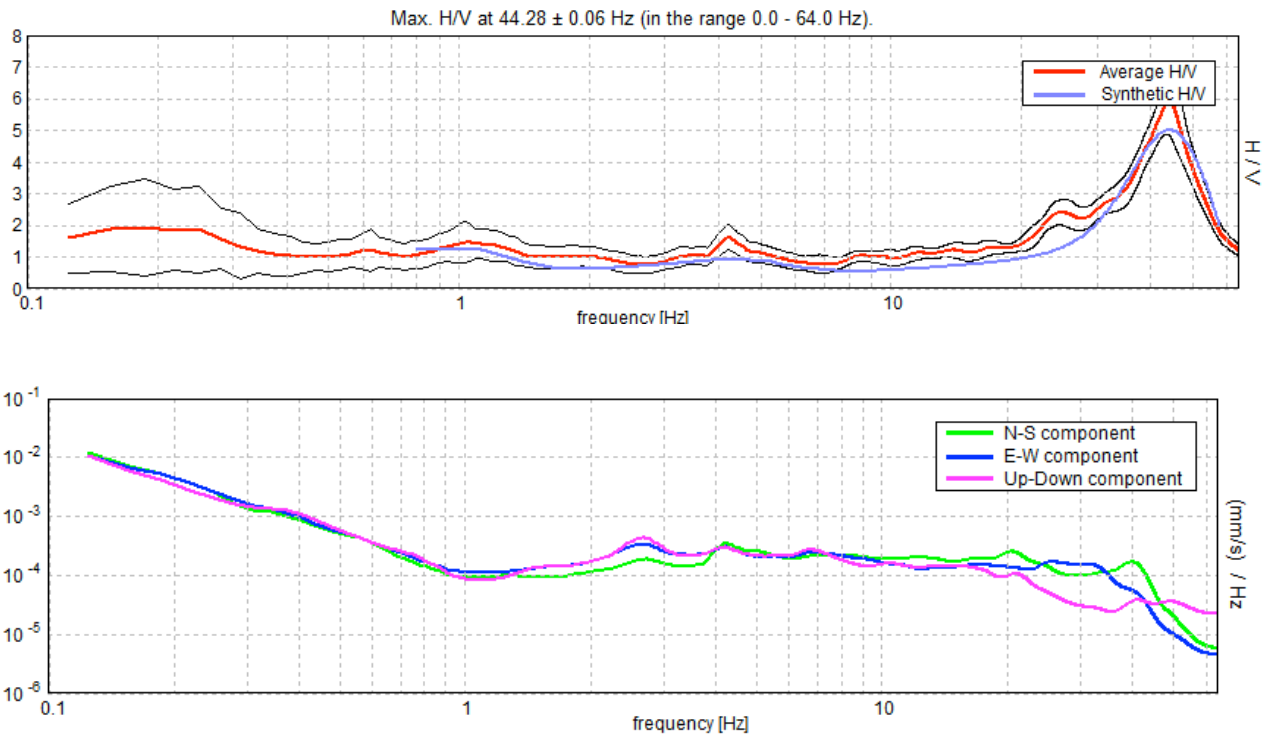


Figura 53. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.60	0.60	100	0.40
12.60	12.00	240	0.40
82.60	70.00	350	0.40
inf.	inf.	550	0.40

Tabella 8. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

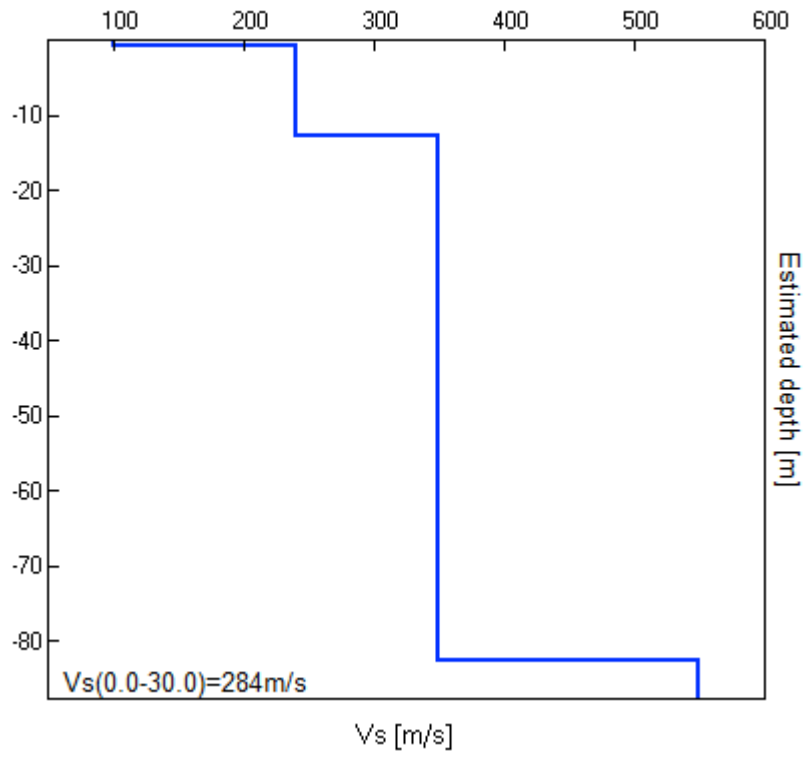


Figura 54. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 16: incrocio via Ossi con via Mazzacavallo

[Prove 233 in Appendice B]

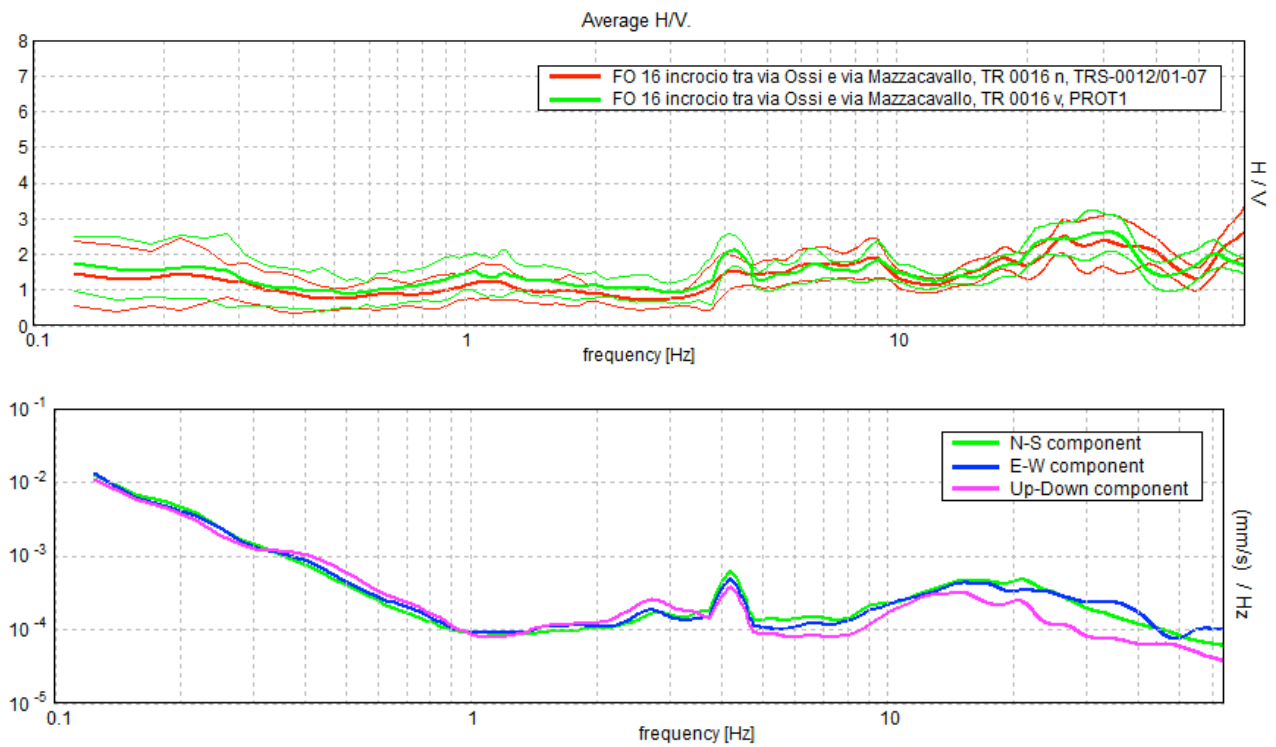


Figura 55. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 17: via Castel Leone 1

[Prove 234 in Appendice B]

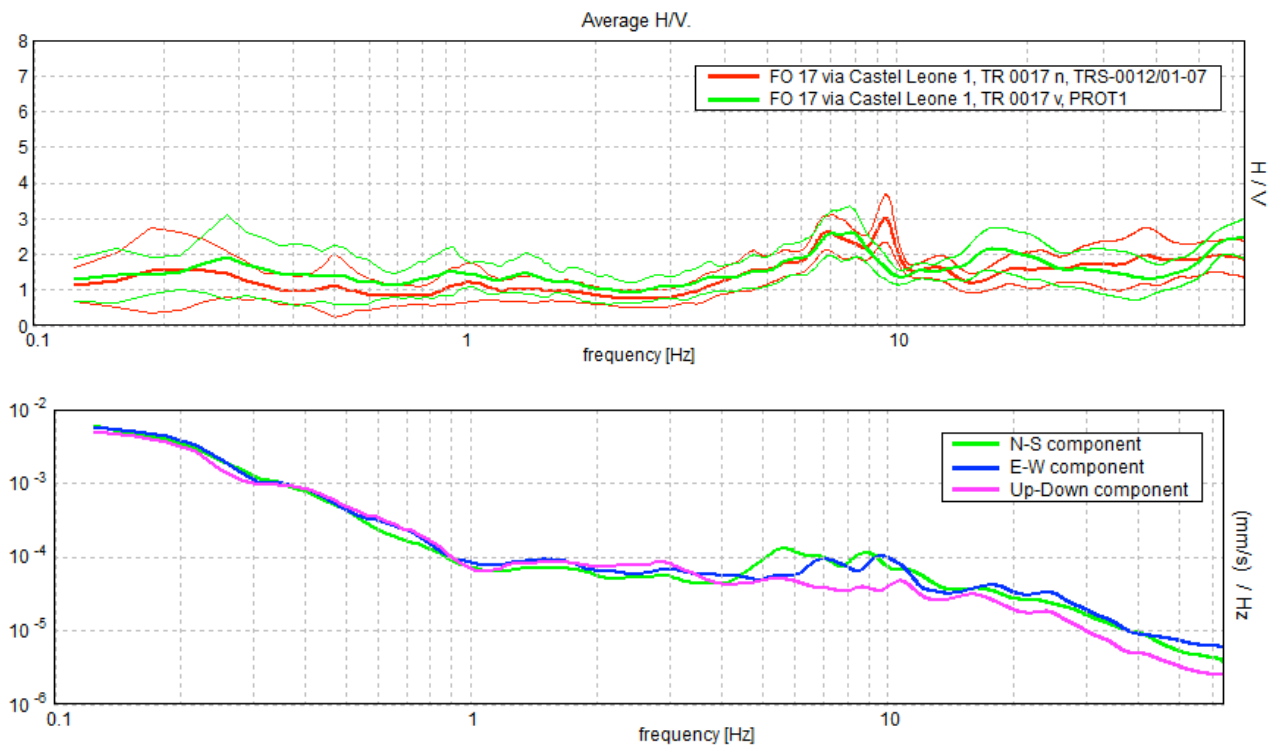


Figura 56. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 18: via Castel Leone 15

[Prove 235 in Appendice B]

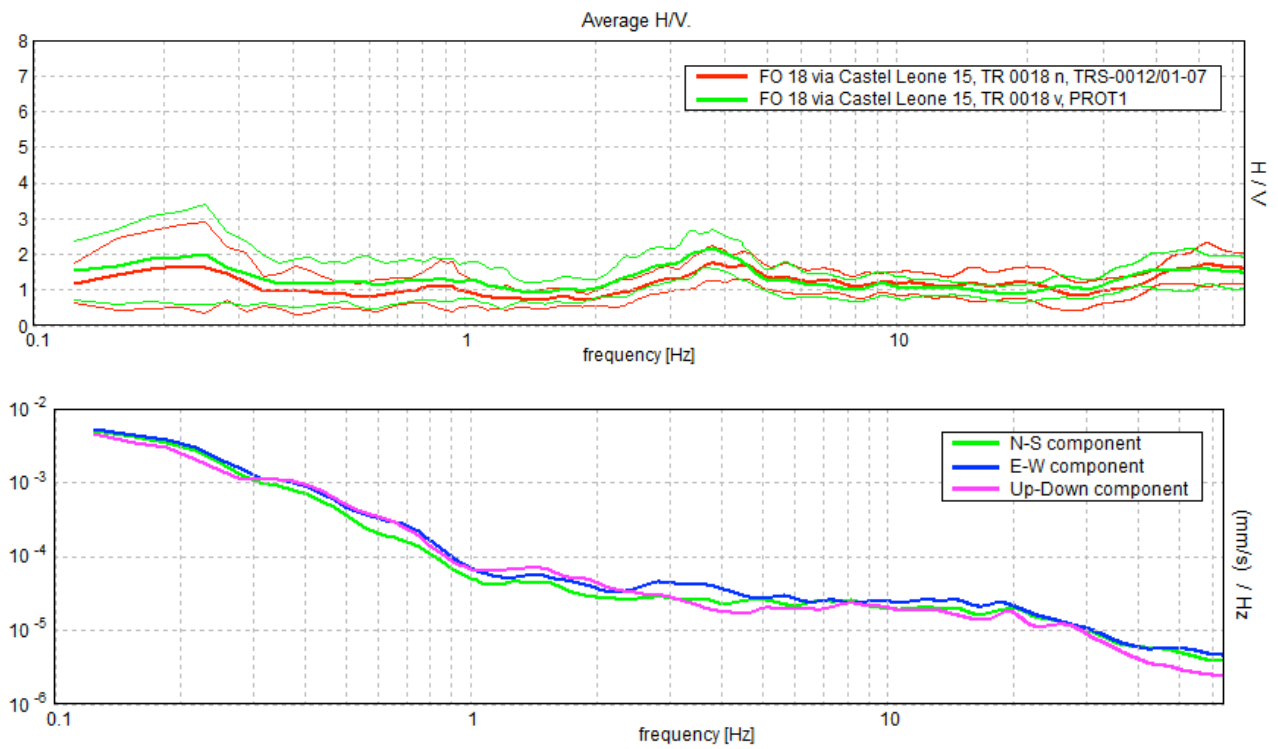


Figura 57. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 19: via del Partigiano

[Prove 236 in Appendice B]

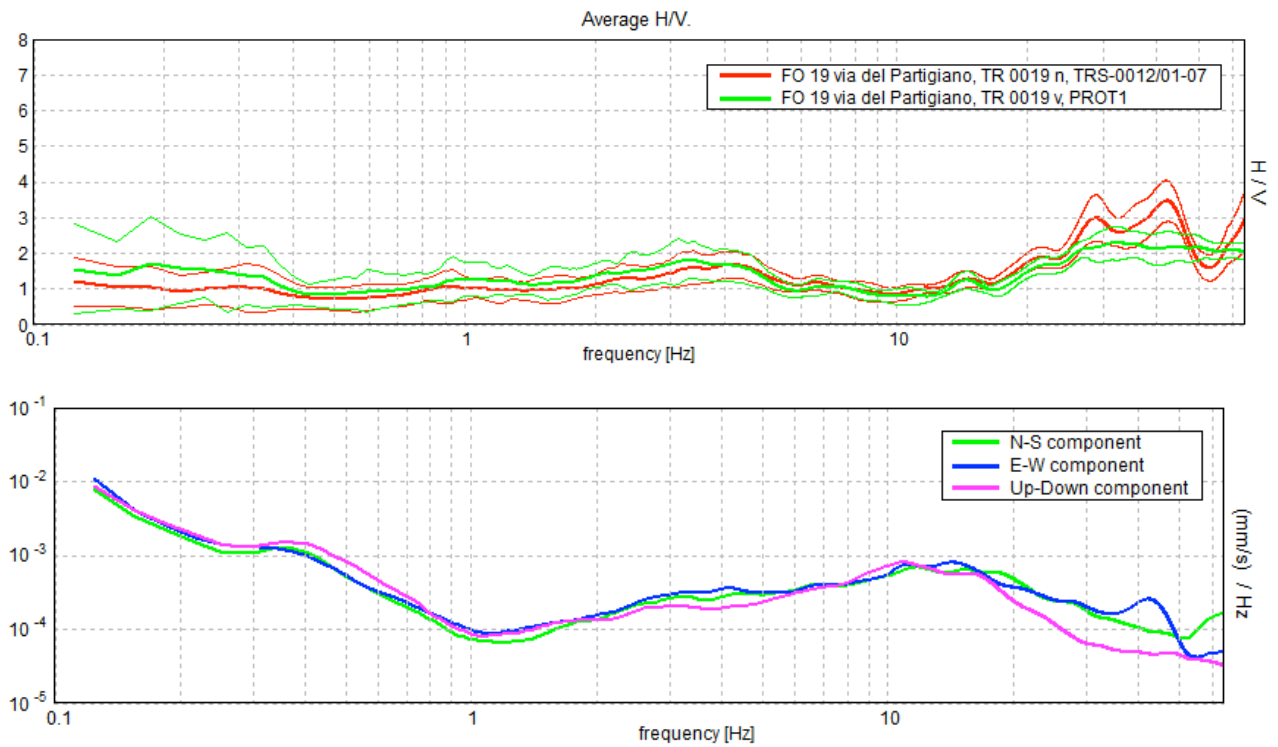


Figura 58. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 20: via Crocetta

[Prove 237 in Appendice B]

