

Studio tecnico associato
CASADIOECO

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



17/01/2024

Casadio Mario
geologo

RELAZIONE GEOLOGICA

integrazione

Committente: S.I.F.srl, Isolanti srl, Edil Esterni srl,
Acquisti Edda e Bartolomei Dario snc

**PER L'ACCORDO OPERATIVO
AI SENSI DELL'ART. 38 DELLA L.R. 24/2017
PIANO URBANISTICO ATTUATIVO
AMBITO A13-06 2°STRALCIO
COMPARTO PRODUTTIVO MELATELLO
SCHEDA N.16-45-46-49
IN COMUNE DI FORLIMPOPOLI**

INTEGRAZIONE
ALLA RELAZIONE GEOLOGICA
PER L'ACCORDO OPERATIVO
AI SENSI DELL'ART. 38 DELLA L.R. 24/2017 PIANO URBANISTICO ATTUATIVO
AMBITO A13-06 2°STRALCIO COMPARTO PRODUTTIVO MELATELLO
SCHEDA N.16-45-46-49
IN COMUNE DI 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 02/12/2021 riguardante il Piano Urbanistico Attuativo Ambito A 13-06 2° stralcio comparto produttivo Melatello, 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 3 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.

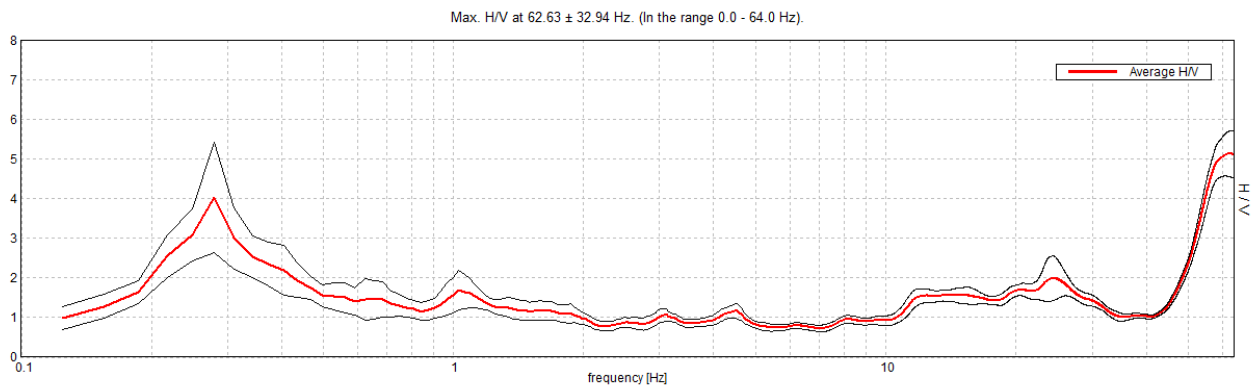
Una volta ricavato il valore di V_s , è possibile ricostruire la stratigrafia dell'area e l'andamento delle discontinuità, se presenti.

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.

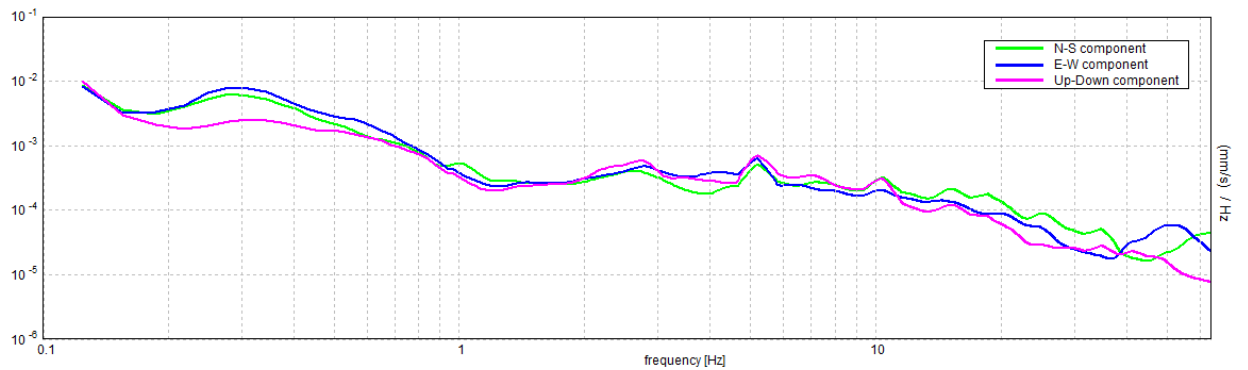
Si riportano di seguito i grafici ottenuti nei punti di rilievo:

Tromografo 1

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

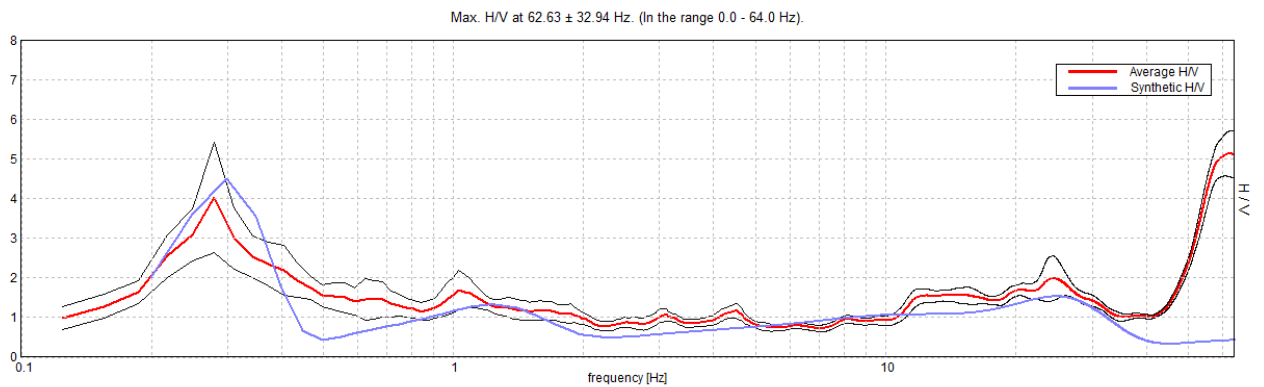


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



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

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

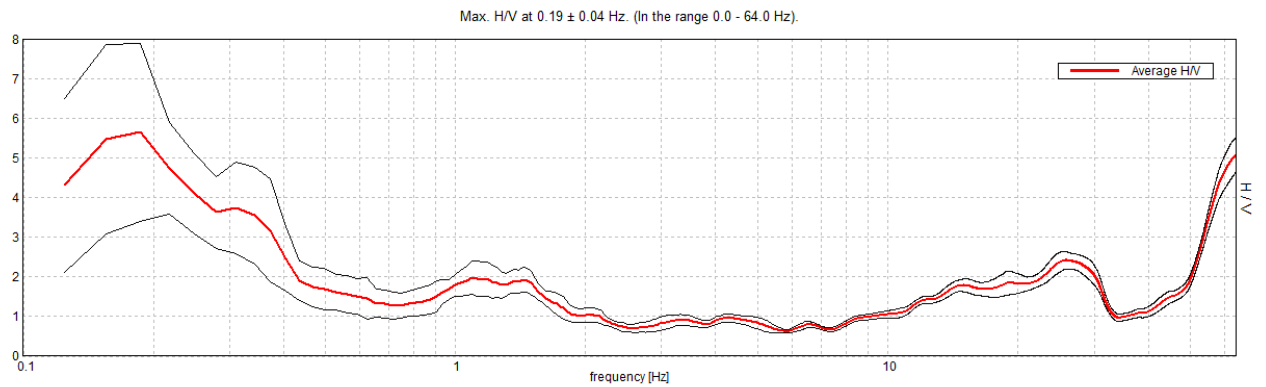


Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.90	0.90	96	0.42
4.90	4.00	198	0.42
44.90	40.00	240	0.42
344.90	300.00	396	0.42
inf.	inf.	800	0.42

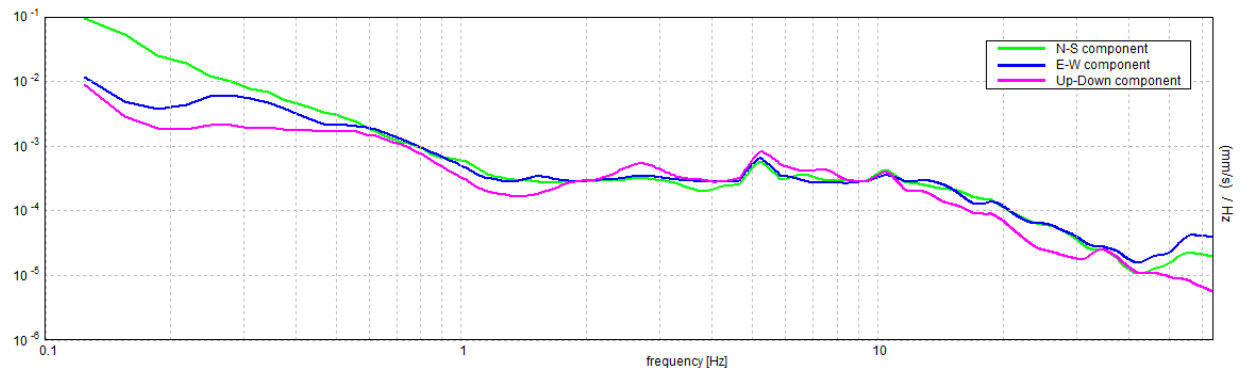
$$V_s(0.0-30.0) = 224 \text{ m/s}$$

Tromografo 2

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

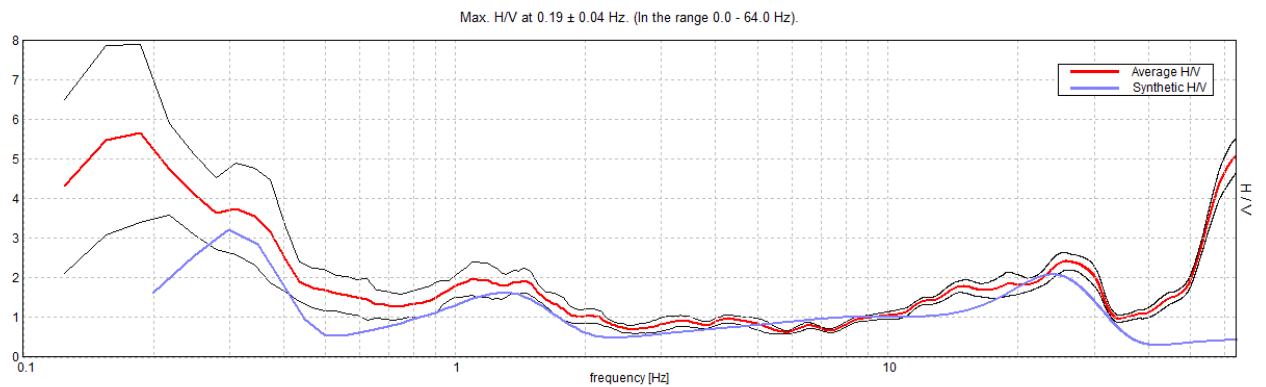


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



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

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

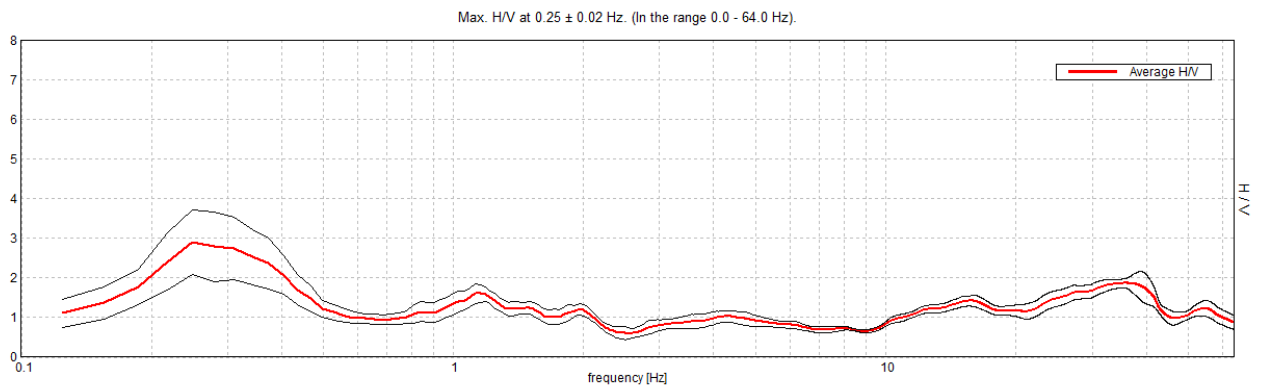


Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.90	0.90	90	0.42
5.90	5.00	200	0.42
45.90	40.00	246	0.42
345.90	300.00	420	0.42
inf.	inf.	800	0.42

