

Studio tecnico associato
CASADIOECO

Via V.Veneto 1/bis – 47100 FORLÌ
Tel: 0543 23923 – Email: studiocasadioeco@gmail.com
PEC: casadioeco@pec.it



22/09/2023

Casadio Mario
geologo

RELAZIONE GEOLOGICA

integrazione

Committente: Viocar spa - Matteini

**PROGETTO PER IL PIANO URBANISTICO ATTUATIVO
2° STRALCIO AMBITO A12-05 – PUA AREA
EX FANTINI
SITO A FORLIMPOPOLI**

INTEGRAZIONE
ALLA RELAZIONE GEOLOGICA
PER IL PROGETTO PER IL PIANO URBANISTICO ATTUATIVO
2° STRALCIO AMBITO A12-05 – PUA AREA EX FANTINI
SITO A FORLIMPOPOLI

PREMESSA

La presente relazione geologica è redatta per rispondere alle integrazioni richieste dalla Provincia di Forlì – Cesena Servizio Edilizia e Pianificazione Territoriale alla relazione geologica datata 16/11/2021 riguardante il Piano Urbanistico Attuativo 2° stralcio Ambito A12-05, in Comune di Forlimpopoli.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Relativamente alla parte geologica, si fa riferimento alle seguenti normative:

- Decreto Ministeriale 17.01.2018 e successiva circolare esplicativa
- Decreto Ministeriale 14.01.2008
- DGR n. 630/2019, DGR n. 476/2021
- Testo Unitario - Norme Tecniche per le Costruzioni
- Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008. Circolare 2 febbraio 2009.
- Eurocodice 8 (1998); Eurocodice 7.1 (1997); Eurocodice 7.2 (2002); Eurocodice 7.3 (2002)
- Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- Progettazione geotecnica – Parte I : Regole Generali . - UNI
- Progettazione geotecnica – Parte II : Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002). UNI
- Progettazione geotecnica – Parte II : Progettazione assistita con prove in sito(2002). UNI

ANALISI SISMICA

INDAGINE SISMICA – HVSR

Per ricavare il valore delle VS30 sono state eseguite 2 prove sismiche sul territorio di intervento della categoria del sottosuolo, nell'area è stato condotto il rilievo dei microtremori con il tromografo digitale "Tromino" per verificare le caratteristiche sismiche e stratigrafiche del terreno.

Lo strumento utilizzato registra il rumore sismico ambientale presente nella superficie terrestre e generato da fenomeni atmosferici, dall'attività antropica e dall'attività dinamica terrestre.

I microtremori sono rappresentati da oscillazioni molto piccole (accelerazioni dell'ordine di 10^{-15} m/s^2), che, attraversando strati con caratteristiche differenti (in termini di densità e velocità di propagazione delle onde), subiscono fenomeni di rifrazione, riflessione, attenuazione e altri.

Questi fenomeni sono tali per cui un'onda che viaggia all'interno di un mezzo e viene riflessa da una superficie di discontinuità interferisce con le onde incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime quando la lunghezza d'onda incidente λ è pari a 4 volte lo spessore h dello strato (condizione di risonanza):

Relativamente alle onde S:

$$f_r = \frac{V_{S1}}{4h}$$

f_r rappresenta la frequenza fondamentale dello strato, ossia la frequenza cui corrispondono le maggiori accelerazioni sismiche.

Utilizzando la formula sopra esposta si evince che conoscendo la profondità di una discontinuità (trovata nelle prove penetrometriche) e la frequenza fondamentale del terreno in superficie (fornita dal tromografo) è possibile risalire alla velocità delle onde S del terreno.

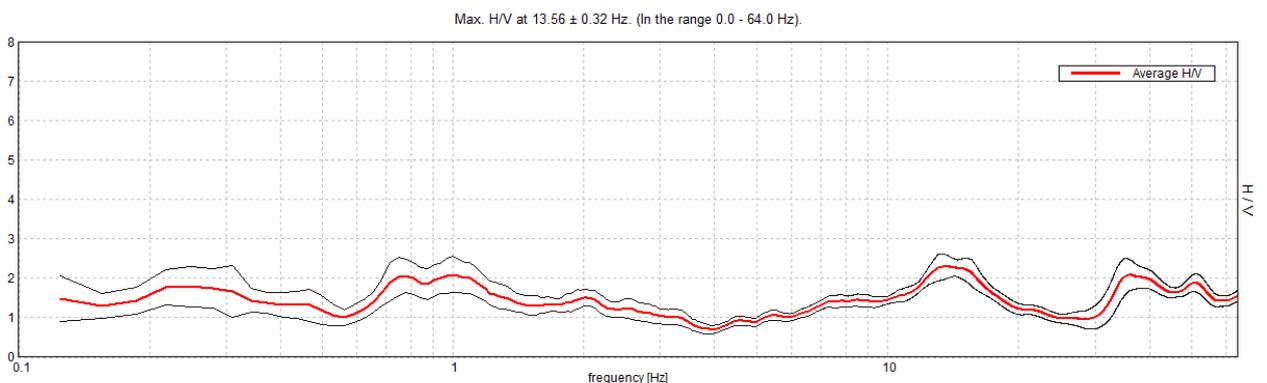
Una volta ricavato il valore di V_s , è possibile ricostruire la stratigrafia dell'area e l'andamento delle discontinuità, se presenti.

La tecnica HVSR consiste nella valutazione dei rapporti spettrali tra le componenti orizzontali e verticali del moto ed è in grado di fornire in buona approssimazione il contenuto in frequenza del segnale dei microtremori.

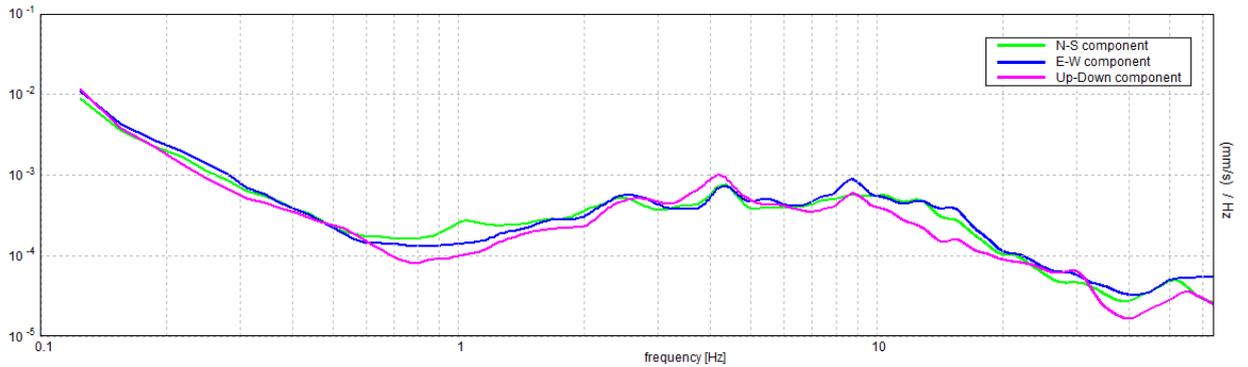
Si riportano di seguito i grafici ottenuti nei punti di rilievo:

Tromografo 1

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



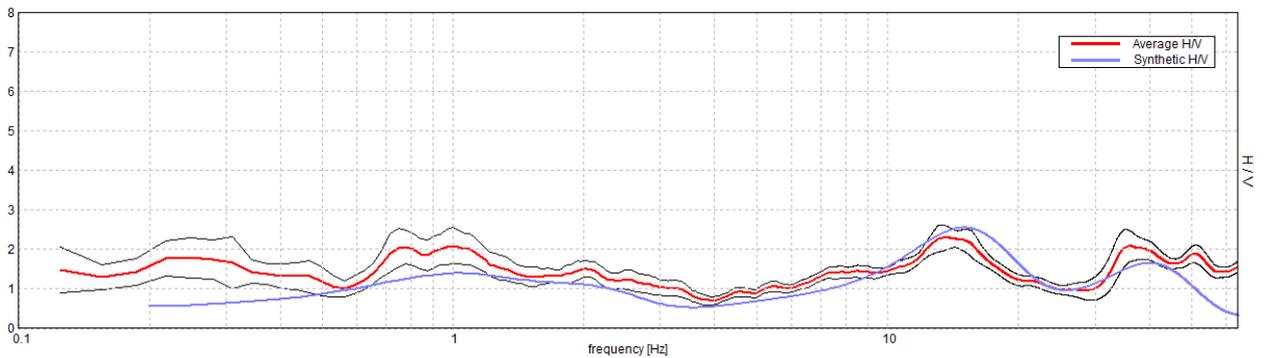
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Tramite un processo di inversione dei dati si ricerca una curva teorica che meglio approssima quella sperimentale.

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

Max. H/V at 13.56 ± 0.32 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

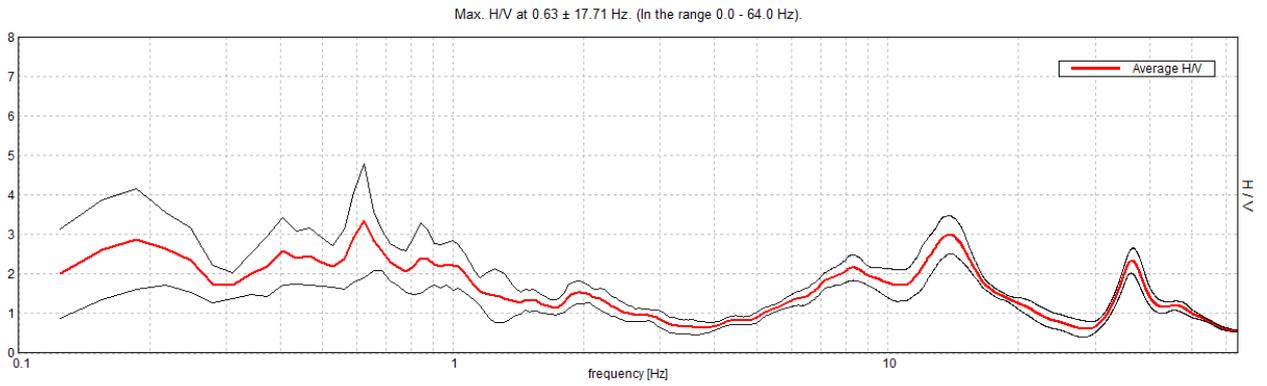


Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.40	0.40	64	0.42
2.20	1.80	136	0.42
27.20	25.00	224	0.45
97.20	70.00	360	0.45
inf.	inf.	440	0.45

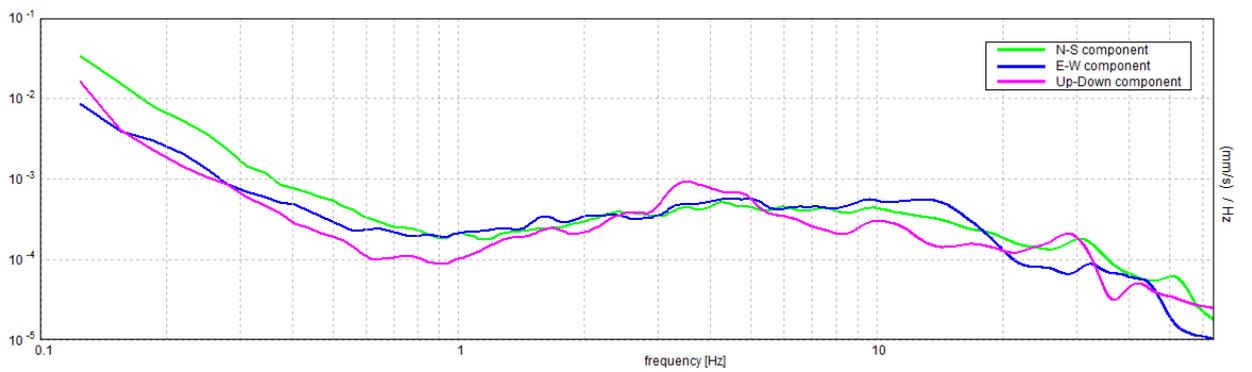
$$Vs(0.0-30.0) = 216 \text{ m/s}$$

Tromografo 2

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

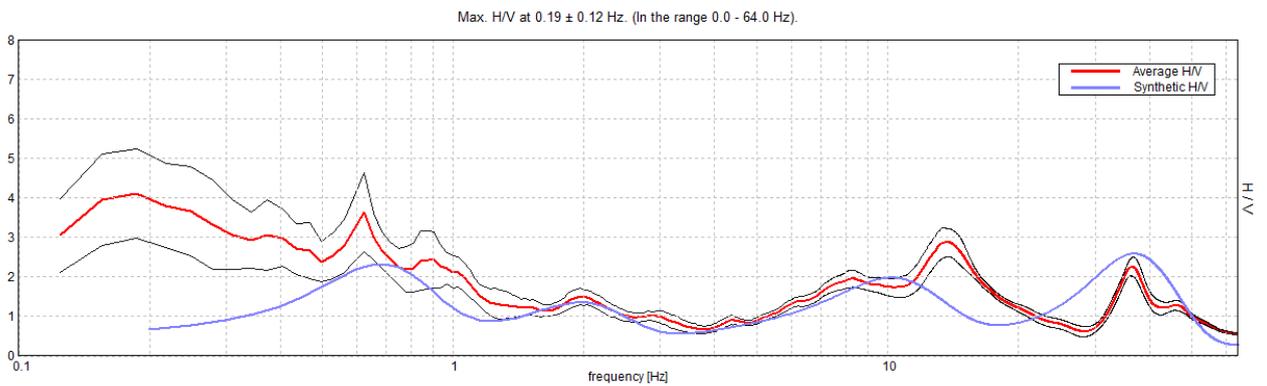


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Tramite un processo di inversione dei dati si ricerca una curva teorica che meglio approssima quella sperimentale.