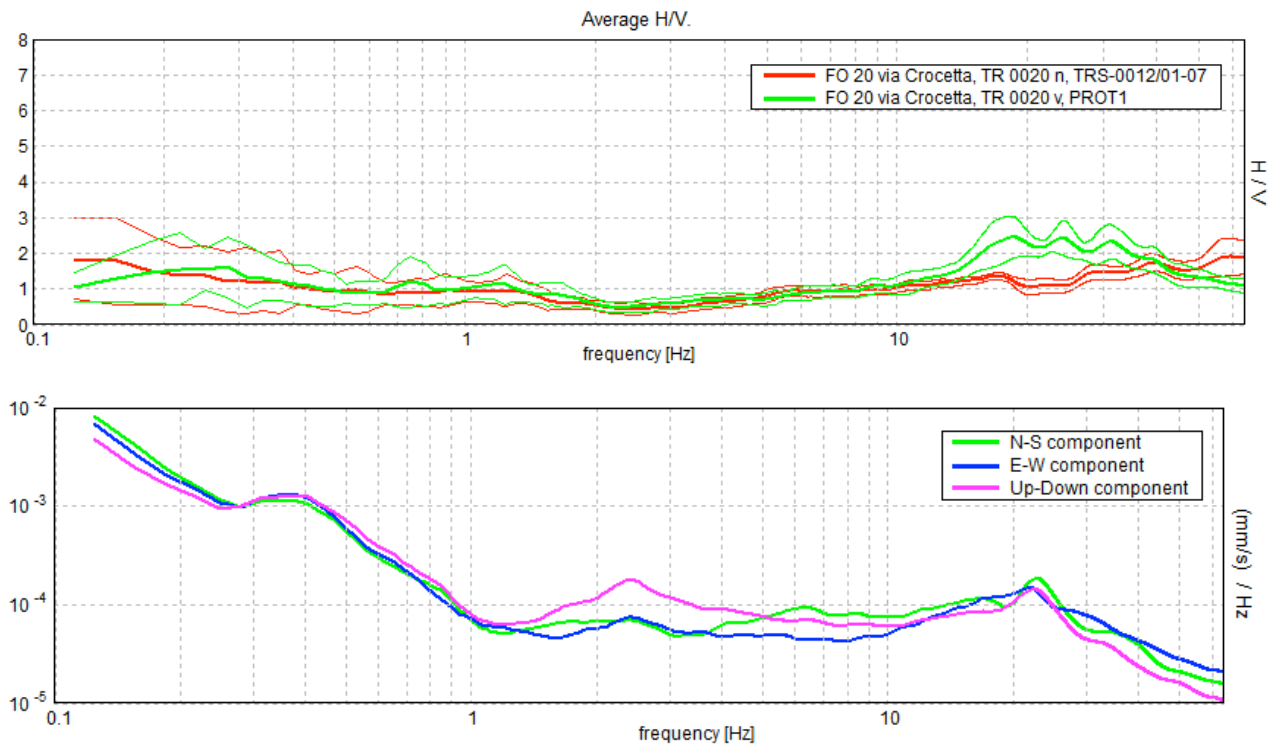


Figura 59. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 21: via Malguaia

[Prove 238 e 239 in Appendice B]

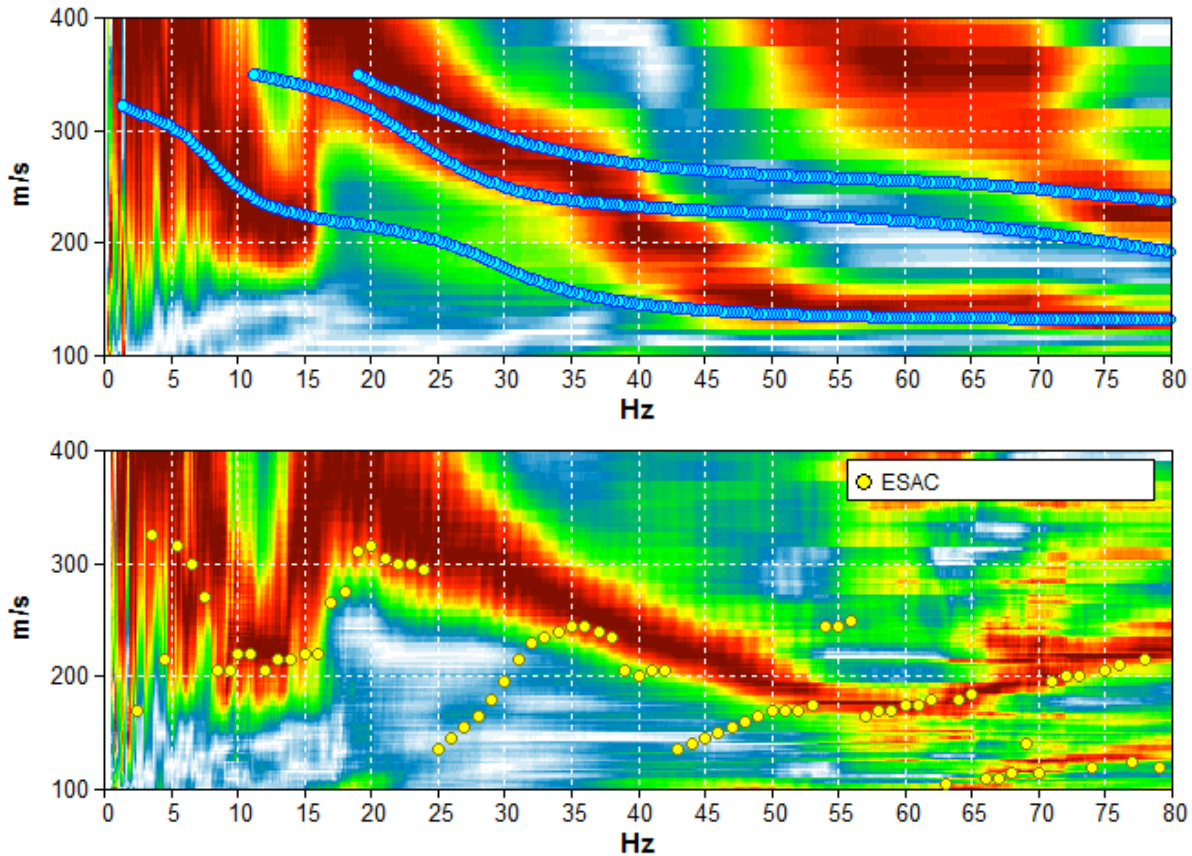


Figura 60. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

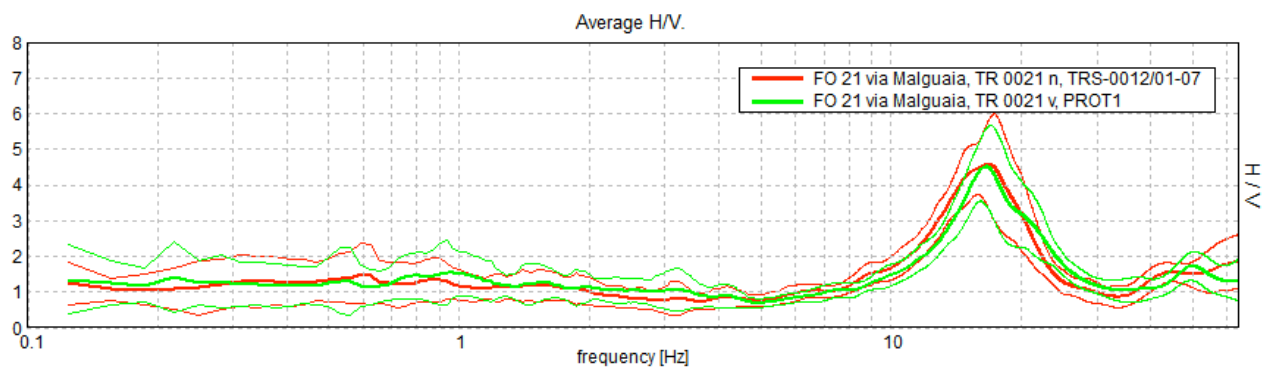


Figura 61. Alto: confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). Basso: spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

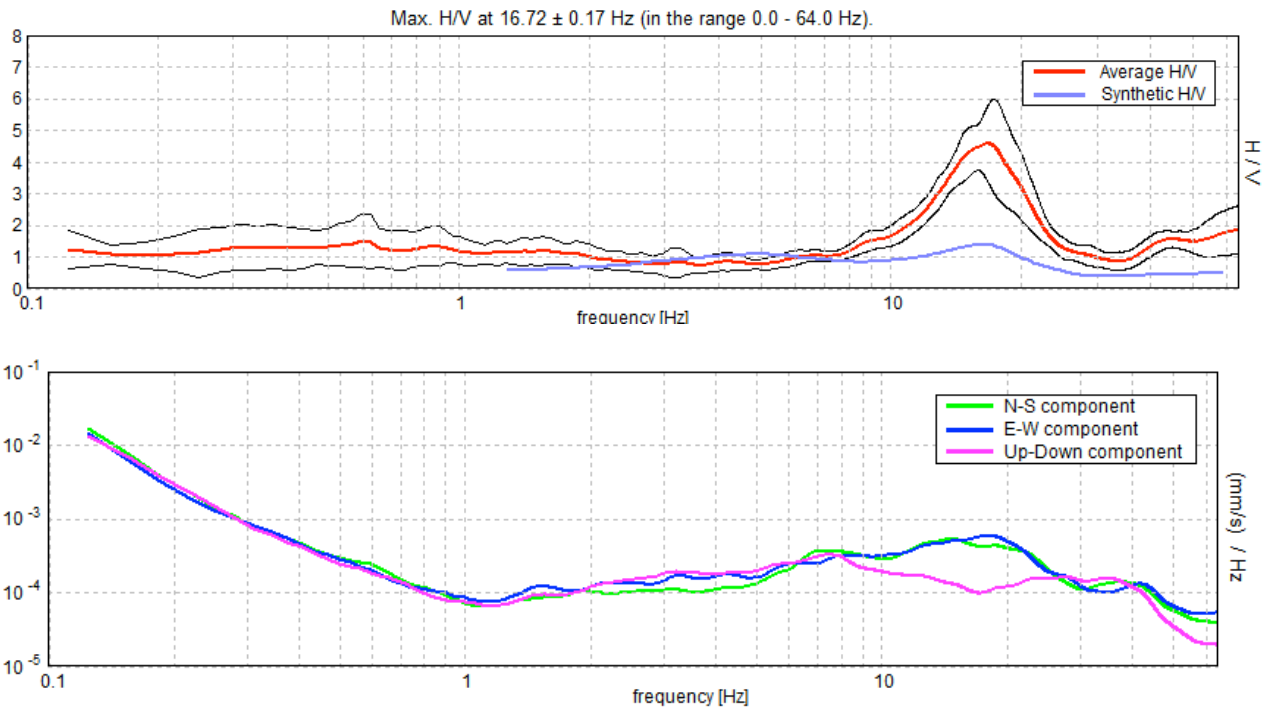


Figura 62. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
2.00	2.00	140	0.40
12.00	10.00	250	0.40
inf.	inf.	350	0.40

Tabella 9. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

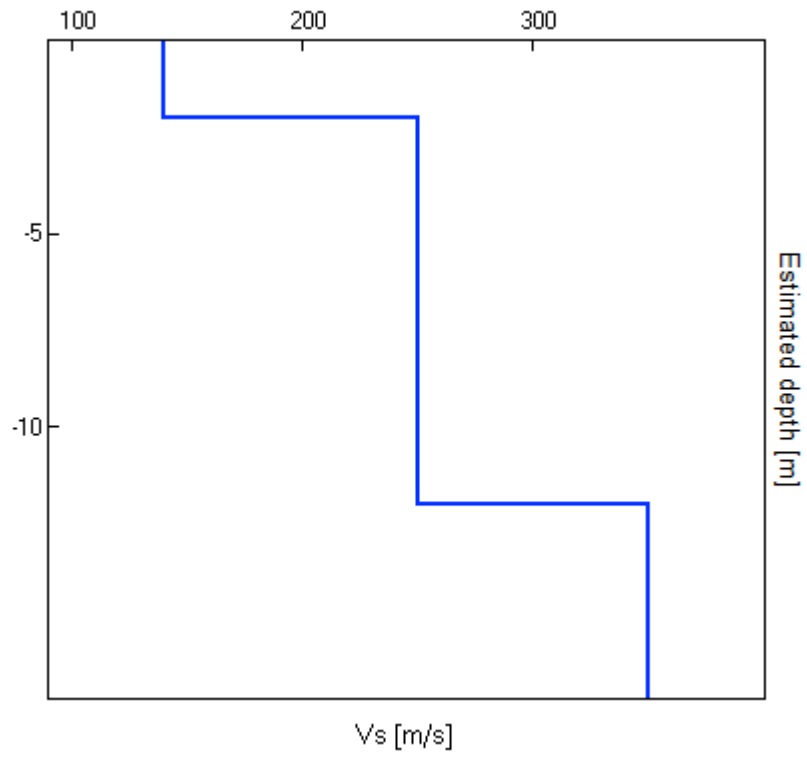


Figura 63. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 22: via dell'Appennino 775
 [Prove 240 e 241 in Appendice B]

