CASADIO & CO.
di Casadio Mario

Via V.Veneto 1/bis – 47100 FORLI'
Tel: 0543 23923 – Email: studio@casadioeco.it
P.I. 04263320402

Casadio&Co
geologia
acustica
ambiente

ANALISI SISMICA
con approfondimento di terzo livello e risposta sismica locale

Committenti: VIRMANI srl, Sigg. Orlati, Parrocchia di S. Maria Assunta Carpena

DATA: 12/01/2021

REALIZZAZIONE DI UN PIANO URBANISTICO ATTUATIVO ADF 13 – COMPARTO A IN VIA BRANDO BRANDI A CARPENA IN COMUNE DI FORLI'

Il geologo
MARIO CASADIO

ANALISI SISMICA

CON APPROFONDIMENTO DI TERZO LIVELLO E RISPOSTA SISMICA LOCALE

PER LA REALIZZAZIONE DI UN PIANO URBANISTICO ATTUATIVO

ADF 13 – COMPARTO A

IN VIA BRANDO BRANDI A CARPENA

IN COMUNE DI FORLI'

PREMESSA

La presente relazione è stata richiesta allo scopo di integrare la relazione geologica datata Aprile 2020, riferita ad un'area sita in Via Brando Brandi in Comune di Forlì, sulla quale si dovrà realizzare un Piano Urbanistico Attuativo.
Il Servizio Tecnico Infrastrutture, Trasporti e Pianificazione Territoriale della Provincia di Forlì-Cesena ufficio pianificazione ha richiesto quanto segue inerente la suddetta relazione:

……Integrazioni alla relazione geologica
In materia di prevenzione sismica, la normativa vigente in ambito di pianificazione, è rappresentata dalla DGR n. 630/2019 sopra citata.
Si chiede pertanto di aggiornare i contenuti della Relazione geologica, relativamente alla definizione della pericolosità sismica di sito, secondo le prescrizioni ed i parametri della DGR 630/2019. I risultati di tali approfondimenti, dovranno essere confrontati con le tavole di MZS comunale, che il Comune di Forlì ha effettuato, avendo avuto accesso ai fondi di cui alle DGR 1051/2011 e 17050/2016.
Sempre in materia di prevenzione sismica, si chiede, inoltre, di approfondire i seguenti aspetti:
Rischio liquefazione: la relazione afferma che "...è possibile evitare la verifica, in quanto i terreni hanno granulometria argillosa sino a circa 6,0 metri e sotto la granulometria diventa sabbioso-ghiaiosa e quindi fuori dai fusi granulometrici pericolosi." Tale affermazione non è supportata da dati geologici (anche bibliografici) in relazione, poiché le prove si sono arrestate nei primi centimetri del banco sabbioso. Né le caratteristiche granulometriche, né lo spessore dello strato sono quindi noti e non è possibile, con i dati a disposizione, omettere la verifica. Anche il modello geologico proposto non risulta determinato, mancando un qualsiasi riscontro diretto…….

L'integrazione quindi riguarda l'approfondimento della risposta sismica locale di terzo livello secondo il DGR 630/2019 e lo studio sulla liquefazione dei terreni.
Per meglio esaudire le richieste è stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo fino alla profondità di 30,0 m.

Si allegano:

- planimetria generale dell'area a scala 1:1.500
- stratigrafia sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel gennaio 2021

MORFOLOGIA E GEOLOGIA DEL TERRITORIO

La zona qui studiata è posta a circa 32 m s.l.m., morfologicamente si presenta pianeggiante facente parte della zona di margine pedecollinare costituita da depositi alluvionali granulari su un substrato marino pleistocenico.

Nel nostro caso la stratigrafia è stata desunta fino a 30,0 m di profondità dal sondaggio eseguito il 7 gennaio 2021 (si allega stratigrafia)

Sondaggio a carotaggio continuo

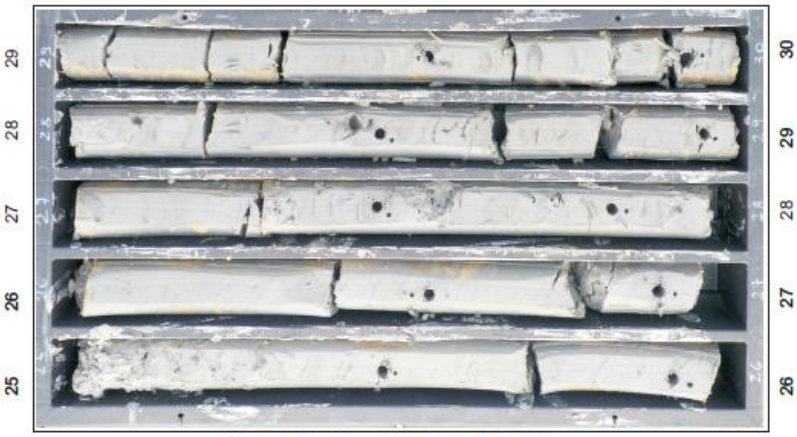
Cassa 1 da 0.0 a -5.0 m

Cassa 2 da -5.0 a -10.0 m

Cassa 3 da -10.0 a -15.0 m

Cassa 4 da -15.0 a -20.0 m

Cassa 5 da -20.0 a -25.0 m



Cassa 6 da -25.0 a -30.0 m

la restante stratigrafia profonda è stata ricavata dall'interpolazione sia dai dati ottenuti dal tromografo, dallo stendimento in array che dai pozzi ubicati sulla Strada Provinciale del Ronco e al Circolo Tennis di Carpena.

Si nota un netto cambio stratigrafico alla profondità di 24.80 m quando al posto di terreni granulari si incontrano argille limose color grigio che però non appaiono ancora come il substrato marino essendovi presenza di bioclasti e veli carboniosi.

Infatti nelle stratigrafie dei pozzi il substrato è indicato a profondità maggiore (circa 38 m) così pure nei rilievi sismici eseguiti c'è un passaggio netto alla profondità di 35 metri.