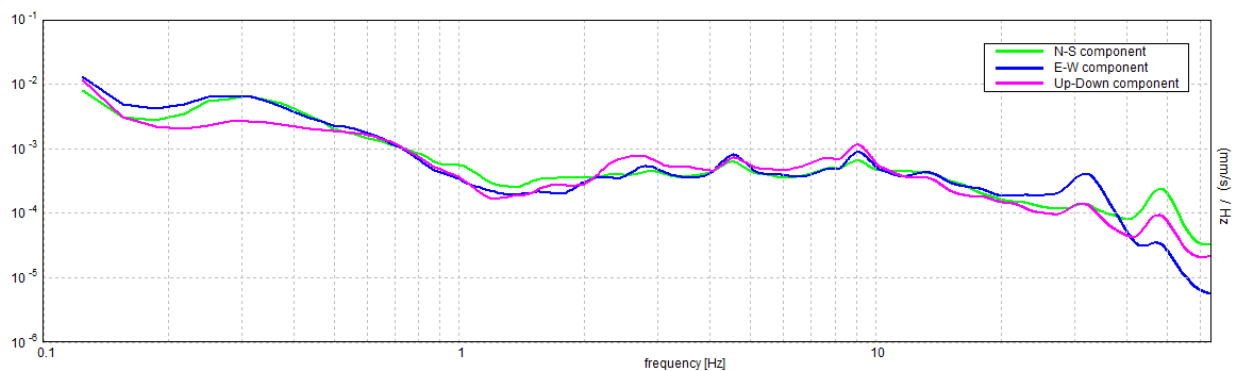
$$V_s(0.0-30.0) = 226 \text{ m/s}$$

Tromografo 3

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

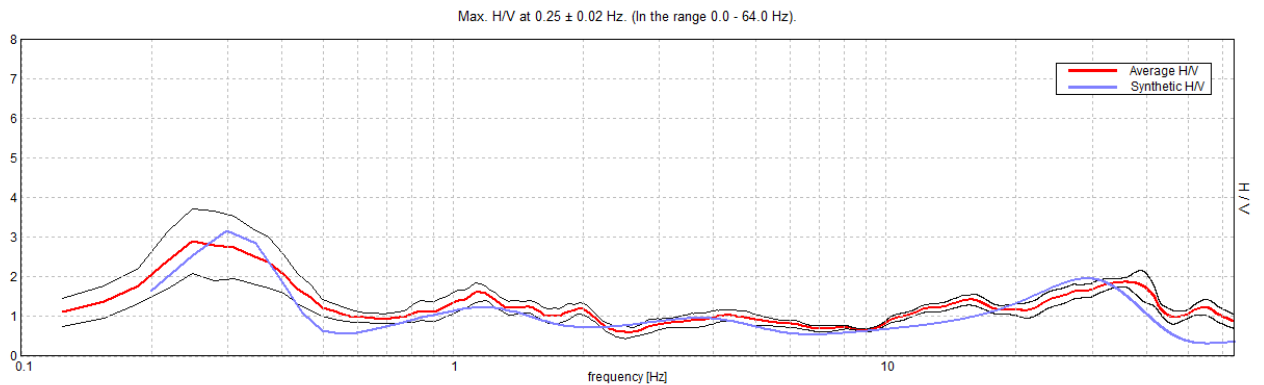


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



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
0.70	0.70	90	0.45
11.50	10.80	180	0.42
56.50	45.00	266	0.45
316.50	260.00	387	0.45
inf.	inf.	661	0.45

$$V_s(0.0-30.0) = 218 \text{ m/s}$$

Si nota che a parte i picchi caratteristici di frequenza delle altissime frequenze che corrispondono però a strati superficiali si notano picchi a 24.31 Hz e a 1.03 Hz (tromografo 1), 26.12 Hz e a 1.13 Hz (tromografo 2), 15.79 Hz e 1.15 Hz (tromografo 3).

Per i valori delle Vs30 calcolati si evince che i terreni sono inseriti dal punto di vista sismico nella **classe C**.

Per il valore delle Vs30 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>	<i>V_{s30} (m/s)</i>
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:

$$\tau = (\sigma - u) \tan \varphi$$

Da studi statistici si è verificato che il fuso granulometrico a rischio possiede un D_{50} compreso tra 0,25 e 0,45 mm.

Come già descritto nei paragrafi precedenti, la stratigrafia del sottosuolo presenta irregolarmente strati sabbiosi immersi in falda, che potrebbero quindi essere liquefacibili, ma occorre anche tenere in considerazione la profondità in cui si trovano tali strati e lo spessore degli stessi.

Poiché la liquefazione si verifica in condizioni in cui le sabbie presentano una composizione granulometrica piuttosto uniforme, si escludono dalla verifica i casi in cui si presentano livelli sabbiosi di spessore uguale o inferiore ai 60 cm, che rappresentano intercalazioni all'interno di strati coesivi.

Sono inoltre esclusi i depositi presenti ad una profondità superiore a 15 m, in quanto il carico litostatico è talmente elevato da non poter essere raggiunto dalla pressione neutra.

Per la verifica si considerano i risultati della prova penetrometrica statica.

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

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

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

MSF = fattore di scala della magnitudo

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

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

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

Per la verifica del potenziale di liquefazione si considera i risultati della prova penetrometrica elettrica e le indicazioni del DR 630/19 della regione Emilia Romagna.