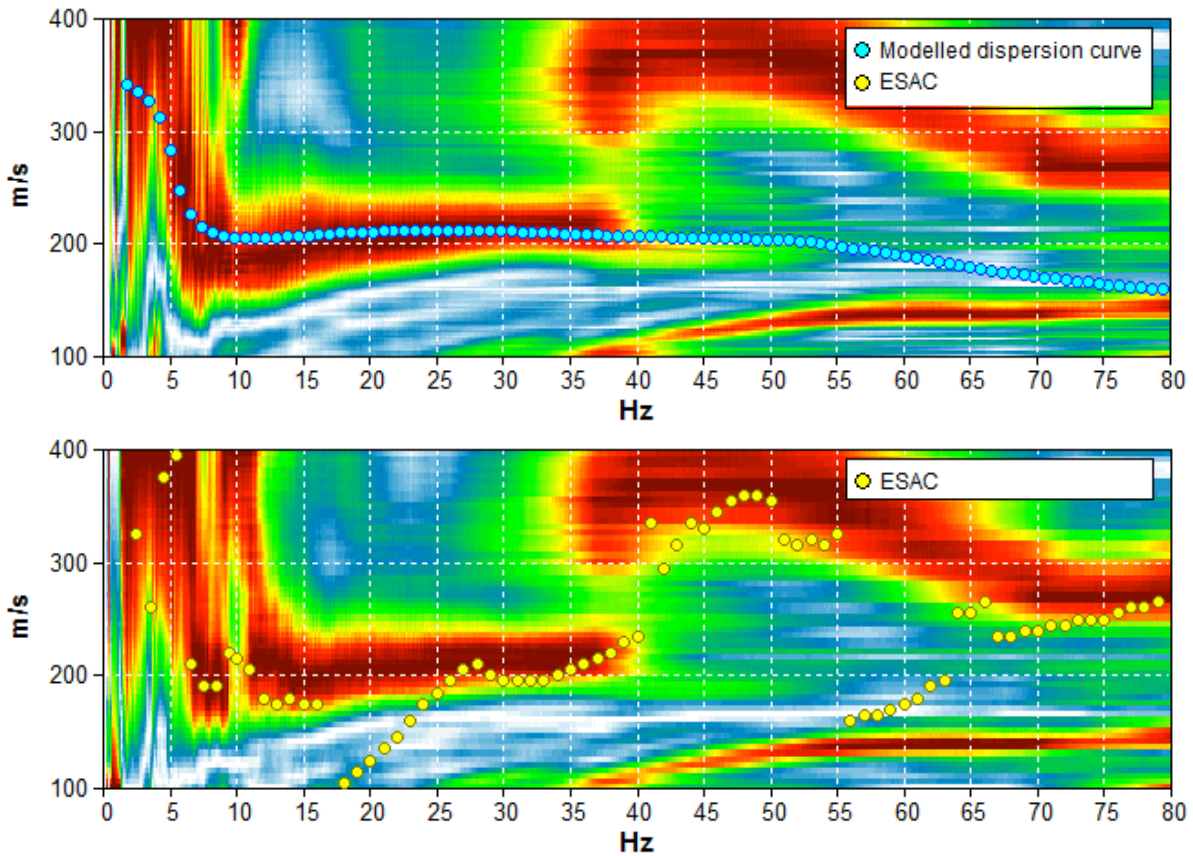
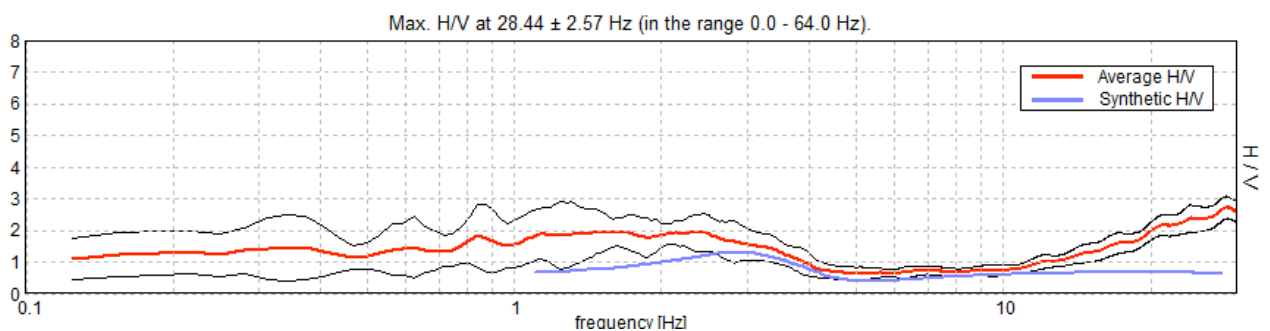


Figura 64. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.



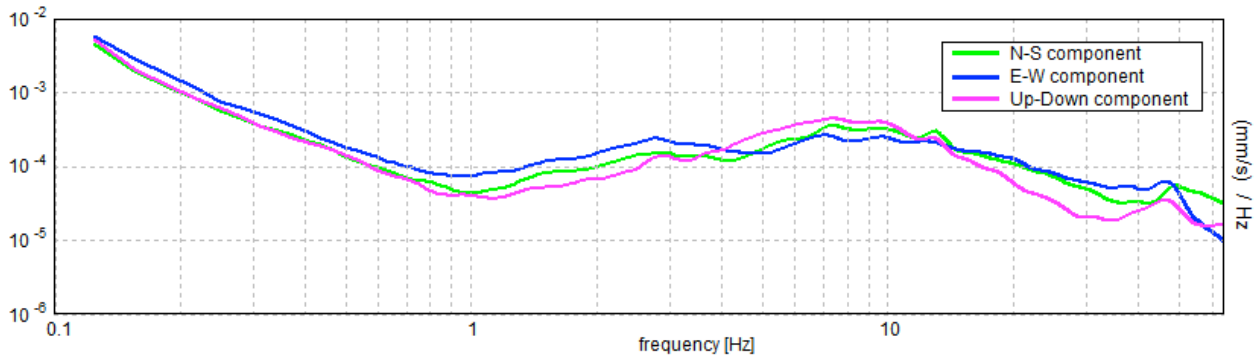


Figura 65. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.00	1.00	150	0.40
6.00	5.00	250	0.40
16.00	10.00	200	0.40
inf.	inf.	380	0.40

Tabella 10. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

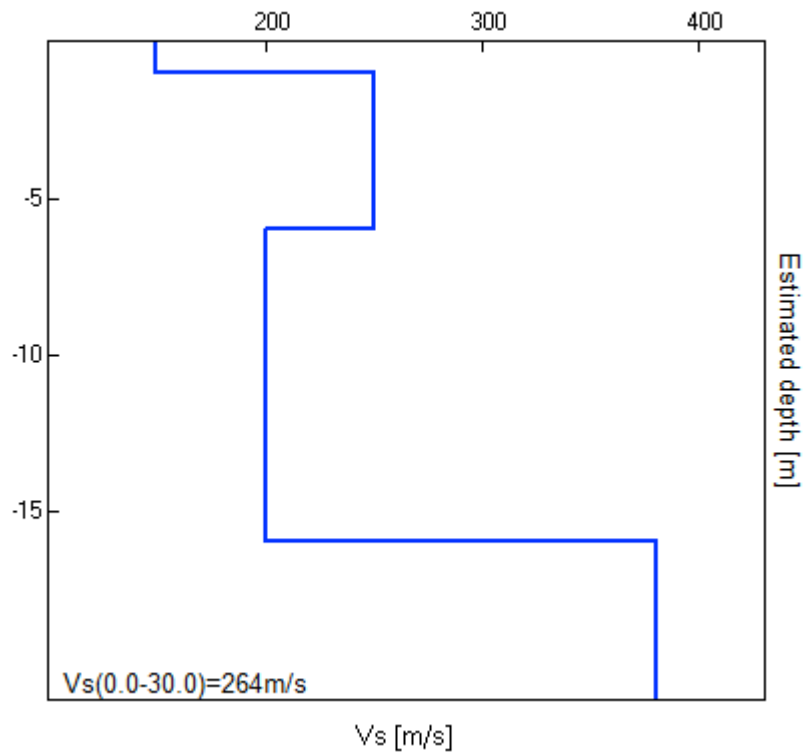


Figura 66. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 23: via Para 22

[Prove 242 in Appendice B]

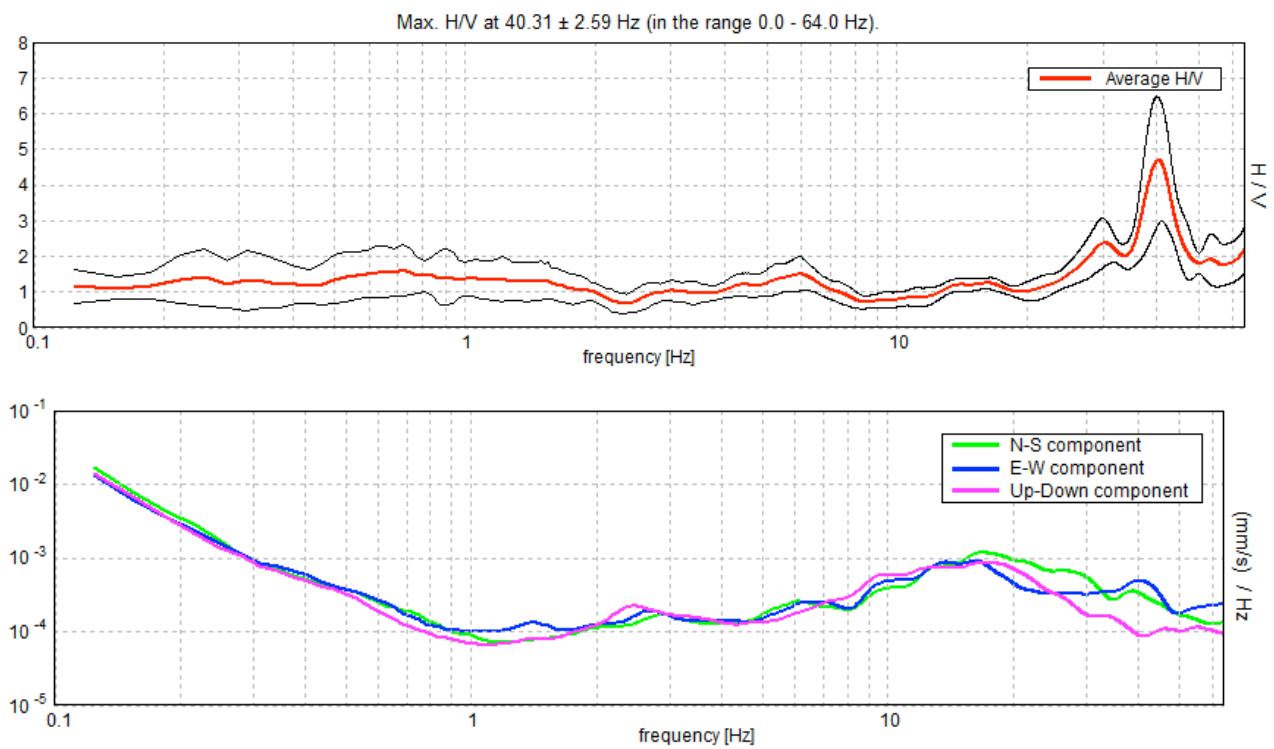


Figura 67. *Alto*: curva H/V registrata nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso*: spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

FO 24: via Maglianella, agriturismo La Sarzola

[Prove 243 in Appendice B]

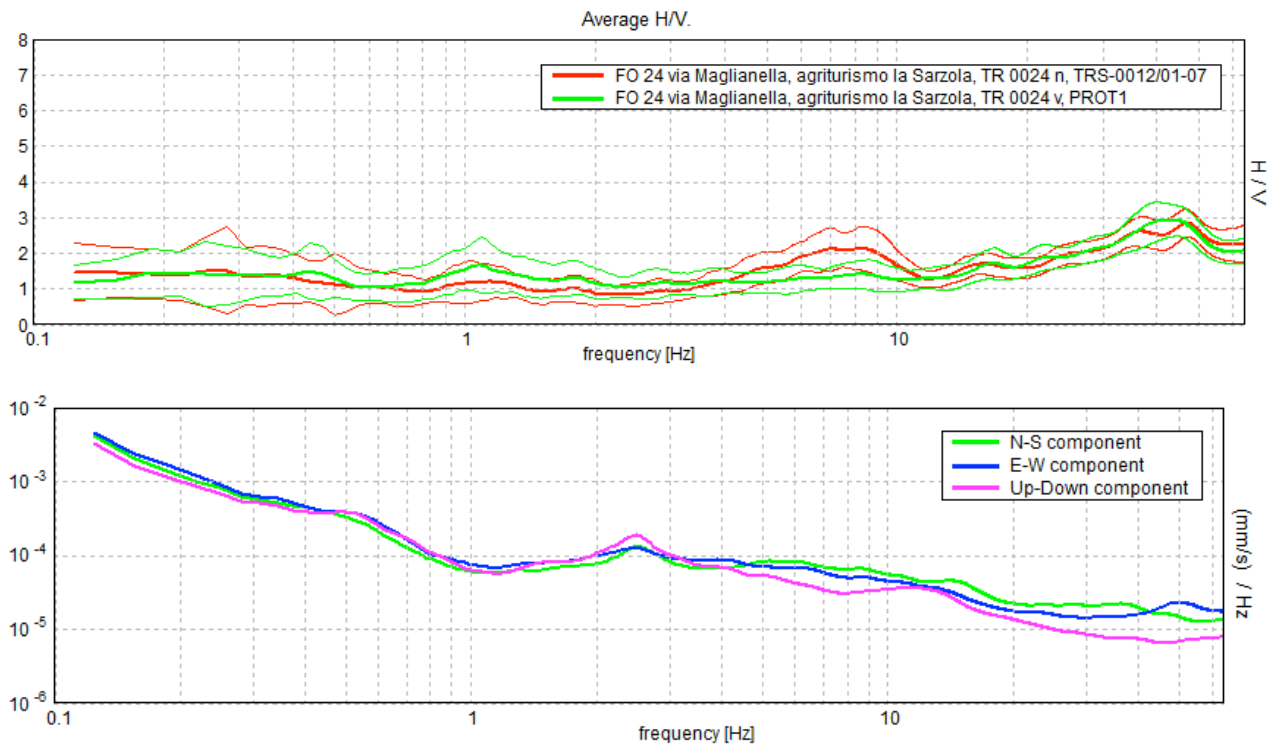


Figura 68. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 25: viale Bidente 273

[Prove 244 in Appendice B]

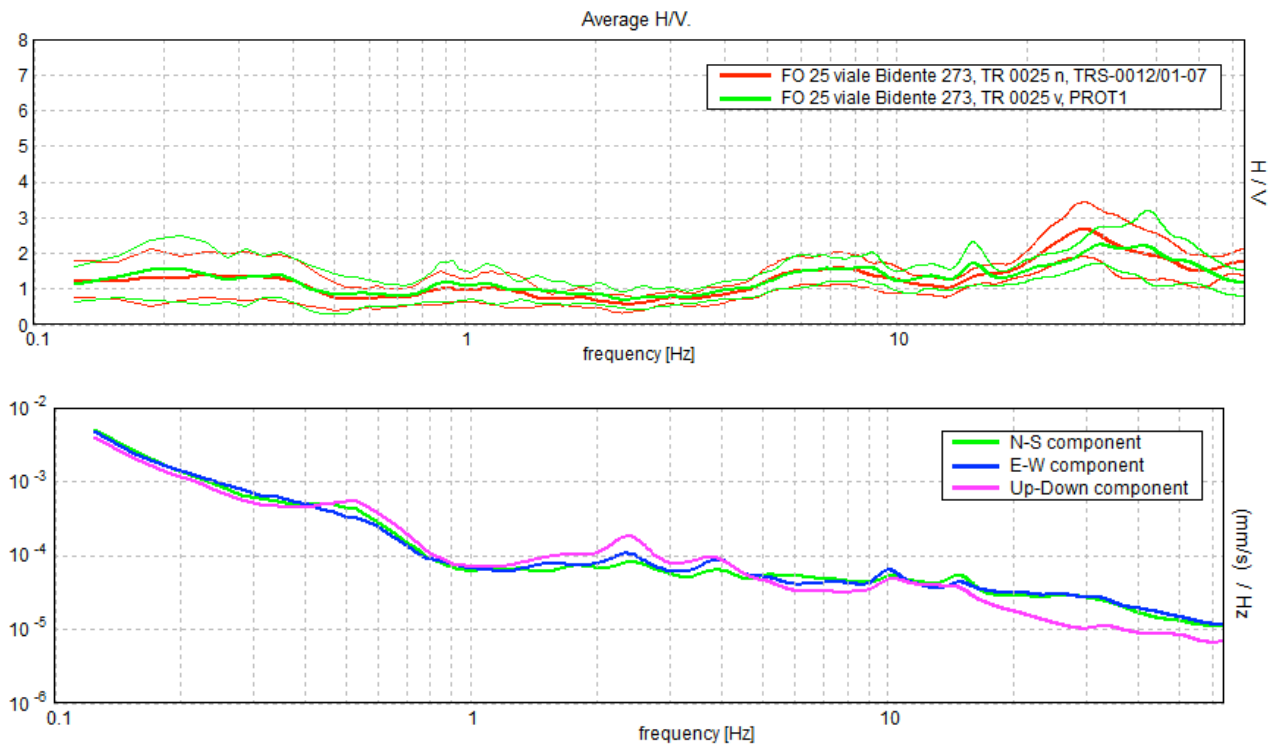


Figura 69. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 26: via Tibano 1

[Prove 245 e 246 in Appendice B]