48

255010 P634

POZZO DI CARPENA

Strada Provinciale Del Reno

NOTE GEOLOGICHE:

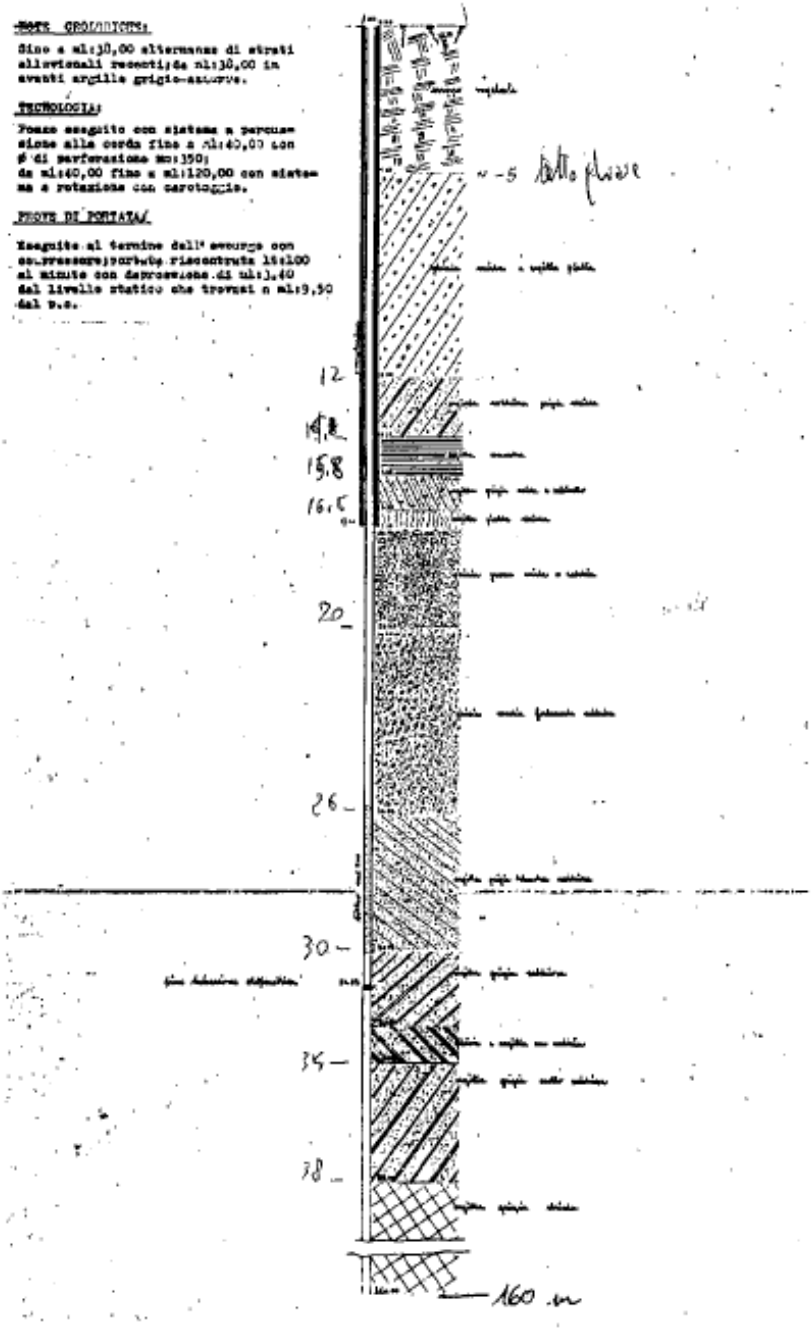
Sino a ml:30,00 alternanze di strati alluvionali recenti; da ml:30,00 in avanti argille grigio-azzurre.

TECNOLOGIA:

Pozzo eseguito con sistema a percussione alla corda fino a ml:40,00 con ø di perforazione mm:350; da ml:40,00 fino a ml:120,00 con sistema a rotazione con carotaggio.

PROVE DI PORTATA:

Eseguite al termine dell'avanzo con ev.pressore; portata riscontrata lt:100 al minuto con depressione di ml:1,40 dal livello statico che trovasi a ml:9,50 dal p.c.



13/05/99 12:46 COMUNE DI FORLI' PIANIF. TERR.LE 001

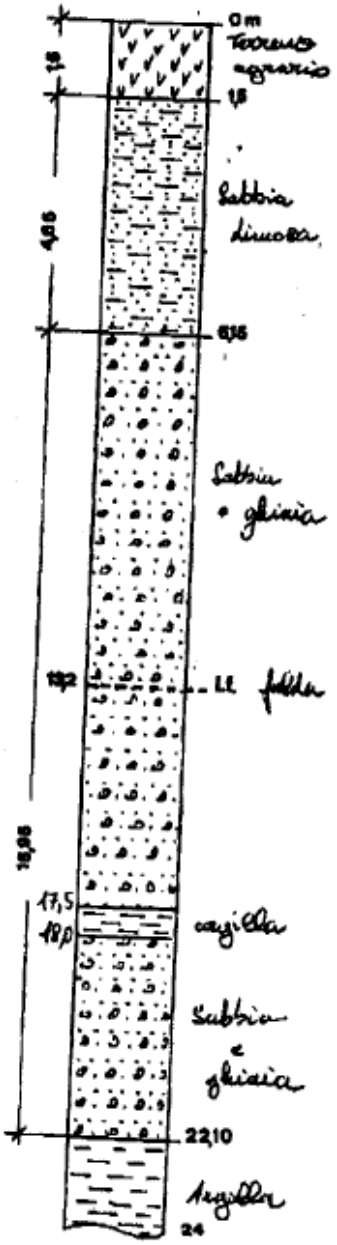
255010 P635

Comune di Forlì

STRATIGRAFIA POZZO PRIVATO c/o TENNIS CARPENA (CARPENA - FORLÌ)

quota SLM 36,5

COMUNE DI FORLÌ



CORTESE ATT. NE ADT. SEVERI PAOLO -

Come d'accordo, t' invio quanto promesso - Per eventuali informazioni, il mio telefono è 0543 - 712733

Buon lavoro -

ADT. MERELLI MARCELLO

La falda è stata misurata l'8 gennaio 2021 a distanza di 24 ore dall'esecuzione del sondaggio, a profondità di 11,6 m dal piano campagna attuale. Tale quota è da ritenersi vicina alla quota massima vista la stagione abbastanza piovosa.

