



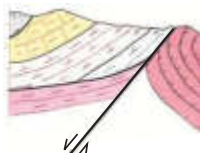
COMUNE DI LUGAGNANO VAL D'ARDA
Provincia di Piacenza

INDAGINI SISMICHE E RELATIVE ANALISI DI
**Risposta Sismica Locale A SUPPORTO DELLO STUDIO
DI VULNERABILITA' SISMICA DELLA SCUOLA MATERNA**
c/o la località di "Prato Ottesola"
COMUNE DI LUGAGNANO VAL D'ARDA - Provincia di Piacenza
[CIG: Z7D34A3A56]



RELAZIONE SISMICA

00	GENNAIO 2022	A. Carpena	A. Carpena	
REV.	DATA	REDAZIONE	APPROVAZIONE	MODIFICHE



Studio Geologico Dott. Geol. Andrea Carpena

uffici: via Carlo Fioruzzi, 15 - 29121 Piacenza
Tel.: +335/6176390 (fax: 0523/462427)
e-mail: andrea.carpena@georeflex.it

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. BREVE INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO	5
3. ANALISI SISMICA	9
4. ASSETTO SISMOTETTONICO	9
5. SISMICITA' E PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE	13
6. ANALISI DEI MICROTREMORI	22
6.1 Descrizione del metodo	22
6.2 Strumentazione e criteri di acquisizione	23
6.3 Elaborazione dati	25
7. CALCOLO DELLE Vs30	27
8. CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SUOLO DI FONDAZIONE	28
9. ANALISI TROMOGRAFICA	29
9.1 Breve introduzione amplificazione di sito	29
9.2 Descrizione del metodo HVSR	31
9.3 Strumentazione impiegata ed elaborazione dati	32
9.4 Calcolo della frequenza naturale di sito	33
10. AZIONE SISMICA	36
11. CONCLUSIONI.....	45

FIGURE

1.A	Inquadramento territoriale da ortofoto AGEA2017	scala 1:2000 (in A3)
1.B	Inquadramento territoriale da sorvolo con drone	
2.A	Estratto dalla Carta geologica regionale	scala 1: 3000 (in A3)
2.B	Legenda della Carta geologica regionale	
3.	Ubicazione delle indagini geofisiche	scala grafica del disegno

1. INTRODUZIONE

Su incarico del **Comune di Lugagnano Val d'Arda** (rif. Determina nr. 177 del 30-12-2021), nell'ambito dello studio di Vulnerabilità Sismica di un immobile a destinazione scolastica (Scuola Materna), sito presso la località "Prato Ottesola", nel comune di Lugagnano Val d'Arda, provincia di Piacenza, è stato redatto uno studio articolato attraverso lo sviluppo dei seguenti punti:



Figura 1: Estratto da ortofotogrammetrico regionale (AGEA 2017)

- a. Sintetico inquadramento geologico-geomorfologico dell'area.
- b. Analisi della **Risposta Sismica Locale (RSL)**; a tal fine, è stata eseguita, in data 11 gennaio 2022, un'analisi dei microtremori (**ReMi**). L'indagine è finalizzata al calcolo delle V_{seq} (valore medio delle velocità di taglio) ed alla definizione del suolo di fondazione sulla base della nuova classificazione sismica del territorio nazionale e del Decreto Ministeriale del 22 marzo 2018 (pubblicato sul supplemento ordinario nr. 8 della Gazzetta Ufficiale del 20 febbraio 2018 – "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni").
- c. Sempre in data 11 gennaio 2021 è stata acquisita nr. 1 registrazione di vibrazioni ambientali per un'analisi dei rapporti spettrali **HVSR** (metodo tromografico). L'indagine è finalizzata al calcolo della frequenza naturale f_0 di risonanza di sito.
- d. **Azioni sismiche** sulla base delle caratteristiche della struttura e definizione della pericolosità sismica di base.

L'area si colloca nel settore nord-occidentale del nucleo abitativo di Lugagnano Val d'Arda.



Figura 2: Prospettica scattata da drone (11-01-2022)

La zona, sede dell'immobile scolastico oggetto di studio, nella sua globalità risulta sostanzialmente pianeggiante; ai margini della collina. Confina, a NNE, con la Chiesa della frazione di Prato Ottesola.

2. BREVE INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO

L'area oggetto d'indagine ricade all'interno del territorio comunale di Lugagnano Val d'Arda (settore Nord- Occidentale), alla quota di circa 213 metri s.l.m.

L'area, nella sua globalità, come detto prima, non presenta sostanziali variazioni morfologiche.

Nel particolare, l'area di studio, ricade all'interno della successione post-evaporitica del margine padano-adriatico.

Nell'ambito del "Quaternario", il quadro stratigrafico (Regione Emilia Romagna, 1998) è costituito da n.3 Sequenze Deposizionali principali, o Supersintemi:

- **Supersintema Emiliano Romagnolo (SER);**
- **Supersintema del Quaternario Marino (Qm);**
- **Supersintema del Pliocene medio-superiore.**

Queste tre sequenze deposizionali costituiscono la risposta sedimentaria ad altrettante fasi tettoniche regionali.

L'area di studio ricade nel "Supersintema Emiliano Romagnolo". Tale ciclo quaternario continentale, risulta suddivisibile in n.2 Unità riconosciute e correlate a livello regionale in:

- **Sintema Emiliano Romagnolo Superiore (*in cui ricade l'area di studio*);**
- **Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore.**

Esse sono separate da una superficie di discontinuità, spesso con discordanza angolare, testimonianza di un'importante fase tettonica regionale.

Il Sintema Emiliano Romagnolo Superiore è caratterizzato dapprima da depositi che testimoniano la persistenza della subsidenza, seguiti da strutture e depositi che indicano una fase di prevalente sollevamento della catena e di conseguente erosione e terrazzamento delle unità precedenti.

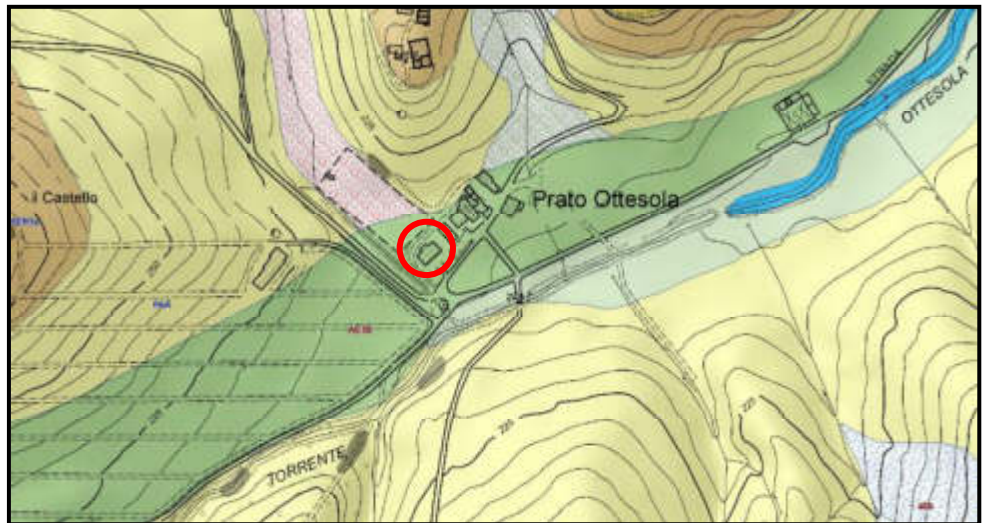
Questa unità è costituita da depositi prevalentemente grossolani, di ambiente di conoide alluvionale ghiaiosa, di interconoide e, localmente, di piana alluvionale.

In particolare, il

Sintema Emiliano Romagnolo

Superiore (SES),

rappresenta un'unità alluvionale terrazzata, costituita da ghiaie



prevalenti (depositi di conoide e di terrazzo intravallivo) in corrispondenza degli apparati fluviali principali, passanti a limi prevalenti, con rare intercalazioni di sabbia e ghiaie, nelle aree di interconoide. Nell'area in questione raggiunge uno spessore massimo di circa 150-160 metri. L'età complessiva dell'Unità è Pleistocene superiore – Olocene.

A livello locale, l'area in oggetto ricade specificatamente all'interno del **Subsintema di Ravenna (AES8)**. Si tratta di ghiaie sabbiose, sabbie e limi stratificati con copertura discontinua di limi-argillosi; depositi intravallivi terrazzati e di conoide ghiaiosa. Limi e limi-sabbiosi; depositi di interconoide. Il profilo di alterazione varia da qualche decina di cm fino a circa 1 m.

Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico, mentre il contatto di base è discordante sulle unità più antiche. Lo spessore massimo dell'unità è inferiore a 20 metri.

L'età è Pleistocene superiore – Olocene (post circa 20.000 anni B.P.).

I processi geomorfologici che nel corso del tempo hanno lasciato un'impronta più evidente nella forma del paesaggio, sono legati alla:

- dinamica fluviale
(in questo caso del Torrente Ottesola che si trova a circa 65 metri a Sud)
- attività antropica.

Dalla consultazione della cartografia del dissesto, unitamente ad un rilievo dell'area di studio ed un suo adeguato intorno, non si rilevano manifestazioni morfologiche tipiche di movimenti in atto e/o quiescenti.

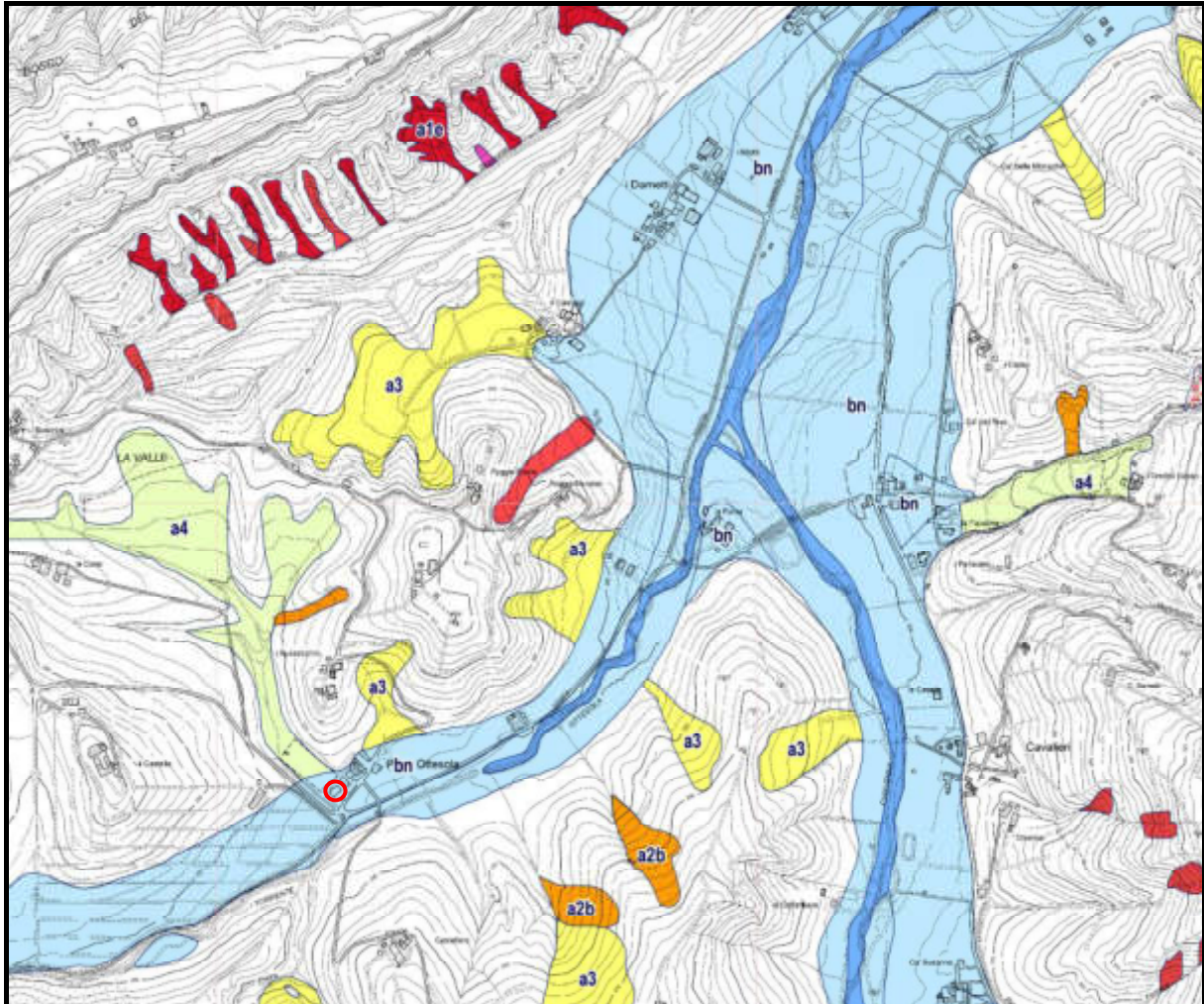











Figura 3: Estratto dalla cartografia dell'inventario delle frane dell'Emilia-Romagna (ed. giugno 2018).



Si riporta qui di seguito anche la legenda esplicativa delle varie retinature cartografate nell'estratto di cui sopra.

LEGENDA




Depositi di frana

-  a1a - Deposito di frana attiva per crollo e/o ribaltamento
-  a1b - Deposito di frana attiva per scivolamento
-  a1d - Deposito di frana attiva per colamento di fango
-  a1e - Deposito di frana attiva per colamento detritico
-  a1g - Deposito di frana attiva complessa
-  a2b - Deposito di frana quiescente per scivolamento
-  a2d - Deposito di frana quiescente per colamento di fango
-  a2e - Deposito di frana quiescente per colamento detritico
-  a2g - Deposito di frana quiescente complessa



Eventi di frana storicamente documentati

-  Frana con eventi storicamente documentati di limitata estensione
-  Frana con eventi storicamente documentati

Altri depositi di versante

-  a6 - Detrito di falda
-  a3 - Deposito di versante s.l.; a5 - Antico deposito di versante
-  a4 - Deposito eluvio-colluviale; e1 - Deposito di salsa; d1 - Deposito eolico; f1 - Deposito palustre; f2 - Deposito lacustre

Depositi alluvionali

-  b1 - Depositi alluvionali attualmente in evoluzione
-  bn - Depositi alluvionali attualmente non in evoluzione

Depositi Antropici

-  h - Cava

Figura 4: Legenda carta dell'inventario frane dell'Emilia-Romagna (ed. giugno 2018)

3. ANALISI SISMICA

Ad integrazione, viene qui di seguito illustrato schematicamente un quadro sismotettonico dell'area in oggetto ed un suo adeguato intorno.

Sulla base, sia di dati in ns. possesso, che dati consultati presso enti, si è cercato di fornire, in questa sede, una classificazione del suolo di fondazione sulla base della nuova classificazione sismica del territorio nazionale.