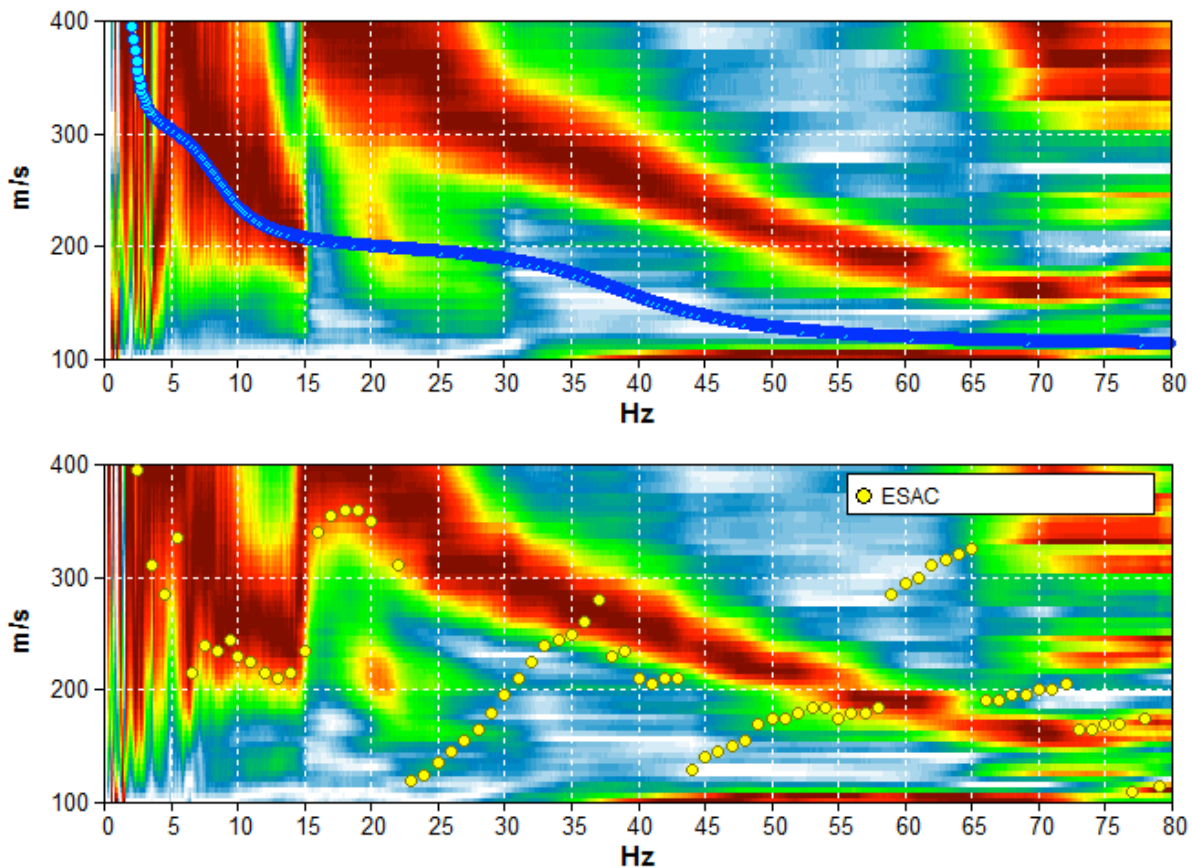


Figura 70. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

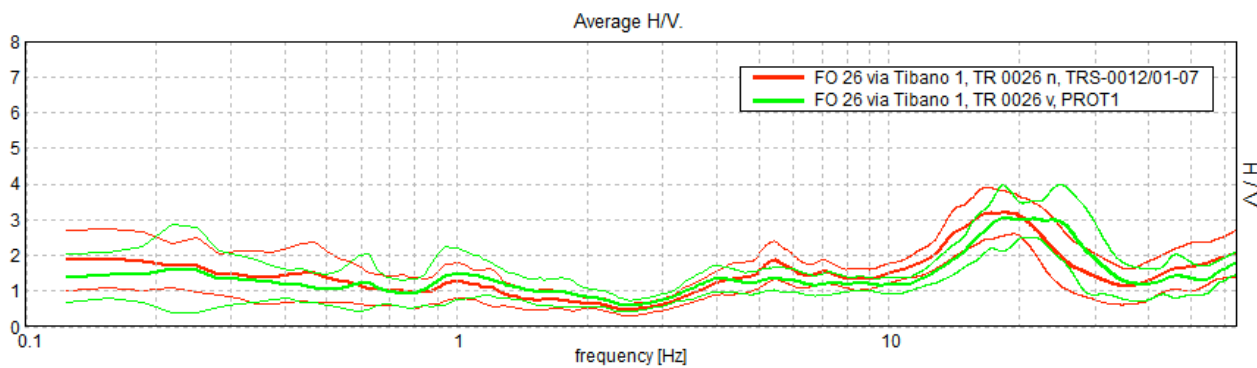


Figura 71. Confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile).

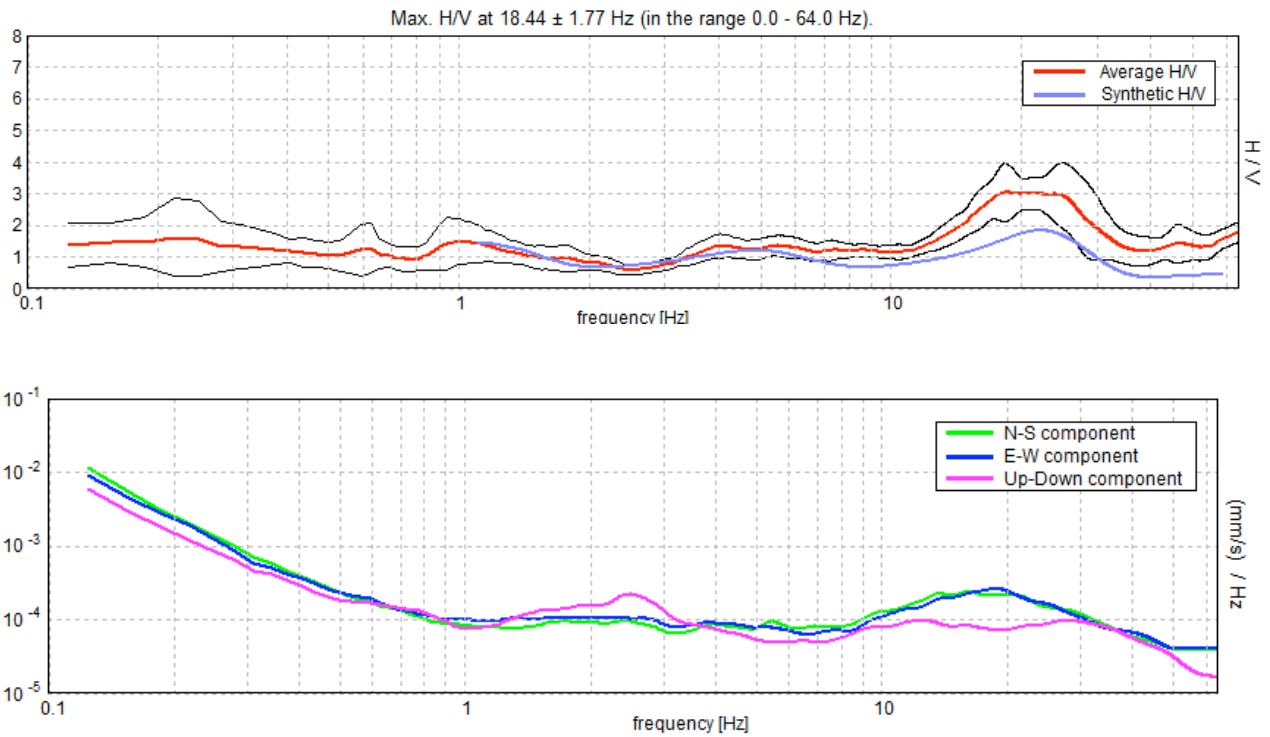


Figura 72. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.30	1.30	120	0.40
11.30	10.00	230	0.40
71.30	60.00	350	0.40
inf.	inf.	550	0.40

Tabella 11. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

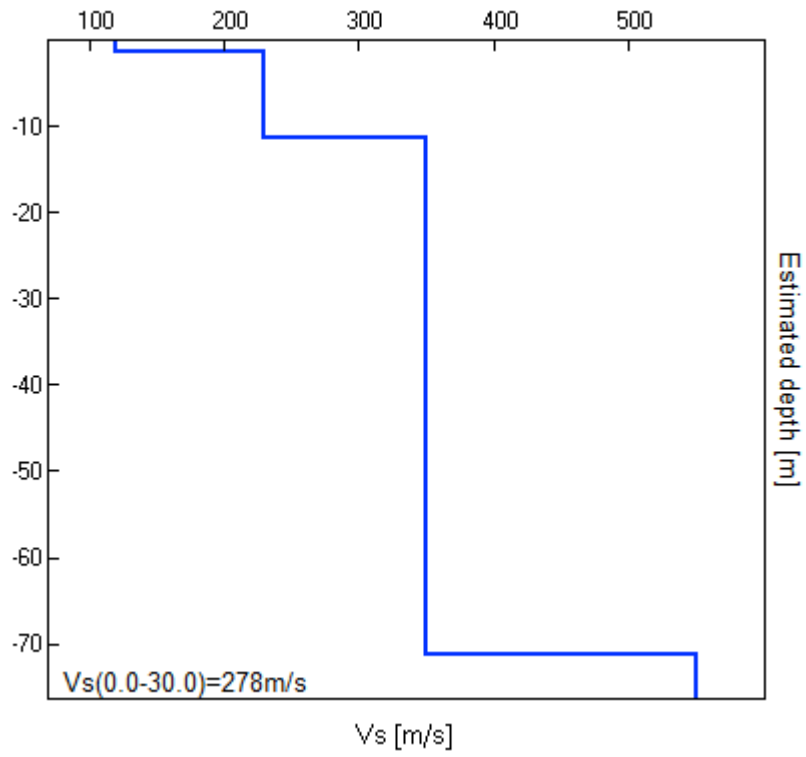


Figura 73. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 27: viale Roma, incrocio con Tangenziale Est

[Prove 247 in Appendice B]

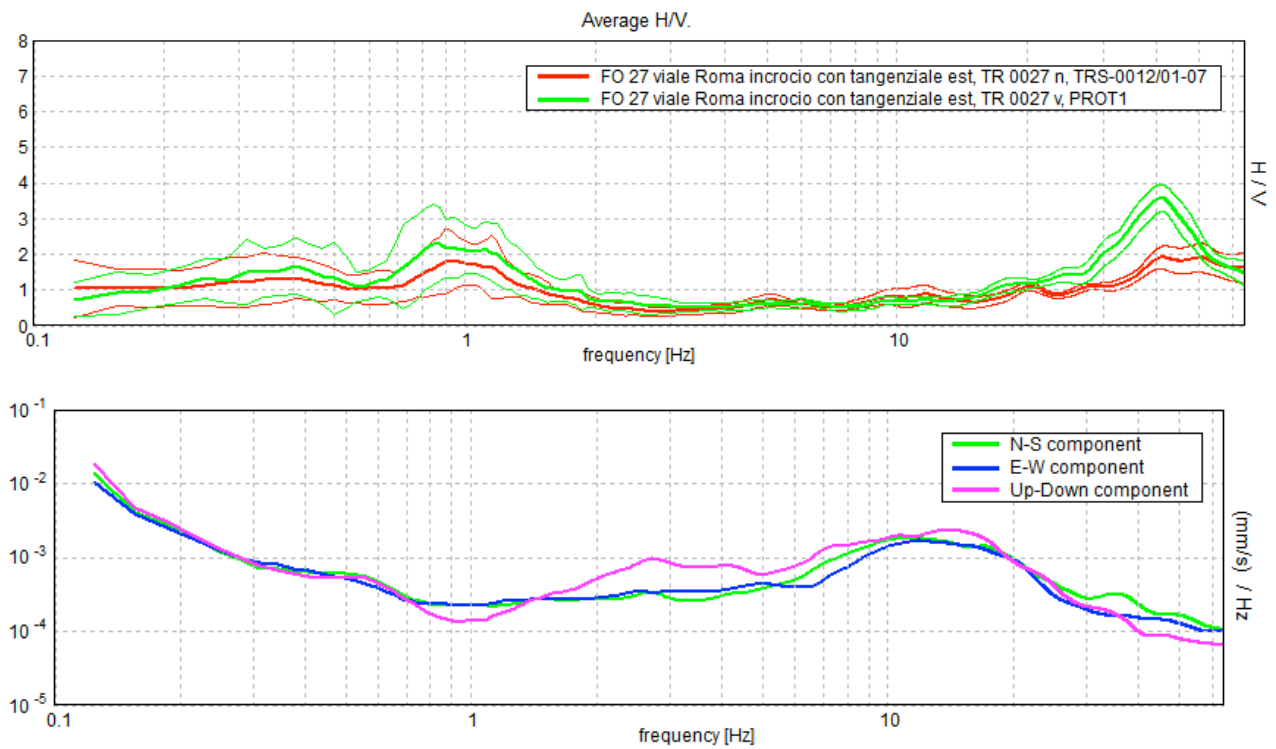


Figura 74. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 28: via Giulio II

[Prove 248 in Appendice B]

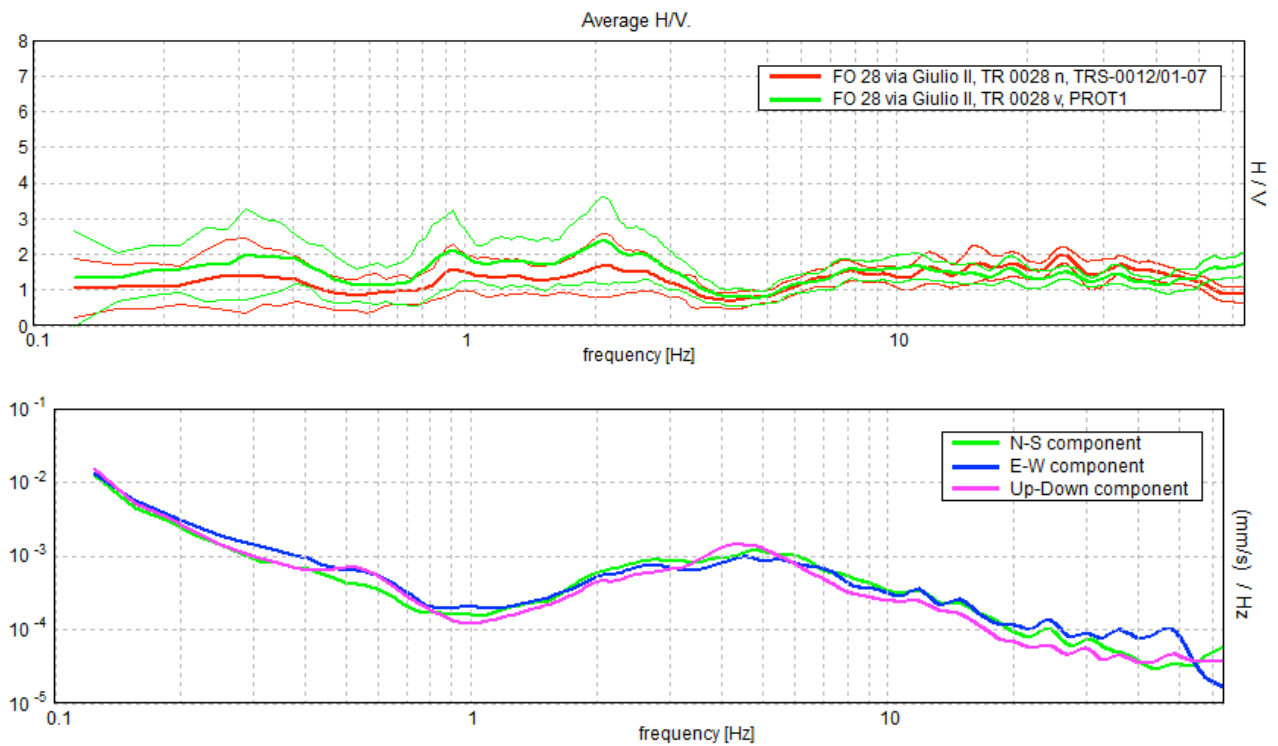


Figura 75. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 29: via Monte San Michele 12 (vecchia Eridania)

[Prove 249 e 250 in Appendice B]