Utilizzando il software Cliq della ditta Geologismiki, è possibile elaborare la prova penetrometrica elettrica secondo i vari metodi semplificati.

Nel nostro caso è stato applicato il metodo di Robertson 2009 e considerando le seguenti condizioni principali:

- Strato liquefacibile sino a 19.76 m
- Magnitudo massima 6
- PGA = 0.201 g
- Falda a - 2.7 m dal piano campagna attuale

Il software normalizza le prove penetrometriche in funzione della profondità e della pressione interstiziale. Poi si applicano le seguenti formulazioni per ottenere un fattore di sicurezza e una probabilità di liquefazione LPI (I_L):

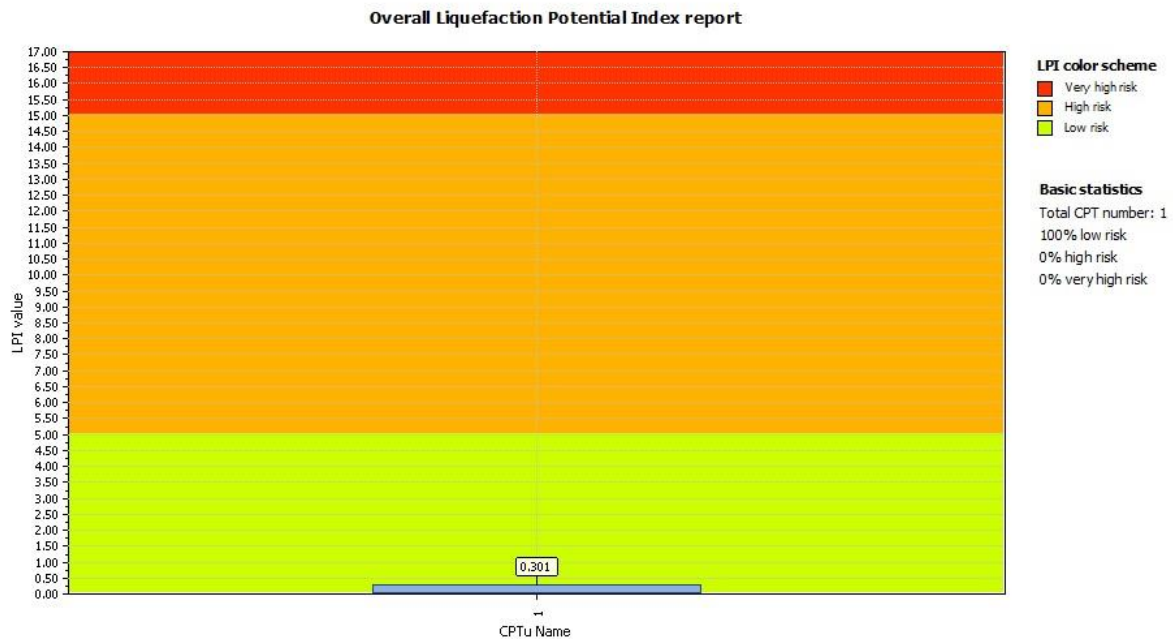
$$F_L(z) = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma'v=1atm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

che praticamente esegue il rapporto opportunamente corretto in funzione della magnitudo MSF e della pressione efficace, tra la resistenza ciclica normalizzata CRR e il taglio ciclico indotto dal sisma CSR.

Il potenziale di liquefazione è poi l'integrale:

$$LPI = \int F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

si ottengono i seguenti risultati:

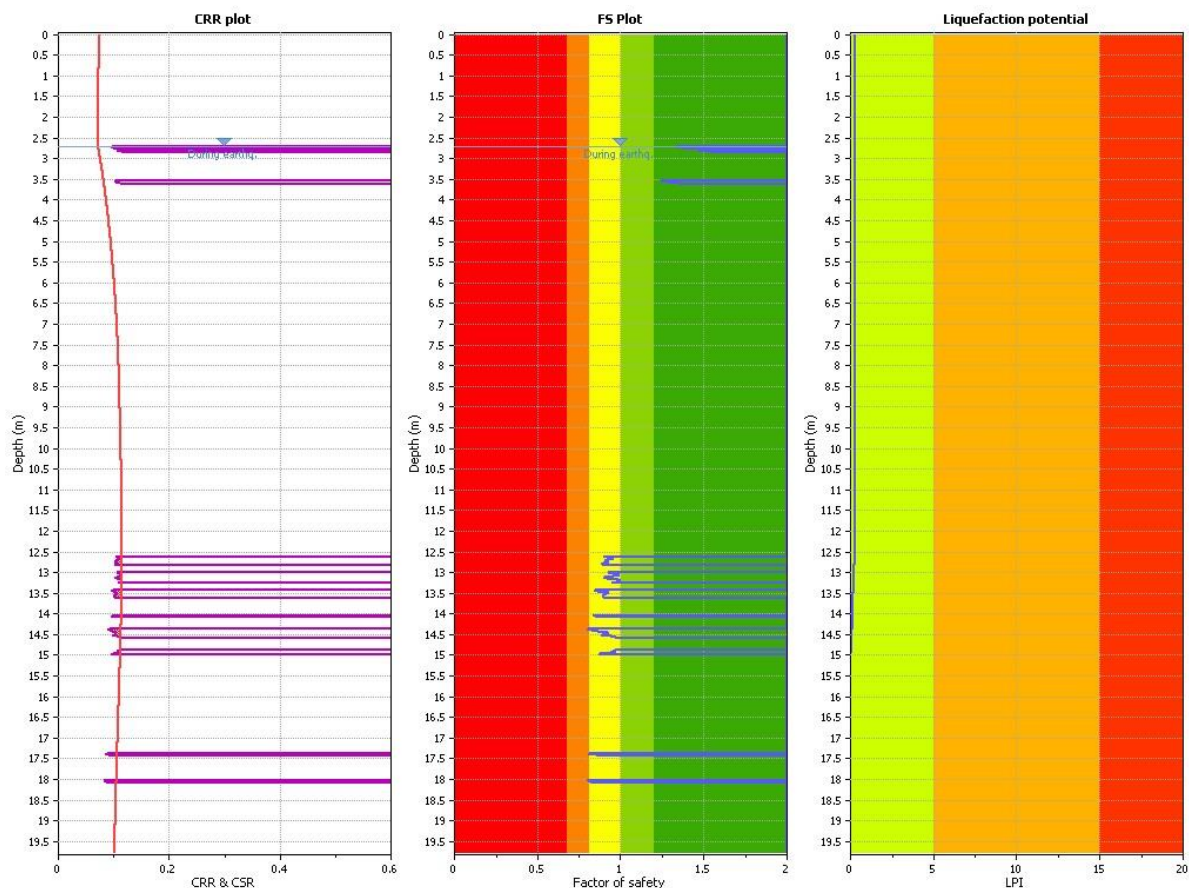


dove si ricava che rispetto alle categorie di Somnez,

$I_L = 0$	Non liquefacibile ($F_L \geq 1.2$)
$0 < I_L \leq 2$	Potenziale basso
$2 < I_L \leq 5$	Potenziale moderato
$5 < I_L \leq 15$	Potenziale alto
$15 < I_L$	Potenziale molto alto

i terreni ricadono in una potenzialità di liquefazione basso.

Si riporta nei seguenti grafici l'elaborazione dove si vede che il valore è dovuto alla presenza di pochi strati granulari tra le profondità di 12.5 e 15.0 metri.

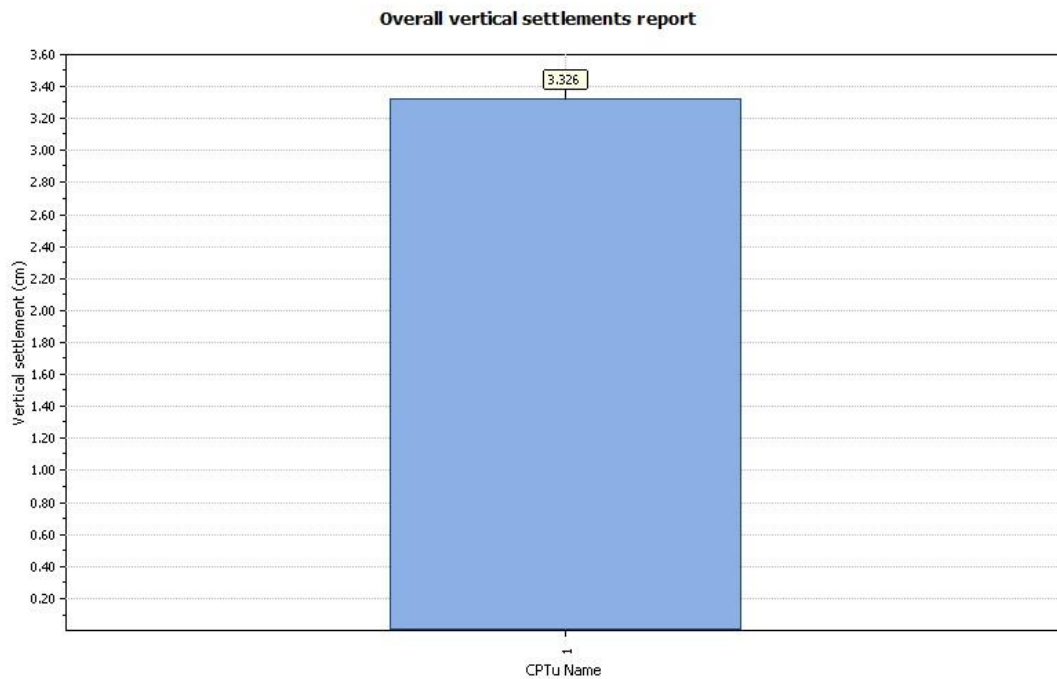


Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica

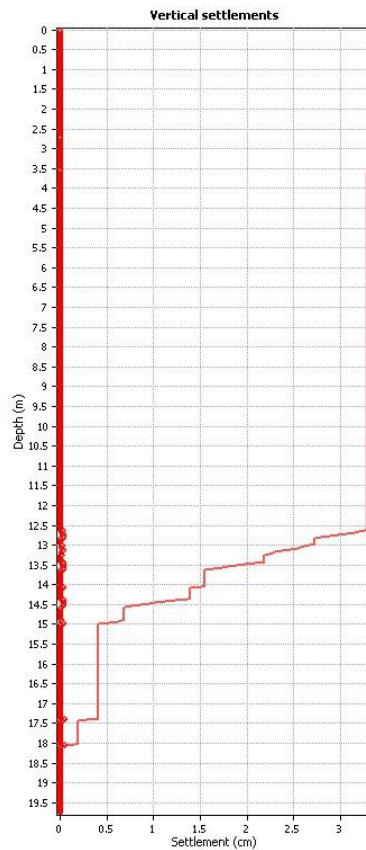
La stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica è affetta da notevoli incertezze. I valori che si ottengono applicando la procedura nel seguito descritta devono intendersi solo orientativi. Per cedimento si intende l'abbassamento del piano campagna, ovvero l'integrale della deformazione del terreno in direzione verticale, o anche la sommatoria dei prodotti della deformazione verticale media per lo spessore di ciascuno degli strati deformati. In condizioni edometriche, ovvero in presenza di strati di terreno orizzontali ed omogenei, e con tensione costante in direzione orizzontale, le deformazioni laterali sono nulle e pertanto la deformazione verticale coincide con la deformazione volumetrica. Per semplicità e con approssimazione accettabile, salvo casi di morfologia con forti pendenze e stratigrafie molto variabili in direzione orizzontale, per la stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica si può fare riferimento alle condizioni edometriche. Il cedimento permanente indotto dall'azione sismica in corrispondenza di una verticale di esplorazione si ottiene dalla somma dei contributi al cedimento stimati per i diversi strati del sottosuolo, fino alla profondità alla quale tali contributi non sono più significativi. Il cedimento permanente post-sismico può dunque essere stimato con l'equazione:

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{vi} \cdot \Delta Z_i$$

di cui ε_{vi} è la deformazione volumetrica (e verticale) dello strato i-esimo e ΔZ_i il suo spessore.
I cedimenti calcolati per la nostra area dal software CLiq sono indicati nel seguente grafico:



Nel nostro caso si ha un valore totale di 3.32 cm, che è stato prodotto dagli strati indicati nel grafico:



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

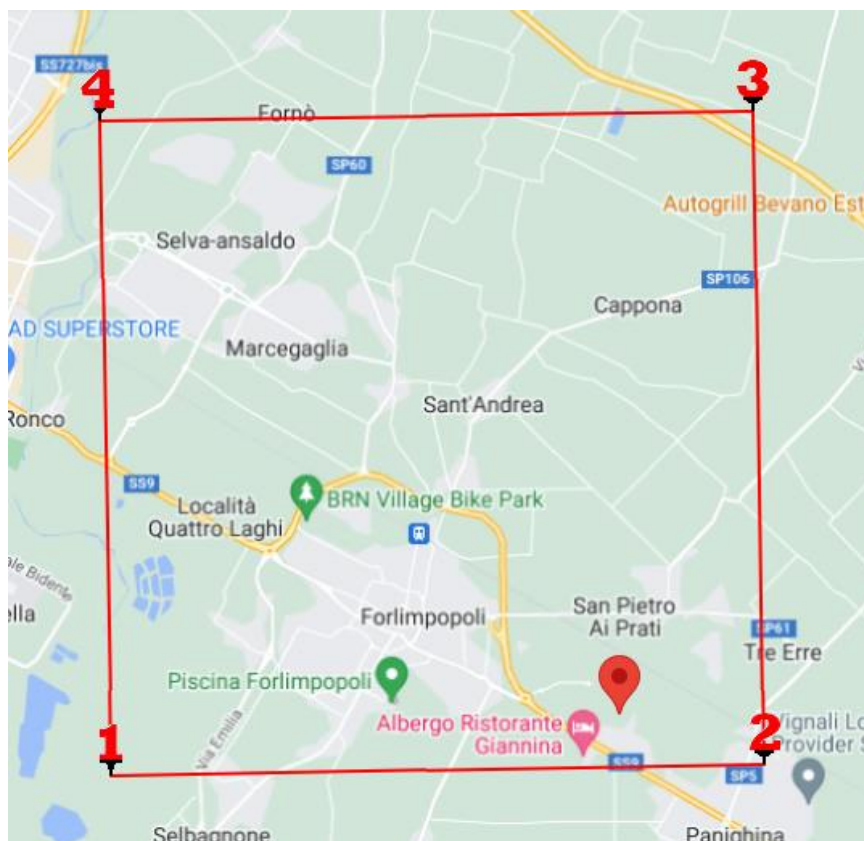
Non si rende quindi necessario un approfondimento delle indagini ai fini della microzonazione sismica e dell'analisi della risposta sismica locale.

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: 4347,602
Sito 2	ID: 18296	Lat: 44,1775	Lon: 12,1659	Distanza: 1307,293
Sito 3	ID: 18074	Lat: 44,2275	Lon: 12,1648	Distanza: 5254,762
Sito 4	ID: 18073	Lat: 44,2267	Lon: 12,0951	Distanza: 6695,691



Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
 Categoria topografica: T1
 Periodo di riferimento: 50anni
 Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
 Tr: 30 [anni]
 ag: 0,062 g
 Fo: 2,418
 Tc*: 0,265 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento:	63	%
Tr:	50	[anni]
ag:	0,080	g
Fo:	2,405	
Tc*:	0,273	[s]

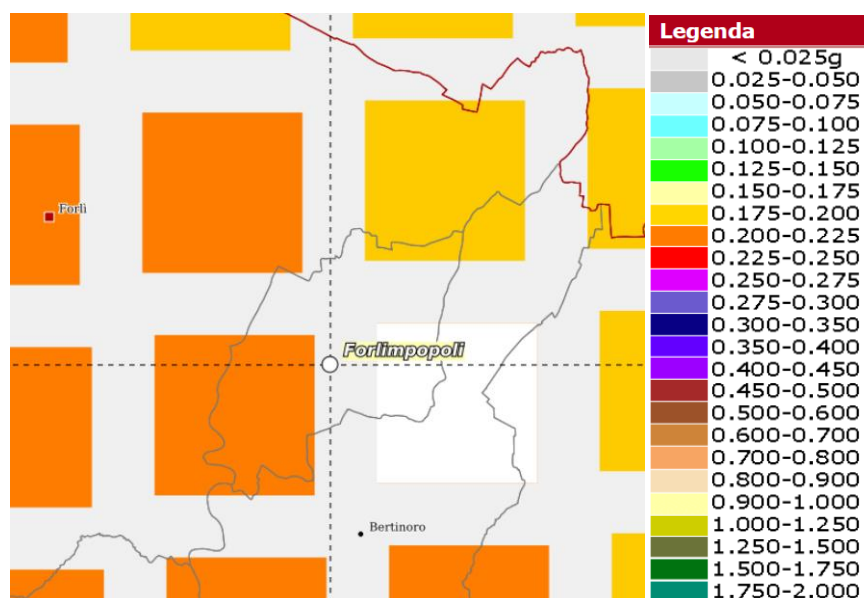
Salvaguardia della vita (SLV):