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:

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

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 fine1 , FC, superiore al 20%, con indice di plasticità IP>10%;

− FC ≥ 35% e resistenza (N1)60>20 oppure qc1N>120 oppure VS1>200 m/s;

− FC ≤ 5% e resistenza (N1)60>30 oppure qc1N>160 oppure VS1>220 m/s

(N1)60, qc1N, VS1 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:

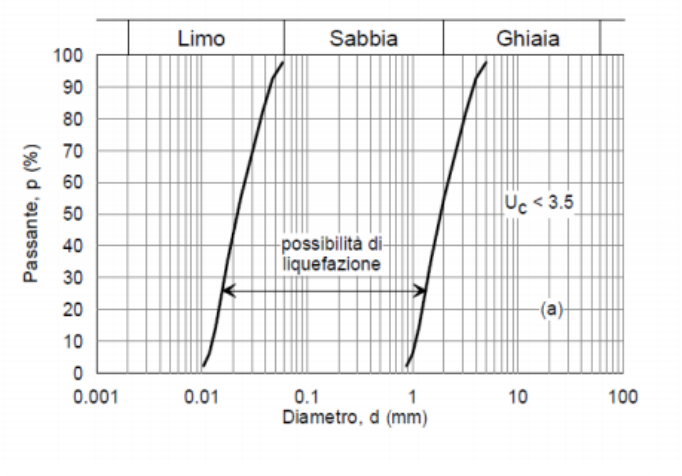
$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$$

$$q_{c1N} = \frac{q_c}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$$

$$V_{S1} = V_S \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25}$$

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

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



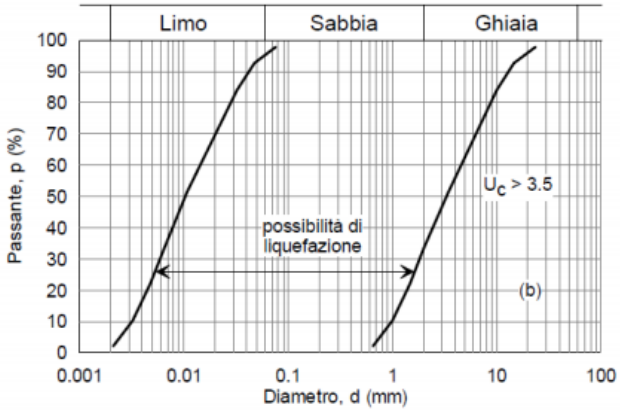


Figura 1 - Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità a liquefazione di terreni a granulometria uniforme (a) ed estesa (b) (AGI, 2005)

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

Nel nostro caso è possibile evitare la verifica in quanto i terreni da 7,5 m sono prevalentemente ghiaiosi fino a profondità di 25,10 m e quindi fuori dai fusi granulometrici pericolosi per la liquefazione, fatta eccezione per uno strato di argilla di spessore di 2,10 m individuata a 13,0 m di profondità ma comunque anch'essa fuori dai fusi granulometrici pericolosi per il tipo di litologia.

Inoltre la profondità della falda fornisce uno spessore di terreno potenzialmente liquefacibile di appena 3,4 m e quindi le eventuali pressioni interstiziali che si possono sviluppare hanno la possibilità di dissiparsi nei 4,0 m di ghiaia insatura presenti sopra tale strato e quindi eliminano la possibilità del fenomeno della liquefazione.

INDAGINE SISMICA

Metodi di indagine

Prova HVSR

All'interno dell'area di studio 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:

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

fr 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 Vs, 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.

Prova MASW

L'analisi dei microtremori viene effettuata utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione (a geofono singolo) disposta sul terreno con array lineare, da 12 a 48 geofoni; per ottenere una buona risoluzione in termine di frequenza, oltre ad utilizzare geofoni con bassa frequenza di risonanza (4-14 Hz raccomandati), è indispensabile

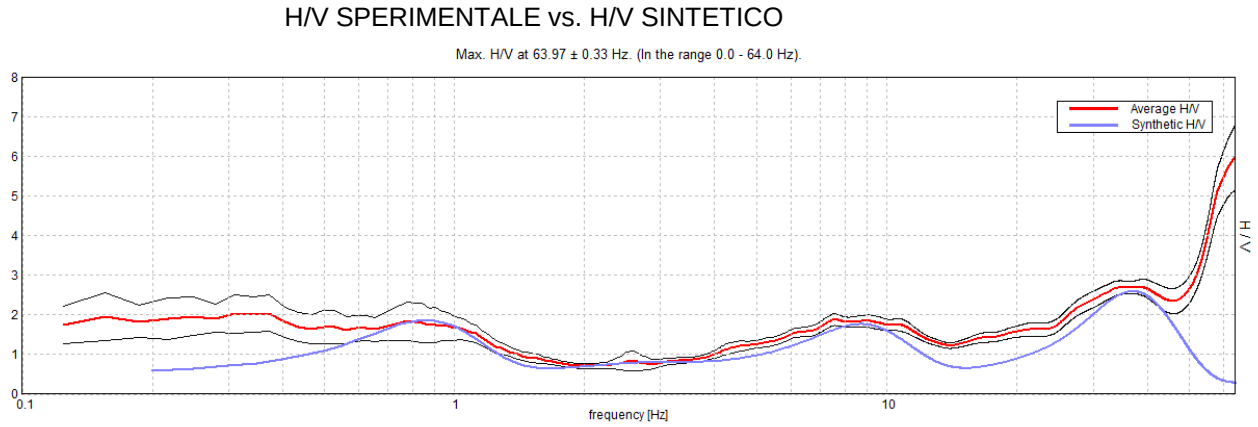
allungare il tempo di registrazione (15-30s) rispetto alla sismica a rifrazione tradizionale. L'uso di un sismografo digitale con elevata dinamica consente di dimezzare la frequenza utile campionabile rispetto a quella nominale dei geofoni impiegati.