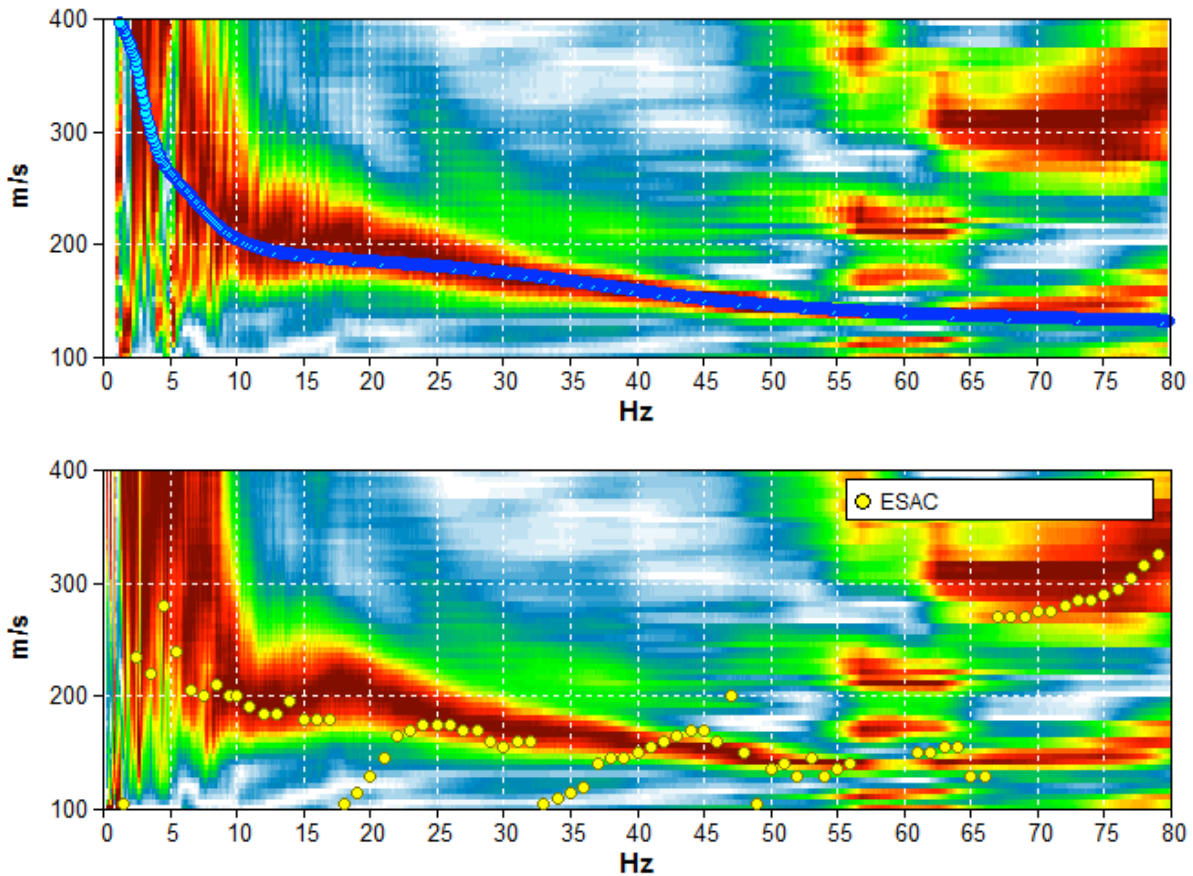


Figura 76. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

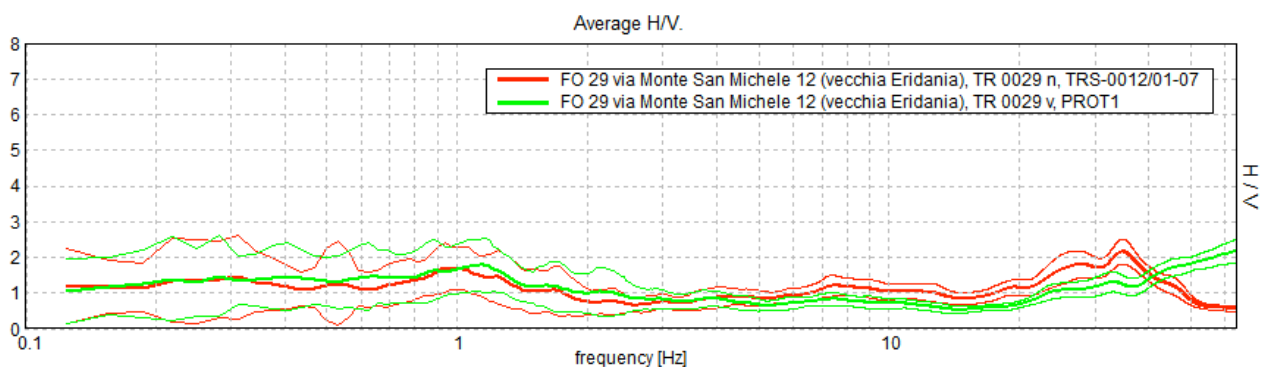


Figura 77. Confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile).

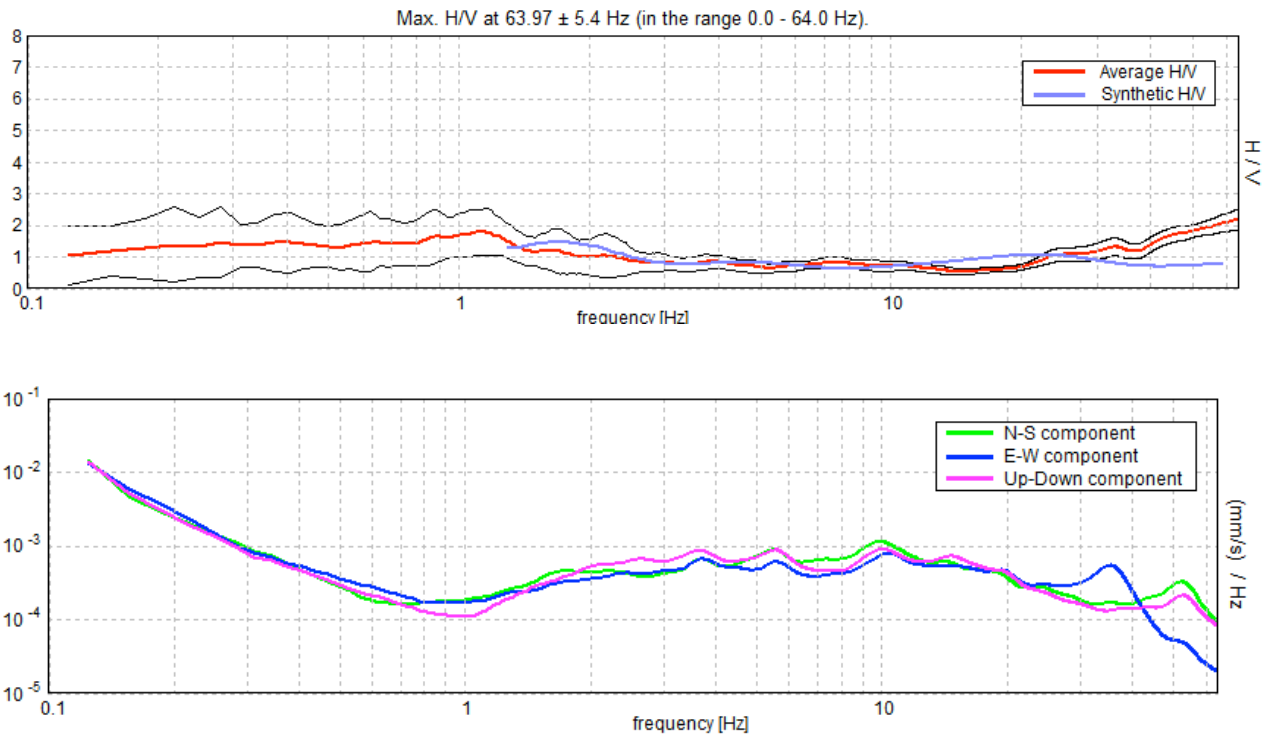


Figura 78. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.30	0.30	100	0.40
1.60	1.30	150	0.40
11.60	10.00	210	0.40
41.60	30.00	300	0.40
inf.	inf.	450	0.40

Tabella 12. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

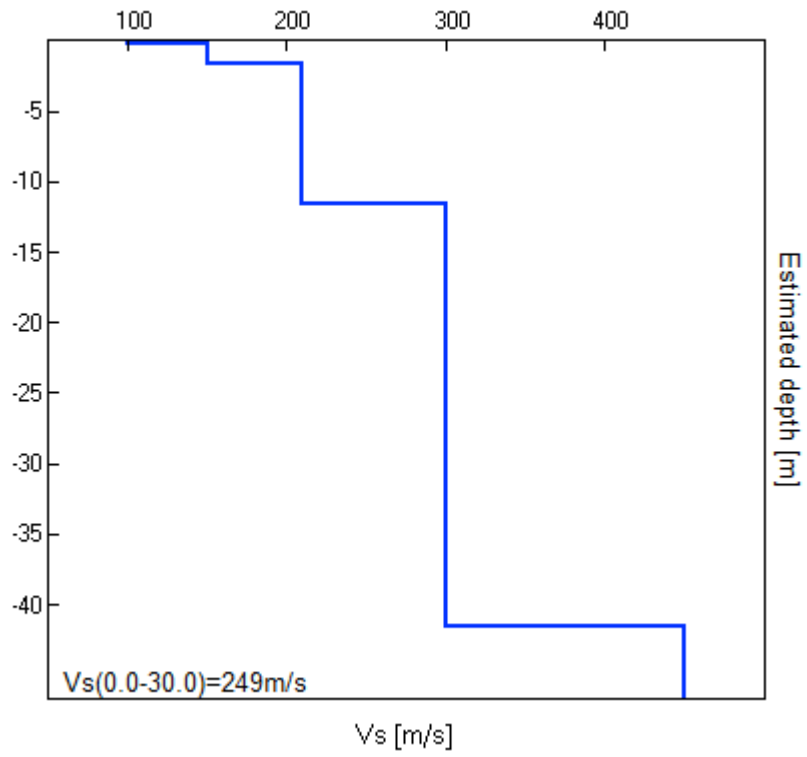


Figura 79. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 30: via Dandolo 11

[Prove 251 e 252 in Appendice B]

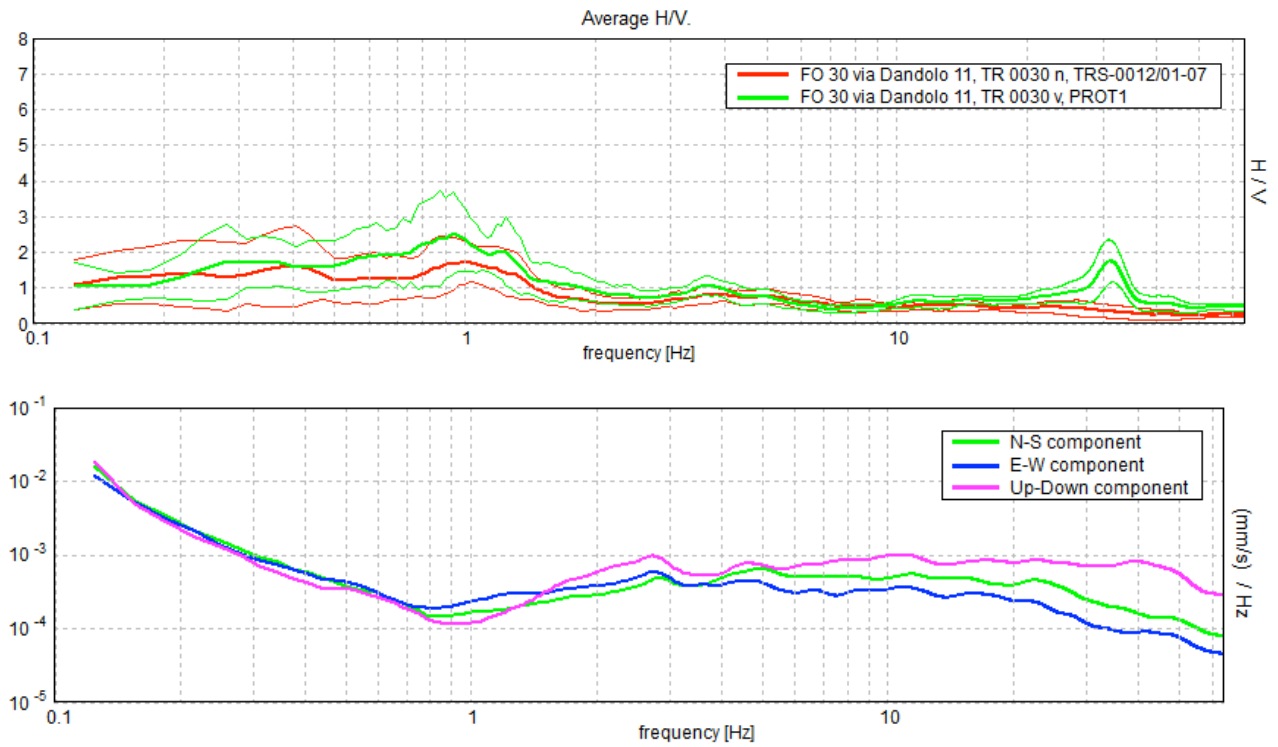


Figura 80. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 31: via Curte 8

[Prove 253 in Appendice B]

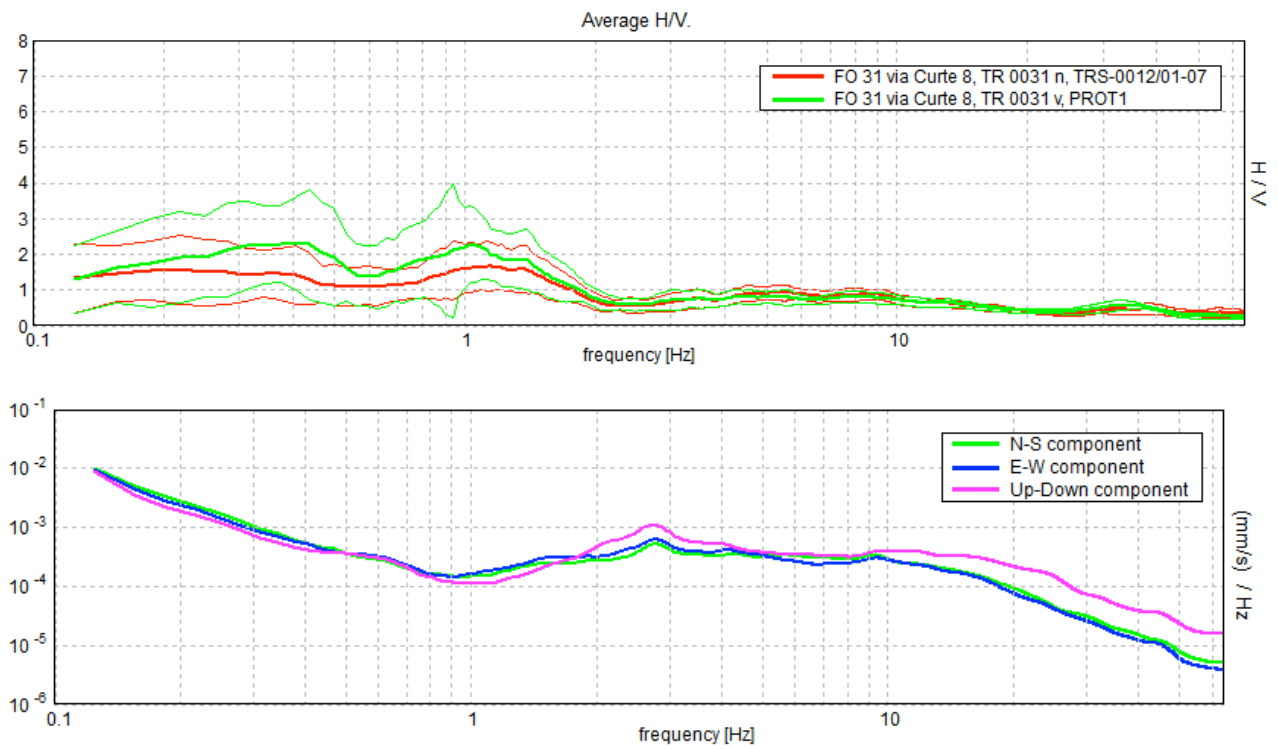


Figura 81. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 32: viale Bologna 2-4

[Prove 254 e 255 in Appendice B]