4. ASSETTO SISMOTETTONICO

L'area in esame ricade nel contesto generale della Pianura Padana che costituisce nel Mesozoico l'avampaese comune delle catene (Alpi ed Appennini); dall'Oligocene in poi tale area si evolve in avanfossa, prima legata al Sudalpino e poi, dal Messiniano, alla catena appenninica.

L'avanzata delle opposte falde, sviluppatesi in due distinte fasi, ha indotto sprofondamenti flessurali nell'antistante avampaese padano e il formarsi di successivi bacini di avanfossa confinati al margine delle due catene in formazione (**Fig. 5**).

Le due fosse a polarità opposta si accrescono quindi successivamente sullo stesso avampaese e vengono in parte a sovrapporsi.

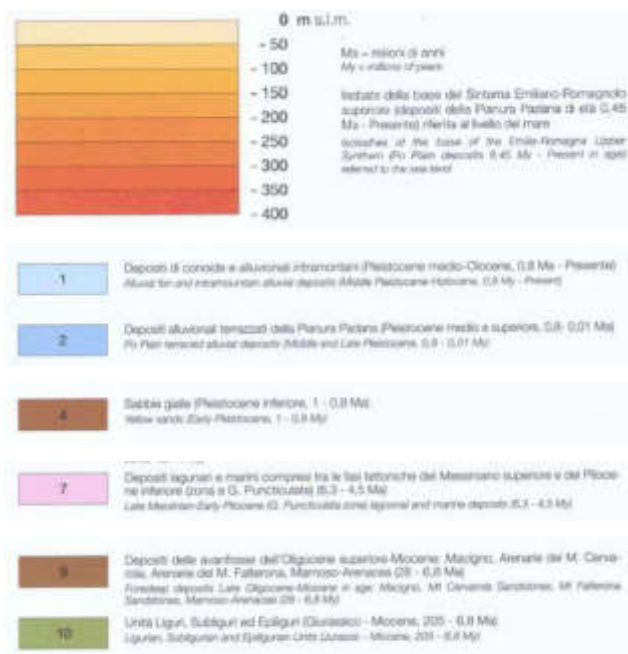
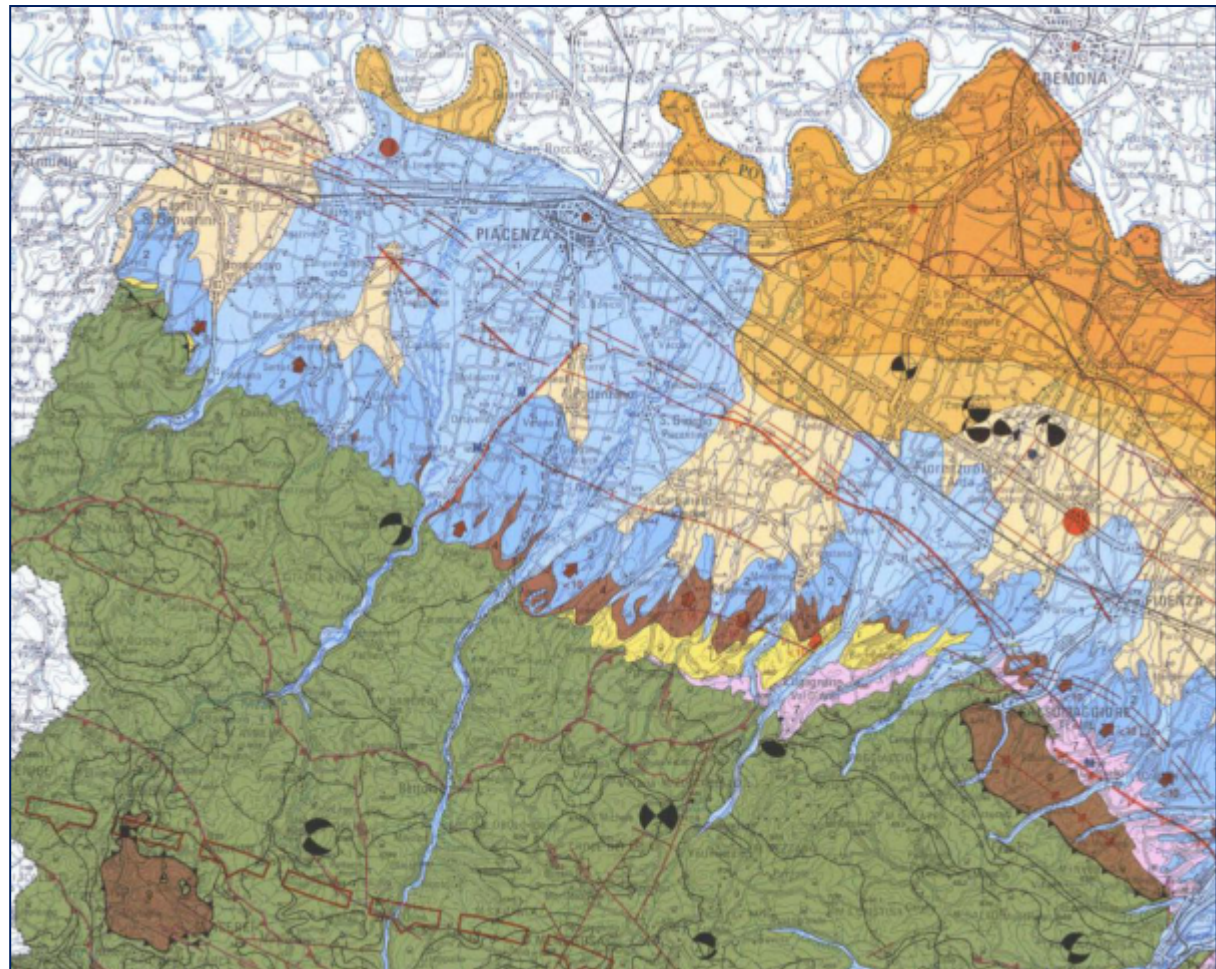


Figura 5: Estratto della carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna.

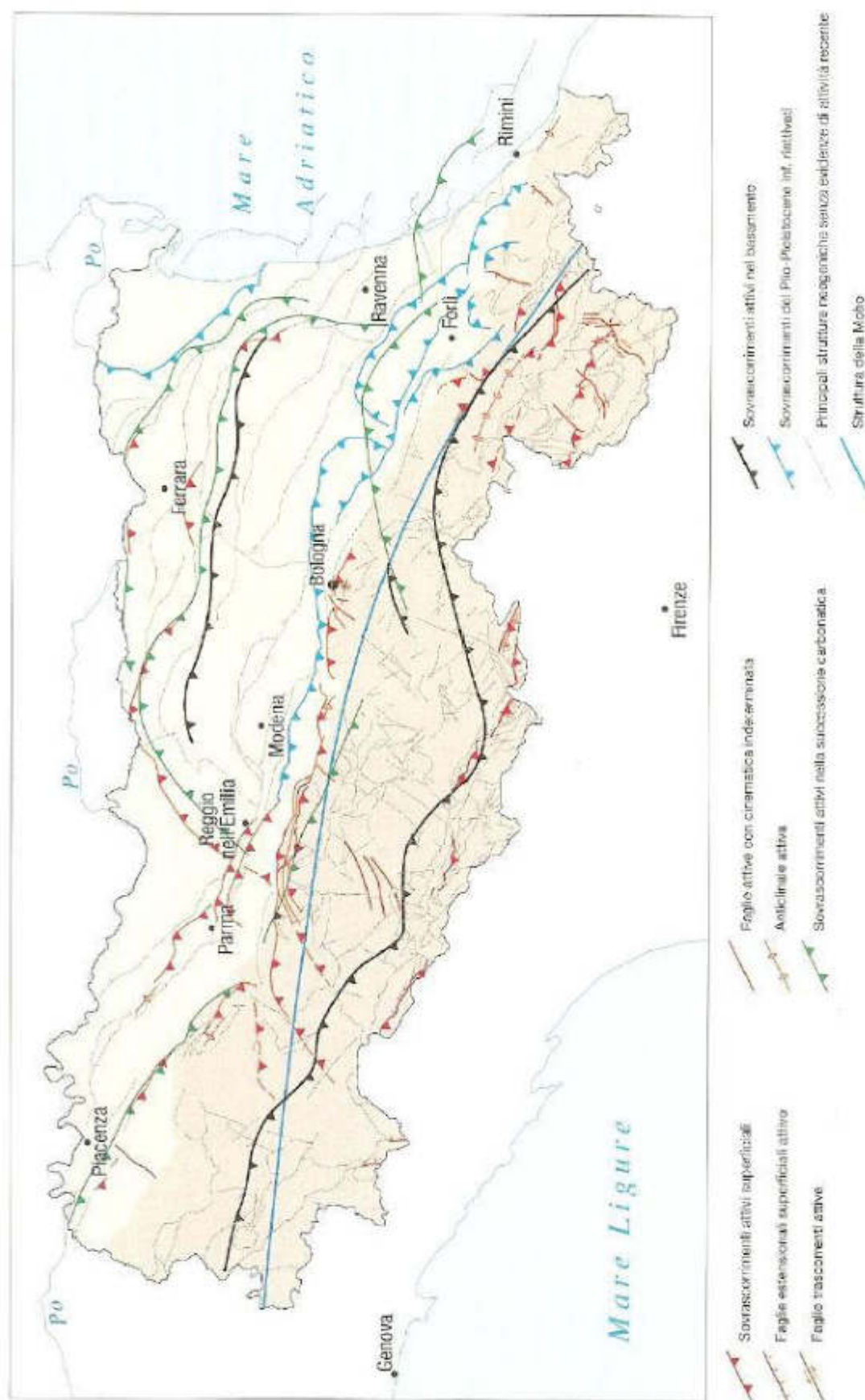


Figura 6: Sintesi regionale delle principali strutture attive.

Spesse coltri di sedimenti plio-pleistocenici ricoprono i sistemi di *thrusts* appenninici e alpini (**Fig. 5-6**). Il complesso sistema frontale di accavallamento degli edifici appenninico ed alpino è strutturato secondo faglie a cinematica inversa a basso angolo, che spesso si manifestano morfologicamente attraverso sistemi di pieghe.

Al di sotto di questi sistemi, ad oltre 10 Km di profondità, è presente un basamento magnetico, interessato da sovrascorrimenti ed immergente al di sotto del fronte pedeappenninico, dove raggiunge la profondità di 14-15 Km.

La maggior parte degli ipocentri dei terremoti registrati nell'area è concentrata entro i primi 10-15 Km di profondità, con un approfondimento nel settore di Borgotaro-Pontremoli oltre il quale si hanno profondità decisamente maggiori per l'area della Garfagnana (da: *Guide Geologiche Regionali n°6 Appennino Ligure –Emiliano*).

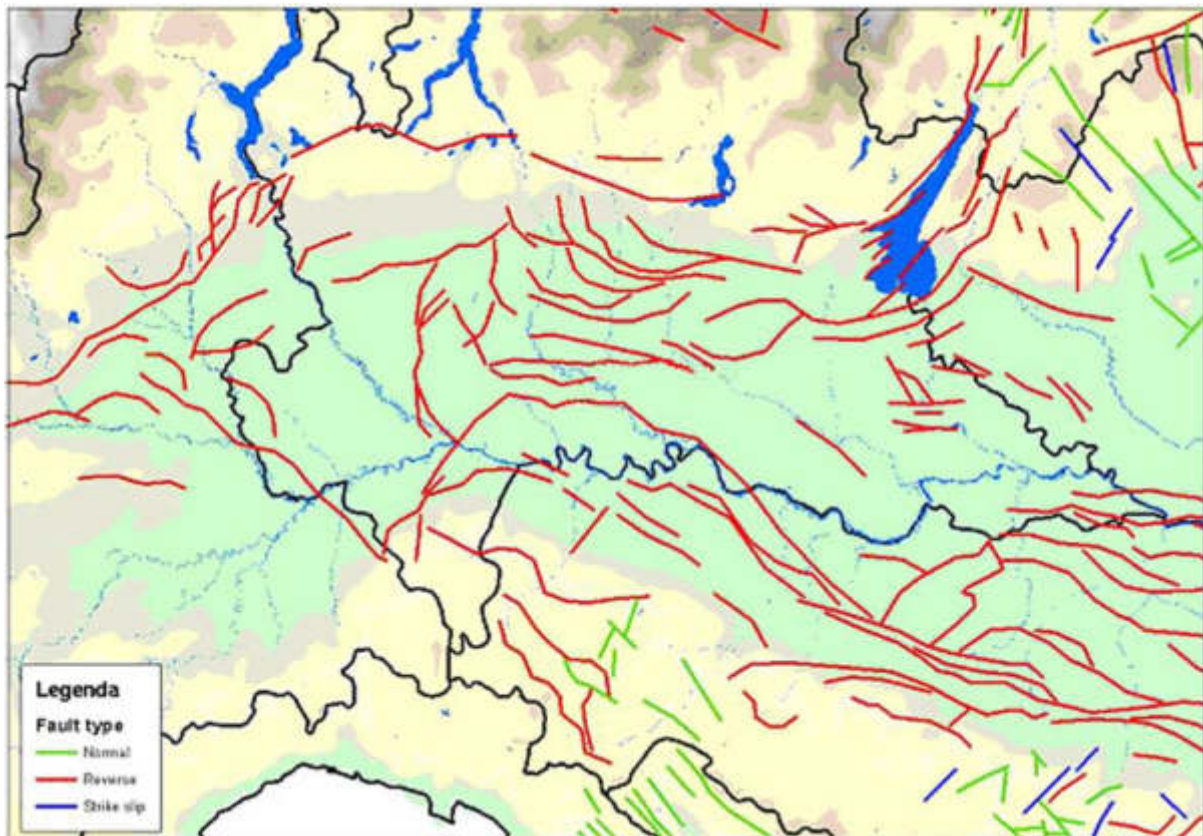


Figura 7: Quadro sismotettonico della Pianura Padana.

5. SISMICITA' E PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE

La sismicità storica del Comune di Lugagnano Val d'Arda è congrua con il quadro sismotettonico descritto nel precedente Capitolo. Le informazioni ad essa relative sono state desunte dal Catalogo Parametrico dei Terremoti italiani, redatto grazie all'INGV dal Gruppo di lavoro CPTI nel 2015 (**CPTI-15**), che elenca tutti i terremoti avvenuti dal 1000 al 2014.

La versione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI15 rappresenta una significativa evoluzione rispetto alle versioni precedenti, che sono quindi da considerare del tutto superate. Anche se i criteri generali di compilazione e la struttura sono gli stessi della precedente versione CPTI11, il contenuto del catalogo è stato ampiamente rivisto per quanto concerne:

- la copertura temporale, estesa dal 2006 a tutto il 2014
- il database macrosismico di riferimento (DBMI15; Locati et al., 2016), significativamente aggiornato
- i dati strumentali considerati, nuovi e/o aggiornati
- le soglie di ingresso dei terremoti, abbassate a intensità massima 5 o magnitudo 4.0 (invece di 5-6 e 4.5 rispettivamente)
- la determinazione dei parametri macrosismici, basata su una nuova calibrazione dell'algoritmo Boxer
- le magnitudo strumentali, che comprendono un nuovo set di dati e nuove relazioni di conversione.