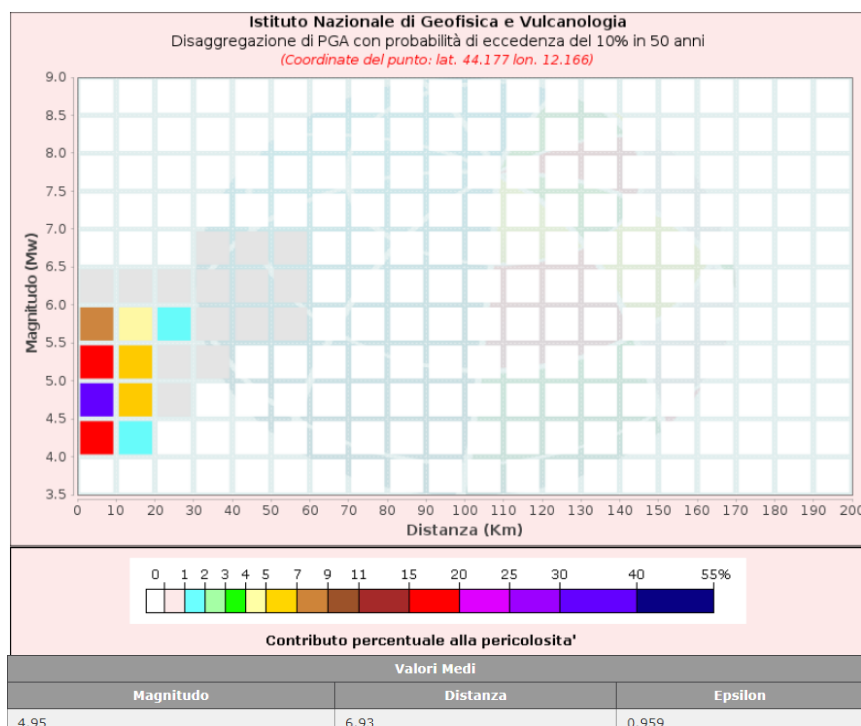
Probabilità di superamento:	10	%
Tr:	475	[anni]
ag:	0,201	g
Fo:	2,378	
Tc*:	0,311	[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento:	5	%
Tr:	975	[anni]
ag:	0,253	g
Fo:	2,438	
Tc*:	0,322	[s]

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

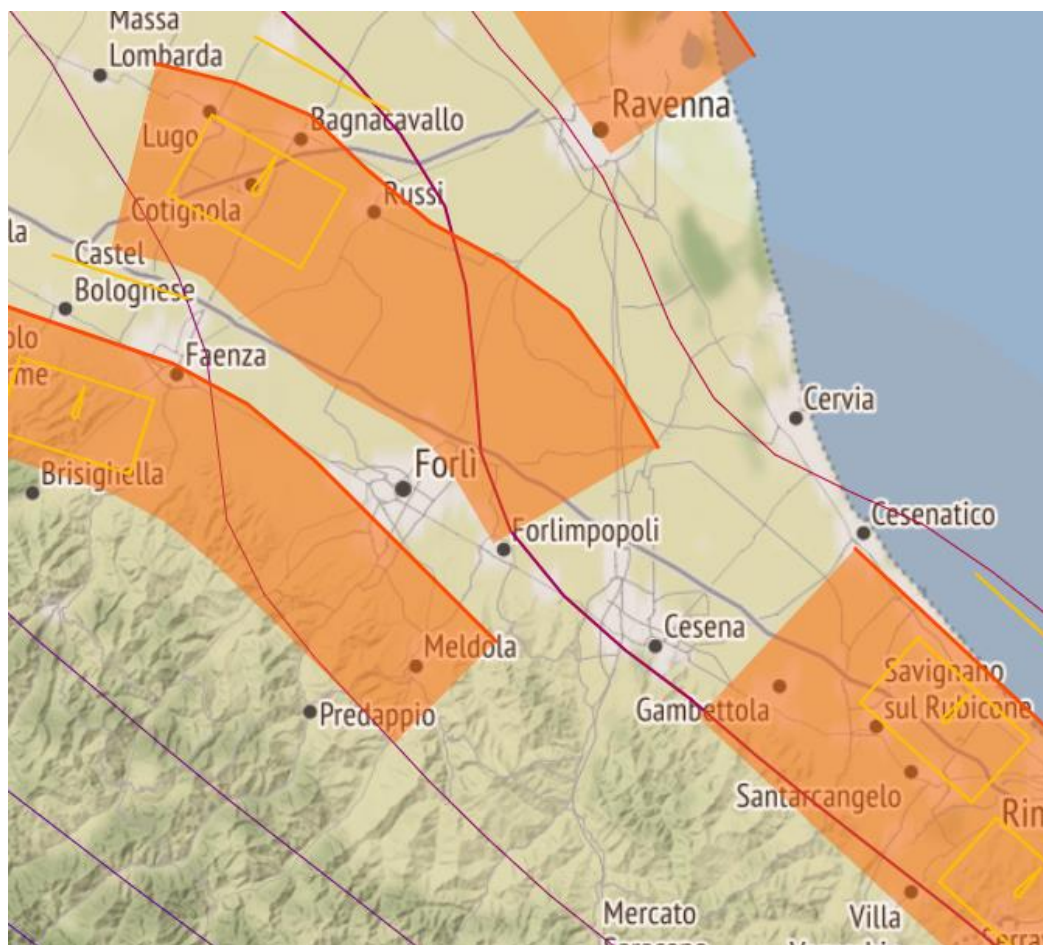




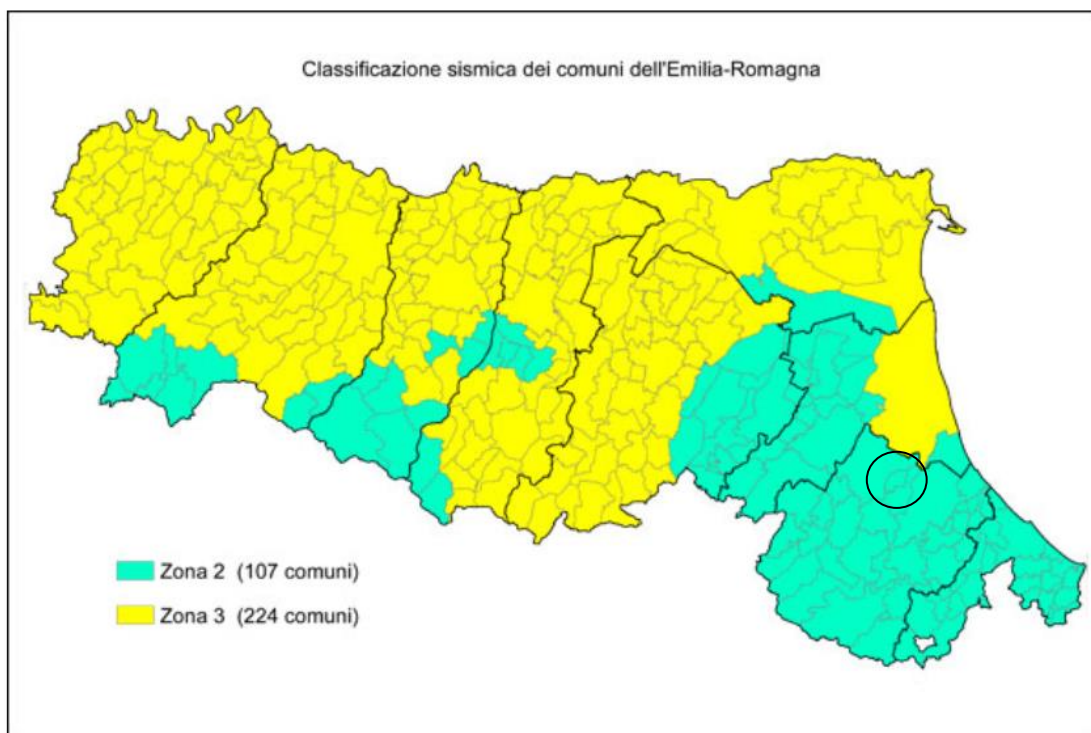
Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti specificatamente il territorio comunale di Forlimpopoli, sono state ricavate dal Database of Individual Seismogenic Sources (DISS) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Version 3.2.0., ossia dal database 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:

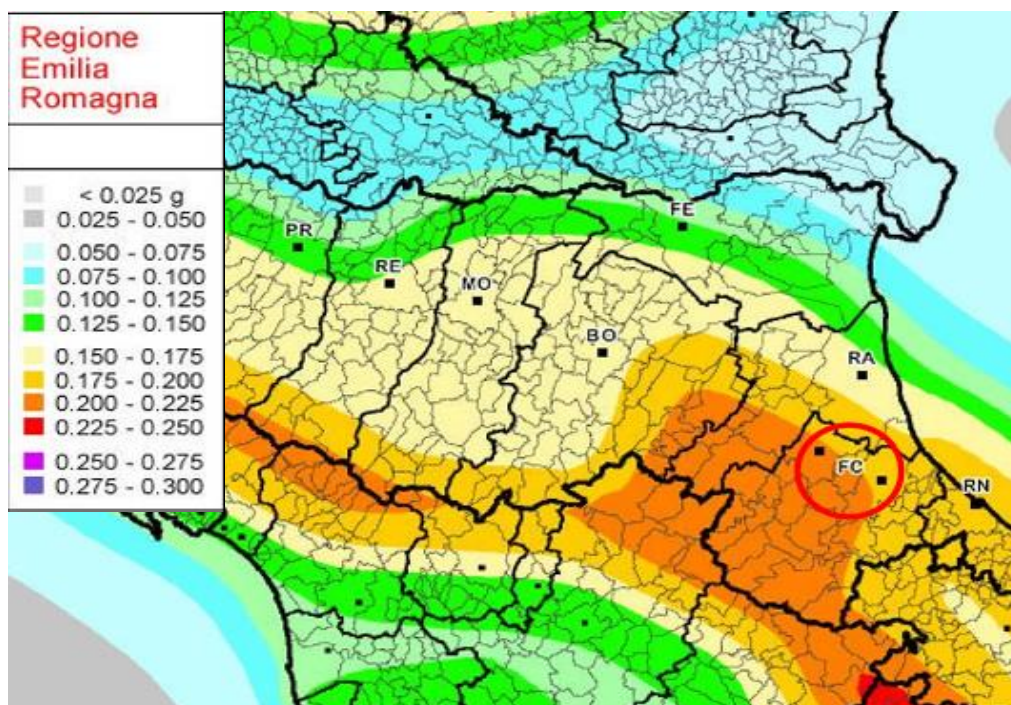
- ITCS039: Riminese onshore con Mw max (magnitudo momento massima) 7,0;
ITCS001: Castel San Pietro Terme-Meldola con Mw max (magnitudo momento massima) 6,5;
- ITCS011: Ascensione-Armaia con Mw max (magnitudo momento massima) 7,0.



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 Forlì 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

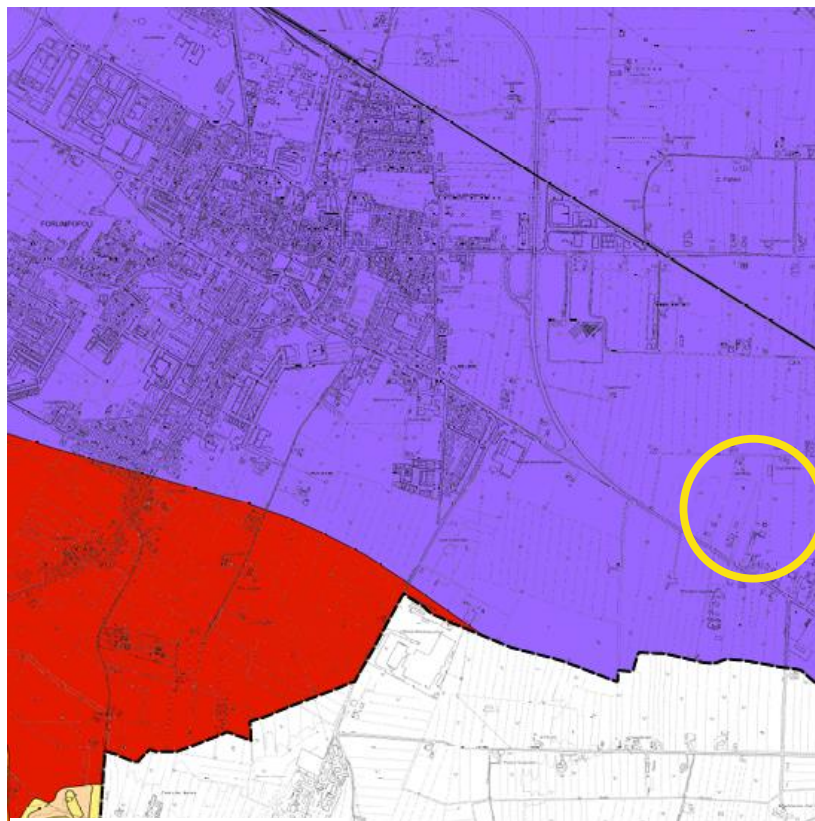
Fattore di Amplificazione **PGA**

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