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



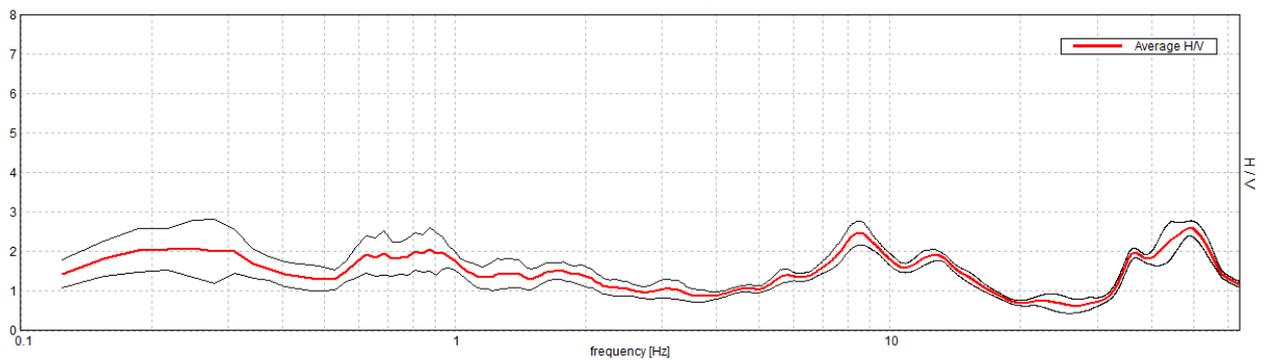
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.50	0.50	73	0.45
3.50	3.00	150	0.42
33.50	30.00	257	0.45
153.50	120.00	420	0.45
inf.	inf.	650	0.45

$$Vs(0.0-30.0) = 231 \text{ m/s}$$

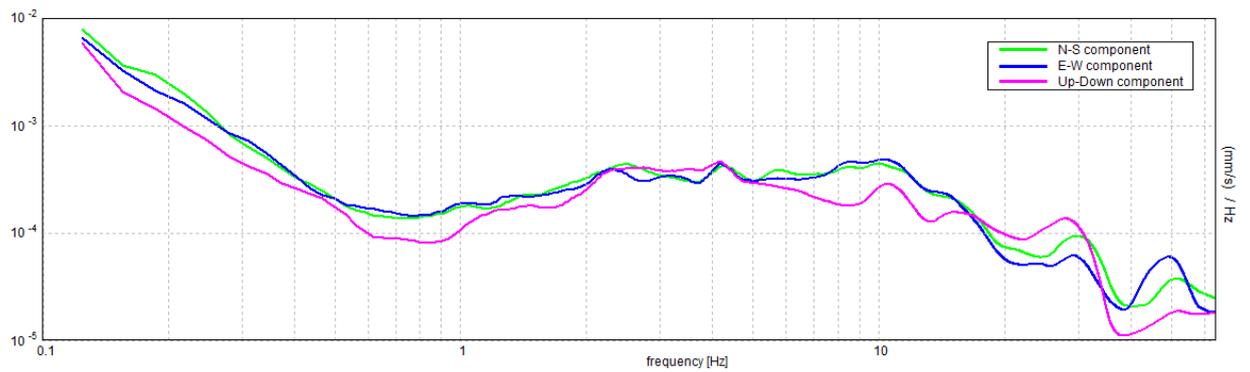
Tromografo 3

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

Max. H/V at 49.06 ± 11.36 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



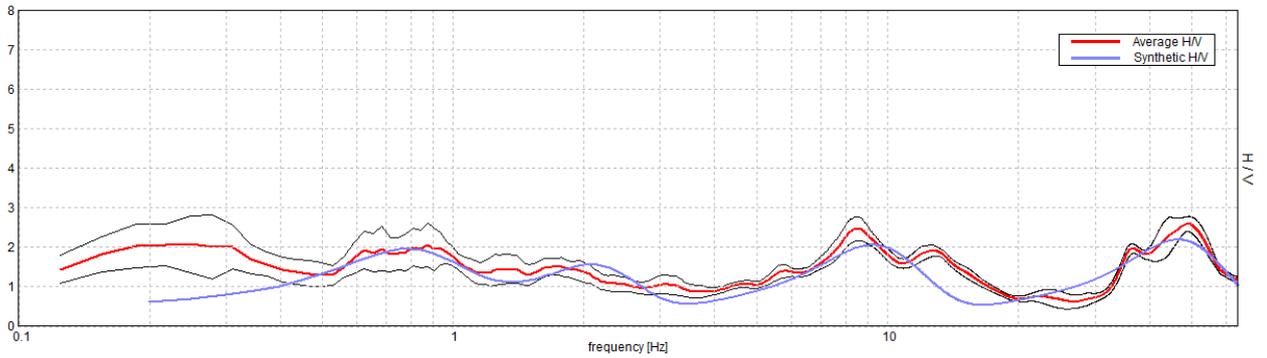
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Tramite un processo di inversione dei dati si ricerca una curva teorica che meglio approssima quella sperimentale.

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

Max. H/V at 49.06 ± 11.36 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



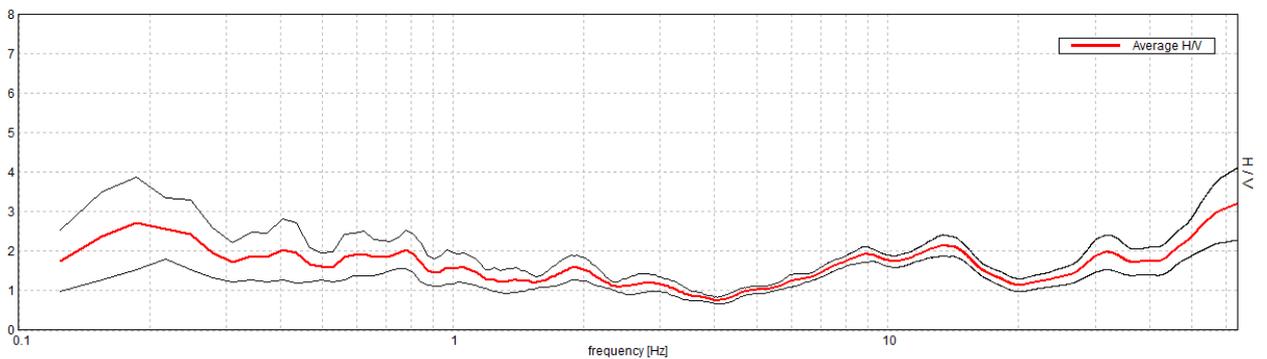
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.35	0.35	68	0.45
3.35	3.00	131	0.42
30.85	27.50	247	0.45
130.85	100.00	411	0.45
inf.	inf.	614	0.45