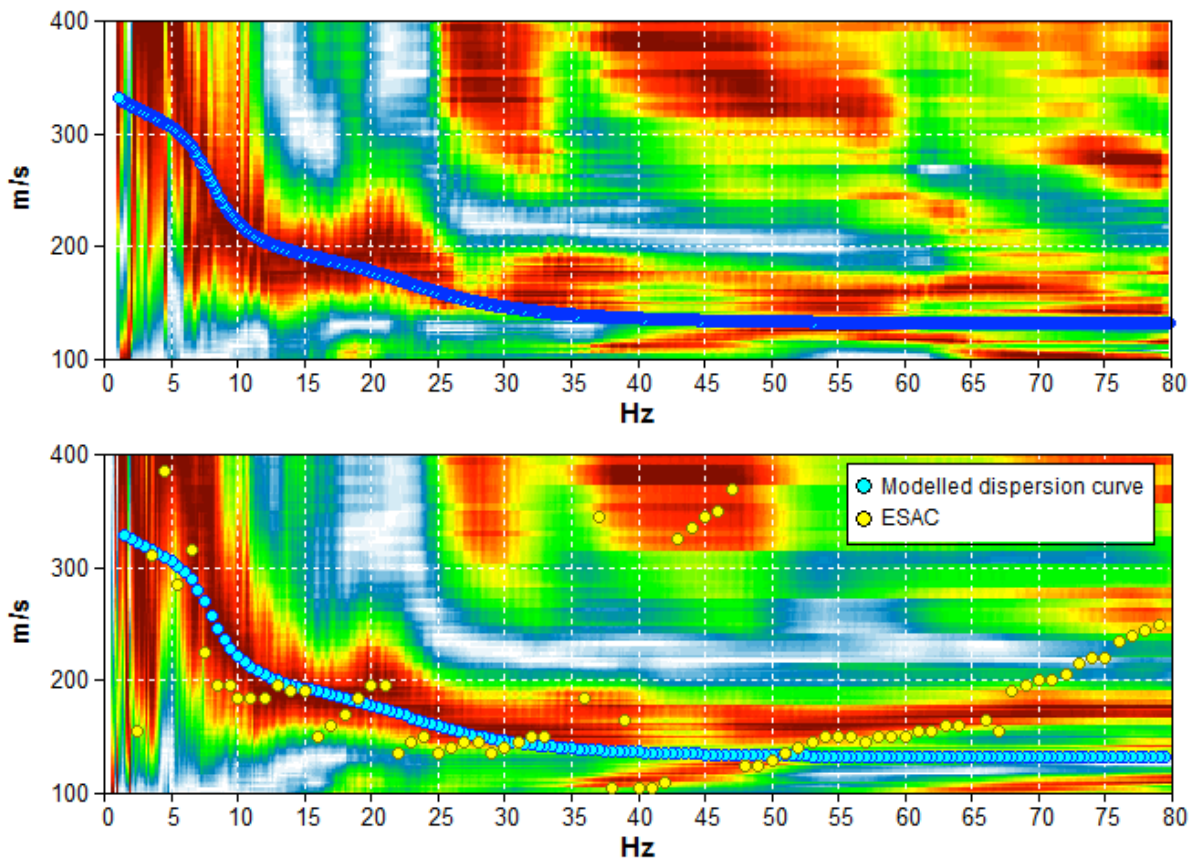


Figura 82. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

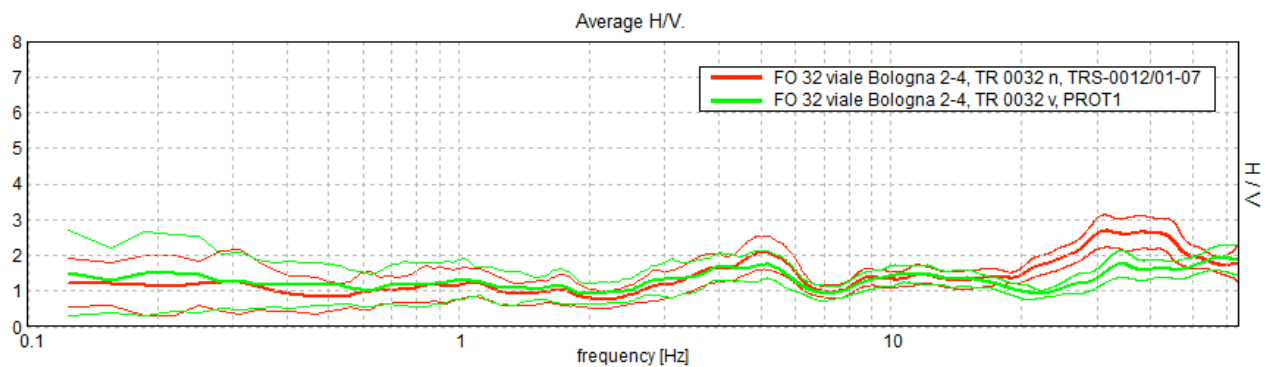


Figura 83. Confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile).



Figura 84. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
2.50	2.50	140	0.40
11.50	9.00	220	0.40
inf.	inf.	360	0.40

Tabella 13. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

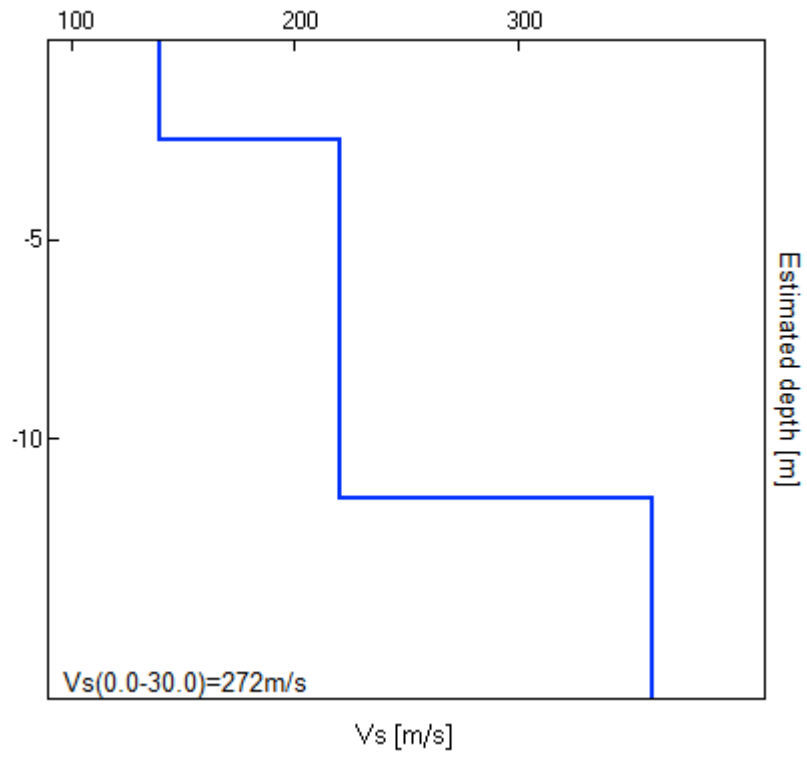


Figura 85. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

FO 33: via Giovanni dalle Bande Nere 4

[Prove 256 in Appendice B]

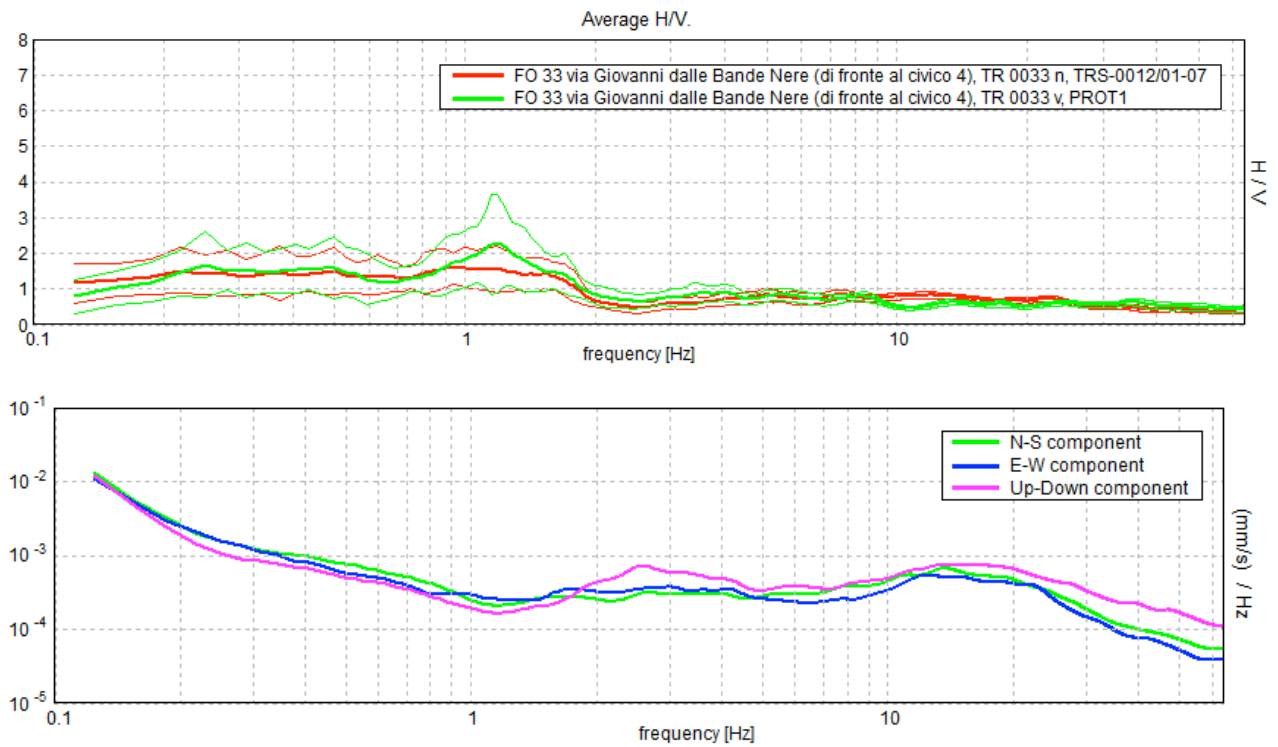


Figura 86. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 34: via Marsala 8

[Prove 257 in Appendice B]

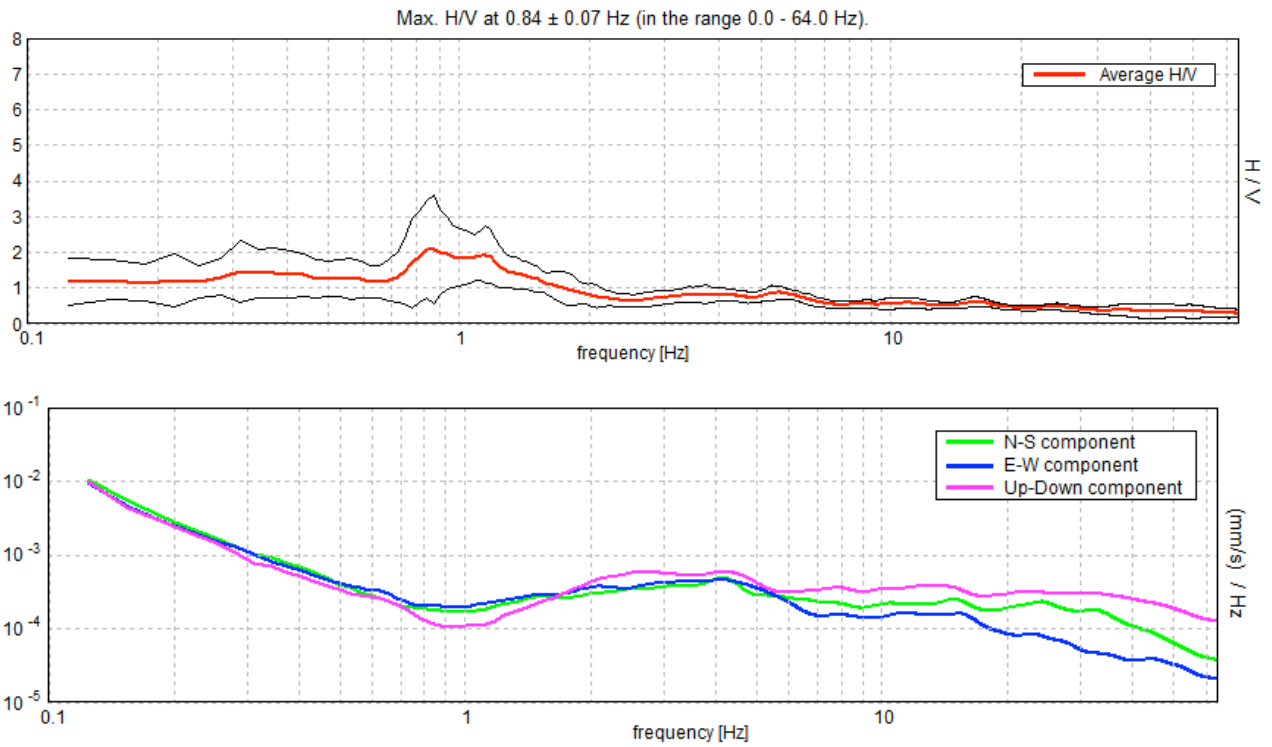


Figura 87. *Alto:* curva H/V registrata nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

FO 35: via Gioppi

[Prove 258 in Appendice B]

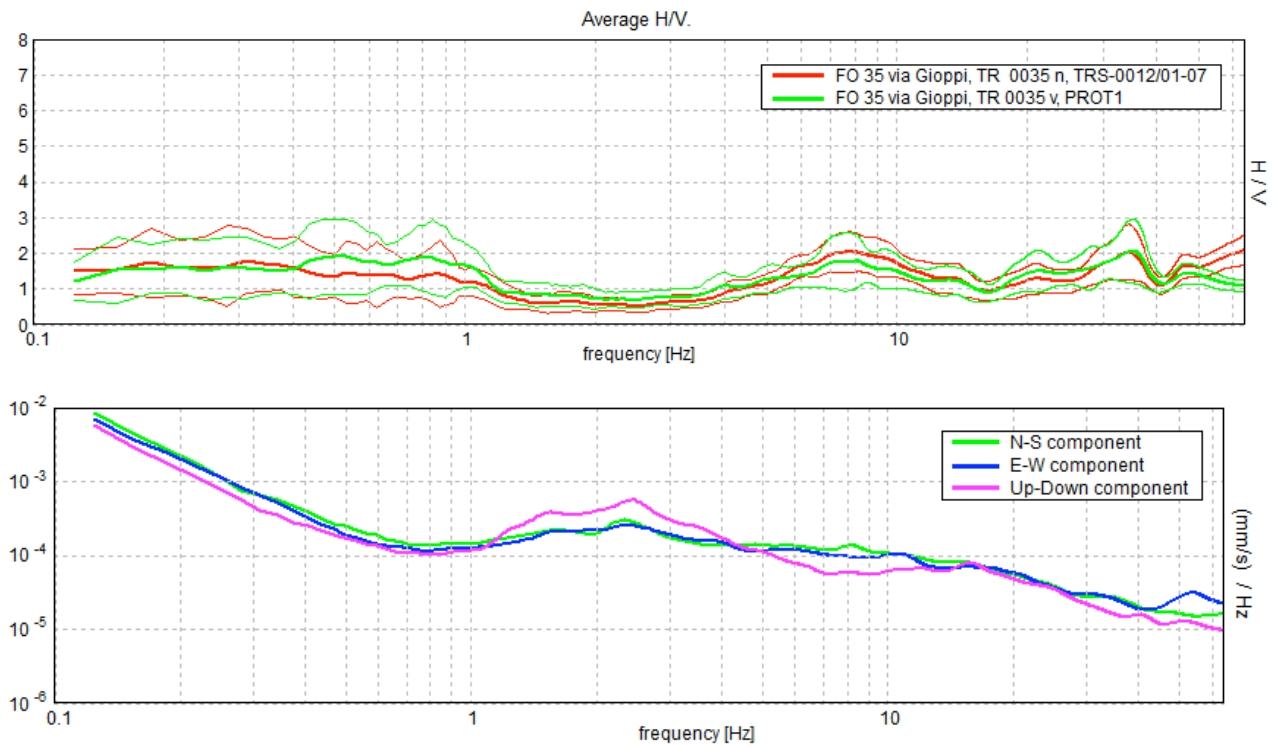


Figura 88. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 36: via Castel Falcino 10

[Prove 259 in Appendice B]