I terremoti più prossimi all'area di Lugagnano Val d'Arda (frazione di Prato Ottesola), estratti da questo catalogo, sono elencati nella Tabella 1 in ordine decrescente di Magnitudo (M_w) con epicentro a distanza inferiore ai 40 km dall'area di studio (**Lat. 44.828990, Long. 9.798786**) e indicati nella mappa riportata in **Fig. 8**.

La sismicità è classificabile come media e la dimostrazione ci viene fornita dalle osservazioni storiche, dove gli unici eventi di rilievo di Magnitudo superiore a 5 ubicati nelle vicinanze di Lugagnano Val d'Arda sono 7 e riportati in tabella (**Tab. 1**). Come è possibile osservare nella mappa in *fig 8*, i terremoti sono prevalentemente ubicati nel Piacentino, Parmense, Val Taro ed Emilia Occidentale.

L'attività sismica storica e strumentale si presume legata a singole e limitate strutture sepolte (*thrusts* o elementi di svincolo trasversale di lunghezza ≤ 10 Km) appartenenti all'arco pavese ed al prospiciente arco alpino.

Uffici: Via Carlo Fioruzzi, 15 – 29121 Piacenza (tel. 0523/454042) cell.:+335/6176390 - P.IVA:01177410337

E-mail: andrea.carpena@georeflex.it – (Iscriz. Albo Professionale Geologi Emilia Romagna n. 636 dal 1992)

Year	EpicentralArea	Lat	Lon	Imax	Io	Mw
1438	Parmense	44,844	10,239	8	8	5,56
1522	Pianura Padana	44,982	10,05	5	5	4,71
1545	Val di Taro	44,473	9,825	7-8	7-8	5,38
1586	Parmense	44,866	10,061	5	5	4,16
1738	Emilia occidentale	44,906	10,028	7	7	5,1
1829	Cremona	45,135	10,023	6-7	5-6	4,4
1834	Val di Taro-Lunigiana	44,531	9,948	7	6-7	5,08
1835	Val di Taro	44,488	9,767	5	5	4,16
1906	Parmense	44,812	10,079	5	5	4,25
1910	Piacentino	44,857	9,659	5	5	4,39
1912	Piacenza	45,052	9,693	5	4	3,7
1913	Val Trebbia	44,895	9,327	5	4-5	4,24
1921	Val di Taro	44,634	9,703	5	4	4,15
1927	Alta Val di Taro	44,52	9,59	6	6	4,66
1928	Alta Val di Taro	44,508	9,587	6	6	4,71
1940	Appennino emiliano	44,8	10,3	F		
1940	Parmense	44,8	10,183			
1954	Appennino piacentino	44,648	9,585	5	4	3,7
1955	Parmense	44,798	10,173	5	5	4,15
1961	Parmense	44,739	10,229	5-6	5-6	4,37
1961	Parmense	44,812	10,153	5-6	5-6	4,47
1969	Parmense	44,731	10,139	5-6	5	4,19
1972	Appennino settentrionale	44,503	9,865	5	5	4,85
1973	Appennino piacentino	44,672	9,479			
1974	Alta Val di Taro	44,559	9,748	6	5	4,14
1975	Appennino piacentino	44,659	9,626	5-6	5-6	4,73
1975	Appennino piacentino	44,749	9,519	5-6	4-5	4,65
1976	Alta Val di Taro	44,499	9,762	5	5	4,51
1980	Piacentino	44,808	9,787	6-7	6-7	5,06
1983	Parmense	44,755	10,265	7	6-7	5,14
1985	Appennino parmense	44,558	9,672	5-6	5-6	4,4
1985	Appennino parmense	44,608	9,616	5-6	5-6	4,4
1985	Appennino parmense	44,565	9,659	6	5	4,16
1985	Appennino parmense	44,605	9,63	7	7	5,04
1986	Appennino parmense	44,596	9,624	6	5	4,16
1988	Alta Val di Taro	44,475	9,854			
1991	Emilia occidentale	44,939	9,997	5-6	5	4,17
2005	Valle del Trebbia	44,724	9,348	4	4	3,96
2007	Pianura emiliana	44,898	10,003			
2009	Piacentino	44,814	9,772			
2012	Appennino parmense	44,523	10,009			
2012	Piacentino	44,782	9,67			
2017	Parmense	44,66	10,033			
2018	Piacentino	44,823	9,682			

Tabella 1: Sismicità storica nell'area di studio.

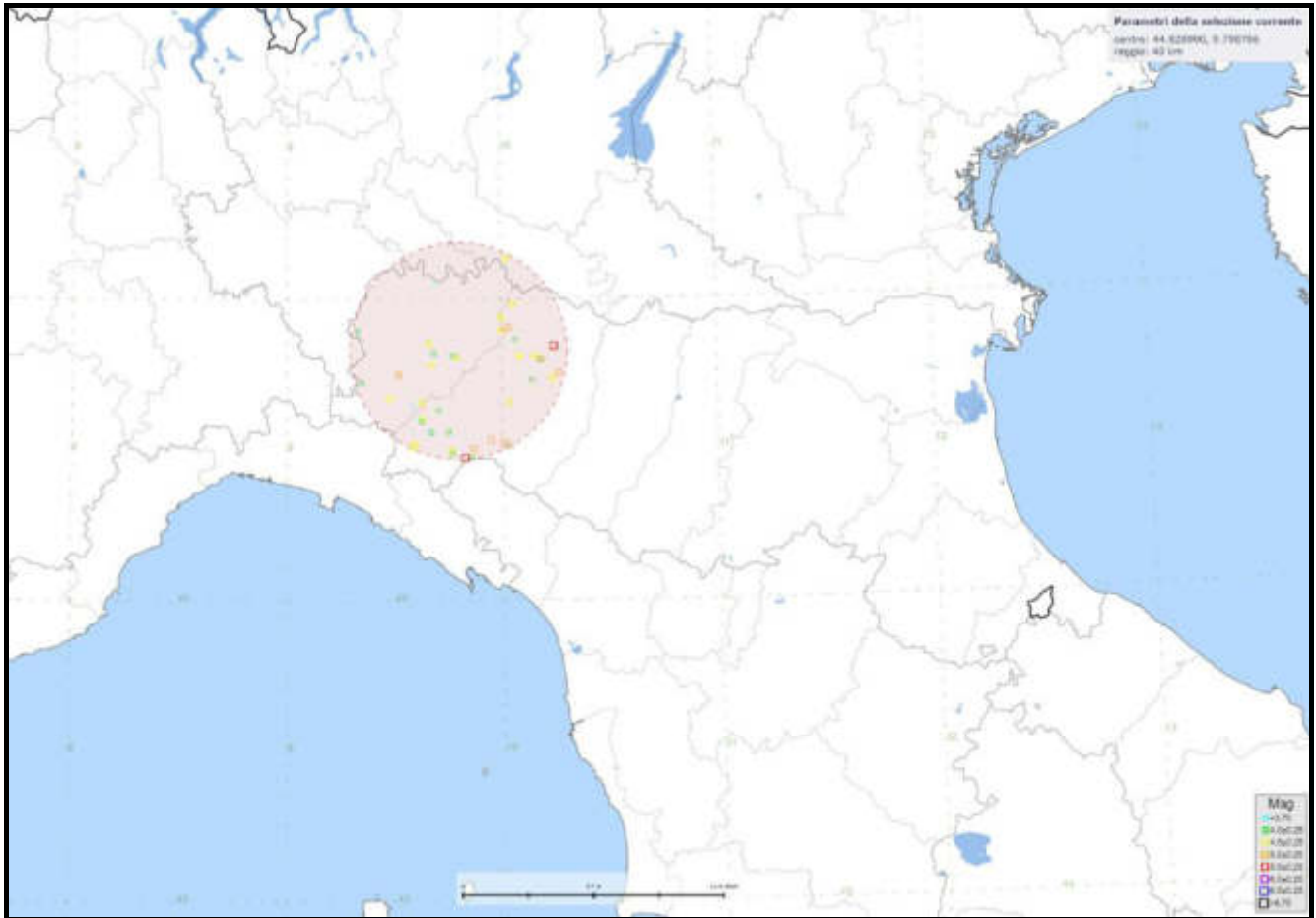


Figura 8: Distribuzione degli eventi sismici estratta dal catalogo parametrico dei terremoti italiani del 2015 (CPTI 15) che mostra gli epicentri dei terremoti più significativi avvenuti nell'area interessata e zone limitrofe.

La più recente Zonazione Sismogenetica realizzata è denominata ZS9 ed è stata elaborata da INGV (Meletti C. e Valensise G., 2004); tale zonazione è stata utilizzata per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica del territorio nazionale.

In generale, le Zone Sismogenetiche (ZS), che vanno dalla 901 alla 910, sono legate all'interazione tettonica Adria-Europa.

Il settore in cui è osservata la massima convergenza tra le placche adriatica ed europea (904-905 e subordinatamente 906) è caratterizzato dalle strutture a pieghe sud – vergenti e dalle faglie inverse associate del Sudalpino orientale e, nelle aree ad est del confine friulano, da faglie trascorrenti destre con direzione NO-SE (**Fig. 9**).

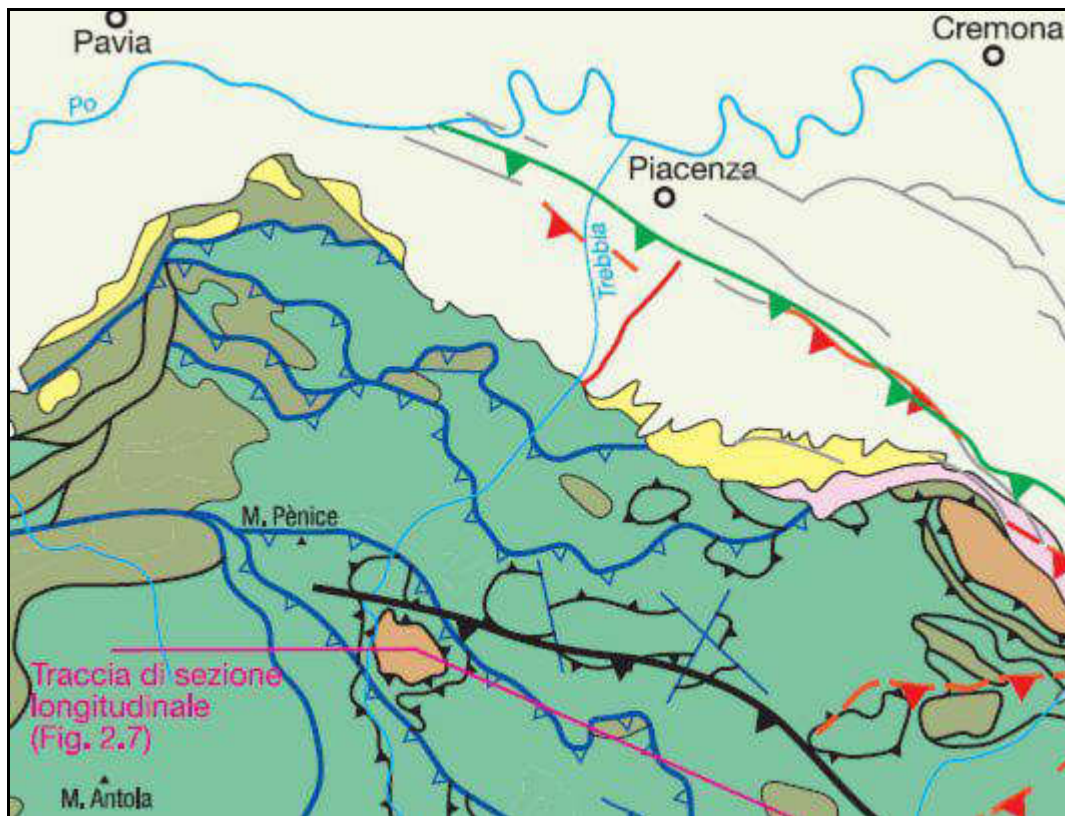


Figura 9: Quadro sismotettonico di dettaglio della Regione Emilia Romagna occidentale.

L'Arco appenninico settentrionale è invece stato organizzato secondo cinque fasce parallele longitudinali alla catena.

L'area, ricadente nel Comune di Lugagnano Val d'Arda, oggetto di studio, ricade nella zona sismogenetica **913 (Fig. 10)**. Tale Zona rappresenta il limite Nord dell'arco appenninico settentrionale, che comprende il cosiddetto "Arco di Pavia" e tutte le strutture ad esso associate, con funzione di svincolo cinematico del sistema tettonico supposto in migrazione verso ovest. Lo smembramento di tale zona nelle diverse zone appenniniche longitudinali è causa di una sismicità di livello non trascurabile.

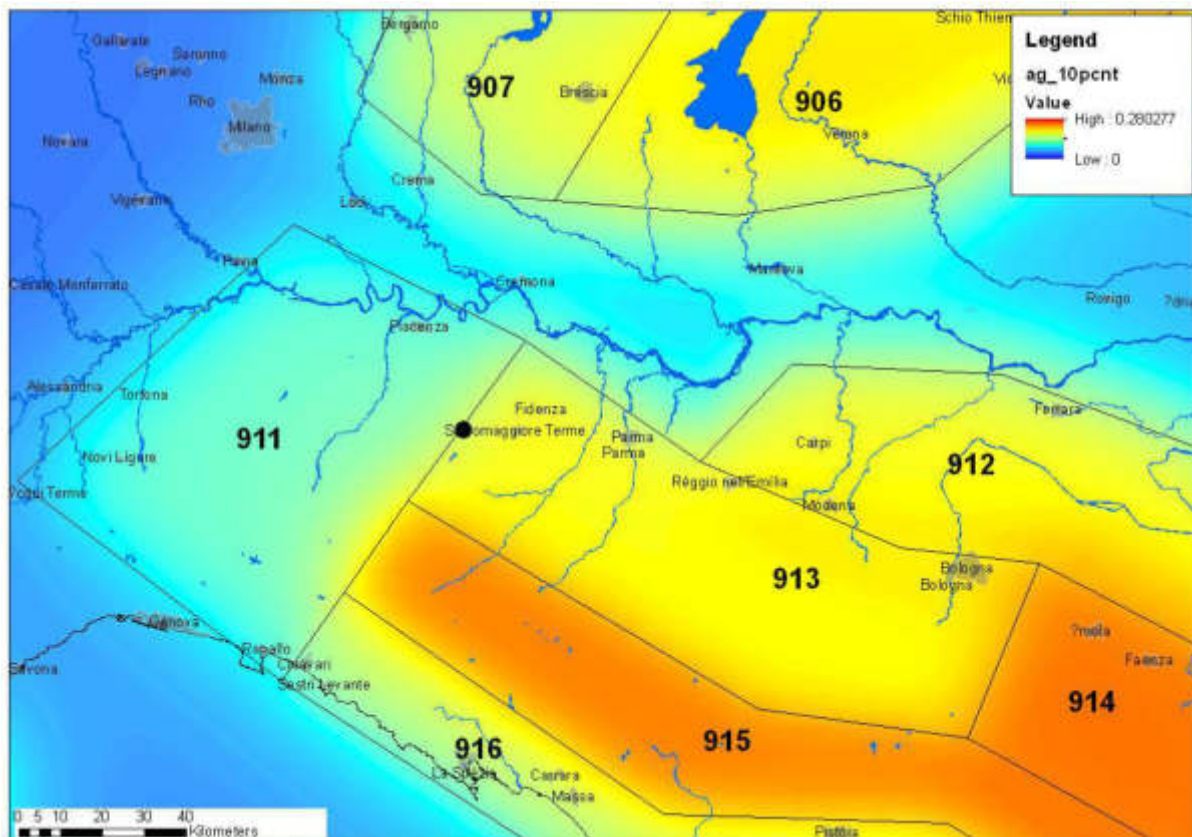


Figura 10: Zonazione sismogenetica ZS9: l'Italia del Nord (da Meletti C. e Valensise G., 2004).