$$Vs(0.0-30.0) = 221 \text{ m/s}$$

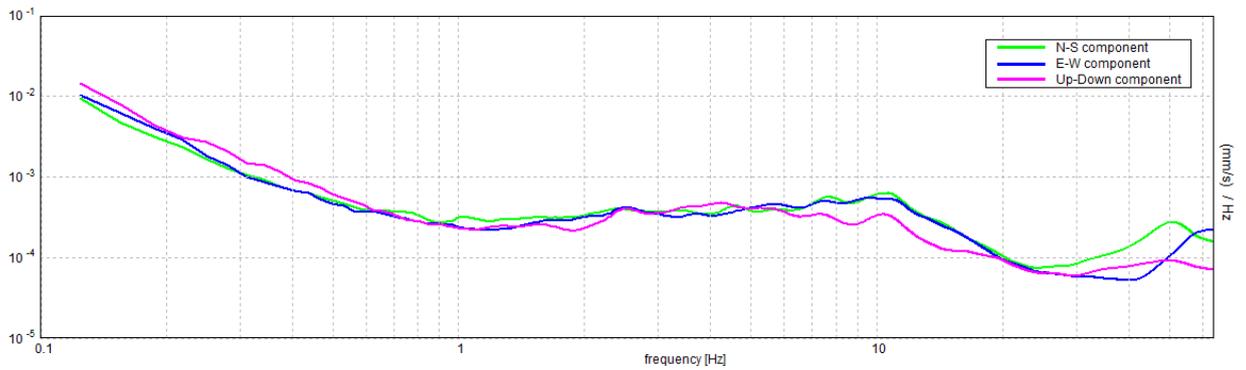
Tromografo 4

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

Max. H/V at 63.97 ± 56.22 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



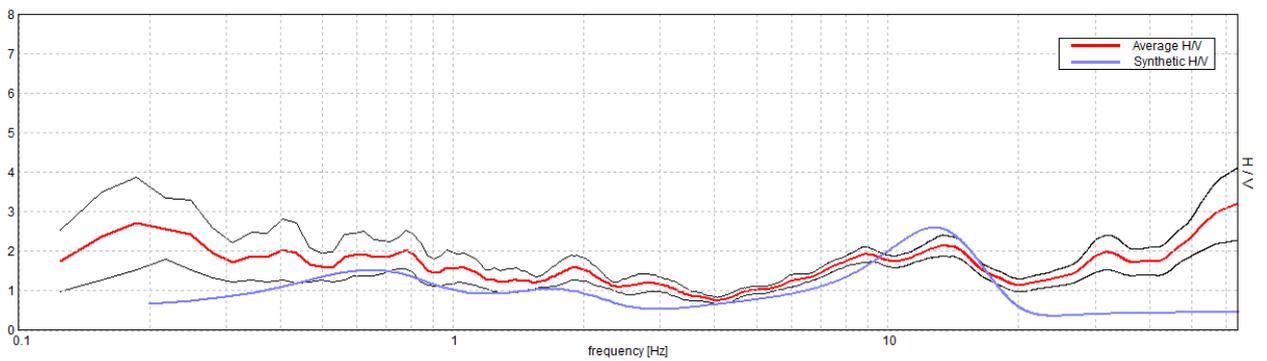
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Tramite un processo di inversione dei dati si ricerca una curva teorica che meglio approssima quella sperimentale.

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

Max. H/V at 63.97 ± 56.22 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.00	1.00	95	0.42
2.20	1.20	130	0.42
32.20	30.00	220	0.42
132.20	100.00	350	0.42
inf.	inf.	500	0.42

$$Vs(0.0-30.0) = 205 \text{ m/s}$$

Si nota che a parte i picchi caratteristici di frequenza delle altissime frequenze che corrispondono però a strati superficiali si notano picchi a 10.5 hz, 8.5 hz, 2.0 hz e a 1.0 hz.

Per il valore delle V_{s30} calcolato è risultata una velocità tra **205 m/s** e **231 m/s** quindi i terreni sono inseriti dal punto di vista sismico nella **classe C**.

NORMATIVA SISMICA

L'attuale normativa suddivide il sottosuolo in varie tipologie raggruppate in 5 categorie discriminate sulla base delle velocità di propagazione delle onde S nei 30 m più superficiali. Il valore indicativo di tali velocità è definito dalla media pesata su uno spessore di 30 m delle velocità misurate $v_{s,30}$. In alternativa si utilizzano dei parametri corrispondenti, meno significativi, rappresentati dal valore della coesione non drenata c_u o del numero di colpi $NSPT$. Qui di seguito è mostrata la tabella di identificazione dei tipi di sottosuolo:

	<i>Descrizione del profilo stratigrafico</i>	V_{s30} (m/s)
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> Caratterizzati da $V_{s30} > 800$ m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m	> 800
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> Con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 e 800 m/s	360 – 800
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 e 360 m/s	180 – 360
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} inferiori a 180 m/s	< 180
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m	

CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Come già descritto il terreno è posto in area pianeggiante e quindi in categoria T1.

La normativa prevede le seguenti categorie topografiche

<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 $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

VERIFICA SULLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE

La liquefazione delle sabbie è un processo che può avvenire durante un evento sismico: essa nasce dall'incremento della pressione dell'acqua interstiziale (u) durante sollecitazioni di tipo ciclico.

Se tale aumento è tale da eguagliare la pressione litostatica totale (σ), si ha l'annullamento della resistenza al taglio (τ), secondo la seguente relazione:

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi$$

La probabilità che si manifestino fenomeni di **liquefazione è bassa o nulla** se è verificata almeno una delle seguenti condizioni:

1. Magnitudo attesa inferiore a 5;
2. Accelerazione massima attesa in superficie in condizioni free-field minore di 0.1g;
3. Terreni sabbiosi con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:

- frazione di fine 1, FC, superiore al 20%, con indice di plasticità $IP > 10\%$;
- $FC \geq 35\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 20$ oppure $qc_{1N} > 120$ oppure $VS_1 > 200$ m/s;
- $FC \leq 5\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 160$ oppure $VS_1 > 220$ m/s

$(N_1)_{60}$, qc_{1N} , VS_1 sono i valori normalizzati dell'indice NSPT della Standard Penetration Test, della resistenza di punta qc della prova CPT e della velocità di propagazione delle onde di taglio da prove geofisiche. In prima approssimazione tali valori possono essere calcolati con le seguenti equazioni:

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$$

$$qc_{1N} = \frac{q_c}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$$

$$VS_1 = V_S \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25}$$

essendo p_a la pressione atmosferica e σ'_{v0} la pressione efficace litostatica verticale.

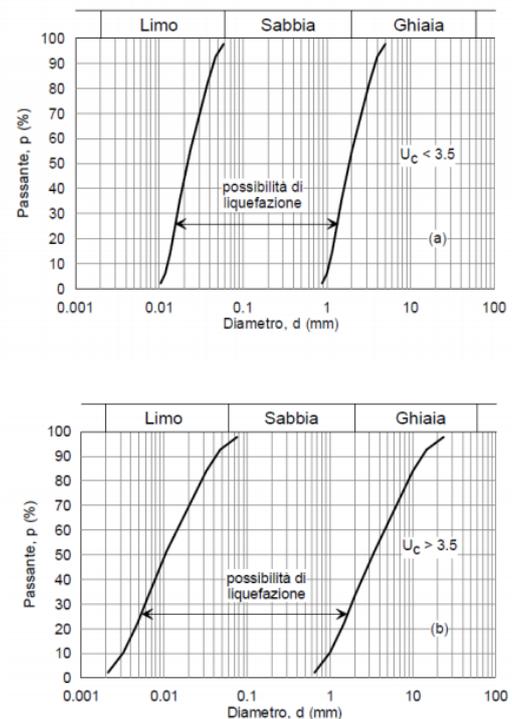


Figura 1 - Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità a liquefazione di terreni a granulometria uniforme (a) ed estesa (b) (AGI, 2005)

4. Distribuzione granulometrica esterna per oltre il 50% al fuso indicato in Figura 1a nel caso di materiale con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ ed in Figura 1b per coefficienti di uniformità $U_c > 3.5$.

