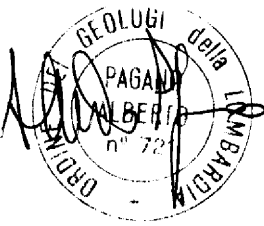


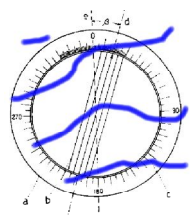
# COMUNE DI CASEI GEROLA

PROVINCIA DI PAVIA

COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA  
NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO  
L.R. 11 marzo 2005, n. 12

**APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO**  
D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011

visto: la committenza	visto:
(Codice)	Alberto Pagano, dott. geologo
	
	Data: MAGGIO 2018



*geologia geofisica ambientale idrogeologica – dr. alberto pagano*  
*Ordine dei Geologi della Lombardia N. 721 – Dottorato di Ricerca in Geofisica Applicata Ph.D.*

Via Leonardo Da Vinci 56 – 27055 RIVANAZZANO TERME (PV) - ITALY  
C.f.: PGNLRT67M08G388K; P.I.: 01819160183  
mob. 339.4161265 e-mail: bertimagnet@alice.it  
PEC: ALBERTOPAGANO@EPAP.SICUREZZAPOSTALE.IT

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO
DATA MAGGIO 2018	L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011

## *Indice*

1. PREMESSA .....	3
2. ZONAZIONE SISMICA NAZIONALE E INQUADRAMENTO DEL COMUNE DI CASEI GEROLA..	3
2.1 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI SISMICI DI SITO PER IL COMUNE DI CASEI GEROLA .....	4
2.1.1 COMUNE DI CASEI GEROLA - 1° LIVELLO .....	5
2.1.2 COMUNE DI CASEI GEROLA - 2° LIVELLO .....	6
2.2 INDAGINE DI SISMICA PASSIVA AI FINI DELLA MICROZONAZIONE SISMICA COMUNALE	7
2.2.1 UBICAZIONE DELLE INDAGINI .....	14
2.2.2 LOCALITA' DI INDAGINE DI SISMICA PASSIVA NEL COMUNE DI CASEI GEROLA..	14
2.2.3 CONSIDERAZIONI SPECIFICHE PER L'INDAGINE SISMICA PASSIVA IN ARRAY ....	16
2.2.4 ARRAY A – GIARDINI SCUOLA MEDIA ELEMENTARE CASEI GEROLA.....	16
2.2.5 INDAGINE SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA.....	18
2.2.6 CENTRO ABITATO DI CASEI, ZONA SCUOLA MEDIA ELEMENTARE.....	19
2.2.7 SITO A STAZIONE SINGOLA 1 – CENTRO ABITATO DI CASEI, ZONA SCUOLA	
MEDIA ELEMENTARE.....	21
2.2.8 SITO A STAZIONE SINGOLA 2 – FRAZIONE GEROLA.....	23
2.3 MISURE IN EDIFICIO – SCUOLA MEDIA ELEMENTARE DI CASEI GEROLA.....	26
2.3.1 MODI DI VIBRAZIONE DELL'EDIFICIO .....	26
2.3.2 SMORZAMENTO DELLE OSCILLAZIONI DELL'EDIFICIO.....	29
2.4 VERIFICA DEGLI EFFETTI DI SITO IN RELAZIONE ALL'AMPLIFICAZIONE SISMICA NEL	
COMUNE DI CASEI GEROLA .....	32
2.5 EFFETTI GEOMETRICI MORFOLOGICI PREVEDIBILI NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI	
CASEI GEROLA.....	34
2.6 CONCLUSIONI .....	34
2.6.1 GLOSSARIO PER I TEMI DELLA GEOFISICA .....	36
3. PRESCRIZIONI GEOLOGICHE SISMICHE PER LE COSTRUZIONI E PER L'USO DEL SUOLO	
DEL TERRITORIO COMUNALE DI CASEI GEROLA (PV) .....	38

## *Tavole*

TAVOLA 1. CARTA DELLA PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE CON APPROFONDIMENTI	
SISMICI DI SECONDO LIVELLO AI SENSI D.G.R. 30 NOVEMBRE 2011 - N. IX/2616	
(SCALA 1: 10.000)	

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

## 1. PREMESSA

Il presente lavoro aggiorna ed integra lo studio COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI CASEI GEROLA, IN ATTUAZIONE DELLA L.R. 11 MARZO 2005, N.12, MARZO 2010, A. PAGANO.

Per il Comune di Casei Gerola, riclassificato in zona sismica 3 dalla nuova classificazione del territorio regionale di cui alla D.G.R. 11/07/2014 n. X/2129, entrata in vigore il 10/04/2016, si è reso necessario procedere all'analisi sismica di 2° livello di caratterizzazione del territorio urbanizzato e/o urbanizzabile.

Si fa presente, infine, che il professionista incaricato conserva i diritti d'autore sul lavoro presentato, elaborati cartografici compresi e che la committenza può utilizzare gli stessi una sola volta e soltanto per lo specifico fine per il quale essi sono stati eseguiti.

## 2. ZONAZIONE SISMICA NAZIONALE E INQUADRAMENTO DEL COMUNE DI CASEI GEROLA

Il territorio comunale di CASEI GEROLA risulta riclassificato in Zona sismica 3 dalla nuova classificazione del territorio regionale di cui alla D.G.R. 11/07/2014 n. X/2129, entrata in vigore il 10/04/2016. La normativa deriva dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri N. 3274 del 20 Marzo 2003 *"Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"*, ed ai sensi dell'*Aggiornamento delle zone sismiche in Piemonte* (Deliberazione della Giunta Regionale 21 maggio 2014, n. 65-7656). La definizione dell'azione sismica di riferimento si basa sui dati rilasciati da INGV - Progetto S1.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

## **2.1 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI SISMICI DI SITO PER IL COMUNE DI CASEI GEROLA**

L'analisi sismica di 1° livello, effettuata nello studio precedente, individua per il territorio del Comune lo scenario Z4a di cui all'Allegato 5 della D.G.R. 30 novembre 2011 - n. IX/2616. Questo scenario è in grado di determinare gli effetti sismici locali per amplificazioni litologiche. La normativa regionale richiede per lo scenario Z4a l'applicazione del 2° livello di approfondimento degli effetti sismici nelle aree urbanizzate o urbanizzabili in fase di pianificazione per i Comuni ricadenti nelle zone sismiche 2 e 3.

La Regione Lombardia con la D.G.R. n. VIII/1566 del 22 dicembre 2005 e successive D.G.R. VIII/7374 del 28 maggio 2008, ha definito la metodologia per la valutazione dell'amplificazione sismica locale, in adempimento a quanto previsto dal D.M. 17/01/2018 (ex D.M. 14 gennaio 2008) «Norme tecniche per le costruzioni», dalla D.G.R. n. 14964 del 7 novembre 2003 e dal d.d.u.o. n. 19904 del 21 novembre 2003.

La metodologia utilizzata, in base a quanto previsto dalla successiva D.G.R. n. IX/2616 del 30 novembre 2011, si fonda sull'analisi di indagini dirette e prove sperimentali effettuate su alcune aree campione della Regione Lombardia, i cui risultati sono contenuti in uno «Studio-Pilota» redatto dal Politecnico di Milano – Dip. di Ingegneria Strutturale, reso disponibile sul SIT regionale.

La metodologia prevede tre livelli di approfondimento, in funzione della zona sismica di appartenenza e degli scenari di pericolosità sismica locale definiti nell'Allegato 5 della D.G.R. n. 9/2616 del 30 novembre 2011.

Si ricorda che la determinazione delle azioni sismiche in fase di progettazione è valutata sito per sito, secondo i valori riportati nell'Allegato B al citato D.M. 17/01/2018; la suddivisione del territorio in zone sismiche (ai sensi dell'OPCM

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

3274/03) individua unicamente l'ambito di applicazione dei vari livelli di approfondimento.

I livelli di approfondimento, in conformità a quanto previsto dalla D.G.R. n. 9/2616 del 30 novembre 2011, sono di seguito di richiamati:

1° livello: riconoscimento delle aree passibili di amplificazione sismica sulla base sia di osservazioni geologiche (cartografia di inquadramento), sia di dati esistenti: redazione della Carta della Pericolosità Sismica Locale, con perimetrazione areale e lineare delle "aree a Pericolosità Sismica Locale – PSL".

2° livello: caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi negli scenari perimetrati nella carta di pericolosità sismica locale, che fornisce la stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di Amplificazione (Fa).

3° livello: definizione degli effetti di amplificazione tramite indagini e analisi più approfondite da effettuare in fase progettuale.

### **2.1.1 COMUNE DI CASEI GEROLA - 1° LIVELLO**

Il metodo permette l'individuazione delle zone ove i diversi effetti prodotti dall'azione sismica sono, con buona attendibilità, prevedibili, sulla base di osservazioni geologiche e sulla raccolta dei dati disponibili per una determinata area, quali la cartografia topografica di dettaglio, la cartografia geologica e dei dissesti e i risultati di indagini geognostiche, geofisiche e geotecniche già svolte e che saranno oggetto di un'analisi mirata alla definizione delle condizioni locali (spessore delle coperture e condizioni stratigrafiche generali, posizione e regime della falda, proprietà indice, caratteristiche di consistenza, grado di sovraconsolidazione, plasticità e proprietà geotecniche nelle condizioni naturali, ecc.).

Lo studio attuato [COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI CASEI GEROLA, IN ATTUAZIONE DELLA L.R. 11 MARZO 2005, N.12, MARZO 2010, A. PAGANO] individua lo scenario di

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

pericolosità sismica comunale Z4a = *Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi*. Effetti = Amplificazioni litologiche e geometriche.

Sigla	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	EFFETTI
Z4a	Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi	Amplificazioni litologiche e geometriche

**Tabella 1** - Scenari di pericolosità sismica locale individuati per il territorio di Casei Gerola (PV).

## 2.1.2 COMUNE DI CASEI GEROLA - 2° LIVELLO

### EFFETTI LITOLOGICI

Il 2° livello permette la caratterizzazione semiquantitativa degli effetti di amplificazione sismica attesi e l'individuazione, nell'ambito degli scenari qualitativi suscettibili di amplificazione, di aree in cui la normativa nazionale risulta sufficiente o insufficiente a tenere in considerazione gli effetti sismici.

Sulla base dei dati osservati la ricostruzione della sezione geologica rappresentativa dello scenario inerente l'area in esame, viene descritta attraverso i dati reperiti da osservazioni e indagini dirette, quali perforazioni per lo scavo di pozzi e sondaggi geognostici.

In ragione della generale omogeneità dei depositi coesivi e granulari del primo sottosuolo, l'individuazione specifica e puntuale derivata da osservazioni dirette risulta estrapolabile in modo significativo anche per tutto il territorio comunale.

Per la descrizione di dettaglio delle Unità stratigrafiche, della geolitologia e dei relativi parametri geotecnici, per l'inquadramento geologico strutturale del territorio si rimanda ai capitoli dello studio geologico.