Pericolosità sismica di base

In generale, la valutazione della Pericolosità sismica di un sito si realizza attraverso quattro diverse fasi:

- 1) Identificazione e caratterizzazione di tutte le sorgenti di eventi sismici in grado di produrre uno scuotimento significativo al sito. La caratterizzazione delle sorgenti include la definizione di ogni geometria di sorgente e relativo potenziale sismico.
- 2) Individuazione della distribuzione di probabilità dei terremoti o relazione di ricorrenza delle sorgenti considerate, che specifica il tasso medio di superamento di un terremoto di definita magnitudo.
- 3) Valutazione dello scuotimento del suolo prodotto dagli eventi sismici attraverso le relazioni di attenuazione.
- 4) Combinazione delle incertezze per ottenere la probabilità che un parametro descrittivo dello scuotimento del terreno sia superato in un determinato intervallo temporale.

L'analisi di pericolosità, definita anche **PSHA** (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*), necessita quindi di:

- Sorgenti sismogenetiche
- Cataloghi sismici (storici e/o strumentali)
- Relazioni di attenuazione

Gli effetti di tutti i terremoti di differente magnitudo, a differente distanza, in differenti zone sismogenetiche e a differente probabilità di occorrenza sono integrati nelle curve di pericolosità sismica che mostrano la probabilità di eccedenza di differenti valori di un dato parametro descrittivo dello scuotimento, ad esempio l'accelerazione, durante uno specificato periodo di tempo.

Nuove carte sulla pericolosità sismica sono state recentemente prodotte dall' Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia (INGV); tale cartografia, realizzata per tutto il territorio italiano, si basano quindi su studi accurati che prevedono l'utilizzo dei dati contenuti nel Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI04), delle informazioni relative alla più recente Zonazione Sismogenetica ZS9 e dei relativi modelli cinematici di sviluppo della tettonica crostale, ed infine di una serie relazioni di attenuazione stimate sulla base di misurazioni accelerometriche effettuate sia sul territorio nazionale che europeo.

Il valore del parametro di scuotimento fornito dall'analisi di pericolosità sismica non corrisponde quindi ad un particolare evento ma, deve essere considerato come il prodotto, espresso in termini probabilistici, degli effetti combinati di tutti gli eventi di differente magnitudo e distanza rappresentativi dell'intera storia sismica dell'area in esame.

La carta di riferimento per valutazioni di pericolosità sismica è rappresentata dalla distribuzione probabilistica dell'accelerazione massima al suolo, definita **PGA** (*Peak Ground Acceleration*) ed espressa come frazione dell'accelerazione di gravità "g", pari a **9,81 m/sec²**.

La carta che riveste una particolare importanza dal punto di vista progettuale è quella in cui il valore di PGA è caratterizzato da tempi di ritorno di 475 anni, corrispondente ad una probabilità di accadimento del 10% in 50 anni (**Fig. 11**).

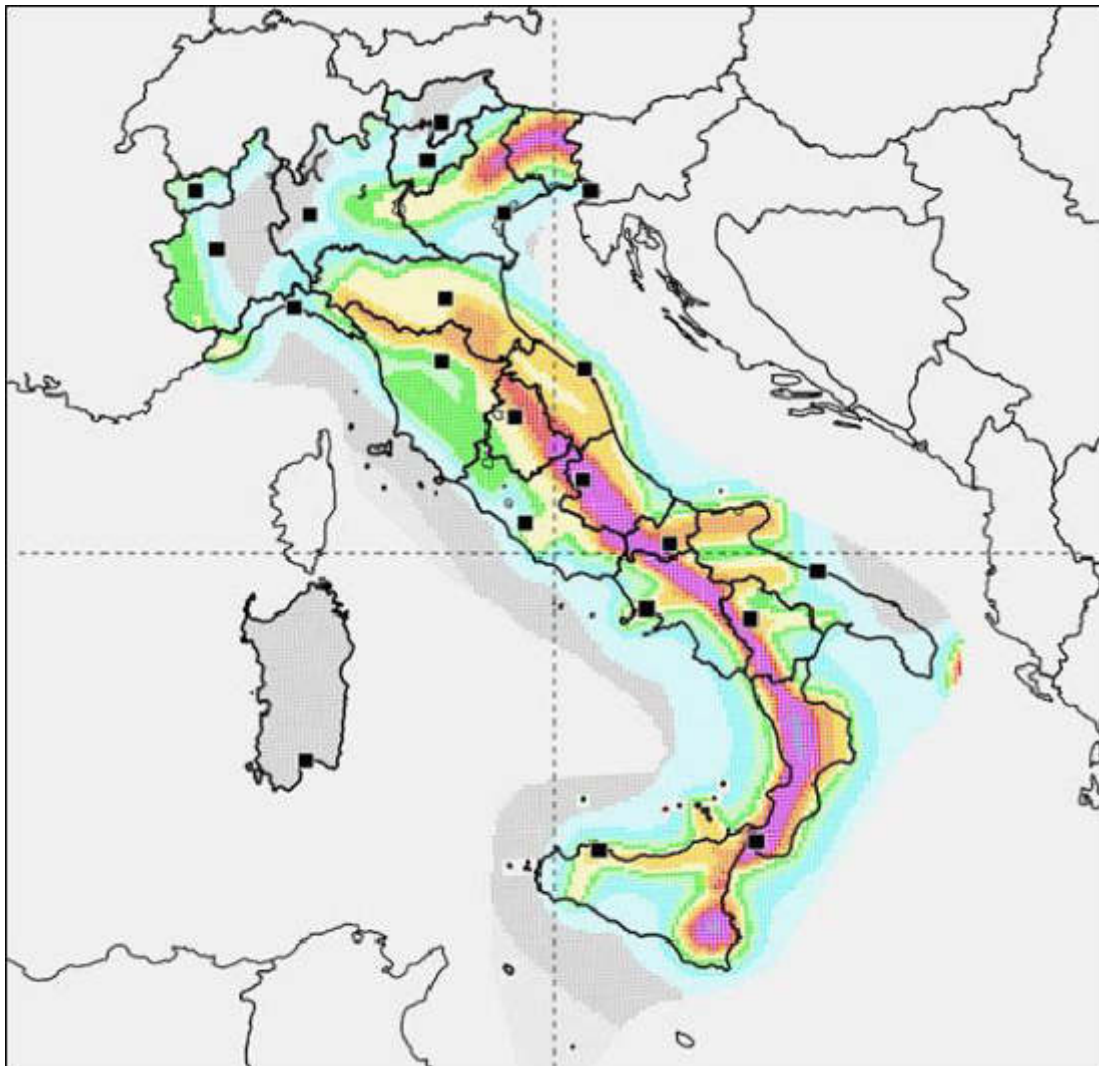


Fig. 11 – Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in accelerazione massima riferita a suoli rigidi ($V_s > 800$ m/sec; Cat. A) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

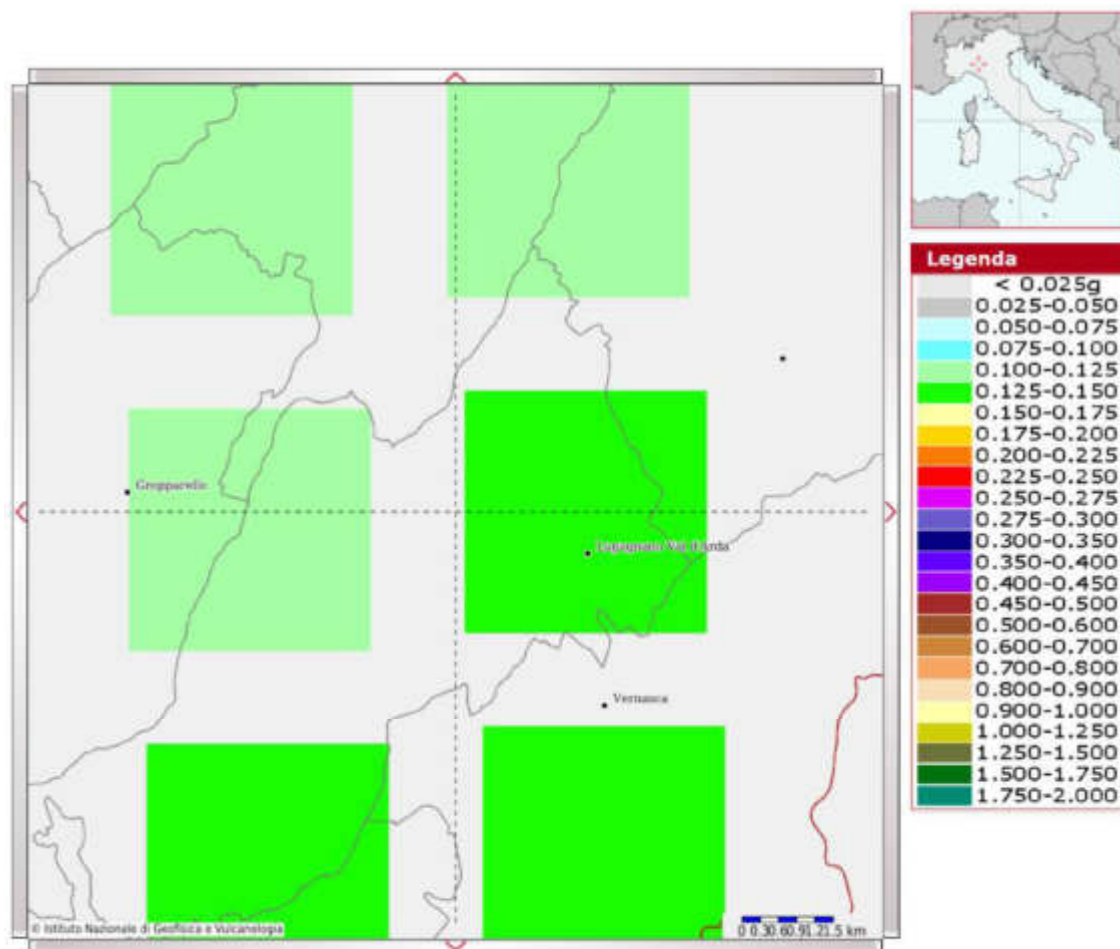


Fig. 12 – Estratto della mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (centrata nelle coordinate del sito oggetto di studio).

Il sito, oggetto di studio, ricadente nel Comune di Lugagnano Val d'Arda, ricade nelle immediate vicinanze di un nodo della griglia di riferimento con valori di **a_g** compresi tra **0,125g** e **0,150g**.

Occorre tuttavia sottolineare che i valori di accelerazione massima vengono riferiti a suoli rigidi ($V_s > 800$ m/sec; Cat. A); per tale motivo, le carte di pericolosità sismica non tengono conto dei possibili fenomeni di amplificazione dovuti a condizioni geologiche locali, che sono invece oggetto delle analisi di risposta sismica locale (RSL).

Sulla base della documentazione allegata al Nuovo Testo Unico 2018, si riportano di seguito i valori dei parametri a_g , F_0 , T_c^* (sito riferiti) per i periodi di ritorno T_R di riferimento, dove:

a_g = accelerazione orizzontale massima;

F_0 = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

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

Risultati NTC 2018 (PSHA)	
50	Periodo di riferimento
474.56107	"Periodo di ritorno"
0.1252	A_g (in unità g)
2.5056	F_0
0.2857	T_c^*

6. ANALISI DEI MICROTREMORI

6.1 Descrizione del metodo

La determinazione delle Vs30 risulta essere fondamentale per la definizione dei suoli secondo l'inquadramento della nuova normativa tecnica in materia di progettazione antisismica.

Per tale valutazione, oltre alla sismica in foro (downhole e crosshole) ed alla sismica di superficie (rifrazione e riflessione ad onde S) metodi alternativi di modellazione del sottosuolo basati sull'analisi delle onde superficiali (Rayleigh) hanno assunto importanza progressivamente crescente negli ultimi anni.

Tra le varie tecniche disponibili, l'analisi dei microtremori risulta essere particolarmente soddisfacente sia dal punto di vista dei risultati che dal punto di vista economico, essendo realizzabile con procedure operative molto simili a quelle impiegate per la sismica di superficie convenzionale.

Nel caso specifico tuttavia i tempi di registrazione dei files sismici devono essere necessariamente più lunghi, generalmente non inferiori ai 15 secondi.

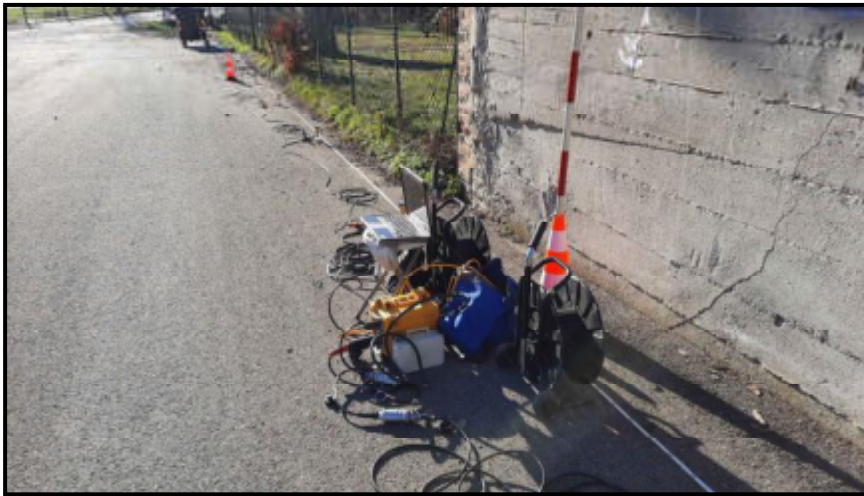
Le geometrie e la strumentazione di acquisizione devono essere in grado di fornire informazioni sulle onde di superficie internamente ad una banda di frequenza che va dai 2 ai 40 Hz circa.

L'elaborazione del segnale consiste nel trasformare le registrazioni effettuate in spettri bidimensionali di tipo "*slowness-frequency*" che permettono, attraverso un *picking* manuale, la definizione di una curva di dispersione caratteristica del moto sismico in superficie, strettamente correlata ai valori Vs relativi ai terreni prossimi alla superficie.