Si possono così registrare onde di superficie il cui contenuto in frequenza copre un range da 25-30Hz fino a 2 Hz che, in condizioni ottimali, offre una dettagliata ricostruzione dell'andamento delle Vs relativamente ai primi cento metri di profondità.

L'elaborazione del segnale consiste nell'operare una trasformata bidimensionale "slowness-frequency"(p-f) che analizza l'energia di propagazione delle onde sismiche create mediante una massa battente ad un estremo della linea sismica e nel rappresentarne lo spettro di potenza su un grafico p-f.

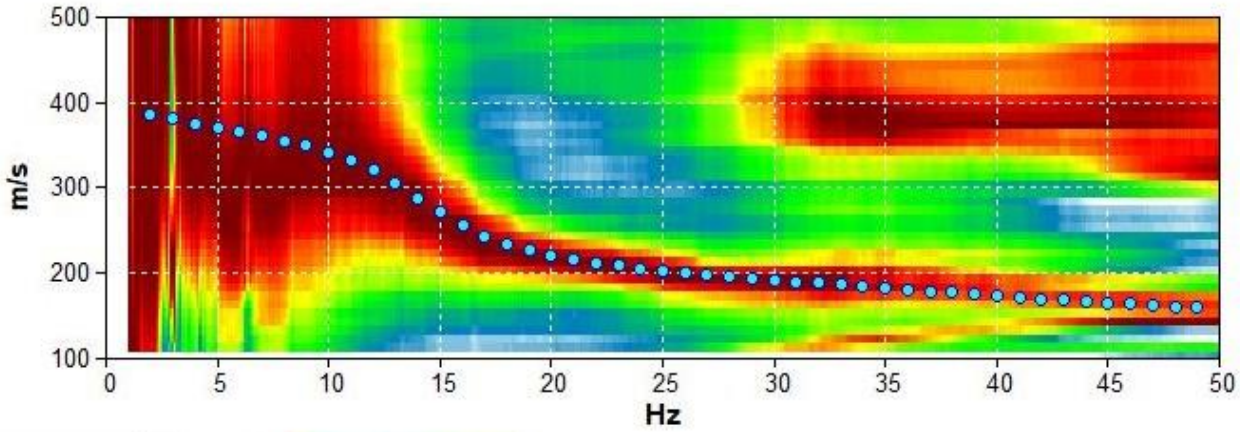
A questo punto l'operatore, in maniera arbitraria ed in base all'esperienza, esegue un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più slowness (p o 1/velocità di fase) per alcune frequenze. Tali valori vengono in seguito plottati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello diretto.

Tromino 1



La linea rossa corrisponde al rapporto spettrale H/V misurato, mentre quella blu è stata calcolata tramite una procedura matematica di inversione di un profilo stratigrafico mostrato in seguito.

Prova MASW

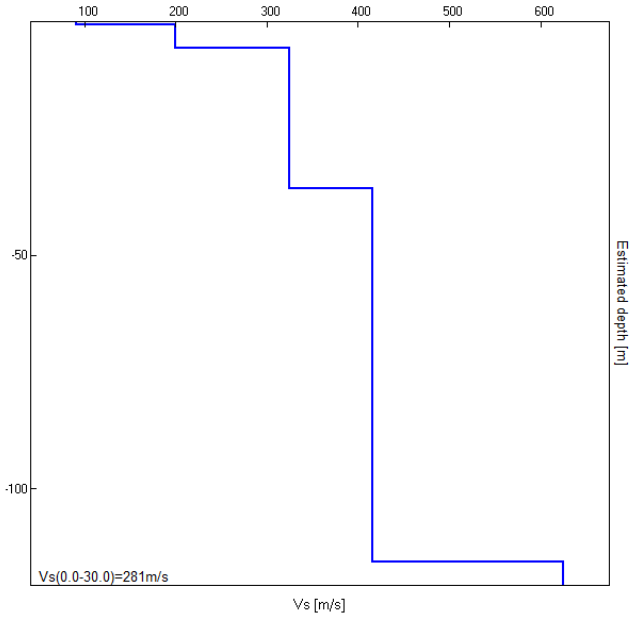


Dalla prova MASW si vede l'orizzonte relativo alla velocità delle onde S nel terreno.

La stratigrafia sismica dell'area, che produce i punti azzurri nel grafico spettrale della prova in array è qui di seguito mostrata.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
0.60	0.60	91	0.42
5.60	5.00	200	0.42
35.60	30.00	325	0.45
115.60	80.00	416	0.45
inf.	inf.	625	0.45

Vs(0.0-30.0)=281m/s



ANALISI 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:

	Descrizione del profilo stratigrafico
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* Caratterizzati da V_{s30} > 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, 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* Con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 e 800 m/s (oppure resistenza penetrometrica N_{SPT} > 50 nei terreni a grana grossa, o coesione non drenata c_u > 250 kPa nei terreni a grana fina)
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 e 360 m/s (oppure resistenza penetrometrica 15< N_{SPT} > 50 nei terreni a grana grossa, o coesione non drenata 70< c_u > 250 kPa nei terreni a grana fina)
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, c*on spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} inferiori a 180 m/s (oppure resistenza penetrometrica N_{SPT} < 15 nei terreni a grana grossa, o coesione non drenata c_u < 70 kPa nei terreni a grana fina)
E	*Terreni dei sottosuoli di tipo C e D per spessore non superiore ai 20 m,* posti sul substrato di riferimento con V_{s30} > 800 m/s