La scelta dell'ubicazione dei punti di misura geofisica è stata stabilita in modo da indagare sistematicamente il territorio, contemplando, sulla base di rilievi geologici

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

e geomorfologici, pressoché tutte le differenti condizioni geologico-stratigrafiche e geologico-strutturali. Ciò seppure nella casistica particolarmente monotona comunale che si può riscontrare in riferimento principalmente allo spessore consistente della copertura detritica alluvionale del primo sottosuolo.

La scelta dei dati stratigrafici, geotecnici e geofisici, in termini di valori di Vs, utilizzati nella procedura di 2° livello per il Comune di Casei Gerola, si ritiene corrispondano ad una VALUTAZIONE DI GRADO MEDIO-ALTO DI ATTENDIBILITÀ. Di seguito, come prescritto dalla normativa di settore, si rappresenta schematicamente ciascun parametro utilizzato per l'analisi a cui è stato assegnato un grado di giudizio di attendibilità.

Dati	Attendibilità	Tipologia
Litologici	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	<b>Alta</b>	<b>Da prove in sito</b>
Stratigrafici (spessori)	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	<b>Media</b>	<b>Da prove indirette (penetrometriche e/o geofisiche)</b>
	<b>Alta</b>	<b>Da indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo)</b>
Geofisici (Vs)	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette e relazioni empiriche
	<b>Alta</b>	<b>Da prove dirette (sismica in foro o sismica superficiale)</b>

**Tabella 2**– Livelli di attendibilità (in grassetto = Comune di Casei Gerola) valutati per la stima del rischio sismico e delle amplificazioni di sito per il territorio di Casei Gerola (PV).

## 2.2 INDAGINE DI SISMICA PASSIVA AI FINI DELLA MICROZONAZIONE SISMICA COMUNALE

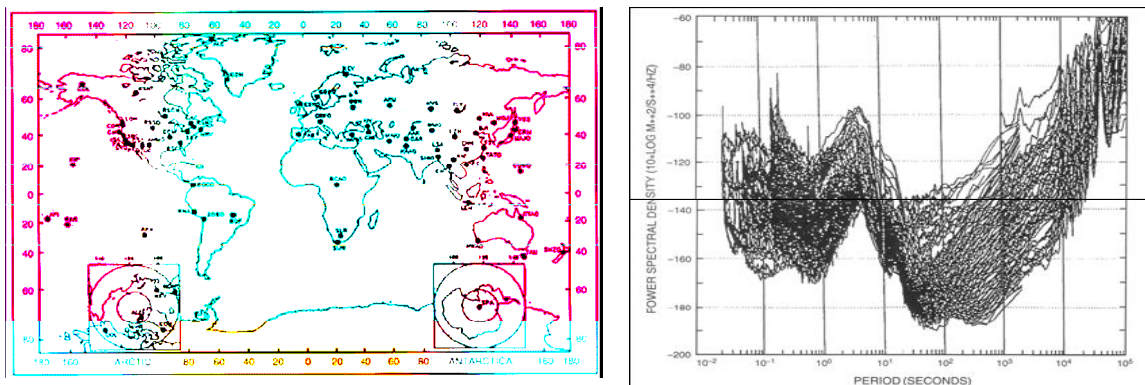
### OGGETTO DELLA MISURA DELLE INDAGINI DI SISMICA PASSIVA: IL MICROTREMORE SISMICO AMBIENTALE

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato, oltre che dall'attività dinamica terrestre, dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo vicino ( $10^{-15}$  [m/s<sup>2</sup>]<sup>2</sup> in termini di accelerazione).

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nelle zone in cui non è presente alcuna sorgente di rumore locale e in assenza di vento, lo spettro in frequenza del rumore di fondo in un terreno roccioso e pianeggiante presenta l'andamento illustrato in Figura 5, dove la curva blu rappresenta il rumore di fondo 'minimo' di riferimento secondo il servizio geologico statunitense

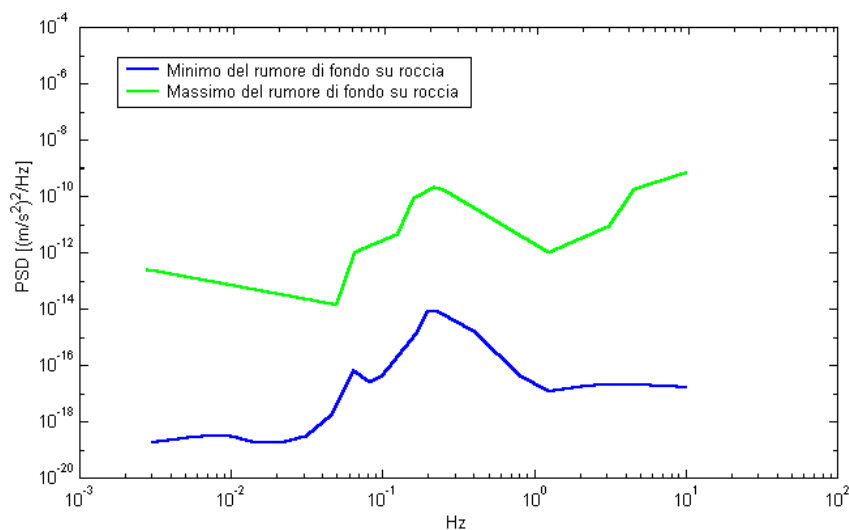
PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO
DATA MAGGIO 2018	L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011

(USGS) mentre la curva verde rappresenta il 'massimo' di tale rumore, e dove i picchi a 0.14 e 0.07 Hz sono comunemente interpretati come originati dalle onde oceaniche. Tali componenti spettrali vengono attenuate molto poco anche dopo tragitti di migliaia di chilometri per effetto di guida d'onda (vd. glossario). A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie o anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz, a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.



**Figura 1** – Potenze spettrali di accelerazione della componente verticale dei microtremori (a destra) registrate in 75 osservatori sismici distribuiti su tutto il globo terrestre (Peterson, 1993).

Il tipo di stratigrafia che le tecniche di sismica passiva 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.



**Figura 2.** - Modelli standard del rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra. Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.



PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

## STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Tutte le misure di microtremore ambientale, della durata di 20 minuti ciascuna, sono state effettuate con un tromografo digitale progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico. Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, senza cavi esterni. I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

Per la sismica passiva in *array* (profilo in microtremore sismico 2D) si è impiegato un array digitale a 16 canali, collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5 Hz. La digitalizzazione del segnale avviene direttamente sui geofoni. Le acquisizioni sono state condotte per parecchi minuti, a frequenza di campionamento di 512 Hz.

Nella sezione seguente si descrivono le procedure seguite per l'inversione dei dati acquisiti in array e a stazione singola.

## TECNICHE DI INVERSIONE PER MISURE IN ARRAY 1D – LA TECNICA IMPIEGATA

Nel sito in cui si è registrato il microtremore sismico ambientale tramite array, sono stati impiegati 16 geofoni a tromografi, allineati sul terreno secondo spazature regolari in configurazione 2D, al fine di ridurre gli effetti di *aliasing spaziale* (vd. glossario) nelle tracce analizzate.

## DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI DISPERSIONE DELLE ONDE RAYLEIGH

Il tipo di stratigrafia che le tecniche di sismica passiva 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

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Allo scopo di ottenere la curva di dispersione delle onde di Rayleigh (relazione tra la velocità di propagazione e le frequenze), le componenti verticali del moto del suolo registrate lungo gli array vengono elaborate secondo due approcci:

analisi tipo REMI (REFRACTION MICROTREMOR, Louie, 2001). Le tracce vengono segmentate in finestre temporali di 10-20 secondi nel dominio frequenza-velocità di fase (*trasformata  $\omega$ -V*, o *slant-stack*, e *trasformata di Fourier*) al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh, secondo un metodo assimilabile a Refraction Microtremor. Viene analizzato l'esito dell'elaborazione in ciascuna finestra e vengono quindi selezionate quelle informative. Il risultato ultimo è ottenuto dalla media delle analisi delle finestre selezionate;

analisi ESAC (EXTENDED SPATIAL AUTOCORRELATION) su array 1D (Ohori *et al.*, 2002; Chavez-Garcia *et al.*, 2006). Mediando l'elaborazione eseguita su finestre temporali di 10-20 secondi, si studiano le funzioni di autocorrelazione spaziale tra tutte le possibili coppie di sensori.

Per ciascun sito di misura, il risultato dell'analisi tipo ReMi sarà rappresentato mediante grafici ad isolinee ed illustrato nelle Figure A. Tale grafico rappresenta il contenuto energetico delle onde di Rayleigh presenti nel rumore sismico ambientale, in funzione della frequenza e della velocità di fase di propagazione dell'onda. L'esito dell'analisi ESAC è sovrapposto nella stessa figura ed illustrato dai pallini gialli.

La curva di dispersione sperimentale che verrà usata per l'inversione è scelta integrando le informazioni ottenute da entrambi i metodi.

## STIMA DEL PROFILO DELLE $V_s$

La curva di dispersione delle onde di Rayleigh è strettamente correlata al profilo di velocità delle onde di taglio. Poiché inoltre  $0.87 < V_R / V_s < 0.96$  (cfr. es. Aki e Richards, 1980), al fine di ottenere l'andamento delle  $V_s$  con la profondità, la curva di dispersione sperimentale viene analizzata con una

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

procedura di inversione. La frequenza minima cui la curva di dispersione risulta riconoscibile vincola la profondità d'indagine.

Per ciascun sito, si riporta nelle Figure B il profilo di velocità delle onde S associato alla curva teorica.

Nelle Tabelle C sono riportati i valori del miglior modello individuato dall'inversione. Il computo del parametro Vs30, secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (2008, ex DM 14/09/2005), viene effettuato tramite la formula seguente:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

dove  $h_i$  e  $V_{s_i}$  sono spessori e velocità dei singoli strati.

La procedura richiede che il microtremore sismico sia relativamente omogeneo intorno ai siti di misura, che il modello di sottosuolo sia assimilabile al caso di strati piani e paralleli e che alla base del modello sia posto un semispazio a spessore infinito.

Là dove i requisiti non siano strettamente soddisfatti, i risultati forniti dall'array vanno interpretati come valori medi nell'intorno investigato.

**Si fa notare che ai fini di questi modelli le  $V_p$  e la densità  $\rho$  dei mezzi sono quasi ininfluenti**, pertanto i valori di  $V_p$  e  $\rho$  che compaiono nelle tabelle alle pagine seguenti vanno considerati come puramente indicativi.