L'inversione di questa curva consente di ricostruire l'andamento delle velocità delle onde S con la profondità, da cui poi risulta agevole determinare le Vs30.

Il software con cui è stato realizzato questo tipo di elaborazione è denominato **ReMi** e viene prodotto dalla Optim LLC (Reno, Nevada, USA).

6.2 Strumentazione e criteri di acquisizione



Per l'acquisizione sismica è stato impiegato un sismografo a 24 canali (**GEODE**) facente parte della gamma dei prodotti Geometrics Ltd; questo strumento è dotato di un convertitore analogico-digitale a 24

bit che permette intervalli di campionamento estremamente ridotti (da 0.02 ms a 16 ms), di un *range* dinamico di sistema di ben 144 dB e di un'ampia banda di ingresso (da 1.75 Hz a 20 kHz), in grado di riprodurre in modo molto accurato il segnale sismico.



I sensori disposti sul terreno sono geofoni caratterizzati da una frequenza di smorzamento di 4.5 Hz. La geometria di acquisizione in campagna è stata realizzata mediante l'allineamento di nr. 24 geofoni con spaziatura costante pari a 3.0 metri.

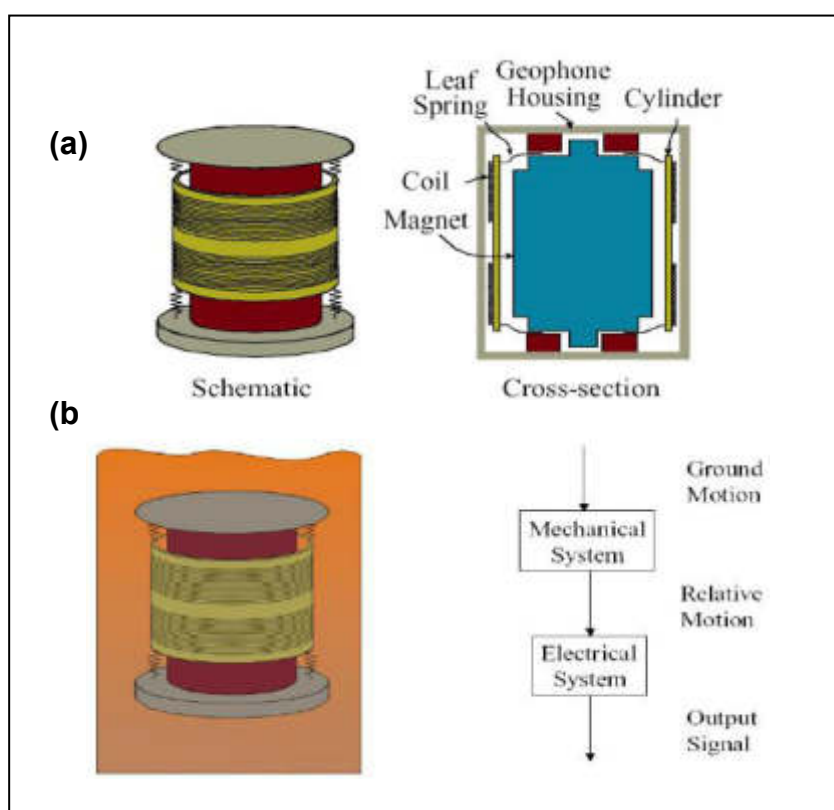


Figura 13: Schema funzionamento geofoni rilevatori.

6.3 Elaborazione dati

I dati, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (SEG-Y) con il software **ReMi** impiegato per l'elaborazione.

Ciascuna delle registrazioni effettuate, è stata convertita in uno spettro *frequency-slowness*, sul quale è stata interpretata la curva di dispersione relativa alle componenti in frequenza dei tremori alla quale è sottoposto il sottosuolo del sito in esame.

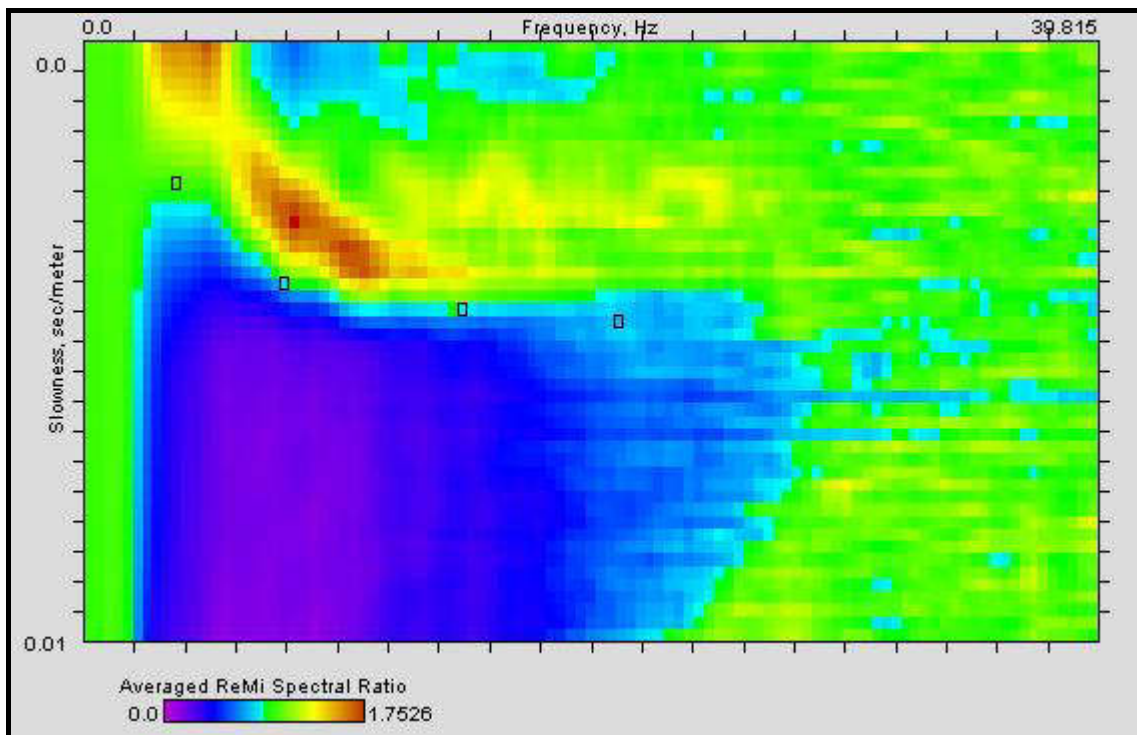


Figura 14: Grafico illustrante un esempio di spettro di tipo “frequency-slowness” e picking della curva di dispersione.

L'inversione della curva di dispersione, ha consentito la valutazione dell'andamento delle Vs con buona affidabilità fino a circa 40 metri di profondità.

Uffici: Via Carlo Fioruzzi, 15 – 29121 Piacenza (tel. 0523/454042) cell.:+335/6176390 - P.IVA:01177410337

E-mail: andrea.carpena@georeflex.it – (Iscriz. Albo Professionale Geologi Emilia Romagna n. 636 dal 1992)

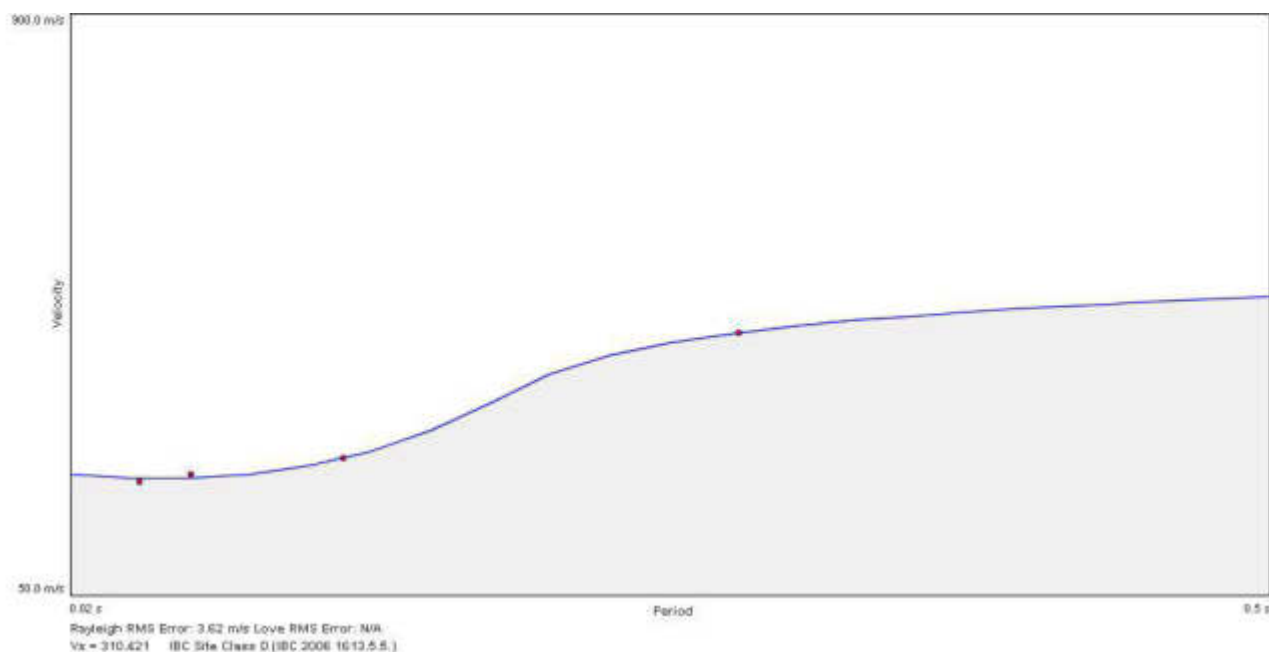
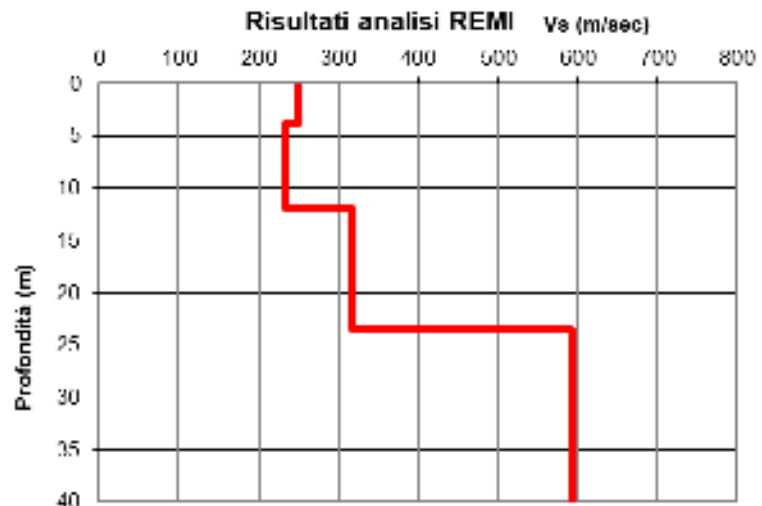


Figura 15: Grafico illustrante i risultati dell'inversione della curva di dispersione stimata.

7. CALCOLO DELLE V_{s30}

Per il calcolo delle $V_{s,eq}$, sulla base dei dati ottenuti dalle indagini dei microtremori (ReMI), è stata impiegata la formula riportata nel D.M. del 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” così di seguito enunciata:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$



con:

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i-esimo per un totale di N strati.

NOTA: per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 metri, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità. In tal caso è stato infatti considerato un $H=30$ metri.

Strato	Spessore	Velocità
(n)	(m)	(m/sec)
1	4	251
2	8	234
3	12	317
4	17	593

$$V_{s,eq H} = 308 \text{ m/sec}$$

8. CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SUOLO DI FONDAZIONE

Il Territorio nazionale è stato suddiviso in quattro zone sismiche, ognuna caratterizzata da un diverso valore di accelerazione orizzontale massima a_g riferita al *bedrock* sismico, espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g ($9,81 \text{ m/sec}^2$) e caratterizzata da una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. I valori di a_g per ciascuna zona sono riportati nella seguente tabella:

Zona	Valore di a_g
1	0,35g
2	0,25g
3	0,15g
4	0,05g

* E' tuttavia doveroso ricordare che, sulla base di quanto contenuto nelle ultime NTC2008 tale classificazione non viene più menzionata.

Ai fini dell'applicazione di queste Norme viene inoltre prevista la suddivisione dei suoli di fondazione nelle seguenti categorie:

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Annessi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Sulla base delle analisi precedentemente descritte, per le quali le **V_s (30)** assumono un valore medio di **308 m/sec**, il suolo di fondazione dell'area di studio ricade nella categoria di tipo **C**.

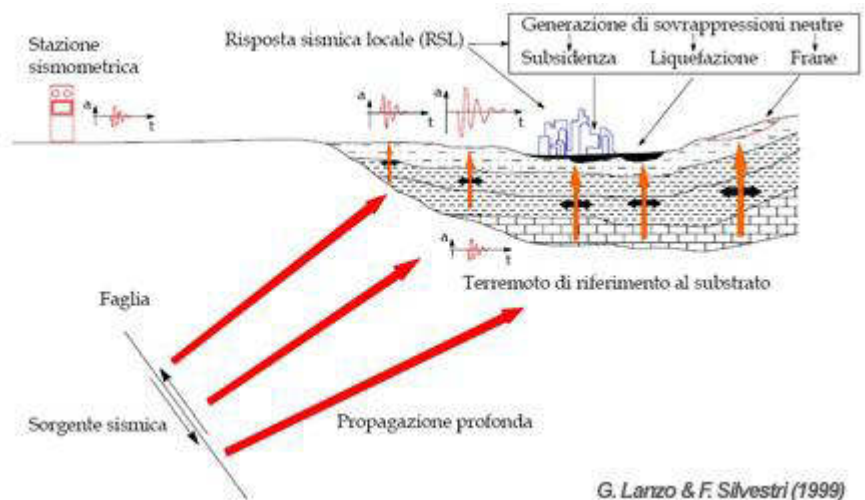
L'area di studio, facente parte del Comune di Lugagnano Val d'Arda, ricade quindi nella Zona sismica 3 [come da Delibera di Giunta Regionale nr. 1164 del 23 luglio 2018] ed è caratterizzata da un suolo di tipo C.

9. ANALISI TROMOGRAFICA

9.1 Breve introduzione amplificazione di sito

L'andamento delle velocità di propagazione delle onde di taglio nel primo sottosuolo (profilo delle Vs) rappresenta in generale un'informazione importante ai fini della caratterizzazione meccanica (in campo dinamico) dei terreni. In particolare essa risulta fondamentale negli studi della risposta

sismica locale. A seguito di un terremoto, si ha spesso modo di osservare come la distribuzione dei danni sul territorio sia assai eterogenea a parità di vulnerabilità



G. Lanzo & F. Silvestri (1999)

dell'edificato. Le condizioni geologico-tecniche degli strati più superficiali, nonché le caratteristiche geomorfologiche possono concorrere, infatti, ad accrescere localmente lo scuotimento indotto da un terremoto. Per un'efficace azione di prevenzione, in materia di rischio sismico, è necessario tener conto non solo, quindi, della zonazione sismica nazionale, ma anche di eventuali sfavorevoli condizioni locali, a scala intra-comunale.