5. Profondità media stagionale della falda superiore ai 15 m dal piano campagna.

Per la verifica si considerano i risultati della prova penetrometrica n° 2.

Per valutare il pericolo di liquefazione è stato adottato il metodo di Robertson e Wride (1998), che parte dai risultati delle prove CPT, per giungere a un fattore di sicurezza, ed un indice di liquefazione associato al rischio.

Metodi di calcolo

Il metodo utilizzato si basa sulle seguenti equazioni principali:

$$F_s = \frac{CRR}{CSR} \cdot MSF$$

dove CRR = resistenza ciclica del terreno
 CSR = sforzo di taglio ciclico indotto dal sisma
 MSF = fattore di scala della magnitudo

$$CRR = 0,883 \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} + 0,05 \quad \text{per } (q_{c1N})_{cs} < 50$$

$$CRR = 93 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0,08 \quad \text{per } 50 < (q_{c1N})_{cs} < 160$$

dove $(q_{c1N})_{cs}$ è la resistenza alla punta normalizzata e corretta per tenere conto della percentuale di fine presente

$$CSR = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0'}} r_d$$

dove a_{max} è l'accelerazione massima orizzontale di progetto
 g è la forza di gravità (980,7 cm/s²)
 σ_{v0} e σ_{v0}' sono le pressioni verticali totali ed efficaci alla prof. Z

r_d è un coefficiente funzione della profondità

Una volta ottenuto il valore del fattore di sicurezza FSL, si calcola l'indice del potenziale di liquefazione P_L (Iwasaki et al, 1978):

$$P_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) w(z) dz$$

dove

$F(z)$ è una funzione dipendente dal FSL

$w(z)$ è una funzione decrescente con la profondità

Risultati

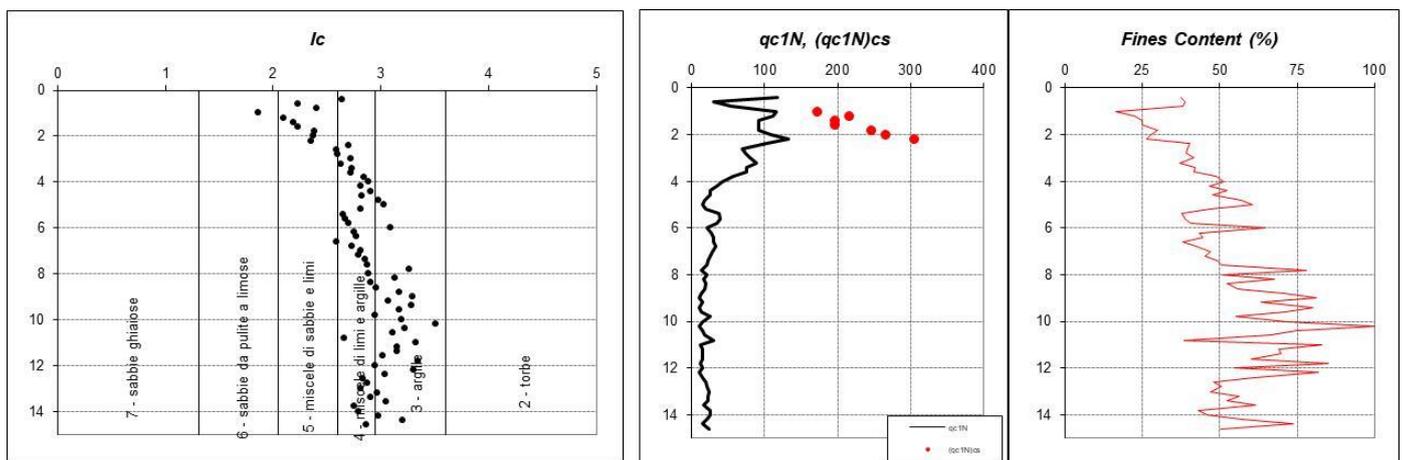
Poiché l'area di studio è inserita all'interno della 2° categoria ed il terreno di studio ricade nella classe C, per il calcolo dell'azione sismica si considera un'accelerazione pari a :

$$S \times a_g = 1,41 \times 0,201 = 0,283 \text{ g}$$

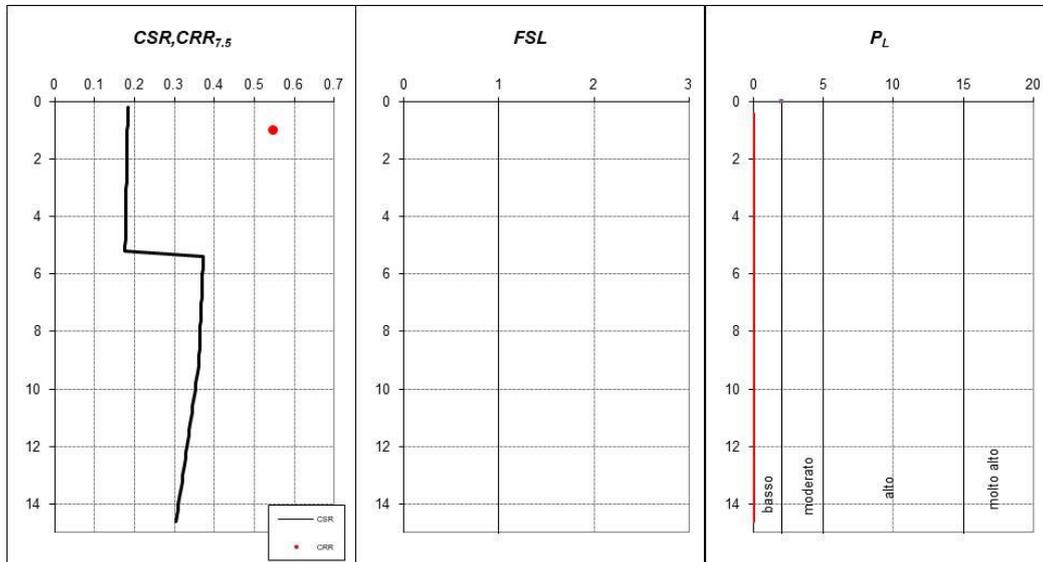
Inserendo i valori estratti dalla prova CPT, Robertson e Wride propongono una distinzione granulometrica sulla base di un Indice del tipo di terreno I_c .

In seguito si calcola il valore di resistenza alla punta normalizzata q_{c1N} e corretta per il contenuto di fini $(q_{c1N})_{cs}$ ed infine il contenuto di frazione fine (%).

Qui di seguito si illustrano tre grafici in cui sono plottati i tre parametri sopra indicati:



Qui di seguito sono poi illustrati il confronto tra i valori di CRR e CSR , il fattore di sicurezza FSL , corretto per una magnitudo realistica per l'area di studio (6) ed il valore di P_L , indice del potenziale di liquefazione.



Come è evidente non ci sono strati che presentano un fattore di sicurezza inferiori a 1, il che si traduce in un valore di P_L pari a 0, indicare come il rischio di liquefazione sia nullo.