## STRATIGRAFIA SISMICA DA INDAGINI A STAZIONE SINGOLA – LA TECNICA IMPIEGATA

Dai primi studi di Kanai (1957) e successivi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSr o H/V), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970). Il metodo fu in seguito reso popolare principalmente da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. Mentre su questo punto non è ancora stato raggiunto consenso, è invece ampiamente riconosciuto che la curva HVSr è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli (es. Field e Jacob, 1993; Lachet e Bard, 1994; Lermo e Chavez-Garcia, 1993, 1994; Bard, 1998; Ibs-von Shet e Wohlenberg, 1999; Bindi *et al.*, 2000, Fah *et al.*, 2001; Delgado *et al.*, 2000, Mucciarelli *et al.*, 2001 e referenze in esso contenute, Parolai *et al.*, 2002; Parolai *et al.*, 2004 solo per citarne alcune) e,

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

tramite opportuna inversione, delle profondità dei substrati rocciosi sotto le coperture sedimentarie.

Studi recenti hanno dimostrato che ulteriori picchi a frequenza maggiori di quelle del bedrock sono riconducibili a contrasti di impedenza interni alla copertura sedimentaria (es. Baumbach *et al.*, 2002) e picchi a frequenze minori di quella del bedrock sono invece riconducibili a contrasti di impedenza interni al bedrock stesso (es. Guillier *et al.*, 2005). Riconosciuta questa capacità e dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSR può essere in linea di principio usato come strumento stratigrafico.

Le basi teoriche dell'HVSR sono relativamente semplici in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D). Consideriamo il sistema di Figura 6 in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ). Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene (parzialmente) riflessa dall'orizzonte che separa i due strati. L'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato. In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a

$$f_r = V_{P1}/(4 h) \quad [1]$$

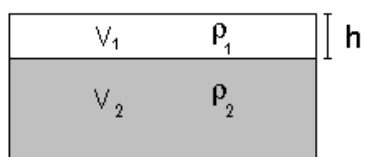
mentre quella relativa alle onde S è

$$f_r = V_{S1}/(4 h). \quad [2]$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità, è in grado di fornire previsioni sullo spessore  $h$  degli strati. Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale,

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo. Rileviamo inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti da onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994). Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S. L'applicabilità pratica della semplice formula [2] è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica che nell'ambito ingegneristico (per un riassunto cf. Gallipoli *et al.*, 2000; Mucciarelli e Gallipoli, 2001; Castellaro *et al.*, 2005). Poiché la situazione illustrata è tipica dei depositi sedimentari sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSr è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).



**Figura 3.** - Modello di suolo costituito da due strati a diverse velocità delle onde sismiche e densità.

Dalla registrazione a stazione singola del rumore sismico ambientale in campo libero sono state ricavate le curve H/V, secondo la procedura descritta in Castellaro *et al.* (2005), con parametri:

larghezza delle finestre d'analisi 20 s,

lisciamento secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale,

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

rimozione dei transienti sulla serie temporale degli H/V.

Le curve H/V vengono invertite creando una serie di modelli sintetici (che contemplano la propagazione delle onde di Rayleigh e di Love nel modo fondamentale e superiori in sistemi multistrato), fino a considerare valido il modello teorico più vicino alle curve sperimentali. L'inversione delle curve H/V è possibile esclusivamente in presenza di un vincolo. Nel caso in questione tale vincolo è fornito dalla Vs del primo strato inferita dalle prove in array, nell'assunto che la successione stratigrafica (ma chiaramente non gli spessori) sia simile nei vari siti (coperture argillose limose su ghiaia e sabbia).

### **2.2.1 UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

I punti di misura delle indagini sono stati scelti in modo sistematico sul territorio, in particolare in corrispondenza dei centri abitati, in Casei Gerola ed alla Frazione Gerola. Queste località di misura si trovano correlabili con riferimento a taratura con stratigrafie note nelle vicinanze dei siti stessi di misura. Ragionevolmente le località scelte di misura risultano significative e con risultati indicativi ed estrapolabili alle condizioni geologiche del territorio pianeggiante di Casei Gerola e della sua Frazione.

Per le misure su edificio, la valutazione dell'edificio della Scuola Media di Casei Gerola è stata ritenuta la più opportuna, essendo l'edificio pubblico di maggiori dimensioni, costruito in cemento armato e più di recente.

### **2.2.2 LOCALITA' DI INDAGINE DI SISMICA PASSIVA NEL COMUNE DI CASEI GEROLA**

E' stata realizzata [COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI CASEI GEROLA, IN ATTUAZIONE DELLA L.R. 11 MARZO 2005, N.12, MARZO 2010, A. PAGANO] un'indagine di sismica passiva a

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

supporto della microzonazione sismica comunale. Gli obiettivi di tale indagine sono stati lo studio e la determinazione dei seguenti parametri:

- 1) della stratigrafia sismica;
- 2) delle frequenze di risonanza degli strati sedimentari sovrastanti il bedrock;
- 3) del profilo di velocità delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ).

L'indagine è stata realizzata attraverso la predisposizione in sito di:

- (a) N° 1 registrazione di microtremore sismico ambientale in array, contemporanee e sincronizzate, su 16 stazioni;
- (b) N° 2 misure di microtremore sismico ambientale a stazione singola;
- (c) N° 2 misure di microtremore sismico ambientale a stazione singola su edificio.

Le misure di tipo a) permettono una ricostruzione dell'andamento delle velocità sismiche delle onde di taglio con la profondità. Il medesimo risultato ma con analisi monodimensionale si ottiene dall'inversione dei dati forniti dalle misurazioni a stazione singola (b) che fornisce anche l'analisi per le frequenze di vibrazione degli edifici (c).

Le misure di tipo b) forniscono, tra l'altro, le frequenze di risonanza dei livelli sedimentari sovrastanti il bedrock nel sito di indagine. Questo valore, messo in rapporto alle frequenze di oscillazione degli edifici/strutture, può evidenziare la possibilità di pericolosi fenomeni di doppia risonanza (vd. glossario) in caso di evento sismico.

Tutte le misure a stazione singola in campo aperto sono state orientate con l'asse orizzontale di allungamento della strumentazione secondo l'asse Nord magnetico.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

### 2.2.3 CONSIDERAZIONI SPECIFICHE PER L'INDAGINE SISMICA PASSIVA IN ARRAY

Al fine di determinare l'andamento della velocità di fase delle onde di Rayleigh (assimilabile alla velocità delle onde di taglio,  $V_s$ ) nel primo sottosuolo, è stata eseguita un'indagine di sismica passiva in array (stendimento sincronizzato di geofoni).

La misura è stata effettuata mediante l'impiego di 16 geofoni verticali posizionati sul terreno secondo geometria a "L" (11 geofoni allineati + 5 ortogonali) con spaziatura intergeofonica costante.

Il rumore sismico ambientale è stato acquisito lungo la linea ad una frequenza di campionamento di 512 Hz.

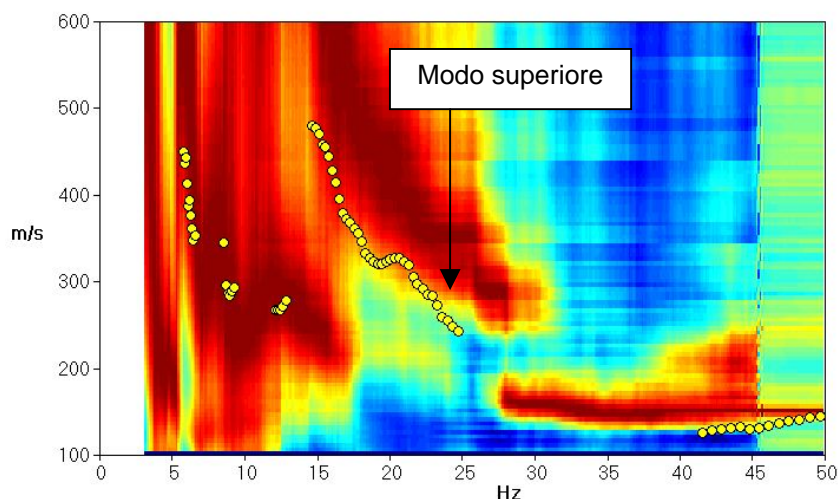
Comune	Distanza inter-geofonica (m)	Massima distanza tra geofoni (m)	Durata registrazione (s)
Casei Gerola	3	50+20	250

### 2.2.4 ARRAY A – GIARDINI SCUOLA MEDIA ELEMENTARE CASEI GEROLA

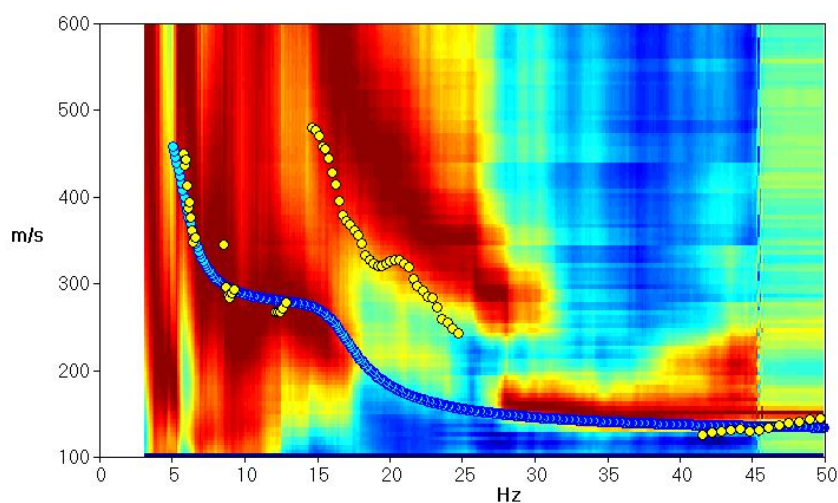
La curva di dispersione sperimentale delle onde di Rayleigh è riconoscibile, in questo sito, tra 5 e 50 Hz. La massima lunghezza d'onda indagata è di circa 90 metri. La curva di dispersione di Figura A evidenzia un modo superiore energeticamente dominante tra 15 e 25 Hz. L'esito dell'analisi ESAC è delineato in tutto il dominio e rileva un modo superiore di vibrazione tra 15 e 25 Hz.



PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

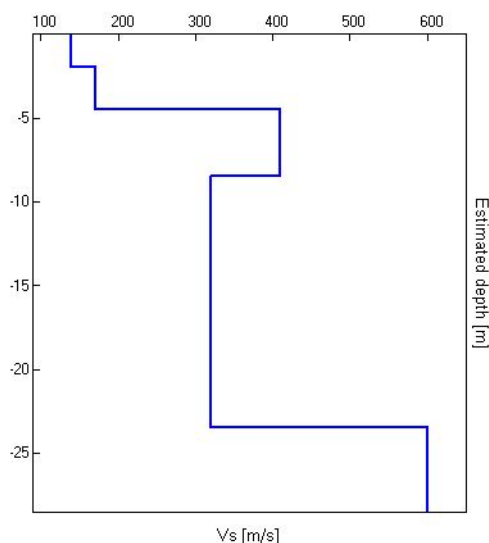


**Figura A.** – Array A. Rappresentazione dell’esito dell’analisi ReMi (scala di colori) e dell’analisi ESAC (pallini gialli). E’ evidenziato un modo superiore energeticamente dominante tra 15 e 25 Hz. In ascissa: frequenza (Hz), in ordinata: velocità di fase delle onde di Rayleigh (m/s).