Particolarmente rilevanti sono i cosiddetti *effetti di amplificazione di sito*, ossia l'insieme delle variazioni in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, rispetto ad una formazione rocciosa di base, subisce attraversando gli strati sovrastanti, fino alla superficie. Tali effetti sono causati, essenzialmente, da un processo di intrappolamento e risonanza dell'energia del terremoto all'interno di un volume di sottosuolo costituito da materiali sedimentari a bassa impedenza sismica (**IS**: *prodotto della velocità di propagazione dell'onda per la densità del mezzo attraversato*) e posto sopra ad un dominio con più alta IS, per esempio un substrato roccioso o un suolo particolarmente rigido.

Durante la propagazione dalla sorgente al sito, il raggio sismico, per via del fenomeno della rifrazione, subisce un processo di verticalizzazione e tende ad emergere lungo una direzione sub-verticale. Le onde compressionali (**P**), dunque, sollecitano all'incirca verticalmente l'edificio, tuttavia è la sollecitazione orizzontale, dovuta alle onde trasversali (**S**), la causa principale del danneggiamento per le costruzioni. Gli edifici e le opere architettoniche in genere sono collaudate per resistere a forti carichi statici, ma quasi mai viene valutata la risposta della costruzione a carichi dinamici orizzontali. Da quanto detto si deduce che studiare le modalità di propagazione ed amplificazione delle onde trasversali o di taglio (**S**) nel sottosuolo vuol dire prevedere, a basso costo, le sollecitazioni che una struttura dovrà sopportare durante il verificarsi di un probabile evento sismico. Tra le metodologie che consentono di ricavare il profilo Vs del sottosuolo stanno suscitando particolare interesse quelle definite di tipo “passivo” ovvero basate sullo studio della continua vibrazione del suolo dovuta a cause sia antropiche che naturali (*Vibrazioni Ambientali*). Tali tecniche consentono di misurare le velocità di propagazione delle onde sismiche già presenti nel terreno per effetto di sorgenti naturali (p.es. il vento e le mareggiate) o antropiche (es. il traffico cittadino e l'attività industriale). A parità di caratteristiche degli stendimenti e dei sensori, le metodologie di tipo “passivo” raggiungono profondità di esplorazione di gran lunga superiori a qualsiasi altra tecnica sismica. Le più comuni tecniche “attive”, infatti, (quali la rifrazione e la riflessione) non sono in grado di indagare spessori di terreno superiori a qualche decina di metri. Quanto detto dipende dal fatto che, questa tipologia di indagini, registra le velocità di propagazione dei segnali generati artificialmente da sorgenti controllate a bassa energia (colpo di martello per esempio) che non garantiscono una penetrazione delle onde nel sottosuolo tale da giustificare profondità d'esplorazione superiori a quelle precedentemente indicate.

Al contrario le metodologie “passive”, sfruttando sorgenti energeticamente importanti, oltre ad essere caratterizzate da profondità di esplorazione dell'ordine delle centinaia di metri, sono particolarmente adatte ad essere applicate in aree urbane, poiché sfruttando quella porzione di segnale che gli altri metodi geofisici scartano, difficilmente soffrono per un basso rapporto tra segnale e rumore.

Se da un lato, quindi, le tecniche “passive” dimostrano numerosi vantaggi applicativi, d’altro canto il fatto che le sorgenti non siano note e controllate comporta una inferiore precisione delle misure che si traduce in notevoli ambiguità in fase di elaborazione dati. Le registrazioni di Vibrazioni Ambientali sono caratterizzate spesso da forti incertezze e si dimostrano efficaci nel momento in cui si parte almeno da una sommaria conoscenza delle litologie in esame che permetta di scartare i risultati più improbabili. In quest’ottica, tuttavia questi metodi sono applicazioni molto potenti poiché consentono di caratterizzare in tempi brevi e costi relativamente contenuti, non solo grandi spessori di sottosuolo, ma anche estese aree in pianta.

9.2 Descrizione del metodo HVSR

Di seguito vengono esposti i principi teorici delle due principali tecniche di acquisizione dati di Vibrazioni Ambientali (HVSR).

Accanto alle tecniche basate sull’impiego di una antenna sismica, esistono altre tecniche basate sull’uso di una singola stazione di misura. In questo caso vengono misurate le vibrazioni ambientali nelle tre direzioni dello spazio attraverso un unico sensore tri-direzionale posto sulla superficie del terreno. In particolare viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “**Horizontal to Vertical Spectral Ratios**”) [Bard., 1998]. Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno. In particolare è possibile individuare la frequenza **f** di questa vibrazione definita di “Risonanza”. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra **f**, lo **spessore della parte più soffice del terreno e la velocità media delle onde sismiche nel sottosuolo** (ricavata per esempio dai metodi MSW e/o REMI), attraverso le misure **HVSR** è possibile risalire allo spessore di questo strato. Il massimo picco della curva HVSR indica la frequenza fondamentale di risonanza del sito.

Questa tipologia di misure può contribuire, inoltre, a ridurre la variabilità dovuta alla non unicità della soluzione del problema inverso realizzando una procedura d’inversione congiunta della curva di dispersione ricavata con le antenne sismiche e della curva HVSR [Pileggi et al., 2011].

9.3 Strumentazione impiegata ed elaborazione dati



Per le misure **HVSR** è stato impiegato un tromografo digitale modello Echo Tromo HVS3 (Ambrogeo).

Il Tromometro digitale (Tromino) è costituito da una centralina ed un geofono a tre componenti (velocimetri) per la registrazione dei microtremori ambientali nell'intervallo di

frequenze compreso fra 0.1 e 200 Hz.

Tale strumento è inoltre dotato di bussola per orientare l'apparato di registrazione affinché il suo asse maggiore sia parallelo alla direzione N-S (nel caso di misure all'aperto destinate allo studio delle successioni stratigrafiche) oppure parallelo all'asse principale degli edifici (nel caso di misure finalizzate alla stima delle frequenze di risonanza di infrastrutture – DIN4150).

Nel ns caso abbiamo applicato la disposizione: asse maggiore parallelo alla direzione N-S.

I dati di vibrazioni ambientali, acquisiti con questa tecnica d'indagine sono stati successivamente elaborati con il software "Geopsy" basato sul progetto **SESAME** (*Site Effects Assesment using Ambient Excitations*). Tale progetto europeo si è infatti occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle



misure di microtremore ambientale in stazione singola ed *array*. Esso ha anche fornito dei criteri per valutare la bontà delle curve HVSR e la significatività dei picchi H/V eventualmente trovati.

9.4 Calcolo della frequenza naturale di sito

I dati acquisiti sono stati elaborati, come appena sopra detto, attraverso l'impiego di un software specifico (*Geopsy*) che consente di analizzare le misure in sito per il calcolo della curva H/V sperimentale e quindi le frequenze di risonanza sperimentali del sito.

Sul grafico del segnale nel dominio del tempo sono visualizzate graficamente le finestre temporali sulle quali il programma *Geopsy* esegue in automatico l'elaborazione; vengono scartati i transienti più importanti. Al termine dell'elaborazione *Geopsy* mostra il grafico della curva H/V risultante e colora in modo diverso ogni finestra temporale selezionata.

La curva H/V, detta di ellitticità, rappresenta il rapporto spettrale tra il segnale delle componenti orizzontali e quello della componente verticale.

La curva nera continua rappresenta il rapporto H/V medio, mentre le curve nere tratteggiate, dette "curve di confidenza", sono il risultato della moltiplicazione (curva superiore) e divisione (curva inferiore) dei valori del rapporto H/V medio per la deviazione standard dei valori delle singole curve H/V.

Le curve colorate sono i rapporti H/V delle singole finestre; grazie al colore è possibile associare ogni curva alla corrispondente finestra temporale.

Le due bande grigie identificano la frequenza principale, o f_0 , individuata automaticamente dal programma. La f_0 del rapporto medio è esattamente al centro delle due bande, mentre l'area coperta dalle bande è ottenuta aggiungendo e sottraendo alla f_0 del rapporto medio la deviazione standard delle f_0 delle singole curve.

9.5 INDAGINE TROMOGRAFICA HVSR1

	ID	Name	Component	Time reference	Start time	End time	Sampling frequency	dt	N samples	Duration	Rec x	Rec y	Rec z	Type
1	1	R001	Vertical	11/01/2022 00:00:00	16h15m	16h35m	155	0.006451612903	186000	20m	0	0	0	Waveform
2	2	R001	North	11/01/2022 00:00:00	16h15m	16h35m	155	0.006451612903	186000	20m	0	0	0	Waveform
3	3	R001	East	11/01/2022 00:00:00	16h15m	16h35m	155	0.006451612903	186000	20m	0	0	0	Waveform

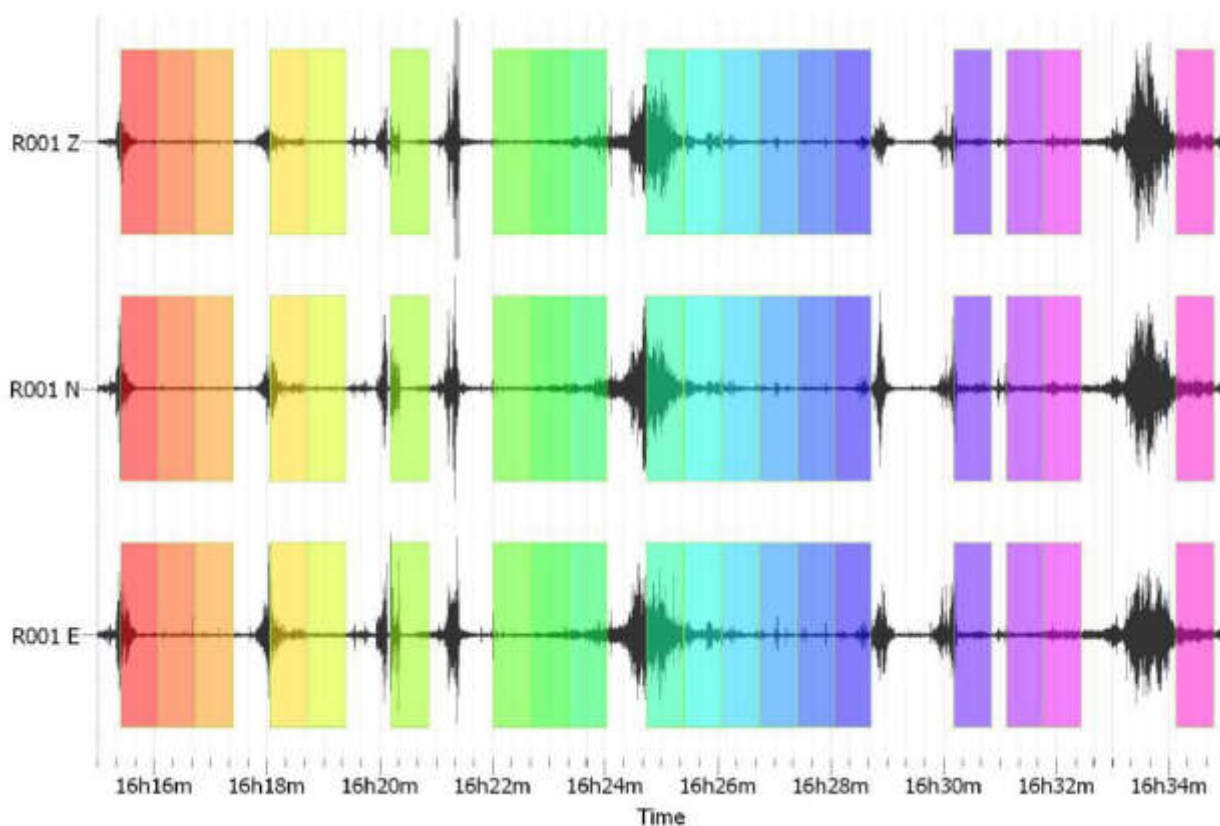


Figura 16: Grafico del segnale nel dominio del tempo.

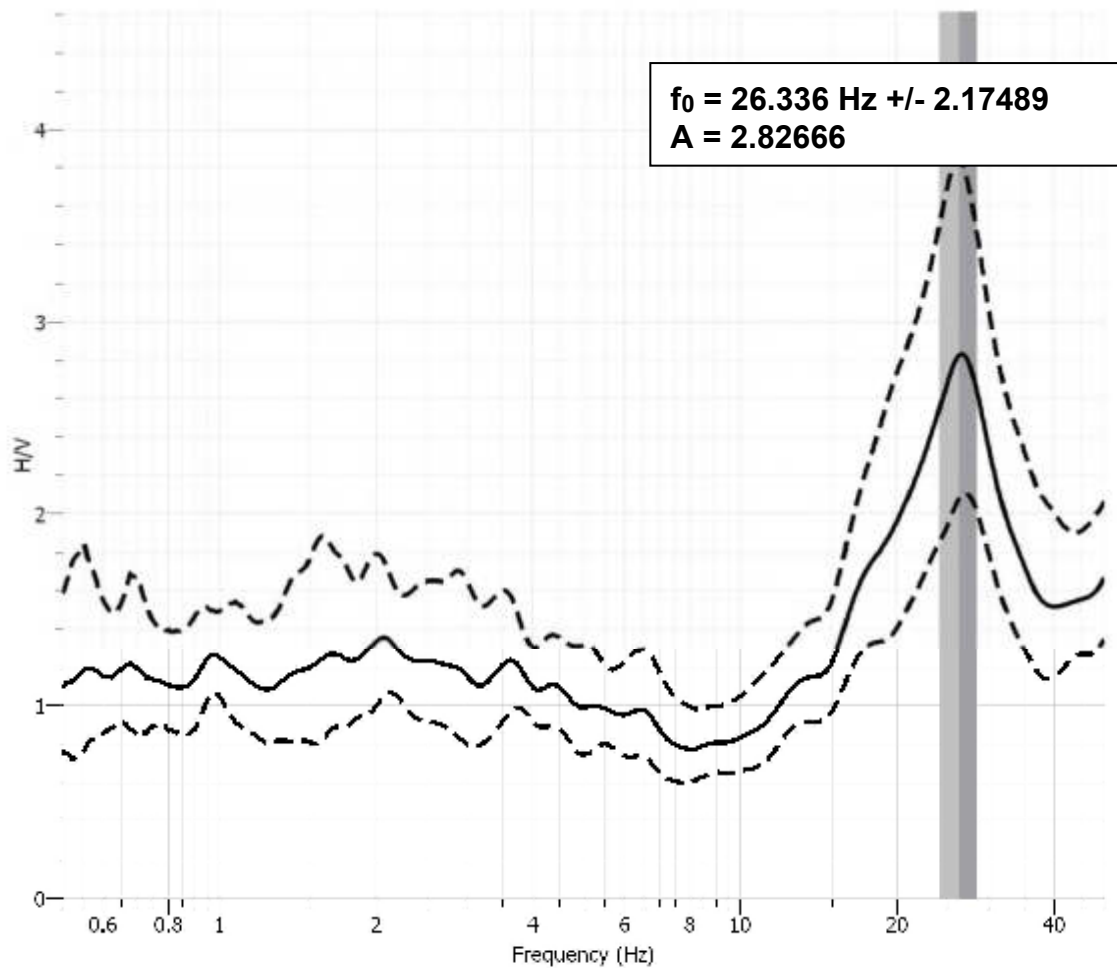


Figura 17: Curva H/V risultante (Geopsy).