MICROZONAZIONE SISMICA

Da quanto si può desumere dai paragrafi precedenti l'area di studio non ricade nelle seguenti categorie:

- Aree soggette a liquefazione e densificazione;
- Aree instabili o potenzialmente instabili;
- Aree in cui le coperture hanno spessore fortemente variabile;
- Aree in cui è prevista la realizzazione di opere a rilevante interesse pubblico

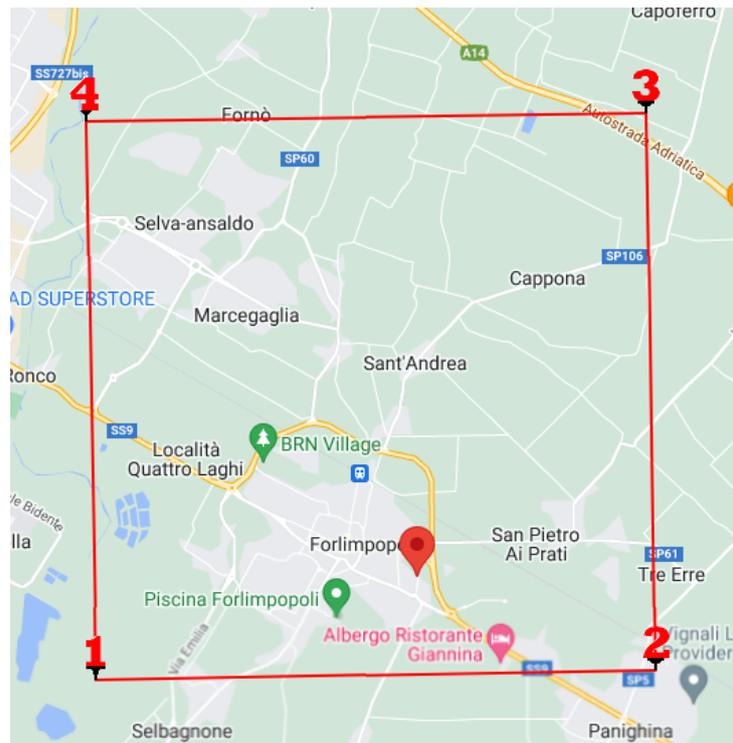
Non si rende quindi necessario un approfondimento delle indagini ai fini della microzonazione sismica e dell'analisi della risposta sismica locale.

VERIFICA SISMICA DI I° LIVELLO

Il territorio nazionale è stato suddiviso in celle aventi caratteristiche sismiche diverse; la cella della maglia sismica in oggetto è la seguente:

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 18295	Lat: 44,1767	Lon: 12,0963	Distanza: 3340,499
Sito 2	ID: 18296	Lat: 44,1775	Lon: 12,1659	Distanza: 2543,501
Sito 3	ID: 18074	Lat: 44,2275	Lon: 12,1648	Distanza: 5162,719
Sito 4	ID: 18073	Lat: 44,2267	Lon: 12,0951	Distanza: 5600,255



Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 50 anni

Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %

Tr: 30 [anni]

ag: 0,063 g

Fo: 2,416

Tc*: 0,264 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento:	63	%
Tr:	50	[anni]
ag:	0,080	g
Fo:	2,403	
Tc*:	0,273	[s]

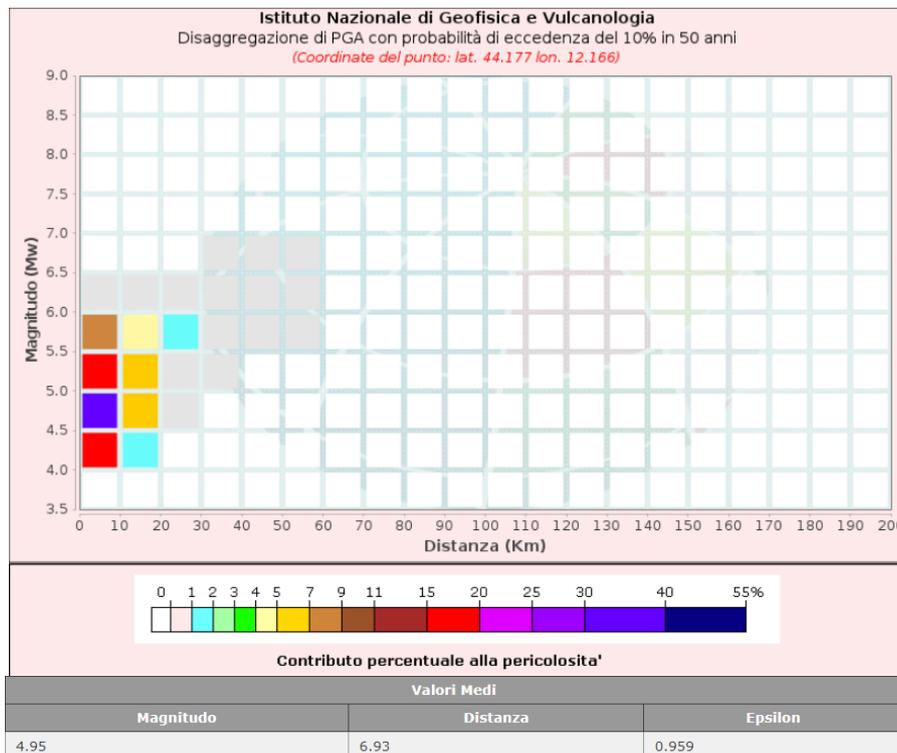
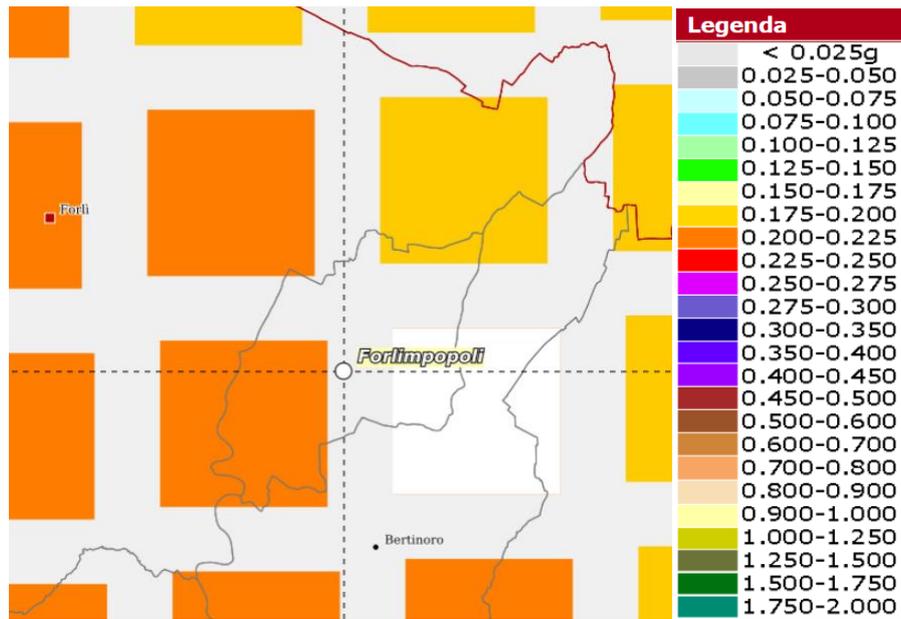
Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento:	10	%
Tr:	475	[anni]
ag:	0,201	g
Fo:	2,388	
Tc*:	0,310	[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento:	5	%
Tr:	975	[anni]
ag:	0,253	g
Fo:	2,447	
Tc*:	0,321	[s]