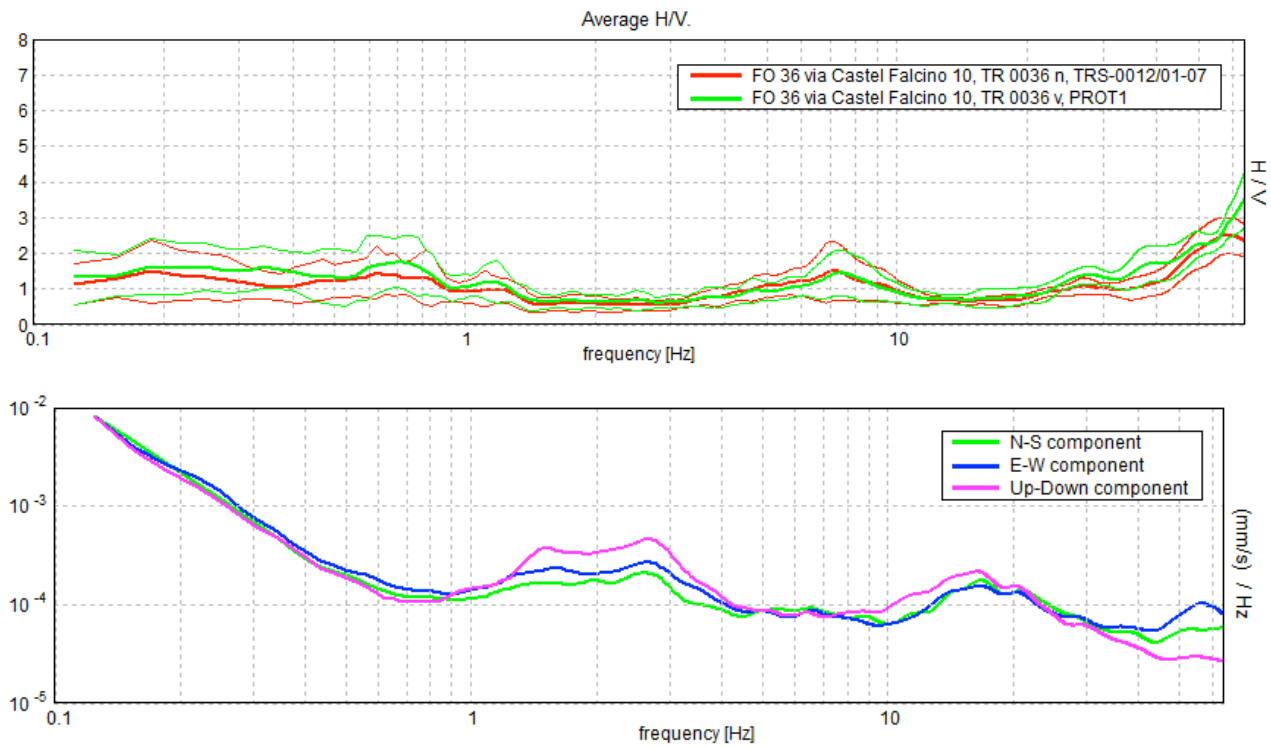


Figura 89. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 37: via Lughese 73

[Prove 260 in Appendice B]

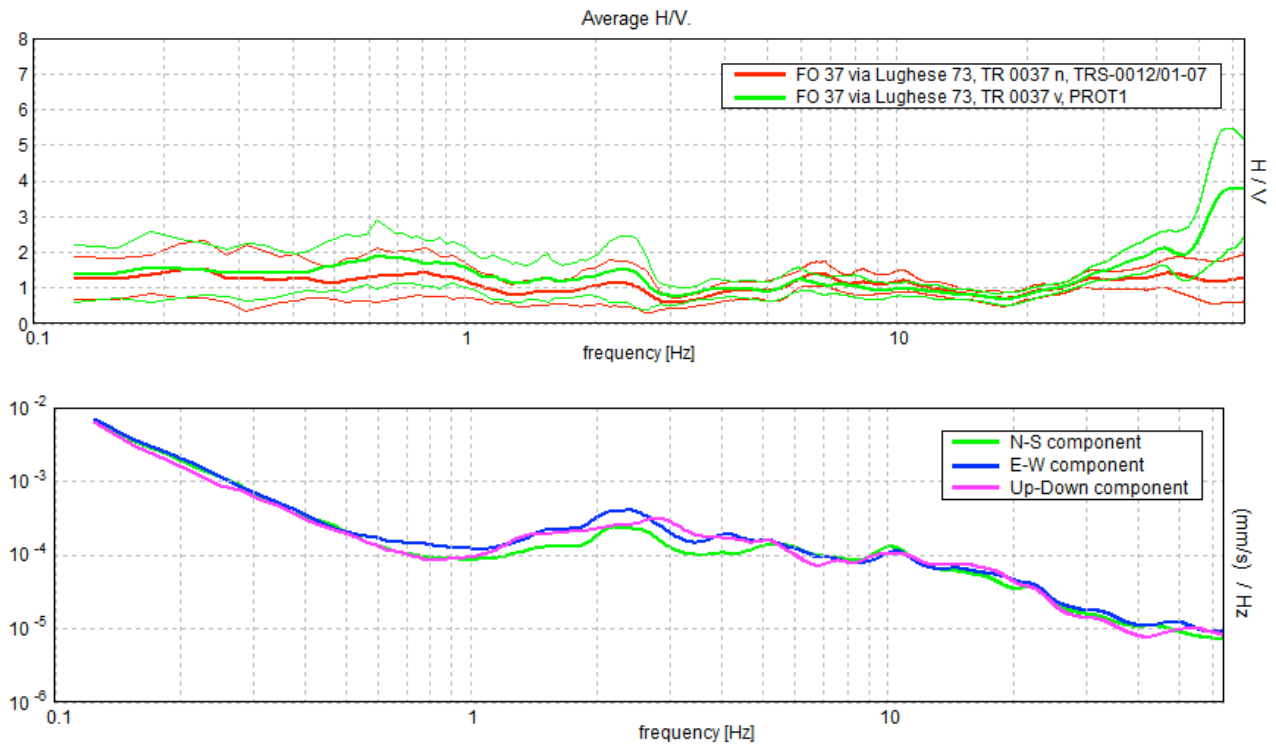


Figura 90. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 38: incrocio tra via Erbosa e via Donnasanta

[Prove 261 in Appendice B]

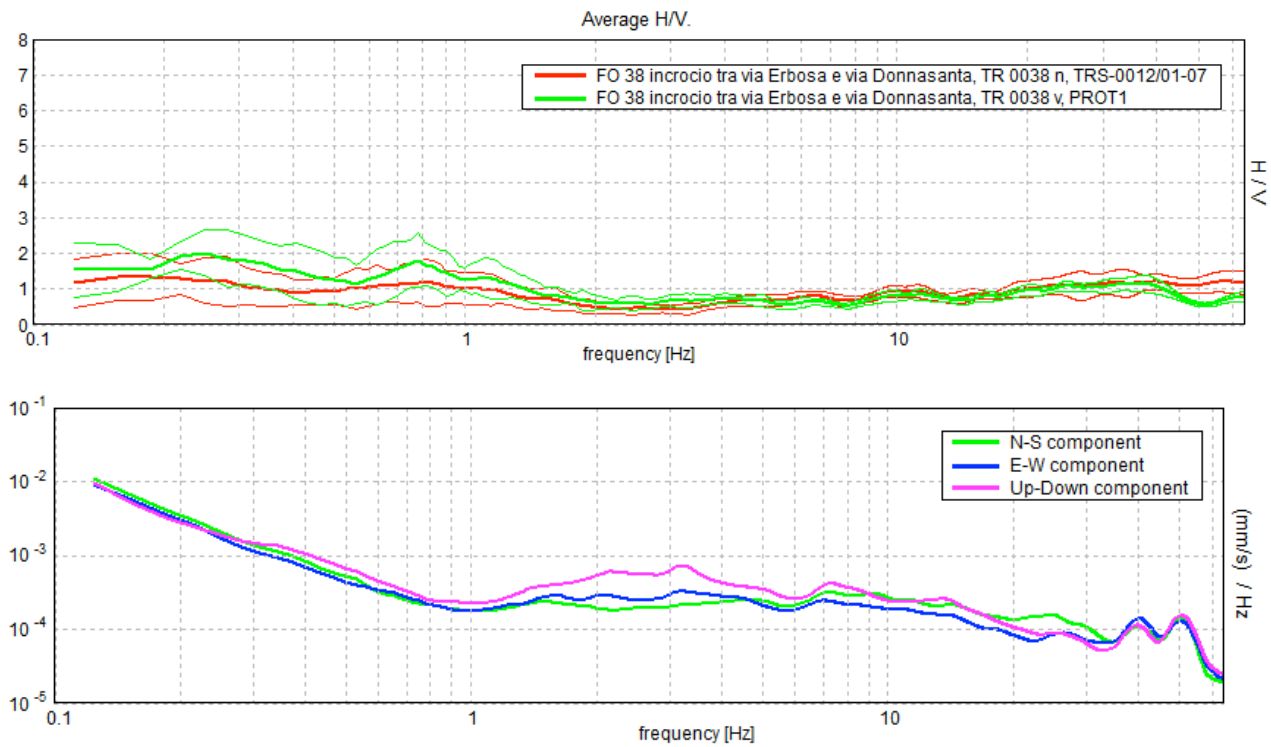


Figura 91. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 39: via Erbosa

[Prove 262 in Appendice B]

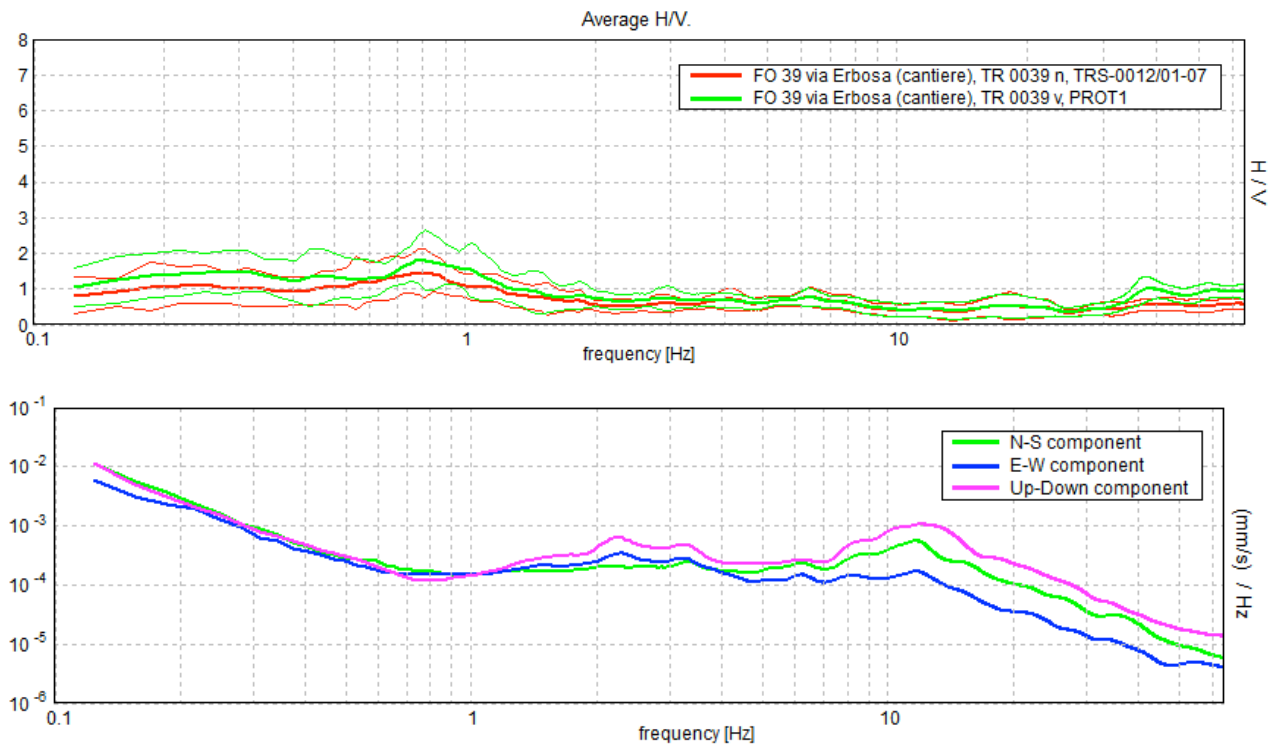


Figura 92. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 40: via Sarachieda 5

[Prove 263 in Appendice B]

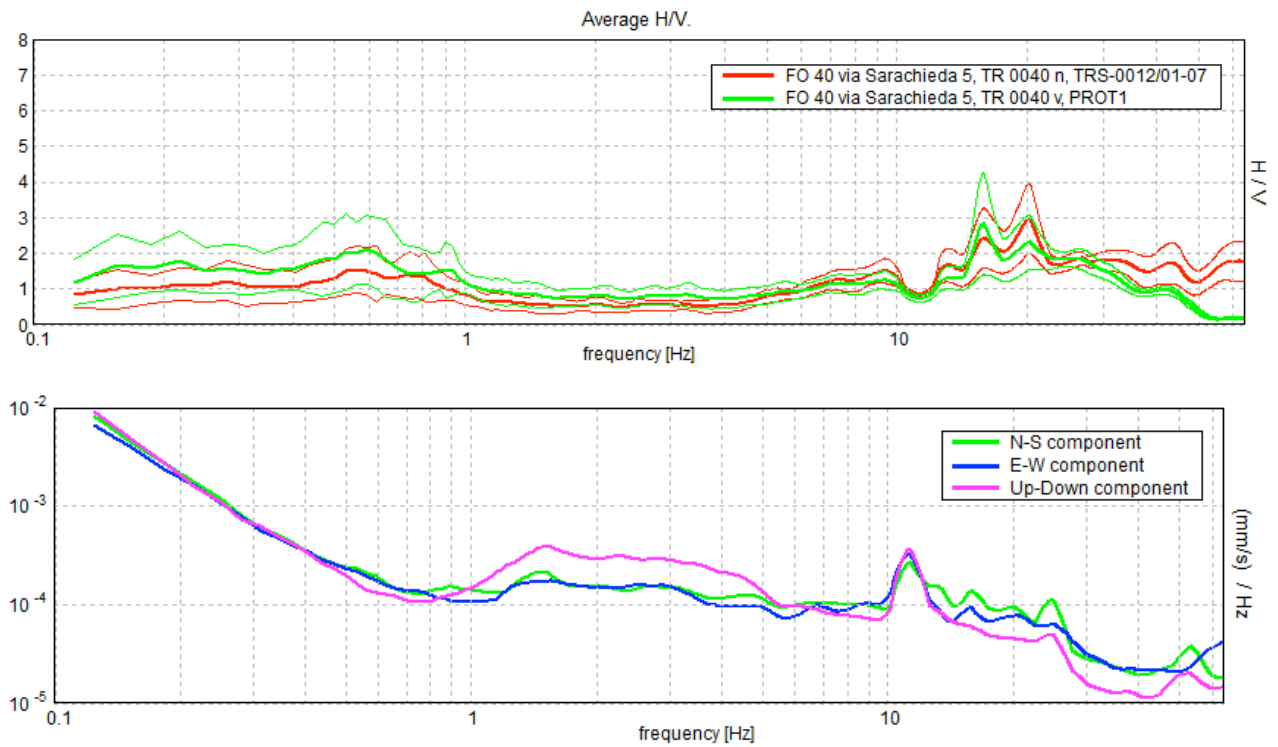


Figura 93. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 41: serbatoio Romagna Acque, Corso A. Diaz

[Prove 264 in Appendice B]

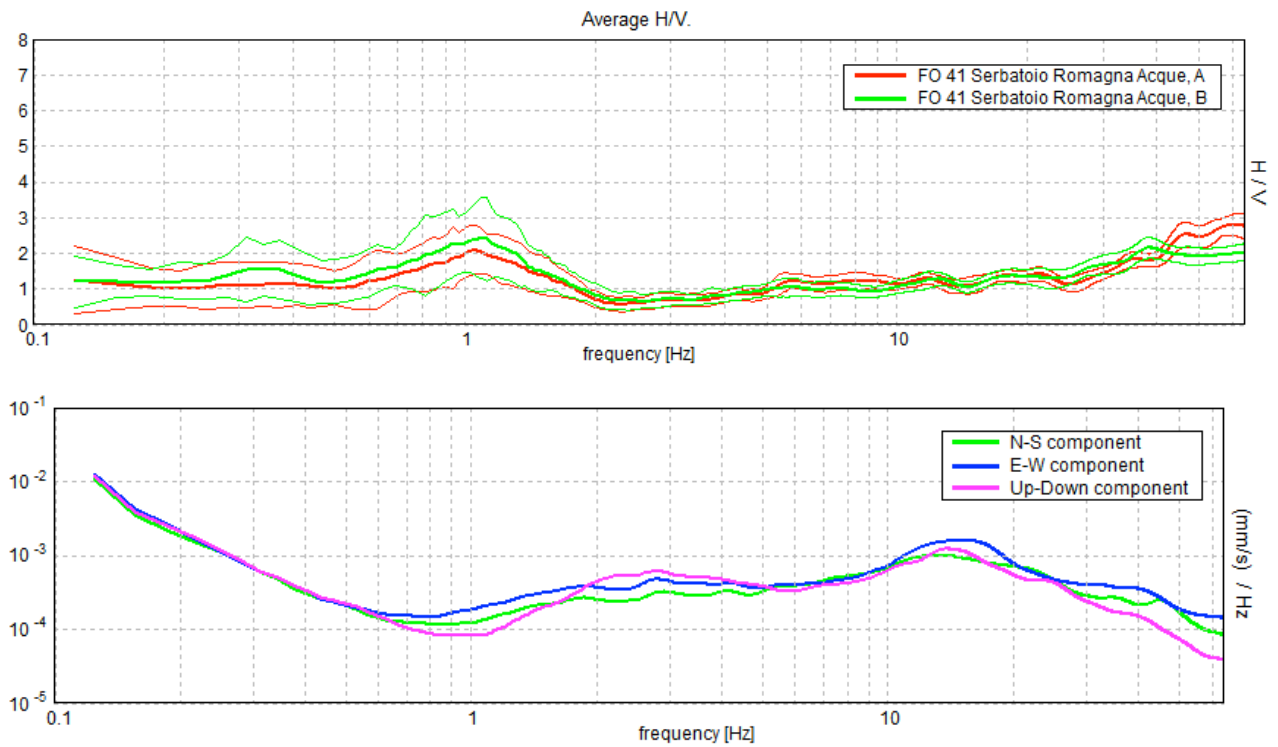


Figura 94. *Alto:* confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile). *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi ad una delle due curve H/V mostrate sopra.