**Figura B.** – Array A. In azzurro è la curva di dispersione teorica ottenuta per modello di sottosuolo proposto per il sito. Si noti che tra 15 e 25 Hz la curva non segue il modo superiore.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	



**Figura C.** – Array A. Profilo di velocità delle onde S stimato - Giardini Scuola Media Elementare Casei Gerola.

Strato	Profondità (m)	Spessore (m)	Vs (m/s)
1	2.0	2.0	140
2	4.5	2.5	170
3	8.5	4.0	410
4	23.5	15.0	320
Semispazio	$\infty$	$\infty$	600

**Tabella D.** – Array A. Modello di velocità delle onde S per il sito in esame.

Il parametro Vs30 vale 311 m/s (incertezza  $1\sigma$  dell'ordine del 15%). La categoria di suolo di fondazione risultante dalle prove in array per il sito in esame è C (Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, DM 14/09/2005).

### 2.2.5 INDAGINE SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA

Dalla registrazione a stazione singola del rumore sismico ambientale in campo libero sono state ricavate le curve H/V (**Figure E**), secondo la procedura descritta in Castellaro *et al.* (2005), con parametri:

- larghezza delle finestre d'analisi 20 s,

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

- *lisciamento* secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale,
- rimozione dei transienti sulla serie temporale degli H/V.

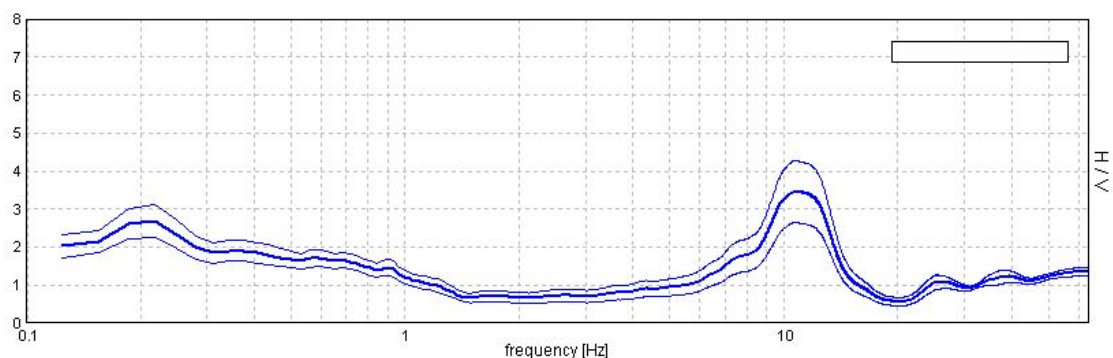
Le curve H/V vengono invertite (**Figure G**) creando una serie di modelli sintetici (che contemplano la propagazione delle onde di Rayleigh e di Love nel modo fondamentale e superiori in sistemi multistrato), fino a considerare per valido il modello teorico più vicino alle curve sperimentali (**Figure H**) (Castellaro e Mulargia, 2008). L'inversione delle curve H/V è possibile esclusivamente in presenza di un vincolo. Nel caso in questione tale vincolo è fornito dai dati stratigrafici noti (Pozzo idrico in Via Squadrelli, Pozzo idrico Comune di Cornale) e dalla Vs del primo strato inferita tramite l'array, nell'assunto che la successione stratigrafica del primo sottosuolo (ma chiaramente non gli spessori) sia simile nei vari siti. Dall'analisi congiunta delle curve H/V (**Figure E**) e degli spettri da cui esse derivano (**Figure F**) si rileva che nei siti indagati si manifestano risonanze del terreno in alta frequenza ( $> 6$  Hz), legate al contatto argille-ghiaie entro i primi 10 m. Le amplificazioni risultano variabili da sito a sito. Al di sotto del picco principale di risonanza la curva H/V scende leggermente sotto ampiezza 1, per depressione delle componenti orizzontali del moto fino a quasi 1 Hz. Questa caratteristica indica la presenza di una seppure debole inversione di velocità, sottostante il primo livello ghiaioso. Tra gli strati profondi non si manifestano altre risonanze secondarie e significative.

## 2.2.6 CENTRO ABITATO DI CASEI, ZONA SCUOLA MEDIA ELEMENTARE

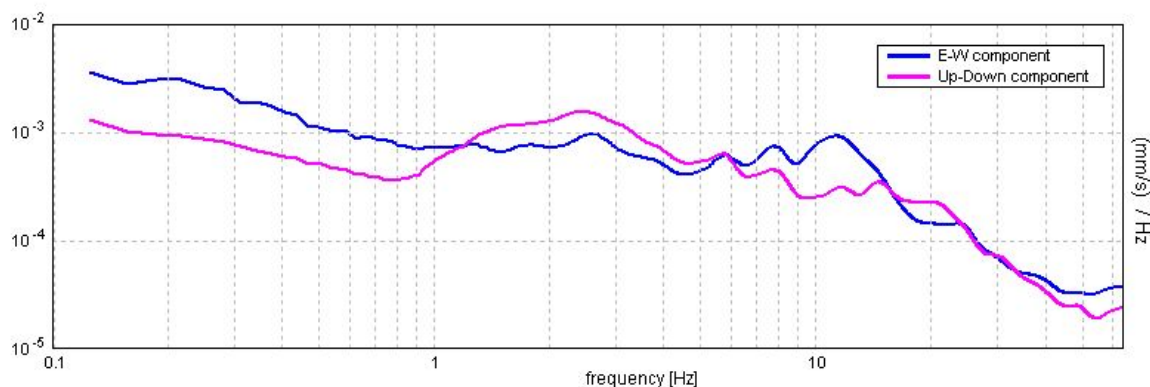
Nelle figure seguenti si riportano la curva H/V e gli spettri delle relative componenti registrate per l'Array A, in corrispondenza del centro abitato di Casei, nella zona della Scuola Media Elementare. Si osserva una importante frequenza di risonanza a 11 Hz, corrispondente ad un substrato rigido a circa 4-5 m.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO
DATA MAGGIO 2018	L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011

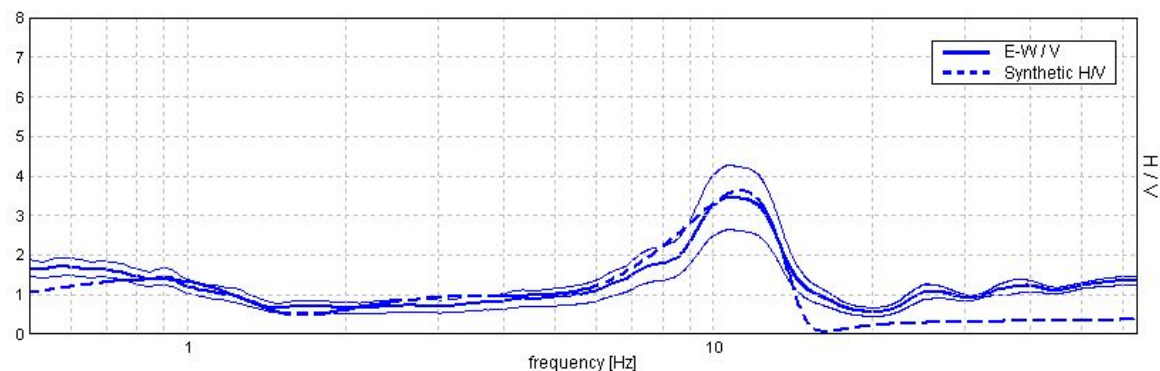
Il confronto tra la curva H/V sperimentale e quella sintetica ottenuta dall'inversione dell'Array A per il profilo di velocità del sottosuolo di Figura C è dato in Figura G. Si nota l'ottimo accordo tra le due curve.



**Figura E** – Array A - Curva H/V media (rosso) e intervallo di confidenza al 95% (nero).



**Figura F** - Array A - Spettri di ampiezza in velocità delle singole componenti del moto.

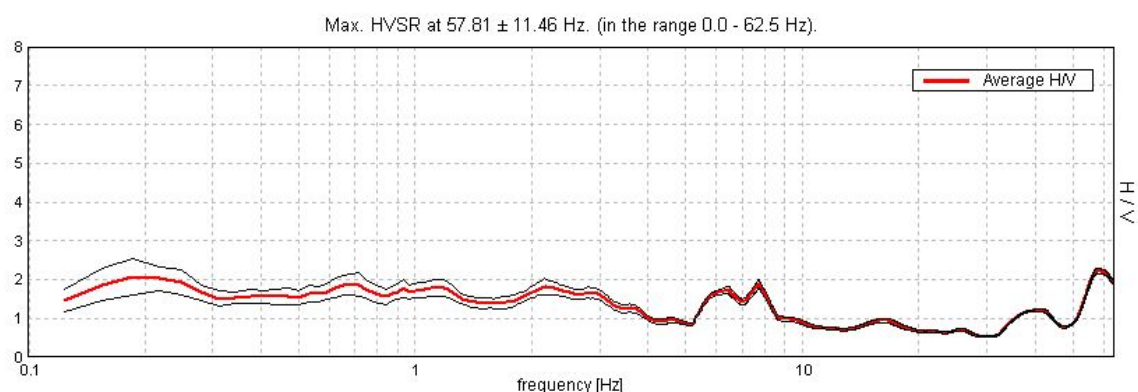


**Figura G** - Array A. - Confronto tra curva H/V sperimentale (media in blu spesso, intervallo di confidenza al 95% in blu sottile) e teorica (blu a tratteggio) ottenuta per il modello di sottosuolo di Figura C (array A).

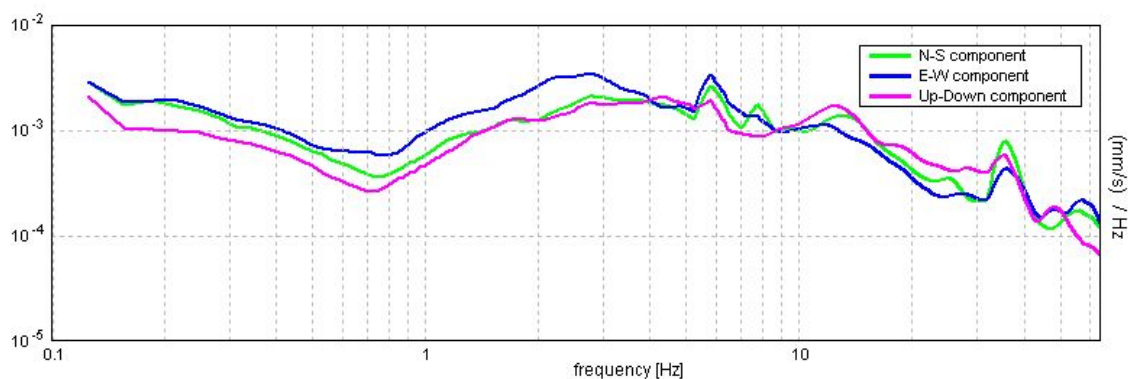
PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO
DATA MAGGIO 2018	L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011

## 2.2.7 SITO A STAZIONE SINGOLA 1 – CENTRO ABITATO DI CASEI, ZONA SCUOLA MEDIA ELEMENTARE

Nelle figure seguenti si riportano la curva H/V e gli spettri delle relative componenti registrati nel Sito 1, in corrispondenza del centro abitato di Casei, nella zona della Scuola Media Elementare. Non si osservano picchi di risonanza particolarmente rilevanti. Il picco a 7 Hz è legato alla risonanza tra argille superficiali ed un livello di ghiaie e sabbie attorno a 7 m di profondità.