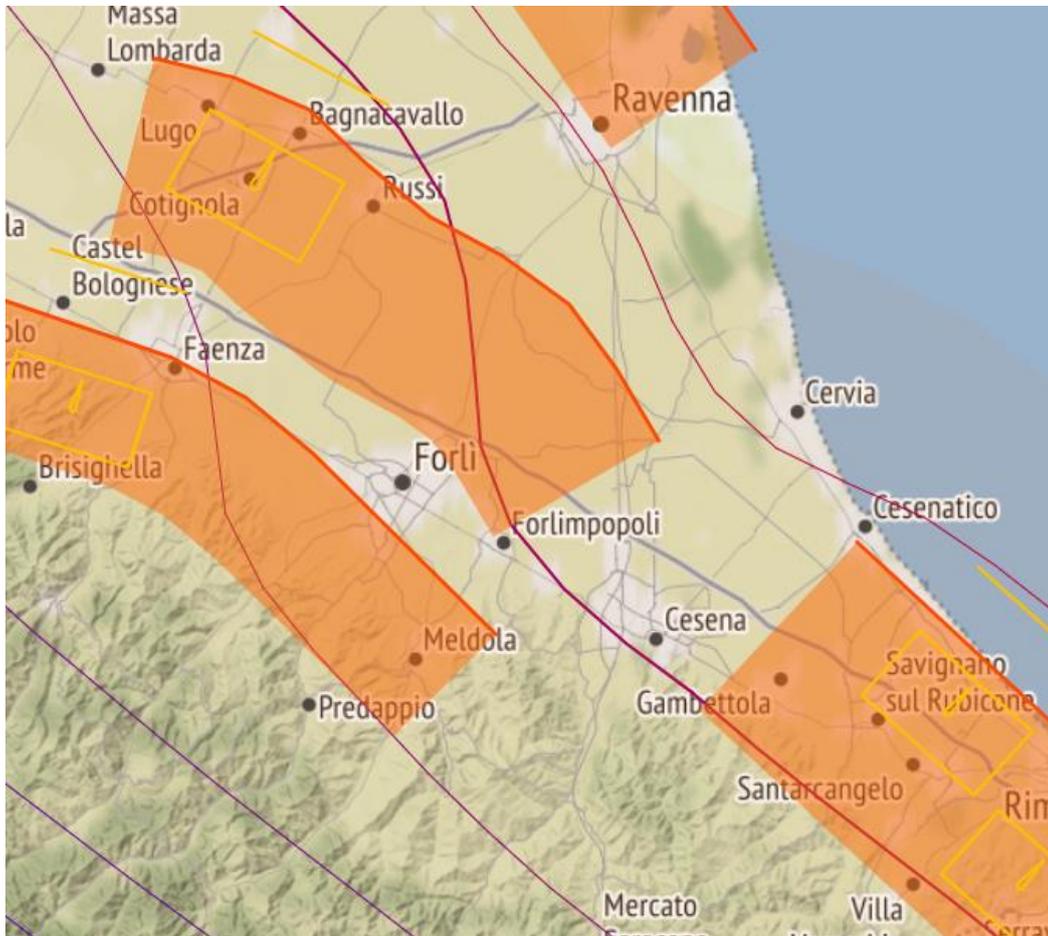
Il sito dell' INGV fornisce i dati di pericolosità sismica sul territorio con possibilità di avere anche i dati disaggregati del valore di a(g)



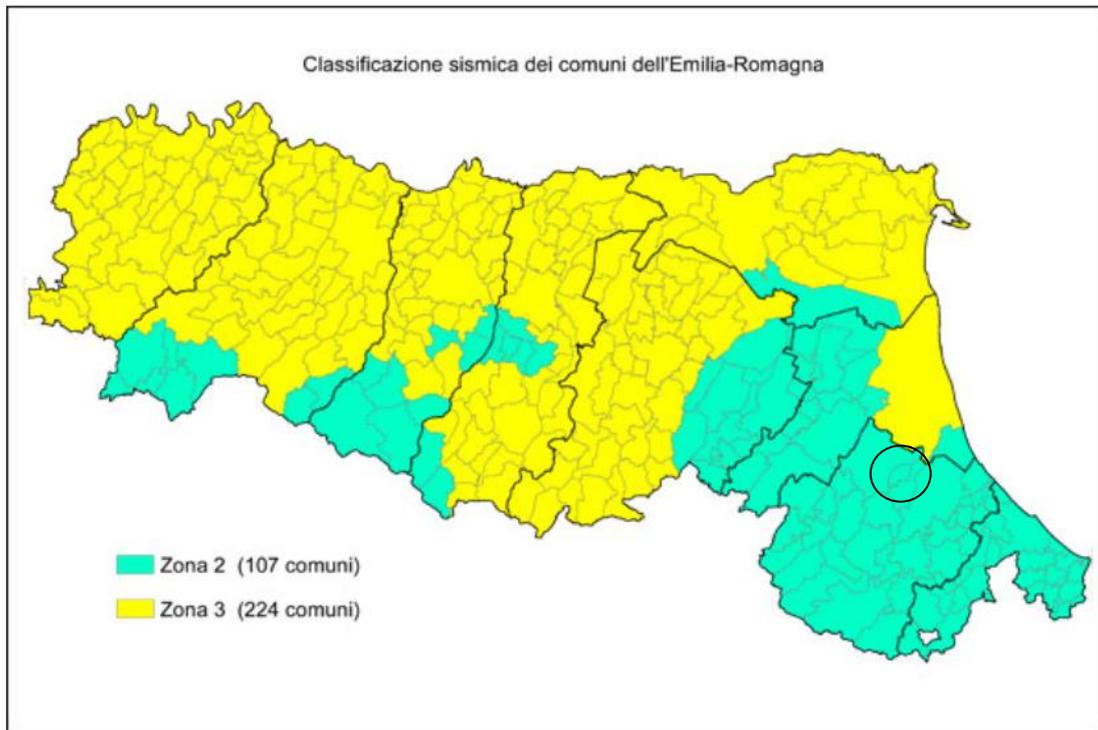
Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti specificatamente il territorio comunale di Forlimpopoli, sono state ricavate dal Database of Individual Seismogenic Sources (DISS) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Version 3.2.0., ossia dal database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area Italiana.