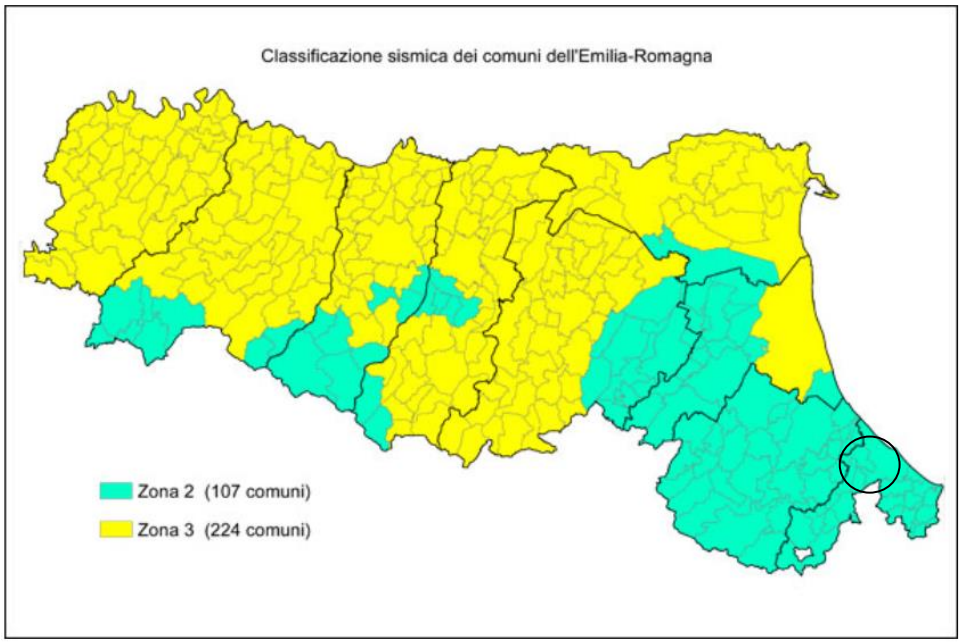
Dai risultati delle prove penetrometriche e delle prove sismiche, il terreno di studio ricade all'interno della ***classe C***.

La suddetta normativa prevede le seguenti categorie topografiche. Il lotto appartiene alla categoria T1.

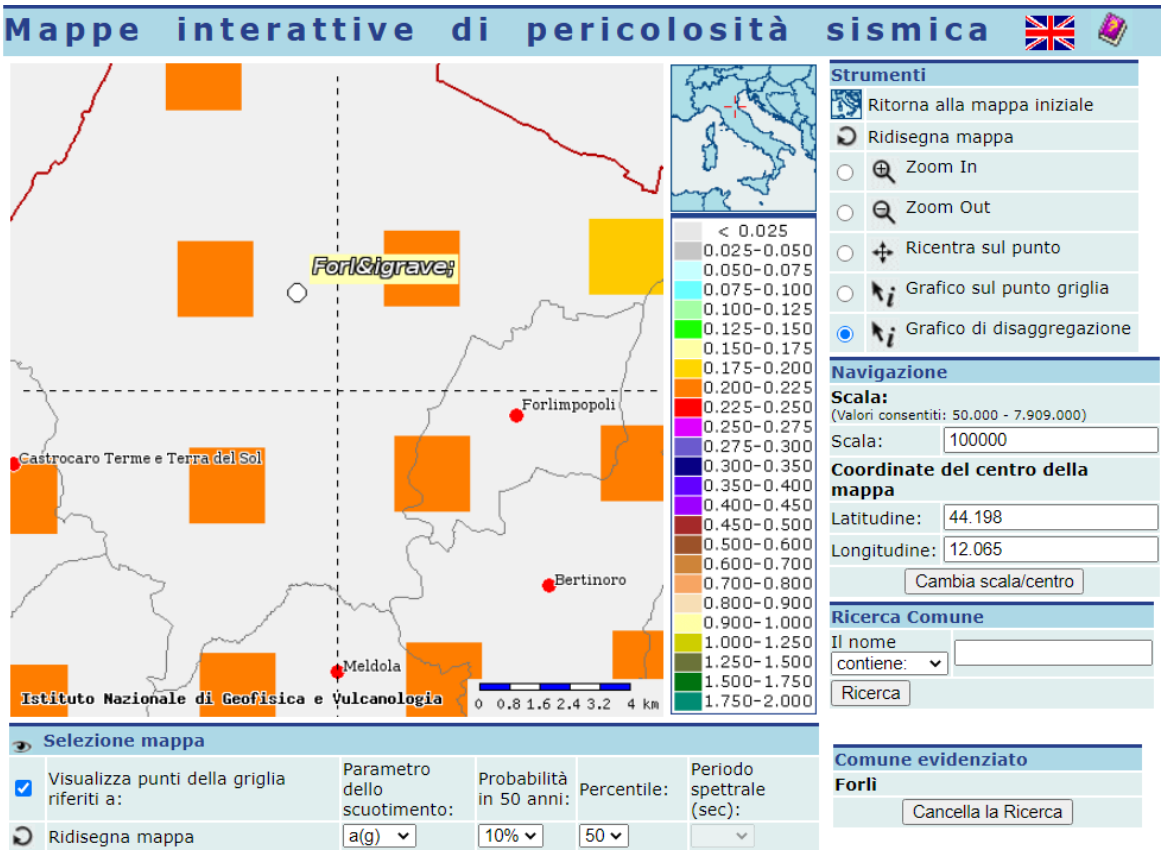
Categoria	*Caratteristiche della superficie topografica*
T1	**Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°**
T2	Pendii con inclinazione media i > 15°
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media 15° ≤ i ≤ 30°
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media i > 30°