La frequenza caratteristica di risonanza del sito risulta generata dalla discontinuità sismica localizzata alle medio-alte frequenze ($f_0 = 26.336 \text{ Hz} \pm 2.17489$) e presumibilmente associabile al contatto copertura-substrato.

Nota: la qualità del segnale acquisito è risultata sufficiente per estrapolare, attraverso dedicate calcolazioni del software Geopsy, un'affidabile curva HVSR.

Per concludere, il picco a 26.336 Hz soddisfa tutti i criteri e va pertanto assunto come frequenza fondamentale di risonanza del sito.

10. AZIONE SISMICA

Per valutare se un'opera strutturale è sicura bisogna far riferimento a degli stati limite, che possono verificarsi durante un determinato periodo di riferimento della stessa opera. Quindi per poter stimare l'azione sismica che dovrà essere utilizzata nelle verifiche agli stati limite o nella progettazione, bisognerà stabilire:

- in primo luogo la vita nominale dell'opera, che congiuntamente alla classe d'uso, permette di determinare il **periodo di riferimento**;
- una volta definito il periodo di riferimento e i diversi stati limite da considerare, dopo aver definito le relative probabilità di superamento è possibile stabilire il **periodo di ritorno** associato a ciascun stato limite;
- a questo punto è possibile definire la **pericolosità sismica di base per il sito** interessato alla realizzazione dell'opera, facendo riferimento agli studi condotti sul territorio nazionale dal Gruppo di Lavoro 2004 nell'ambito della convenzione-progetto S1 DPC-INGV 2004-2006 e i cui risultati sono stati promulgati mediante l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) 3519/2006.

Nel DM 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”, il periodo di riferimento – che non può essere inferiore a 35 anni – è dato dalla seguente relazione:

$$V_R = V_N * C_U$$

V_R = periodo di riferimento

V_N = vita nominale

C_U = coefficiente d'uso

La **vita nominale di un'opera strutturale** V_N , secondo le NTC 2018, è definita come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata.

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

caso di studio

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Le NTC 2018 prevedono quattro **classi d'uso** a ciascuna delle quali è associato un valore del coefficiente d'uso:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Il **valore di C_u** varia a seconda della classe d'uso, come indicato nella seguente tabella:

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_u	0,7	1,0	1,5	2,0

Nel caso in esame viene presa in considerazione la **classe d'uso III** a cui è associato il coefficiente d'uso **$C_u = 1.5$** . Ricavati i valori di V_N e C_u , è possibile calcolare il periodo di riferimento V_R , che qui vale: **$V_R = 50 * 1.5 = 75$ anni**.

Le NTC 2018 prendono in considerazione 4 possibili **stati limite (SL)** individuati facendo riferimento alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti: due sono stati limite di esercizio (SLE) e due sono stati limite ultimi (SLU). *Uno stato limite è una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per la quale è stata progettata.*

Gli stati limite di esercizio sono:

- **Stato Limite di Operatività (SLO):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- **Stato Limite di Danno (SLD):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali e orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):** a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):** a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Ad ogni stato limite è associata una **probabilità di superamento PVR**, ovvero la probabilità che, nel periodo di riferimento V_R , si verifichi almeno un evento sismico ($n \geq 1$) di a_g prefissata (a_g = accelerazione orizzontale massima del suolo) avente frequenza media annua di ricorrenza $\lambda = 1/T_R$ (T_R = periodo di ritorno).

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	PVR = 81%
Stato limite di esercizio: danno	SLD	PVR = 63%
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	PVR = 10%
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	PVR = 5%

Fissati V_R e PVR associata ad ogni stato limite, è possibile calcolare il **periodo di ritorno dell'azione sismica T_R** , espresso in anni, mediante l'espressione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1-P_{VR})} \quad (3.1)$$

Poiché è $V_R = 75$ anni, il tempo di ritorno T_R sarà:

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	TR = 45
Stato limite di esercizio: danno	SLD	TR = 75
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	TR = 712
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	TR = 1462

Di seguito si riportano i valori dei parametri riferiti al punto d'indagine.

Stato limite	Tr [anni]	a_g [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	45	0,050	2,491	0,238
SLD	75	0,062	2,504	0,258
SLV	712	0,143	2,524	0,290
SLC	1462	0,179	2,563	0,298

Come sopra detto, a questo punto è possibile definire la **pericolosità sismica di base per il sito** interessato alla realizzazione dell'opera. In particolare, il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono. Per la singola opera o per il singolo sistema geotecnico la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

Per la definizione degli effetti sull'azione sismica legati alla stratigrafia si utilizza un approccio semplificato che si basa sulla definizione delle "categorie di sottosuolo".

Come riportato nel Capitolo 7, sulla base degli esiti dell'indagine ReMI ($V_{seq} = 308$ m/sec), il suolo di fondazione dell'area di studio ricade nella categoria di tipo C.

Per quanto riguarda il contributo derivante dalla morfologia superficiale sull'azione sismica, nel caso in cui la topografia non presenti particolare complessità, è possibile adottare la seguente classificazione:

<i>Categoria</i>	<i>Caratteristiche della superficie topografica</i>
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i \geq 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $i \geq 30^\circ$

Trattandosi di zona sostanzialmente pianeggiante e quindi con inclinazione media inferiore ai 15° , l'area in oggetto (frazione di Prato Ottesola, nel comune di Lugagnano Val d'Arda), ricade nella categoria **T1**, a cui non è attribuibile alcun fenomeno di amplificazione sismica legato alle condizioni topografiche.

Dal punto di vista progettuale, lo spettro di risposta elastico in accelerazione riveste particolare importanza nella definizione delle azioni sismiche da adottare. Esso viene riferito ad uno smorzamento η convenzionale pari al 5% e la sua forma spettrale dipende dai fattori precedentemente citati (pericolosità di base a_g , stratigrafia, topografia, probabilità di superamento nel periodo di riferimento riferiti agli stati limite di progetto).

Stati limite	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	η [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1,5	0,050	2,491	0,238	1,500	1,690	1,000	1,500	1,000	0,134	0,403	1,800	0,075	0,187
SLD	1,5	0,062	2,504	0,258	1,500	1,640	1,000	1,500	1,000	0,141	0,423	1,848	0,093	0,233
SLV	1,5	0,143	2,524	0,290	1,480	1,580	1,000	1,480	1,000	0,153	0,458	2,172	0,212	0,534
SLC	1,5	0,179	2,563	0,298	1,430	1,570	1,000	1,430	1,000	0,156	0,468	2,314	0,255	0,654

dove:

- S_s e C_c sono espressione dell'effetto di amplificazione stratigrafica e dipendono da F_0 (Fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale), dal rapporto a_g/g e da T_c^* (periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale);
- S_T (effetto di amplificazione topografica), varia con il variare delle quattro categorie topografiche: T1: $S_T = 1.0$; T2: $S_T = 1.20$; T3: $S_T = 1.20$; T4: $S_T = 1.40$.
- S è il coefficiente comprendente l'effetto di amplificazione stratigrafica S_s e di amplificazione topografica S_T .

Espressioni dei parametri dipendenti:

$$S = S_s \cdot S_T$$

$$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} \geq 0,55; \eta = 1/q$$

$$T_B = T_C / 3$$

$$T_C = C_c \cdot T_c^*$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6$$

In **Figura 18** vengono riportati gli spettri in accelerazione orizzontale relativi agli stati limite per l'area (frazione di Prato Ottesola) ricadente nel comune di Lugagnano Val d'Arda.

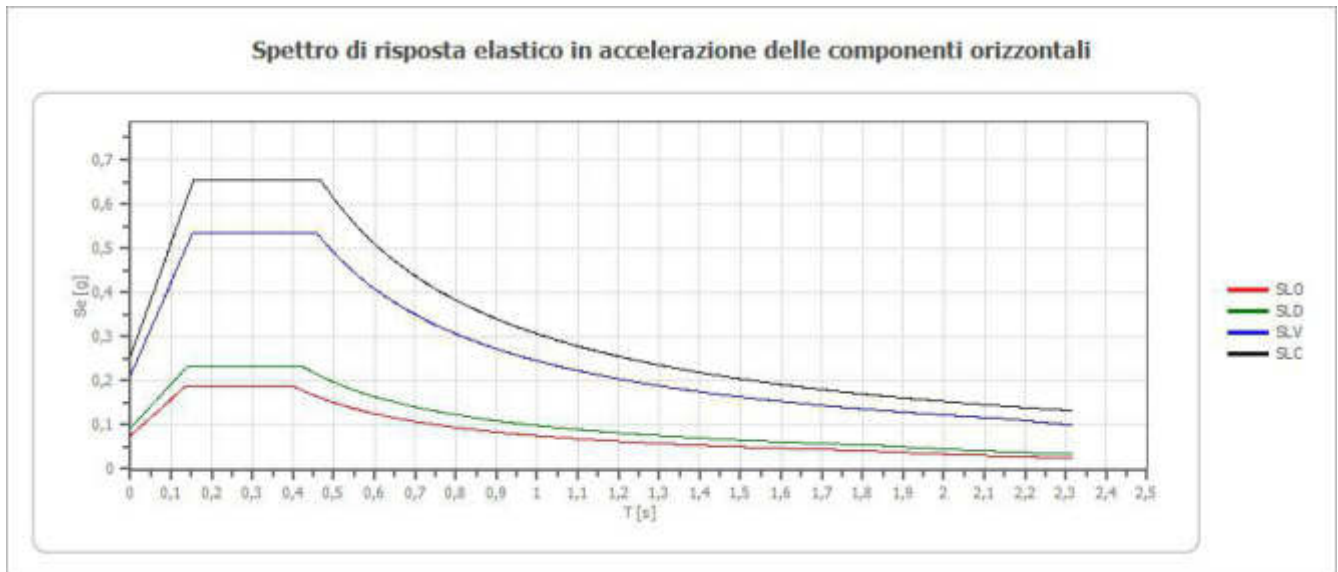


Fig. 18 – Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali.

In riferimento alle caratteristiche di sito sopra descritte e al tipo di opera (riconducibile alla categoria “stabilità dei pendii e fondazioni”), sono stati calcolati anche i coefficienti sismici k_h e k_v , così definiti:

$$k_h = \beta_s \cdot \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \quad (5.2)$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h \quad (5.3)$$

con:

β_s = coefficiente di riduzione dell’accelerazione massima attesa al sito;

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0.2 < a_g(g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g(g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$a_g(g) \leq 0.1$	0.20	0.20

caso di studio

a_{\max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g = accelerazione di gravità.

Spettro di progetto

Fattore di struttura spettro orizzontale q: 1,50
 Fattore di struttura spettro verticale q: 1,50
 Periodo fondamentale T: 1,00 [s]

	SLO	SLD	SLV	SLC
khi = Sde(T) Orizzontale [g]	0,075	0,066	0,163	0,204
k_v = Sdve(T) Verticale [g]	0,006	0,005	0,018	0,026

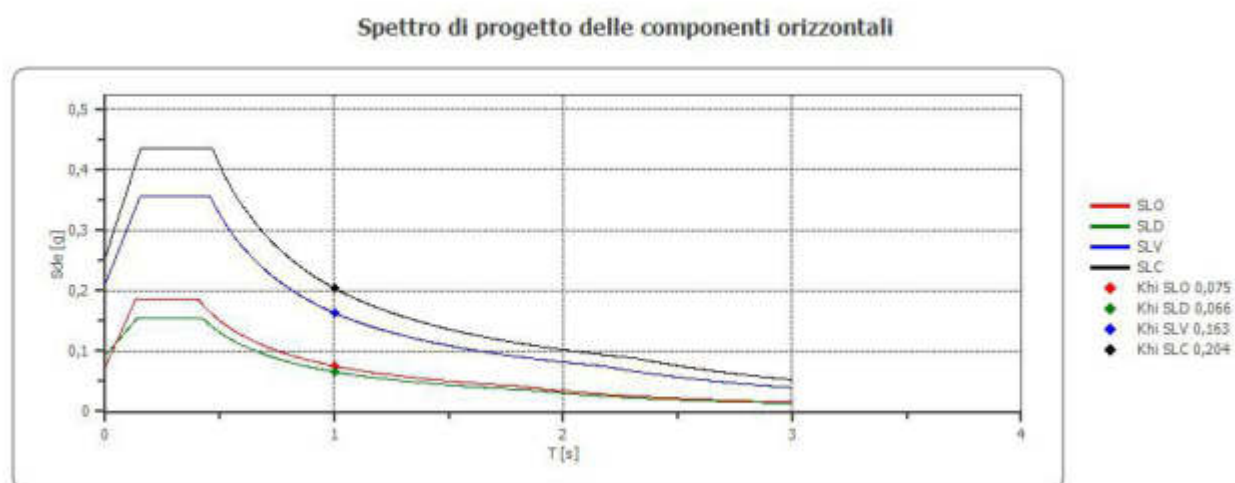


Fig. 19 – Spettro di progetto delle componenti orizzontali.