FO 42: dipartimento della Protezione Civile Provinciale, via Cadore 75

[Prove 265 e 266 in Appendice B]

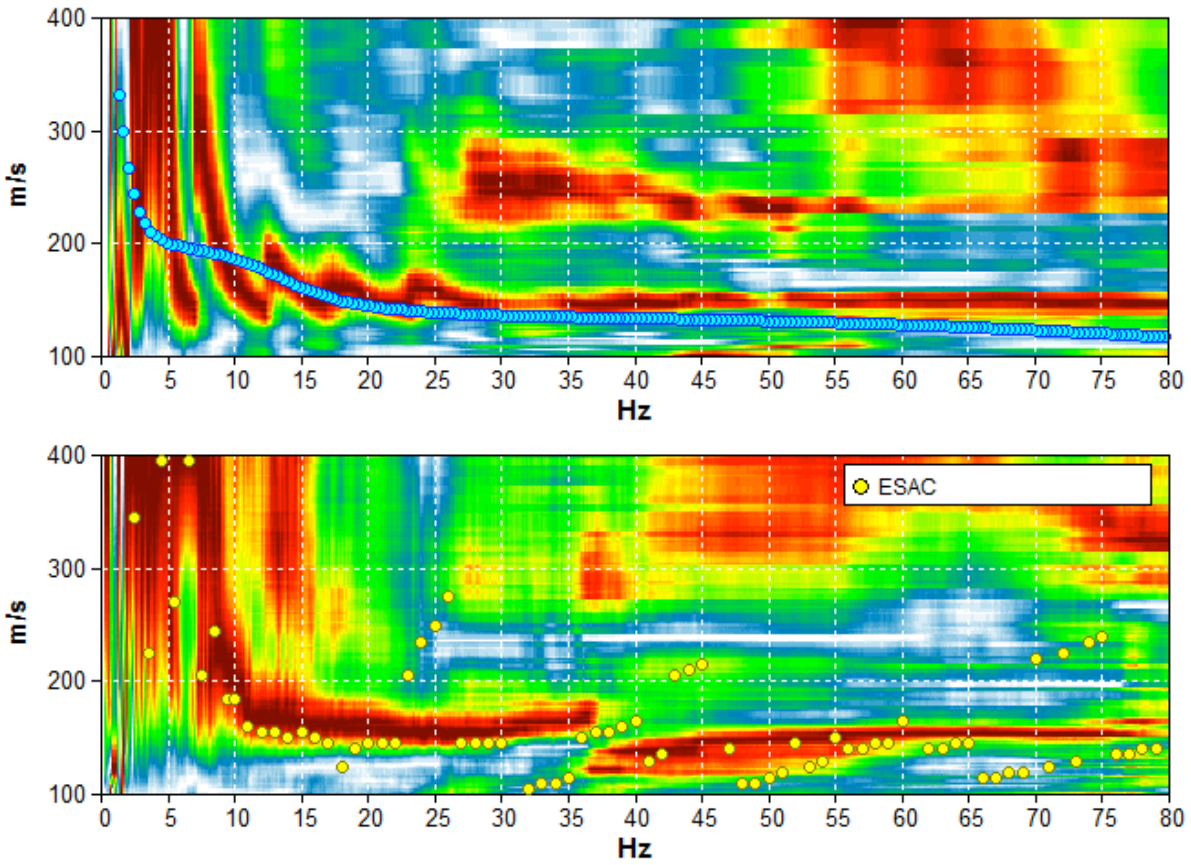


Figura 95. Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW (alto) e ReMi (basso). Cerchi gialli: curva di dispersione della velocità di fase dell'onda di Rayleigh derivante da indagine ESAC. Cerchi azzurri: curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

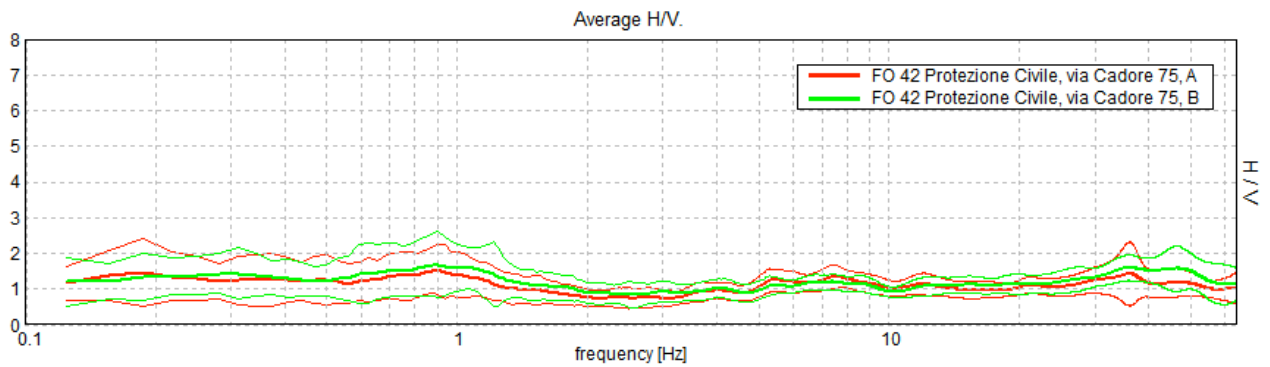


Figura 96. Confronto tra le curve H/V registrate nel sito (media in grassetto, intervallo di confidenza 2σ a linea sottile).

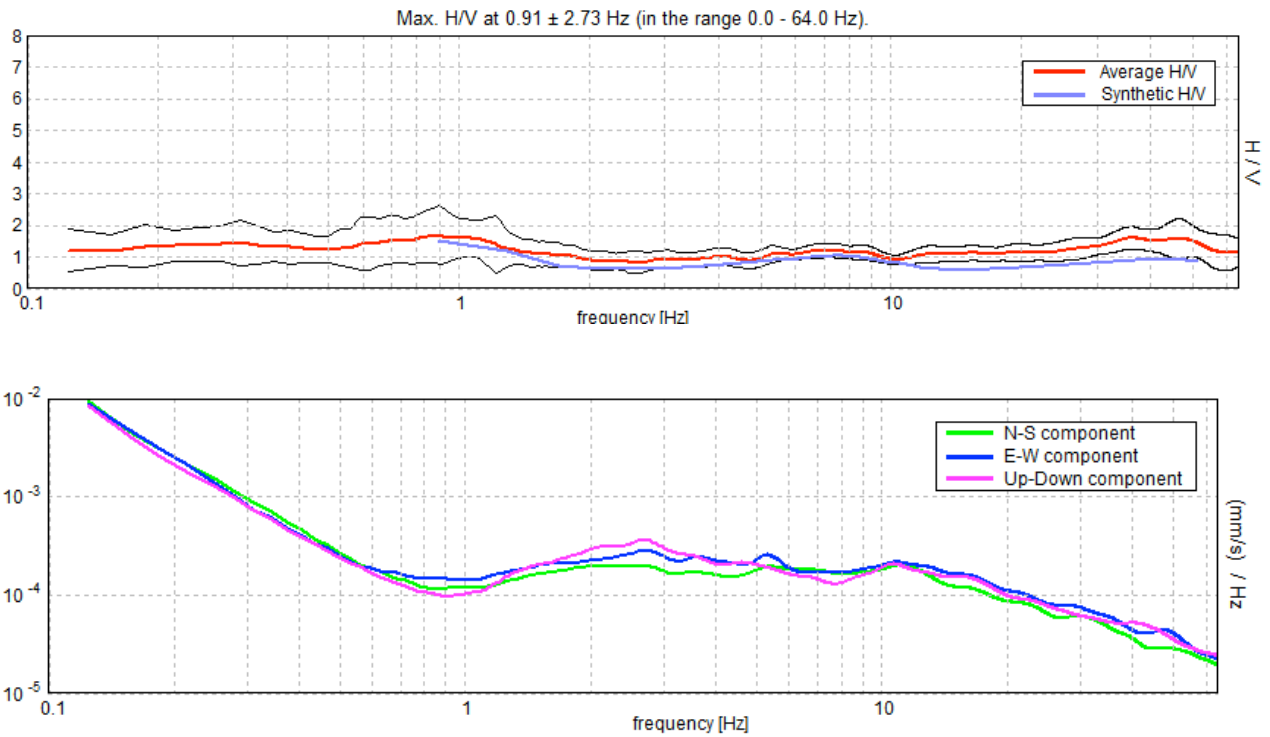


Figura 97. *Alto:* curva H/V sperimentale (rosso) e teorica (blu) per il modello di sottosuolo proposto per il sito, *Basso:* spettri di ampiezza in velocità delle componenti del moto relativi alla curva H/V mostrata sopra.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.50	0.50	100	0.40
4.50	4.00	150	0.40
34.50	30.00	220	0.40
74.50	40.00	300	0.40
inf.	inf.	400	0.40

Tabella 14. Modello di sottosuolo medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto delle prove in array e H/V. Si noti che le prove effettuate forniscono una stima delle sole Vs. Il rapporto di Poisson indicato è quello adottato nella modellazione ma le prove geofisiche basate su onde di superficie non possono fornire misure affidabili di questo parametro.

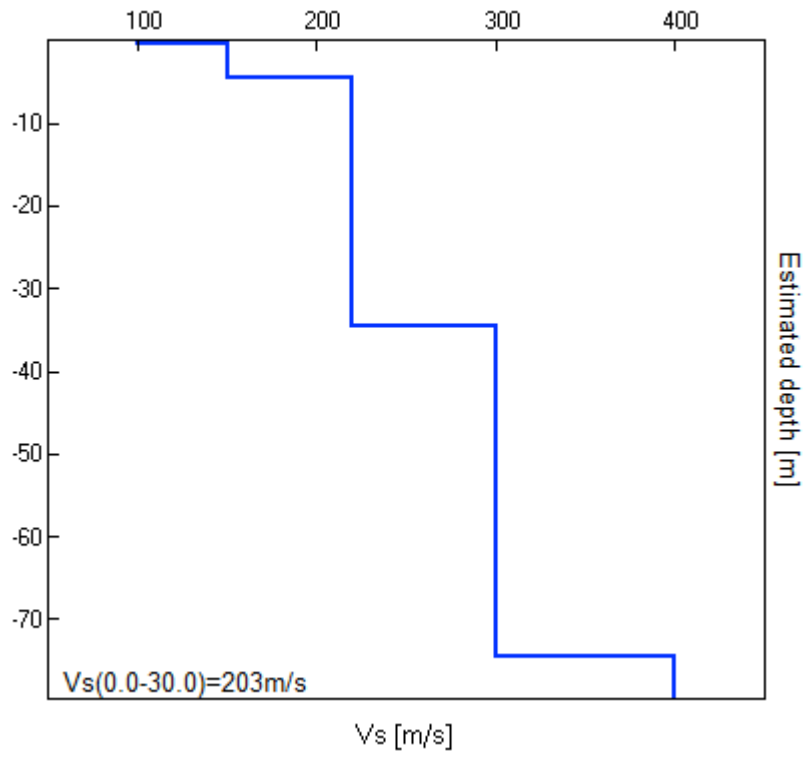


Figura 98. Modello di velocità delle onde di taglio (V_s) medio sotto l'area indagata ottenuto dal fit congiunto di prove in array e H/V.

APPENDICE B.

In questa appendice sono riportati in forma numerica i valori dei parametri estratti dalle prove geofisiche pregresse e di nuova acquisizione nel Comune di Forlì.

Il significato dei simboli in colonna è come segue:

COD	Numero identificativo della prova
VN	Indica se la prova è di vecchia (V) o nuova (N) acquisizione. Per “nuova” si intende acquisita nel novembre 2011 ai fini di questo lavoro
TIPO	H/V prova sismica passiva a stazione singola MASW, prove sismica multicanale attive (MASW) e passive (ReMI/ESAC) ReMi, basate sulla dispersione delle onde di superficie ESAC TOMOS tomografia sismica a rifrazione in onde S RIFRA prova sismica a rifrazione DH prova sismica in foro di tipo down-hole CH prova sismica tra fori di tipo cross-hole
Z	Profondità in metri raggiunta dall’indagine. Dove non è fornita il motivo è l’illeggibilità dei report di prova o una scarsa qualità della prova stessa
VsH	Velocità delle onde S nello strato omogeneo equivalente di spessore H
H	Profondità in metri del bedrock sismico
Vs30	Velocità delle onde S nello strato omogeneo equivalente ai primi 30 m di spessore
f	Valore della frequenza di risonanza più bassa riscontrabile nel sito tramite prova H/V (in Hz).
Amp _f	Ampiezza del picco H/V alla frequenza f
f ₀	Valore della frequenza di risonanza fondamentale nel dominio di frequenze di interesse ingegneristico determinata tramite prova H/V (in Hz).
Amp _{f₀}	Ampiezza del picco H/V alla frequenza f ₀
f ₁	Valore di altre frequenza di risonanza a frequenza > f ₀ riscontrate nel sito tramite prova H/V (in Hz).
Amp _{f₁}	Ampiezza del picco H/V alla frequenza f ₁
Fa	Fattore di amplificazione dello spettro dell’accelerazione a basso periodo (in prossimità del periodo proprio al quale si verifica il massimo della risposta in accelerazione) (ICMS, 2008)
Fv	Fattore di amplificazione dello spettro di velocità a periodo proprio, per il quale si verifica la massima risposta in pseudo velocità (ICMS, 2008)
Fa _{PGA0}	fattore di amplificazione di PGA ₀ , (Peak Ground Acceleration, accelerazione sismica di picco al bedrock) (Atto di Indirizzo per la MZS in Emilia Romagna, 2007)
Fa I _s [0.1-0.5]s	Fattore di amplificazione dell’intensità spettrale I _s nell’intervallo di periodo 0.1-0.5 s (Atto di Indirizzo per la MZS in Emilia Romagna, 2007)
Fa I _s [0.5, 1]s	Fattore di amplificazione dell’intensità spettrale I _s nell’intervallo di periodo 0.5-1 s (Atto di Indirizzo per la MZS in Emilia Romagna, 2007)
UTM X	Longitudine un coordinate del reticolato UTM (in km)
UTM Y	Latitudine un coordinate del reticolato UTM (in km)