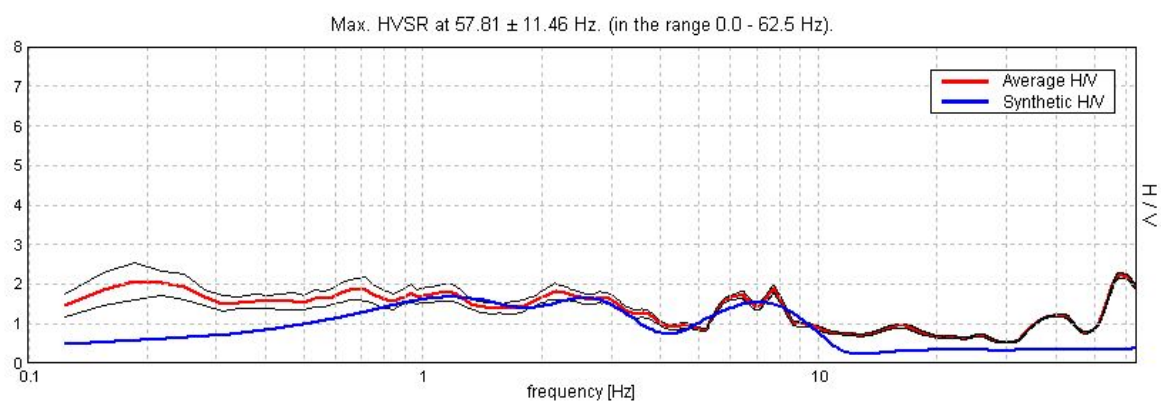


**Figura E(1).** – Sito 1 - Curva H/V media (rosso) e intervallo di confidenza al 95% (nero).

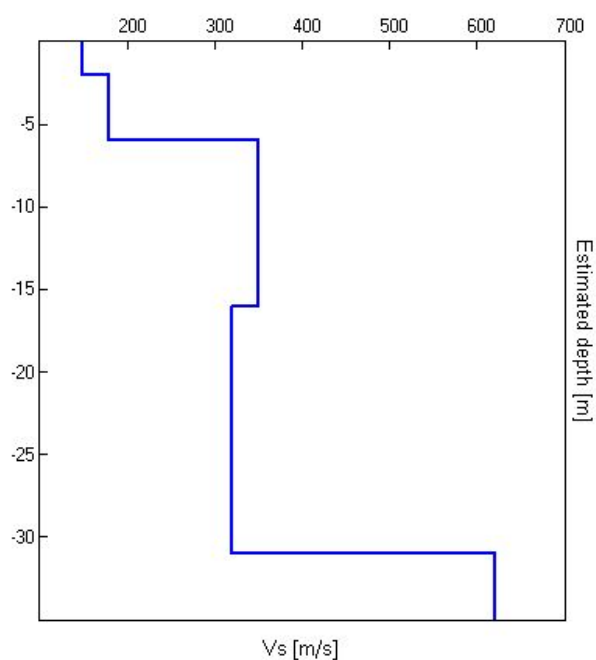


**Figura F(1).** – Sito 1 - Spettri di ampiezza in velocità delle singole componenti del moto.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO
DATA MAGGIO 2018	L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011



**Figura G(1).** – Sito 1 - Confronto tra curva H/V sperimentale (media in rosso, intervallo di confidenza al 95% in nero) e teorica (blu) ottenuta per il modello di sottosuolo di Figura H(1).



**Figura H(1).** – Sito 1 - Profilo della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) stimato per il sottosuolo sulla base dell'inversione vincolata della curva H/V.



PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

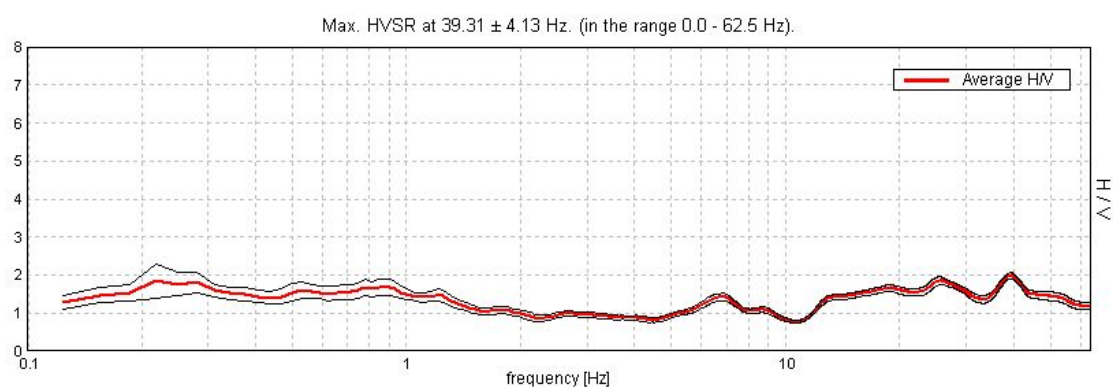
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.0	2.0	150
6.0	4.0	180
16.0	10.0	350
31.0	15.0	320
substrato	$\infty$	620

**Tabella I (1).** – Sito 1 - Modello di sottosuolo per il sito inferito dall'indagine a stazione singola 1.

La velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m di terreno calcolata è  $V_{s30} = 278$  m/s (incertezza  $1\sigma$  dell'ordine del 15%). La categoria di suolo di fondazione risultante dalle prove a stazione singola per il sito in esame è C (Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, DM 14/09/2005).

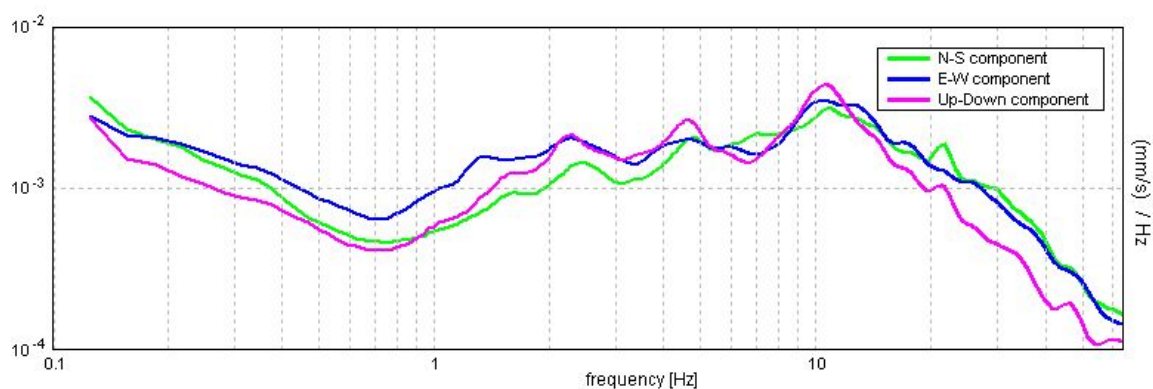
## 2.2.8 SITO A STAZIONE SINGOLA 2 – FRAZIONE GEROLA

Nelle figure seguenti si riportano la curva H/V e gli spettri delle relative componenti registrate nel sito 2. Non si osservano picchi di risonanza rilevanti da un punto di vista sismico.

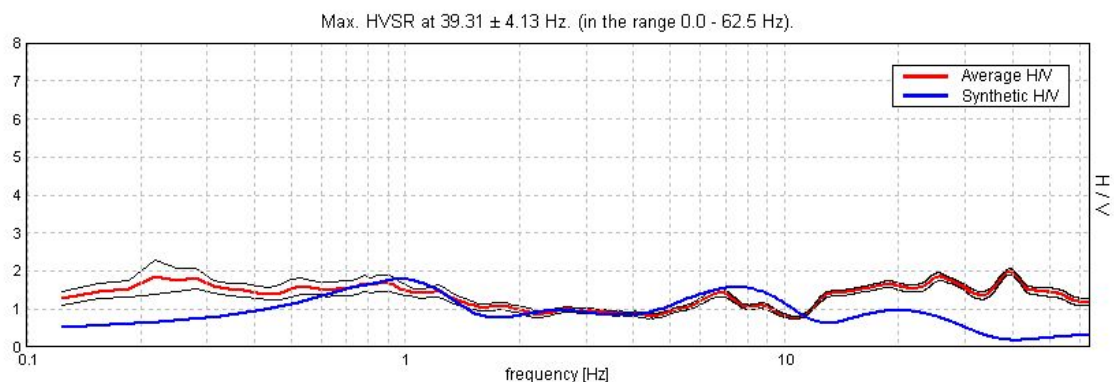


**Figura E(2).** – Sito 2 - Curva H/V media (rosso) e intervallo di confidenza al 95% (nero).

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO
DATA MAGGIO 2018	L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011



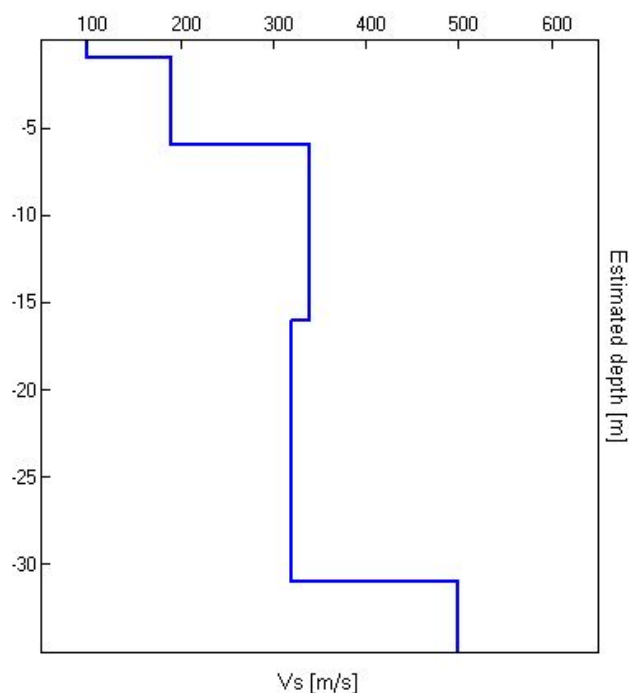
**Figura F(2).** – Sito 2 - Spettri di ampiezza in velocità delle singole componenti del moto.



**Figura G(2).** Sito 2 - Confronto tra curva H/V sperimentale (media in rosso, intervallo di confidenza al 95% in nero) e teorica (blu) ottenuta per il modello di sottosuolo di Figura H(2).



PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	



**Figura H(2).** – **Sito 2** - Profilo della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) stimato per il sottosuolo sulla base dell'inversione vincolata della curva H/V Sito 2.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	$V_s$ [m/s]
1.0	1.0	100
6.0	5.0	190
16.0	10.0	340
31.0	15.0	320
substrato	$\infty$	500

**Tabella I(2).** – **Sito 2** - Modello di sottosuolo per il sito inferito dall'indagine a stazione singola.

La velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m di terreno calcolata è  $V_{s30} = 274$  m/s (incertezza  $1\sigma$  dell'ordine del 15%). La categoria di suolo di fondazione risultante dalle prove a stazione singola per il sito in esame è C (Norme Tecniche per le Costruzioni 2008).

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

## 2.3 MISURE IN EDIFICIO – SCUOLA MEDIA ELEMENTARE DI CASEI GEROLA

Esistono essenzialmente tre 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, 3) test in condizioni di vibrazioni ambientali.

Nei primi due casi la struttura viene sollecitata da mezzi artificiali, come degli oscillatori o la caduta di pesi. Nell'ultimo caso, la vibrazione è indotta dall'eccitazione ambientale, sempre presente in natura, e fornita dal traffico e dalle perturbazioni atmosferiche. I test nelle condizioni di vibrazione ambientale sono recentemente preferiti rispetto alle vibrazioni forzate per il costo molto inferiore e perché permettono la caratterizzazione delle proprietà dinamiche della struttura nelle condizioni operative quotidiane.

Numerosi dati sperimentali (Hans *et al.*, 2005) hanno mostrato inoltre che dalle piccole ampiezze delle vibrazioni ambientali alle ampiezze molto maggiori raggiunte sottoponendo gli edifici a shock, le strutture rispondono sistematicamente seguendo lo stesso comportamento quasi elastico (Trifunac, 1972). Ne consegue pertanto che le misure semplici di vibrazioni sotto la condizione di microtremore ambientale sono sufficienti per identificare il comportamento della struttura nell'intero dominio quasi-elastico.

### 2.3.1 MODI DI VIBRAZIONE DELL'EDIFICIO

Per mettere in evidenza le risposte spettrali dell'edificio in esame sottoposto al microtremore ambientale, le serie temporali registrate contemporaneamente sui vari piani sono state analizzate secondo la procedura seguente:

- la serie temporale viene suddivisa in tratti di 20 s. Per ciascun tratto si esegue:
- la correzione per la linea di base (*detrending*),
- un *tapering*, secondo *finestra di Bartlett*,
- un trattamento dei dati di *padding*,

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

- la *trasformata* veloce di *Fourier* (FFT).

Lo spettro finale è dato dalla media degli spettri ottenuti su ciascun tratto.

In questa sezione gli spettri sono *lisciati* all'1% della frequenza centrale.

Per valutare le frequenze dei modi fondamentale e superiori dell'edificio, è necessario valutare e rimuovere l'effetto del sottosuolo. Accade infatti frequentemente che le frequenze proprie di risonanza del sottosuolo siano misurabili anche all'interno degli edifici e vadano pertanto rimosse per mettere in evidenza il solo effetto legato all'edificio.

Applichiamo pertanto il metodo cosiddetto del *sito di riferimento*. Assumiamo cioè 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 facciamo il rapporto tra le componenti spettrali dei vari piani e quelle del sito di riferimento.

In questo modo si metterà in evidenza anche il fattore di amplificazione del moto tra il piano n-esimo e il piano terra.

L'orientamento dello strumento coincide con quello geografico, assumendo all'incirca il nord secondo l'asse di allungamento dell'edificio stesso.

I risultati di questa analisi sono illustrati nelle Figure seguenti e riassunti in Tabella per quanto concerne i modi di oscillazione principali dell'edificio.

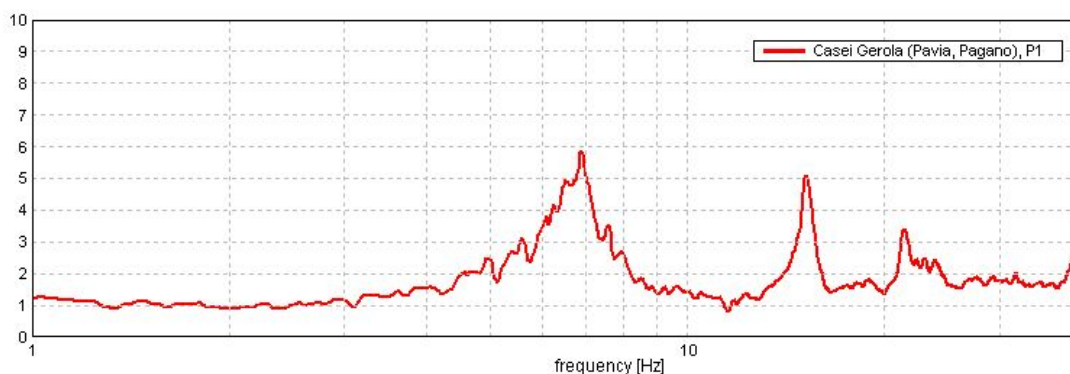
La componente N-S pare di lettura più difficoltosa a causa della presenza di alcuni artefatti di origine antropica. Lo spettro della componente verticale si presenta invece piatto, in linea con quanto atteso per questa tipologia di edificio.

Il sottosuolo di questa area (Sito 1; Array A) è caratterizzato, dal punto di vista stratigrafico, dalla presenza di uno strato ad crescente contrasto di impedenza tra circa 7 m (sito 1) e circa 4 m (array) di profondità: Questa caratteristica genera una risonanza dei terreni sovrastanti, da debole a intermedia, tra 7 Hz (sito 1) e 12 Hz (array).

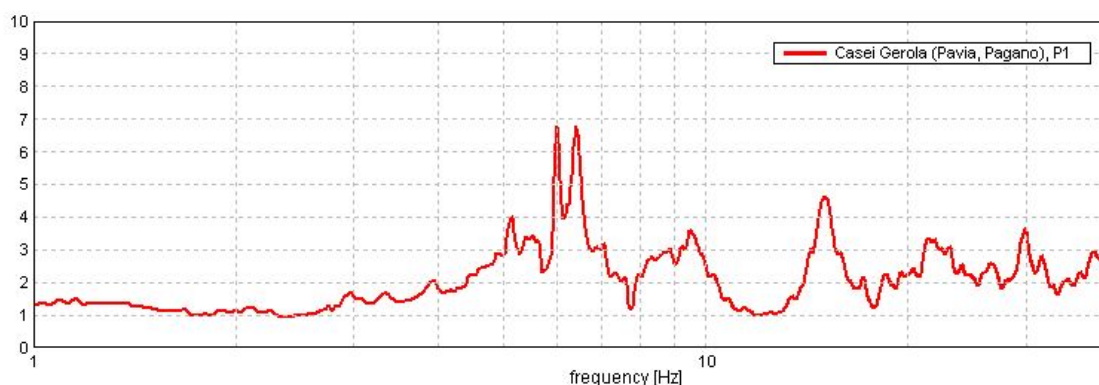
PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO
DATA MAGGIO 2018	L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011

Si osserva pertanto una parziale sovrapposizione del primo modo di vibrare dell'edificio investigato con la frequenza di risonanza del terreno, fenomeno che potrebbe generare doppia risonanza in caso di terremoto.

La situazione non appare tuttavia eccessivamente sfavorevole poiché le risonanze del sottosuolo sono piuttosto deboli, a meno del sito "array" in cui però la frequenza di risonanza è nettamente maggiore di quella della struttura del fabbricato.

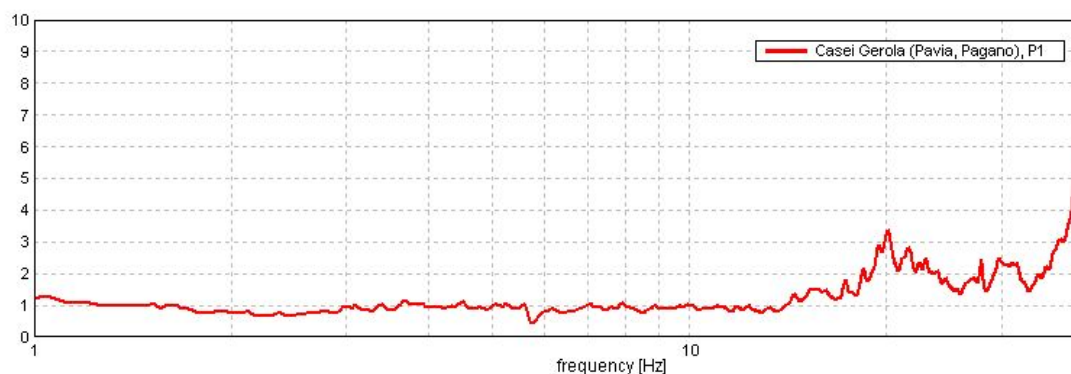


**Figura 4.** Rapporto tra gli spettri medi E-W registrati all'ultimo piano e quelli registrati al piano di fondazione (sito di riferimento). I rapporti mettono in evidenza i modi di vibrazione dell'edificio e i fattori di amplificazione del moto ai vari piani.



**Figura 5.** Rapporto tra gli spettri medi N-S registrati all'ultimo piano e quelli registrati al piano di fondazione (sito di riferimento). I rapporti mettono in evidenza i modi di vibrazione dell'edificio e i fattori di amplificazione del moto ai vari piani.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	



**Figura 6.** Rapporto tra gli spettri medi della componente verticale registrati all'ultimo piano e quelli registrati al piano di fondazione (sito di riferimento). I rapporti mettono in evidenza i modi di vibrazione dell'edificio e i fattori di amplificazione del moto ai vari piani.

Componente	Modo 0 [Hz]	Modo 1 [Hz]	Modo 2 [Hz]
E-W	6.8	15.1	21.2
N-S	6.4	9.3	14.7

**Tabella 3.** Tabella riassuntiva della frequenza fondamentale di risonanza e dei modi superiori nelle due componenti orizzontali. Per l'orientamento delle misure si confronti la cartografia allegata.

### 2.3.2 SMORZAMENTO DELLE OSCILLAZIONI DELL'EDIFICIO

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  $T$ .