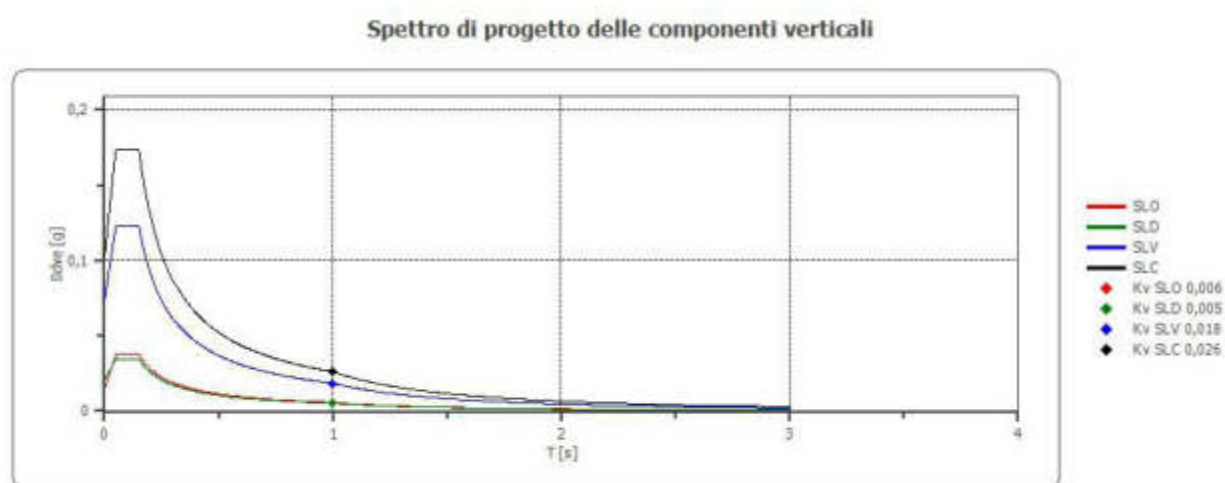


Fig. 20 – Spettro di progetto delle componenti verticali.

	cu	ag	F0	Tc*	Ss	Cc	St	S	q	TB	TC	TD	Sd(0)	Sd(TB)
		[g]	[-]	[s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[s]	[s]	[s]	[g]	[g]
SLO orizzontale	1,5	0,050	2,491	0,238	1,500	1,690	1,000	1,500	1,000	0,134	0,403	1,800	0,075	0,187
SLO verticale	1,5	0,050	2,491	0,238	1,500	1,690	1,000	1,000	1,000	0,050	0,150	1,000	0,015	0,038
SLD orizzontale	1,5	0,062	2,504	0,258	1,500	1,640	1,000	1,500	1,500	0,141	0,423	1,848	0,093	0,155
SLD verticale	1,5	0,062	2,504	0,258	1,500	1,640	1,000	1,000	1,500	0,050	0,150	1,000	0,021	0,035
SLV orizzontale	1,5	0,143	2,524	0,290	1,480	1,580	1,000	1,480	1,500	0,153	0,458	2,172	0,212	0,356
SLV verticale	1,5	0,143	2,524	0,290	1,480	1,580	1,000	1,000	1,500	0,050	0,150	1,000	0,073	0,123
SLC orizzontale	1,5	0,179	2,563	0,298	1,430	1,570	1,000	1,430	1,500	0,156	0,468	2,314	0,255	0,436
SLC verticale	1,5	0,179	2,563	0,298	1,430	1,570	1,000	1,000	1,500	0,050	0,150	1,000	0,102	0,174

11. CONCLUSIONI

In base alle indagini effettuate si può concludere che:

nell' area in esame e nelle sue immediate vicinanze non sono presenti dissesti attivi e/o quiescenti che in qualche modo possano interferire con l'immobile scolastico oggetto di valutazione;

Dal punto di vista geomorfologico, ci si colloca infatti su di un'area sostanzialmente pianeggiante (ai margini della collina) tipica dell'assetto geologico-strutturale del territorio comunale.

In base ai dati ricavati dal **Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI-15)**, si evince un dato di **sismicità media**; gli unici eventi di rilievo di Magnitudo superiore a 5, ubicati nelle vicinanze di Lugagnano Val d'Arda, sono 7 e riportati in Tabella 1 (pag. 14). Come è possibile osservare nella mappa in *fig 8*, i terremoti sono prevalentemente ubicati nel Piacentino, Parmense, Val Taro ed Emilia Occidentale.

In riferimento all'inquadramento macrosismico di riferimento definito dalla zonazione sismogenetica del territorio italiano ZS9, l'area, ricadente nel Comune di Lugagnano Val D'Arda, ricade nella **zona sismogenetica 913**.

Il comune di Lugagnano Val D'Arda ricade in **Zona sismica 3**. Dalle carte di pericolosità sismica è possibile ottenere un valore di a_{refg} pari a **0.1252 g** per un tempo di ritorno di 475 anni.

Il calcolo delle **Vs30** (VseqH dalle ultime direttive NTC2018), è stato ottenuto analizzando i risultati semiempirici eseguiti nell'area attraverso l'acquisizione di nr. 1 REMI. E' stato pertanto ricavato un valore di **Vseq di 308 m/sec**.

Per cui, sulla base della classificazione sismica dei suoli riportata nel Testo Unico, **il suolo di fondazione dell'area di studio ricade nella categoria di tipo C**.

Dalle indagini tromografiche, si è ricavata la frequenza caratteristica di risonanza del sito che risulta generata dalla discontinuità sismica localizzata alle alte frequenze (**$f_0 = 26.366 \text{ Hz} \pm 2.17489$**) ed associabile presumibilmente al contatto copertura-substrato.

La qualità del segnale acquisito è risultata sufficiente per estrapolare, attraverso dedicate calcolazioni del software Geopsy, un'affidabile curva HVSR.

Per concludere, il picco a 26.366 Hz soddisfa tutti i criteri e va pertanto assunto come frequenza fondamentale di risonanza del sito.

Nota: per gli approfondimenti relativi alle “**Azioni Sismiche**”, si rimanda alla consultazione del **Capitolo 10** della suddetta relazione sismica.

Dott. Geol. Andrea Carpena

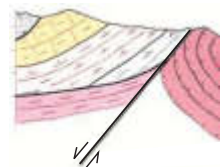
(iscrizione all'Albo dei Geologi della Regione Emilia Romagna: 636 dal 1992)



FIGURE



Fig. 1 - ORTOFOTOGRAMMETRICO [2017] - (scala 1: 2000)



Studio Geologico Dott. Geol. Andrea Carpena

uffici: via Carlo Fioruzzi, 15 - 29121 Piacenza

Tel.: 0523/454042 (fax: 0523/462427)

e-mail: andrea.carpena@georeflex.it



Area oggetto di studio

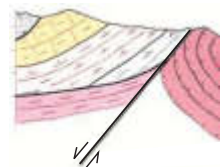
INQUADRAMENTO TERRITORIALE

scala 1: 2000 (in A3)

Fig. 1A



Fig. 1 - PROSPETTICA DA DRONE (11-01-2022)



Studio Geologico Dott. Geol. Andrea Carpena

uffici: via Carlo Fioruzzi, 15 - 29121 Piacenza

Tel.: 0523/454042 (fax: 0523/462427)

e-mail: andrea.carpena@georeflex.it

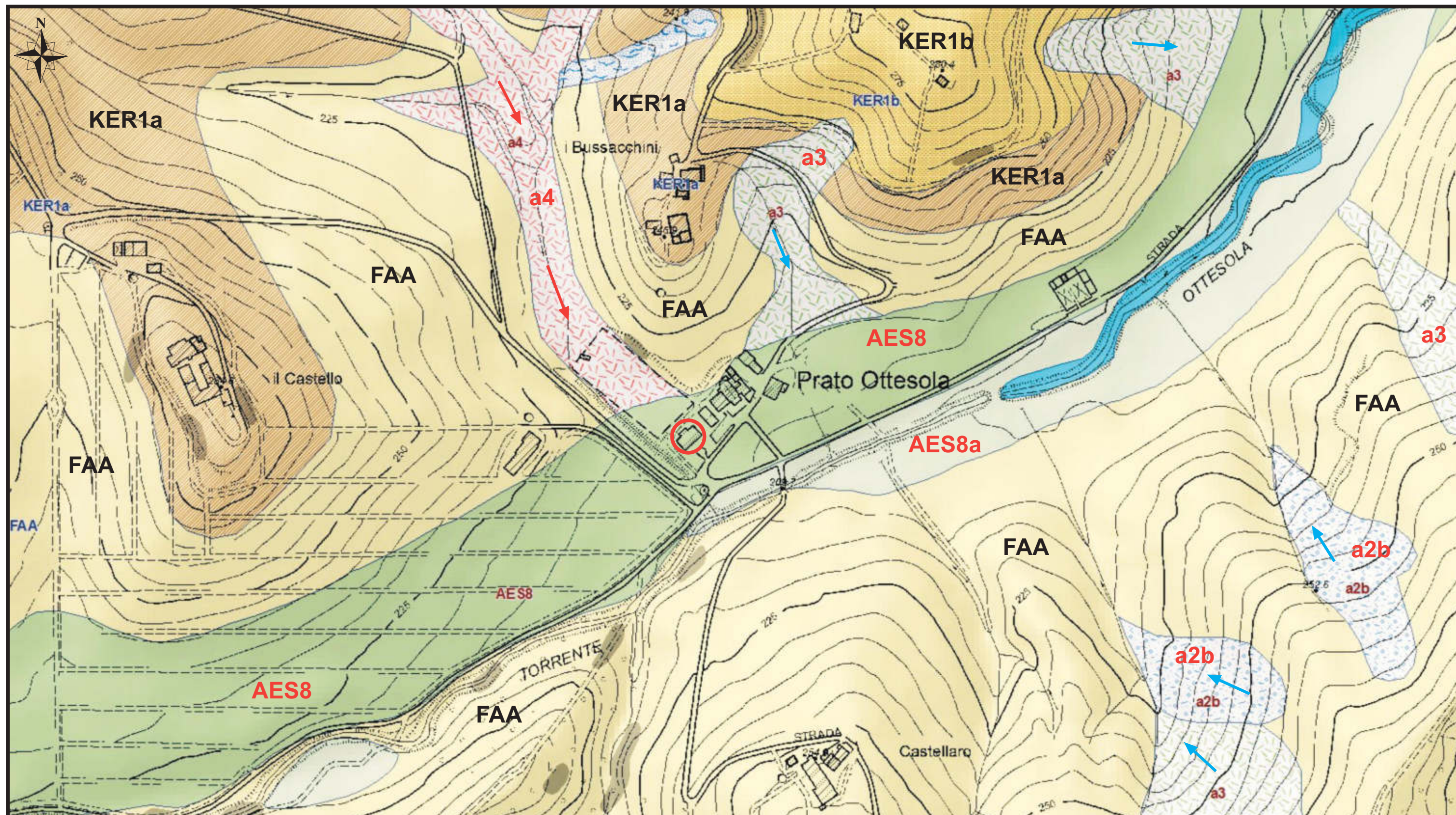


Area oggetto di studio

**INQUADRAMENTO TERRITORIALE
da sorvolo con drone**

scala prospettiva

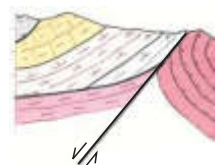
Fig. 1B



Estratto dalla Carta Geologica della Regione Emilia Romagna (scala 1: 3000)

LEGENDA

 Area oggetto di studio (e suo intorno)



Studio Geologico Dott. Geol. Andrea Carpena

uffici: via Carlo Fioruzzi, 15 - 29121 Piacenza
Tel.: +335/6176390 (fax: 0523/462427)
e-mail: andrea.carpena@georeflex.it

NOTA: per la legenda geologica vedasi (Fig. 2b)

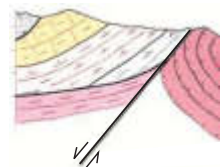
Estratto dalla Carta Geologica Regionale

scala 1: 3000 (in formato A3)

Fig. 2a



Fig. 1 - PROSPETTICA DA DRONE (11-01-2022)



Studio Geologico Dott. Geol. Andrea Carpena

uffici: via Carlo Fioruzzi, 15 - 29121 Piacenza

Tel.: 0523/454042 (fax: 0523/462427)

e-mail: andrea.carpena@georeflex.it



Area oggetto di studio

**INQUADRAMENTO TERRITORIALE
da sorvolo con drone**

scala prospettiva

Fig. 1B



Foto 2 - Prospettica da drone (11-01-2022)



Foto 3 - Prospettica da terra della Scuola



Foto 4 - Particolare postazione HVSR1



Foto 5 - Particolare strumentazione HVSR1



Foto 6 - Panoramica stendimento sismico REMI (da SSW a NNE)

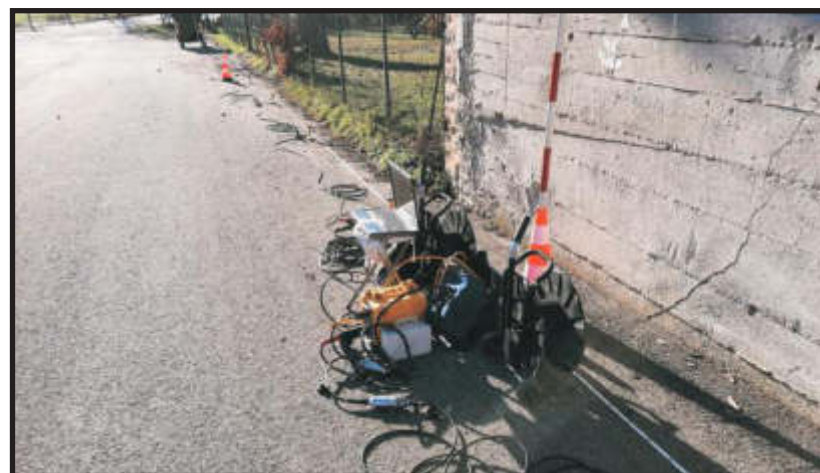


Foto 7 - Particolare stazione di registrazione dati

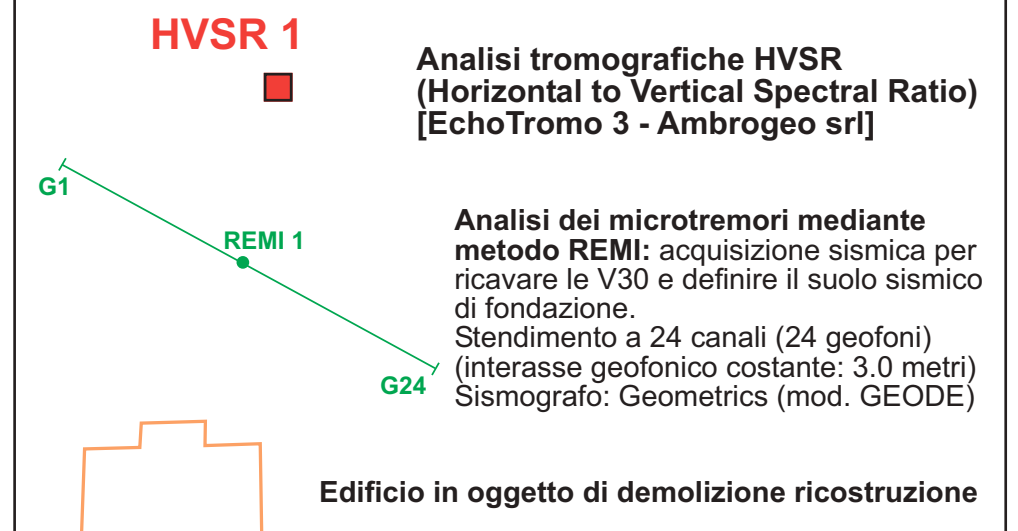


Foto 8 - Particolare di un geofono (4.5 Hz)



FIG. 1 - Estratto da foto satellitare [10-04-2021] - (scala 1: 1000)

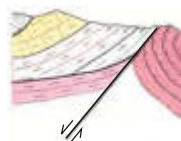
LEGENDA INDAGINI GEOFISICHE



UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE

scala grafica del disegno

FIG. 3



Studio Geologico Dott. Geol. Andrea Carpena

uffici: via Carlo Fioruzzi, 15 - 29121 Piacenza
Tel.: 0523/454042 (mobile: +335/6176390)
e-mail: andrea.carpena@georeflex.it