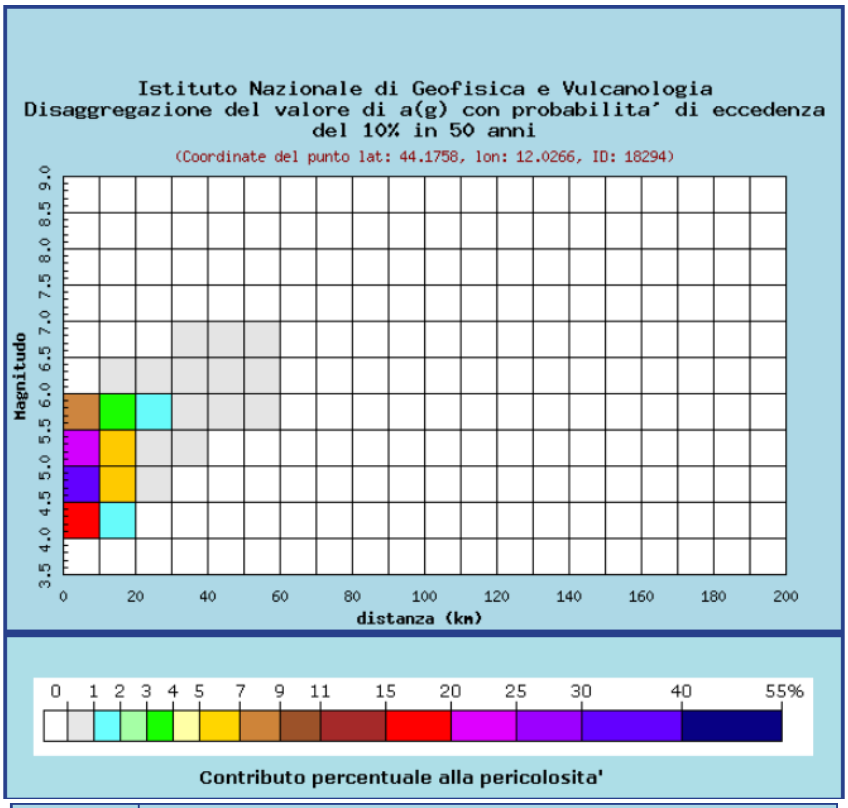
VERIFICA SISMICA DI I° LIVELLO

Il comune è inserito in zona 2 con una accelerazione massima attesa di 0.205 g.



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):





Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilita' di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 44.1758, lon: 12.0266, ID: 18294)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	18.200	34.800	20.400	7.850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	1.290	5.110	6.050	3.910	0.092	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.080	0.703	1.020	0.159	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.000	0.023	0.228	0.110	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.040	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

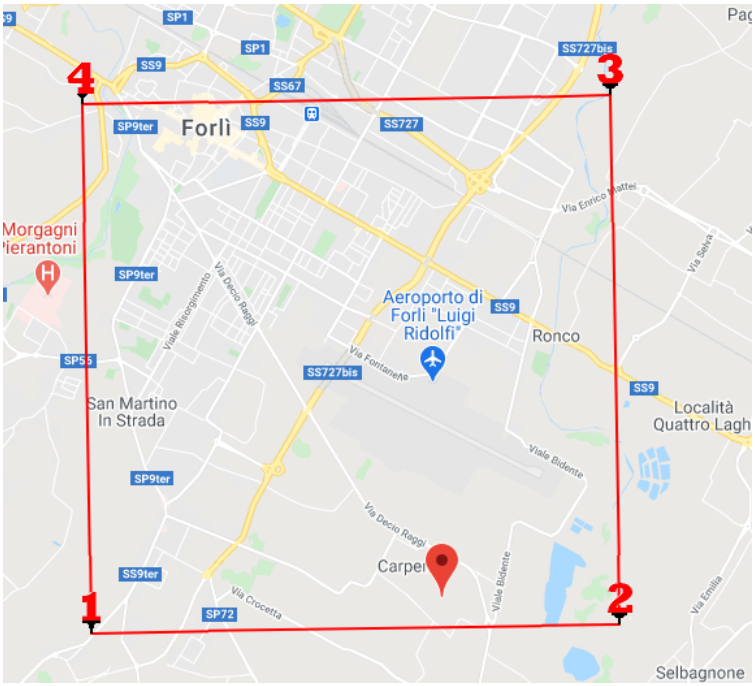
Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
4.930	6.720	1.040

Dalla tabella soprastante il valore medio per la magnitudo è 4.9 mentre la distanza attesa è 6.7 km.

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

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 18294	Lat: 44,1758	Lon: 12,0266	Distanza: 3598,393
Sito 2	ID: 18295	Lat: 44,1767	Lon: 12,0963	Distanza: 1989,905
Sito 3	ID: 18073	Lat: 44,2267	Lon: 12,0951	Distanza: 5642,716
Sito 4	ID: 18072	Lat: 44,2258	Lon: 12,0254	Distanza: 6390,556



Al quale sono associati i seguenti 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:	0,066 g	
Fo:	2,400	
Tc*:	0,263	[s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento:	63	%
Tr:	50	[anni]
ag:	0,084 g	
Fo:	2,392	
Tc*:	0,272	[s]