In assenza di impulsi trasmessi all'edificio *ad hoc*, disponendo di strumenti sufficientemente sensibili, è possibile stimare lo smorzamento anche dal microtremore sismico ambientale. In questo senso non sono adatti gli accelerometri per l'elevato rumore di fondo e vanno invece impiegati i velocimetri. La tecnica per la stima dello smorzamento a partire dai dati di microtremore, nota

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

con il termine *RandomDec*, fu introdotta da Cole negli anni '60-'70 e diffusa da Vandivier *et al.* (1982). La tecnica consiste in:

- 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  $\xi$  sfrutta il decremento logaritmico:

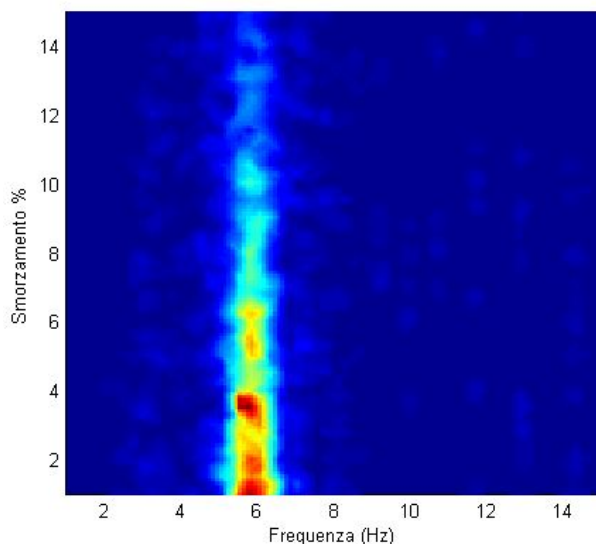
$$\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{A_n}{A_{n+1}} \right| \approx \xi \quad \text{per piccoli valori di } \xi$$

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

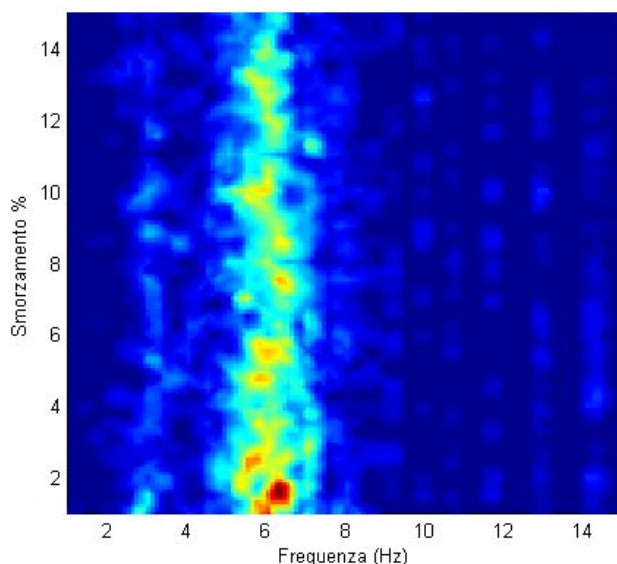
In questo lavoro si calcola in prima approssimazione lo smorzamento attraverso una tecnica non parametrica che consiste, dopo le procedure di correzione ed equalizzazione del segnale, nell'integrazione dello stesso per ottenere serie temporali in termini di spostamento. Successivamente vengono cercati 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 9 e Figura 10 da cui si legge immediatamente la frequenza di risonanza (nel solo modo fondamentale, nei casi del presente studio) e lo smorzamento associato. Questa tecnica è meno precisa della *RandomDec* classica ma molto più rapida e permette di ottenere un'informazione di larga

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

massima sullo smorzamento anche da registrazioni di microtremore estremamente brevi, come quelle effettuate in questo studio.



**Figura 7.** Scuola Media Elementare di Casei Gerola - Grafico frequenza-smorzamento per il primo modo di vibrare della componente N-S. Il massimo a colori indica lo smorzamento (leggermente maggiore a 3.5%) e la frequenza del relativo modo di vibrare.



**Figura 8.** Scuola Media Elementare di Casei Gerola - Grafico frequenza-smorzamento per il primo modo di vibrare della componente E-W. Il massimo a colori indica lo smorzamento (< 2%) e la frequenza del modo di vibrare associato.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

Sebbene lo smorzamento dipenda anche dall'ampiezza della vibrazione, data la brevità delle registrazioni, lo smorzamento medio calcolato risulta essere pari al 3.5% sulla componente N-S e inferiore al 3% sulla componente E-W. La precisione sulla stima aumenta all'aumentare del numero di cicli studiati, ossia alla durata della registrazione.

## 2.4 VERIFICA DEGLI EFFETTI DI SITO IN RELAZIONE ALL'AMPLIFICAZIONE SISMICA NEL COMUNE DI CASEI GEROLA

Nella Tabella sottostante riassumiamo le frequenze di risonanza misurate in sito e l'altezza relativamente più critica dei fabbricati che risultano maggiormente vulnerabili per fenomeni di amplificazione sismica di sito.

Sito	Frequenza risonanza terreno [Hz]	Periodo risonanza terreno [s]	Altezza di edificio relativamente più vulnerabile (numero di piani)
ARRAY A, abitato di Casei	11 Hz	0.09	1 - 2
Sito 1, abitato di Casei	7 Hz	0.14	2 - 4
Sito 2, Frazione Gerola	7 Hz	0.14	2 - 4

**Tabella 4** – Quadro riassuntivo delle frequenze di risonanza rilevate nel territorio comunale di Casei Gerola e correlazione con le altezze degli edifici relativamente più vulnerabili.

Sulla base dei suddetti dati geotecnici e dei rilievi diretti svolti per la presente sono state individuate le litologie prevalenti, in base ai parametri indicativi presenti nelle schede di valutazione. Per la valutazione dei fattori di amplificazione generati e dipendenti dalla copertura detritica è stata scelta, pertanto, la scheda LITOLOGIA LIMOSO-ARGILLOSA TIPO 1. La scelta è considerata cautelativamente valida per l'intero territorio comunale caratterizzato dalla presenza di depositi alluvionali di spessore variabile pari ad alcuni o parecchi metri, in livelli suborizzontali.



PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

Per ogni colonna stratigrafica individuata è stato misurato il periodo proprio che è in funzione delle velocità e dello spessore di ciascuno strato e verificato il valore di  $F_a$  negli intervalli 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s, scegliendo la curva appropriata in funzione della velocità e dello spessore del primo strato; nella Tabella seguente si riportano i risultati:

Colonna stratigrafica	Periodo proprio deposito T (s)	$F_{a0.1-0.5}$	$F_{a0.5-1.5}$
ARRAY A	0.09	1.4	1.00
Sito 1	0.14	1.5	1.05
Sito 2	0.14	1.5	1.05

**Tabella 5** – Valutazione *Periodo di risonanza T* – *Fattore di amplificazione di sito  $F_a$*  per i siti di misura geofisica del territorio comunale di Casei Gerola.

Dalla consultazione della banca dati soglie\_lomb.xls (accesso file *Analisi Sismica Soglie Lomb* nel sito [WWW.TERRITORIO.REGIONELOMBARDIA.IT](http://WWW.TERRITORIO.REGIONELOMBARDIA.IT) in data Maggio 2018), estratta nella tabella seguente per il Comune di Casei Gerola, si hanno i seguenti valori soglia, per i suoli prevedibili nel territorio comunale di categoria B-C-D-E:

per l'intervallo di periodo tra 0,1-0,5 s, (Suolo C) Valore soglia = 1,8;

per l'intervallo di periodo tra 0,5-1,5 s, (Suolo C) Valore soglia = 2,4.

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.1-0.5 s		Valori soglia			
COMUNE	Classificazione	B	C	D	E
Casei Gerola	4	1,4	1,8	2,2	2,0

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.5-1.5 s		Valori soglia			
COMUNE	Classificazione	B	C	D	E
Casei Gerola	4	1,7	2,4	4,2	3,1

**Tabella 6** – Regione Lombardia, banca dati valori soglie\_lomb.xls per il Comune di Casei Gerola.

Il confronto tra i valori di  $F_a$  ottenuti dalla valutazione di 2° livello ed i valori di soglia, utilizzando la Curva 1, 2 della scheda di valutazione scelta ed i periodi propri di risonanza T (s) fino a 0,25 s circa di ciascun sito di misura geofisica implementati per la presente ricerca indicano come la norma è in grado nei

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

periodi considerati di tenere in considerazione gli effetti di amplificazione litologica rilevati nel territorio.

Gli edifici eventualmente più esposti agli effetti sono rappresentati da quelli di altezza pari a 1-2 piani.

## **2.5 EFFETTI GEOMETRICI MORFOLOGICI PREVEDIBILI NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI CASEI GEROLA**

Con riferimento alla normativa regionale, la procedura semplificata considera la valutazione di scenari di pericolosità per amplificazione sismica in corrispondenza di alcune forme geomorfologiche del territorio. Queste forme sono geometricamente definibili attraverso pendenze, altezze e dislivelli, gradi di arrotondamento delle forme del paesaggio. Le caratteristiche morfometriche si ritrovano generalmente in corrispondenza di versanti, cigli di scarpata, creste arrotondate o appuntite di rilievi.

Dalla valutazione della morfologia e morfometria del territorio comunale di Casei Gerola, applicando i parametri previsti dalla normativa, non si riscontrano caratteri morfologici rispondenti ai criteri geometrici minimi definiti dalla normativa a rischio e quindi soggetti a valutazione del fattore di amplificazione sismica.

Pertanto non si prevedono effetti di amplificazione sismica di sito potenzialmente generabili dalle specifiche condizioni geometriche morfologiche del Comune di Casei Gerola.

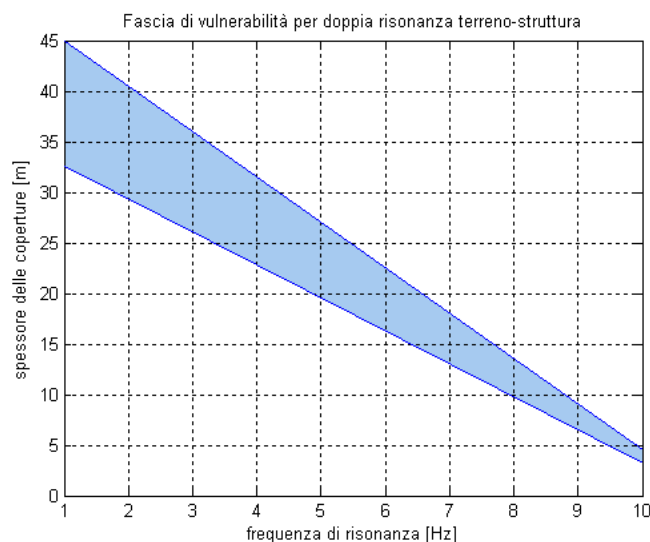
## **2.6 CONCLUSIONI**

Dalle misure effettuate nella zona oggetto di studio è emerso che le frequenze fondamentali di risonanza del sottosuolo nel campo di interesse ingegneristico sono legate ai sedimenti argillosi e limosi sovrastanti depositi con ghiaie del primo sottosuolo nella prima decina di metri di profondità. La tabella seguente illustra il

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

campo di frequenze di risonanza in funzione dello spessore della copertura sensibile misurata per Casei Gerola.

E' inoltre emersa una  $V_s$  media misurata per le coperture sensibili di 150-180 m/s. In funzione dello spessore delle coperture sovrastanti gli strati rigidi<sup>1</sup> si determinano frequenze di risonanza calcolabili in prima approssimazione sulla base della formula  $f = V_s / 4h$ , con  $h$  pari allo spessore delle coperture. La coincidenza tra determinati spessori di copertura e le frequenze di vibrazione delle strutture determina la fascia di vulnerabilità indicata in azzurro in Figura 6 per fenomeni di doppia risonanza terreno-struttura.