Nel territorio di pertinenza di Forlimpopoli figurano le seguenti sorgenti sismogenetiche composite:

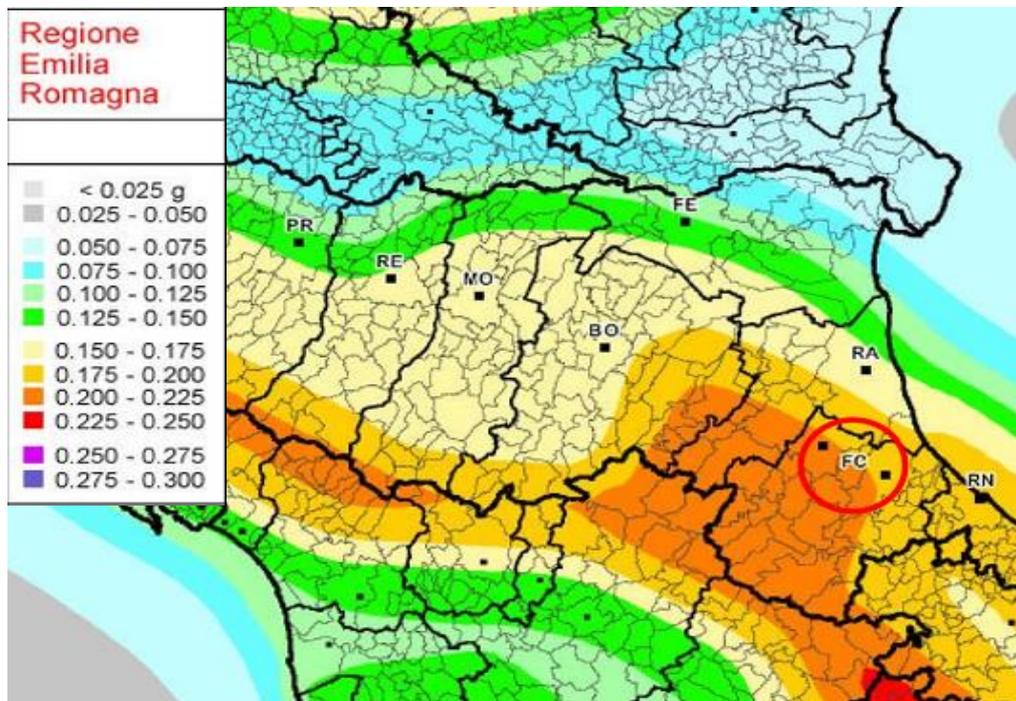
- ITCS039: Riminese onshore con Mw max (magnitudo momento massima) 7,0;
ITCS001: Castel San Pietro Terme-Meldola con Mw max (magnitudo momento massima) 6,5;
- ITCS011: Ascensione-Armaia con Mw max (magnitudo momento massima) 7,0.



Il Comune di Forlimpopoli è inserito nei comuni di 2° zona sismica con valore di accelerazione sismica al substrato pari a 0.201 g.



In questa mappa il territorio del Comune di Forlimpopoli ricade in un'area caratterizzata da un'accelerazione sismica orizzontale massima ag pari a 0,225 g.



VERIFICA SISMICA DI II° LIVELLO

Il territorio regionale è stato suddiviso in varie aree a seconda della tipologia morfologica e stratigrafica.

Il Comune di Forlimpopoli è inserito in categoria II^a, mentre per quanto concerne le tabelle delle amplificazioni inserite nel DGR n. 476/2021, è più assimilabile ai dati della categoria MARGINE B, caratterizzato da spessore dei terreni superficiali fini o grossolani poco consolidati superiore a 30 m.

Le tabelle qui di seguito riportano i valori dei fattori di amplificazioni:

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5

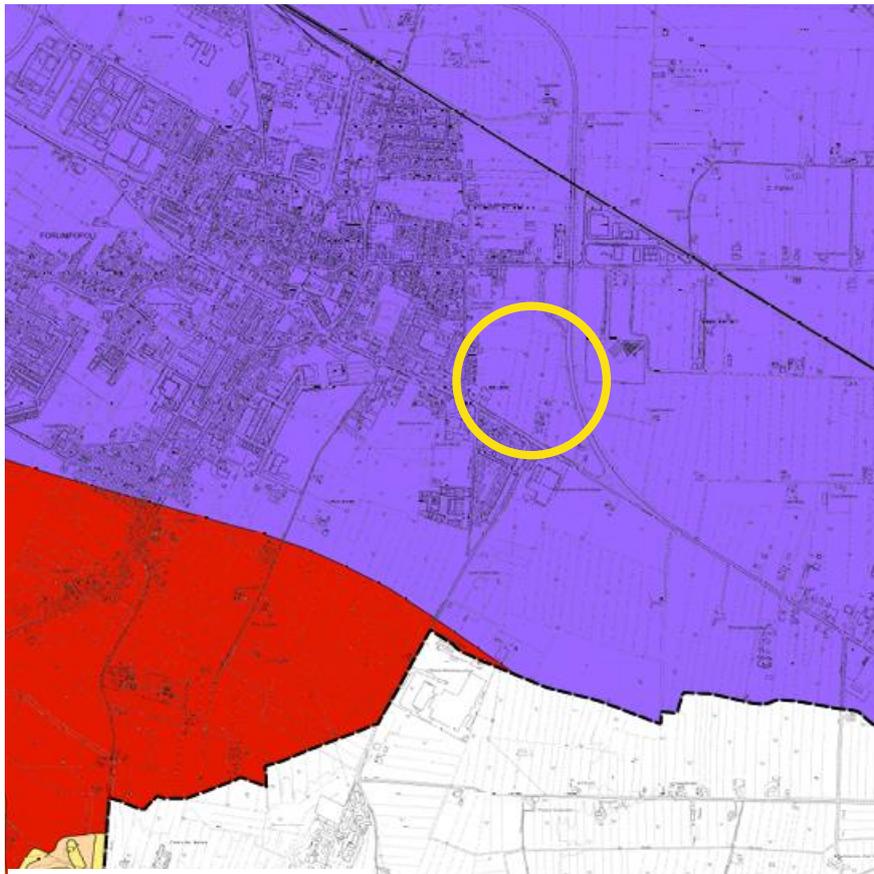
Fattore di Amplificazione **PGA**

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5
SA2	2,6	2,6	2,3	2,1	1,9	1,7
SA3	3,1	2,9	2,7	2,4	2,3	2,1
SA4	3,0	2,9	2,6	2,3	2,1	1,9

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$) e **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1	2,0
SI3	3,3	3,1	2,7	2,4	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)



Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

I valori dei Fattori di Amplificazione sono stati ricavati dalle tabelle allegata alla DGR n. 2193/2015 della Regione Emilia-Romagna

-  FA I.S. 0,5-1,0s = 1,3 - 1,4
-  FA I.S. 0,5-1,0s = 1,5 - 1,6
-  FA I.S. 0,5-1,0s = 1,7 - 1,8
-  FA I.S. 0,5-1,0s = 1,9 - 2,0
-  FA I.S. 0,5-1,0s = 2,1 - 2,2
-  FA I.S. 0,5-1,0s = 2,3 - 2,4
-  FA I.S. 0,5-1,0s = 2,5 - 3,0

Zone di attenzione per instabilità (Livello 2)

-  ZAFR - Zona di attenzione per instabilità di versante - Zona 9
FA I.S. 0,5-1,0s = 1,3 - 1,4

-  Confine comunale

Dall'elaborazione si nota che i Fattori di Amplificazione della normativa sono in linea con quelli delle tavole di MZS della cartografia comunale.

Geologo Casadio Mario