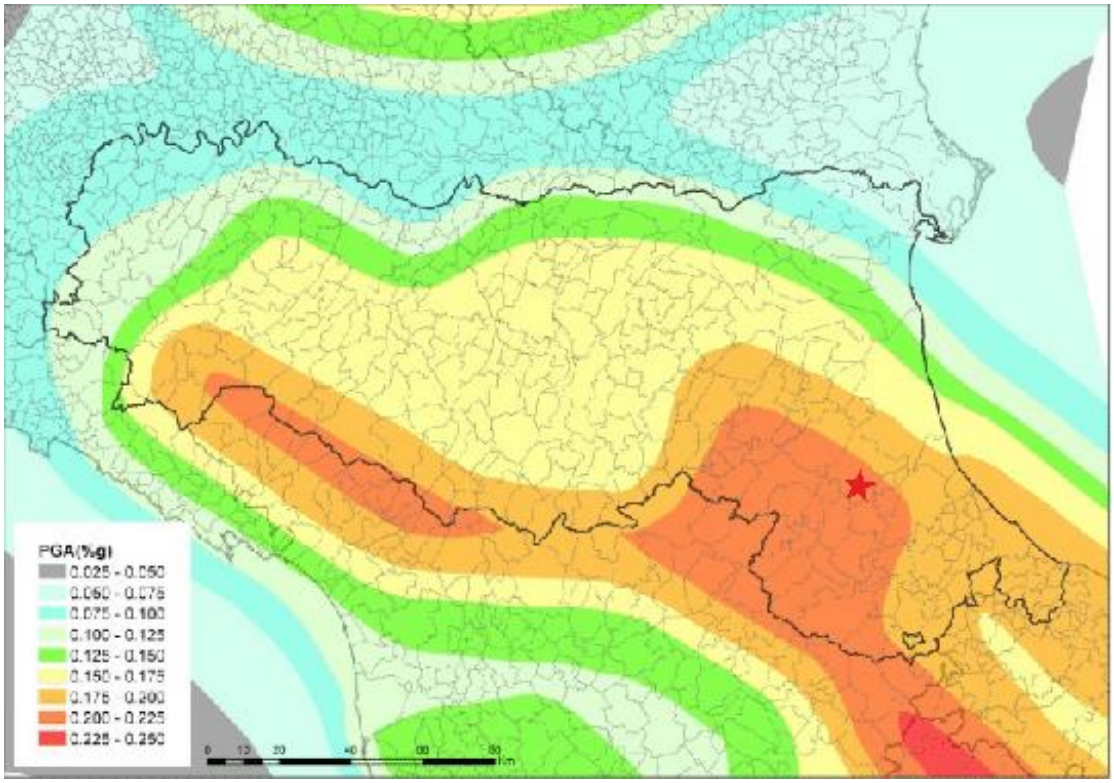
Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento:	10	%
Tr:	475	[anni]
ag:	0,205 g	
Fo:	2,426	
Tc*:	0,305	[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

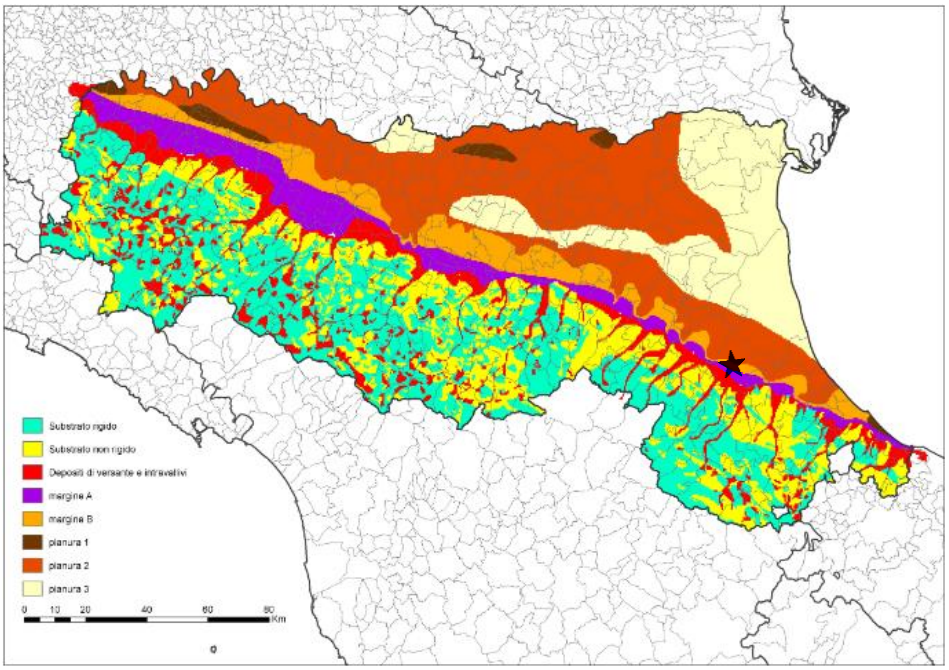
Probabilità di superamento:	5	%
Tr:	975	[anni]
ag:	0,257 g	
Fo:	2,484	
Tc*:	0,317	[s]

La regione Emilia Romagna ha fornito una planimetria con i valori della PGA attesa nel territorio dove si nota che l'area in oggetto appartiene alla campitura arancione chiaro essendo la PGA attesa pari a 0.205 g.