**Figura 6.** – Comune di Casei Gerola - Fascia di vulnerabilità per doppia risonanza terreno-struttura.

La tipologia di suolo di fondazione risultante dalle prove geofisiche realizzate ed estrapolabili alle zone dell'urbanizzato ed urbanizzabile del Comune di Casei Gerola, compresa la Frazione Gerola, è corrispondente alla **CATEGORIA DI SUOLO C** (Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018).

<sup>1</sup> Gli strati rigidi superficiali in questa zona non costituiscono un substrato (*bedrock*) in senso stretto, caratterizzato da  $V_s > 800$  m/s ma risultano comunque assimilabili a *bedrock* (*bedrock-like*), in considerazione delle frequenze di risonanza che possono generare.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

**CATEGORIA DI SUOLO C – SABBIE E GHIAIE MEDIAMENTE ADDENSATE, ARGILLE (NSPT 15-50; CU 70-250 kPa):  $V_{s30} = 180-360$  m/s**

**Tabella 7** – Inquadramento della CATEGORIA DI SUOLO PREVALENTE DEL COMUNE DI CASEI GEROLA, AI SENSI Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018.

Il confronto tra i valori di  $F_a$  ottenuti dalla valutazione di 2° livello ed i valori di soglia suggeriti dalla normativa indicano come la norma è in grado, ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018, nei periodi valutati utili di interesse ingegneristico, di tenere in considerazione gli effetti di amplificazione litologica rilevati nel territorio.

Gli edifici più esposti ad eventuali effetti sono rappresentati da quelli di altezza pari a 1-2 piani.

Gli effetti di amplificazione litologica sono comunque da considerarsi trascurabili essendo la probabilità del verificarsi di eventi sismici, con epicentro in questa parte del territorio di pianura, del tutto remota.

## 2.6.1 GLOSSARIO PER I TEMI DELLA GEOFISICA

**Aliasing.** Effetto indesiderato che consiste nella creazione di una frequenza falsa (ALIAS), non esistente nel segnale reale, dovuta a fenomeni di sottocampionamento.

**Amplificazione/deamplificazione sismica.** Incremento/decremento nell'ampiezza del segnale sismico rispetto ad un'ipotetica roccia di base (BEDROCK) al propagarsi delle onde, in funzione della frequenza e del livello di scuotimento.

**Analisi di Fourier.** Operazione matematica che permette di passare, nella descrizione di un segnale, dal dominio dei tempi al dominio della frequenza. In altre parole consente di descrivere una serie temporale (ad esempio una registrazione del movimento al suolo nel tempo) attraverso le componenti relative di fase e di ampiezza de in funzione della frequenza (spettro di fase o di ampiezza o di potenza).

**Bedrock.** Roccia in affioramento o alla base di sedimenti sciolti.

**Curva di dispersione.** E' la curva che rappresenta l'andamento della velocità di fase dell'onda di Rayleigh in funzione della frequenza.

**Densità.** Indicata con  $\rho$ , è il rapporto tra massa e volume del mezzo.

**Discontinuità sismiche.** Livelli all'interno del profilo litostratigrafico in corrispondenza dei quali si verificano nette variazioni di velocità delle onde sismiche (e pertanto delle proprietà elastiche dei litotipi).

**Doppia risonanza.** Vd. *Risonanza doppia*.

**Frequenza naturale (o fondamentale).** E' la frequenza a cui un sistema, eccitato da un impulso, vibra con maggior ampiezza. E' il reciproco del periodo fondamentale.

**Guida d'onda.** Si intende per guida d'onda il fenomeno per cui un campo di onde tende a rimanere confinato entro un canale (es. un tubo o una fibra in ottica) a causa delle riflessioni delle onde con l'interfaccia di confinamento. In sismica il fenomeno si verifica nei mezzi stratificati, quando sopra e sotto lo strato i-esimo si hanno brusche variazioni di impedenza. Il fenomeno

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

riguarda ad es. le onde di Love dove il mezzo di confinamento è dato dalla superficie libera in alto e, per es., dal bedrock, verso il basso.

**Impedenza sismica.** Prodotto  $Z$  tra la densità del terreno  $\rho$  e la velocità delle onde sismiche  $V$ , che varia fra strati differenti di terreno. Il contrasto di impedenza sismica fra strati di roccia adiacenti influisce sul coefficiente di riflessione. Il contributo maggiore alle variazioni di impedenza sismica è dato dalle variazioni di  $V$ , piuttosto che di  $\rho$ .

**Microtremori.** Rumore sismico ambientale, caratterizzato da oscillazioni di piccola ampiezza, provocate da sorgenti naturali o antropiche (onde del mare, vento, piccoli movimenti terrestri, traffico ecc.). I microtremori sono costituiti da tutti i tipi di onde sismiche, ma generalmente, in maggior misura, da ONDE SUPERFICIALI DI RAYLEIGH e di Love.

**Microzonazione.** Complesso di studi che prevede quale prodotto finale di sintesi una mappa del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico viene amplificato (e come) a causa delle caratteristiche litostratigrafiche del terreno e geomorfologiche del territorio;
- le zone in cui sono presenti o suscettibili di attivazione dissesti del suolo indotti dal sisma (frane, assestamenti, liquefazioni, faglie superficiali).

**Onde P.** Sono le onde sismiche più veloci e vengono anche chiamate *primae* o di compressione. La vibrazione si sviluppa nella stessa direzione di propagazione delle onde. Sono onde di volume e si propagano con velocità  $V_p$ .

**Onde di Love (L).** Onde sismiche generate dall'intrappolamento delle onde S confinate e riflesse tra due strati con diversa impedenza sismica (fenomeno di guida d'onda, vd.). Si propagano con velocità  $V_L$ .

**Onde di Rayleigh (R).** Onde sismiche generate dall'interazione tra onde di volume P ed S. Hanno velocità ( $V_R$ ) prossima a quella delle onde S ( $V_S$ ), in particolare  $0.87 < V_R / V_S < 0.96$ .

**Onde S.** Sono le onde sismiche che giungono per seconde. Sono chiamate anche *secundae* o trasversali e la vibrazione avviene perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda sismica. Sono onde di volume e si propagano con velocità  $V_S$ . Sono le onde più dannose per le strutture durante i terremoti in quanto, giungendo in superficie con incidenza quasi verticale, producono spinte orizzontali sui terreni e sugli edifici fondati su di essi. Gli edifici, che sopportano bene gli sforzi di compressione, generalmente soffrono invece molto la presenza di sforzi di taglio.

**Onde di superficie.** Termine generico per indicare le onde di Rayleigh e di Love, onde il cui campo di vibrazione è la superficie della crosta. La loro energia si disperde meno rapidamente delle onde di volume; esse pertanto tendono a dominare il campo lontano dalla sorgente.

**Onde di volume.** Termine generico per indicare le onde S e P. La loro energia si disperde più rapidamente delle onde di superficie, pertanto tendono a dominare il campo vicino alla sorgente.

**Risonanza.** E' la tendenza di un sistema ad oscillare con maggior ampiezza quando eccitato da energia ad una specifica frequenza, detta *frequenza naturale* di vibrazione del sistema, *autofrequenza* o *frequenza di risonanza*.

Nel caso degli edifici la risonanza è controllata dalle geometrie e dai materiali di costruzione mentre la frequenza di risonanza è controllata principalmente dall'altezza. La frequenza naturale di risonanza di un edificio può essere stimata, in prima approssimazione, dividendo 10 Hz per il numero dei piani dell'edificio.

**Risonanza doppia.** Tutte le strutture hanno una frequenza naturale alla quale la sovrapposizione di energia alla stessa frequenza amplifica il moto. Un analogo di facile comprensione è l'esempio di un bimbo su un'altalena. Se egli verrà spinto ad una frequenza casuale, l'altalena tenderà generalmente a fermarsi. Se invece la spinta sarà applicata all'istante giusto ad ogni oscillazione (cioè alla giusta frequenza), il dondolio dell'altalena aumenterà in modo eclatante. Allo stesso modo, se il moto sismico indotto dal terremoto eccita la base di un edificio a frequenze prossime a quelle di risonanza naturale dell'edificio stesso, l'amplificazione del moto risultante può diventare distruttiva e portare al collasso della struttura.

**Scuotimento.** E' la vibrazione del terreno indotta da un'onda sismica. Lo scuotimento in un sito può essere incrementato dalla focalizzazione dell'energia sismica causata da particolari condizioni geometriche del sottosuolo o geomorfologiche (forma di un bacino sedimentario, cresta, ecc...).

**Slant-stack.** Sovrapposizione obliqua. In questo lavoro questa procedura matematica rappresenta il primo passo nella creazione delle curve di dispersione.

**Vs30.** E' il valore medio della velocità delle onde S nei primi 30 m di sottosuolo.

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

### 3. PRESCRIZIONI GEOLOGICHE SISMICHE PER LE COSTRUZIONI E PER L'USO DEL SUOLO DEL TERRITORIO COMUNALE DI CASEI GEROLA (PV)

La tipologia di suolo di fondazione risultante dalle prove geofisiche ed estrapolabili alle zone dell'urbanizzato ed urbanizzabile del Comune di Casei Gerola, compresa la Frazione Gerola, è corrispondente alla **CATEGORIA DI SUOLO C** (Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018).

**CATEGORIA DI SUOLO C** – SABBIE E GHIAIE MEDIAMENTE ADDENSATE, ARGILLE (NSPT 15-50; CU 70-250 kPa):  $V_{s30} = 180-360$  m/s

Il confronto tra i valori del fattore di amplificazione  $F_a$  ottenuti dalla valutazione di 2° Livello ed i valori di soglia suggeriti dalla normativa indicano come la norma è in grado, ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018, nei periodi valutati utili di interesse ingegneristico (periodo tipico 0,1-0,5 s; 0,5-1,5 s), di tenere in considerazione gli effetti di amplificazione litologica rilevati nel territorio.

In riferimento alle NORME GEOLOGICHE DI PIANO, per tutte le classi di Fattibilità geologica valgono le prescrizioni già individuate nello studio geologico COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI CASEI GEROLA, IN ATTUAZIONE DELLA L.R. 11 MARZO 2005, N.12, MARZO 2010, A. PAGANO.

Gli interventi edificativi previsti nelle aree interessate dallo Scenario Pericolosità Sismica Locale (PSL) Z4a, in cui possono essere attesi effetti sismici locali per

PROGETTO	COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA NEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO L.R. 11 marzo 2005, n. 12 APPROFONDIMENTI SISMICI DI SECONDO LIVELLO D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011
DATA MAGGIO 2018	

amplificazioni litologiche, non sono richiesti ulteriori approfondimenti di analisi sismica.

Pagano Dott. Alberto

*Geologo, Ordine Geologi Regione Lombardia n. 721*