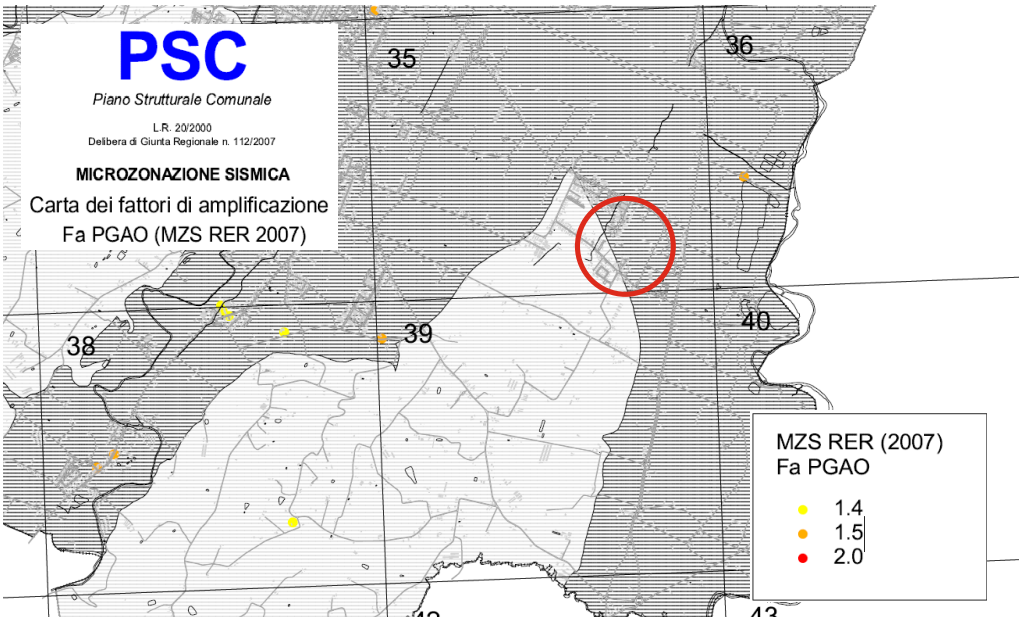

PGA(%g)
0.025 - 0.050
0.050 - 0.075
0.075 - 0.100
0.100 - 0.125
0.125 - 0.150
0.150 - 0.175
0.175 - 0.200
0.200 - 0.225
0.225 - 0.250

VERIFICA SISMICA DI II° LIVELLO

Il territorio regionale è stato suddiviso in funzione delle caratteristiche sismiche, in varie aree a seconda della tipologia morfologica e stratigrafica.



Il Comune di Forlì ha elaborato uno studio di Microzonazione sismica all'interno del PSC dove nell'elaborato inerente l'amplificazione della PGA0 si nota che i valori del FA danno un risultato di 1.5.



Inoltre il comune di Forlì appartiene nella suddivisione del territorio regionale, alla categoria MARGINE di tipo B definito come “caratterizzato da spessore dei terreni superficiali fini o grossolani poco consolidati superiore a 30 m; la successione sottostante è costituita da alternanze di orizzonti grossolani e orizzonti fini”.

Per la categoria del Margine tipo B la normativa fornisce le seguenti tabelle con i fattori di amplificazione:

Vs_{30} (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**

Vs_{30} (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≤T≤0,5s), **SA2** (0,4s≤T≤0,8s), **SA3** (0,7s≤T≤1,1s) e **SA4** (0,5s≤T≤1,5s)

Vs_{30} (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≤T≤0,5s), **SI2** (0,5s≤T≤1,0s), **SI3** (0,5s≤T≤1,5s)

VERIFICA SISMICA DI III° LIVELLO

La Regione Emilia-Romagna, con specifiche norme (L.R. 20/2000 e Delibera Regionale n.112/2007-2015) ha richiesto lo studio di microzonazione sismica locale con approfondimento al terzo livello, allo scopo di verificare la pericolosità sismica delle aree con interesse pubblico rilevante.
Per tale verifica si è utilizzato un software della ditta GEOSTRU denominato RSL con il quale, una volta forniti tutti i dati inerenti le caratteristiche geotecniche e sismiche dei terreni, eseguire in automatico tutte le verifiche con i tre sisma forniti dalla regione Emilia Romagna e calibrati alla accelerazione massima attesa.

PROCEDURA DI CALCOLO

La procedura di calcolo adoperata da RSL per la valutazione della funzione di trasferimento presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi, od uno spettro di risposta in accelerazione e la conoscenza della stratigrafia del sito attraverso i seguenti parametri geotecnici per ogni strato:

- peso per unità di volume;
- velocità di propagazione delle onde di taglio;
- coefficiente di spinta laterale;
- modulo di taglio iniziale (opzionale);
- spessore;
- indice di plasticità.

La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso dalla deformazione.
Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

- Valutazione dello spettro di Fourier dell'accelerogramma (omessa nel caso si debba analizzare uno spettro);
- Ricerca di un errore relativo piccolo seguendo la procedura di:
- Stima della funzione di trasferimento;
- Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;
- Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;
- Le operazioni 2.1, 2.2 e 2.3 sono ripetute fino a quando la differenza di deformazione tra un'iterazione e la precedente non rimane al di sotto di una soglia ritenuta accettabile;
- Trasformazione inversa di Fourier dello spettro precedentemente calcolato ed opportunamente pesato per mezzo della funzione di trasferimento calcolata.

Attraverso questa procedura è possibile "trasferire" l'accelerogramma dal bedrock in superficie. La deformazione per ciascuno strato viene corretta sulla base del rapporto fra deformazione effettiva e massima come suggerito dalla letteratura scientifica, ovvero

$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M-1}{10}$$

dove *M* rappresenta la magnitudo del sisma.

Per la valutazione della funzione di trasferimento, RSL considera un suolo variamente stratificato composto da N strati orizzontali di cui l'N-esimo è il letto di roccia (bedrock). Ponendo come ipotesi che ciascuno strato si comporti come un solido di Kelvin-Voigt $\left[\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma(z,t)}{\partial z \partial t}\right]$, la propagazione delle onde di taglio che attraversano gli strati verticalmente può essere definita dall'equazione dell'onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \tag{1}$$

dove: u rappresenta lo spostamento; t il tempo; ρ la densità; G il modulo di deformazione al taglio; η la viscosità. Per onde armoniche lo spostamento può essere scritto come:

$$u(z,t) = U(z)^{i\omega t} \tag{2}$$

che sostituita nella (1) pone

$$(G + i\omega t)\frac{d^2U}{dz^2} = \rho\omega^2 U \tag{3}$$

dove ω rappresenta la frequenza angolare. La (3) può essere riscritta come

$$G^* \frac{d^2U}{dz^2} = \rho\omega^2 U \tag{4}$$

avendo posto $G^* = G + i\omega\eta$, ovvero il modulo di deformazione al taglio *complesso*. Questo può essere ulteriormente riscritto come

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \tag{5}$$

avendo posto

$$\eta = \frac{2G}{\omega}\xi \tag{6}$$

dove ξ rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso. Ciò posto, e fatta convenzione che l'apice * indica la natura complessa della variabili in gioco, la soluzione dell'equazione generica dell'onda è la seguente:

$$u(z,t) = Ee^{i(\omega t + k^* z)} + Fe^{i(\omega t - k^* z)} \tag{7}$$

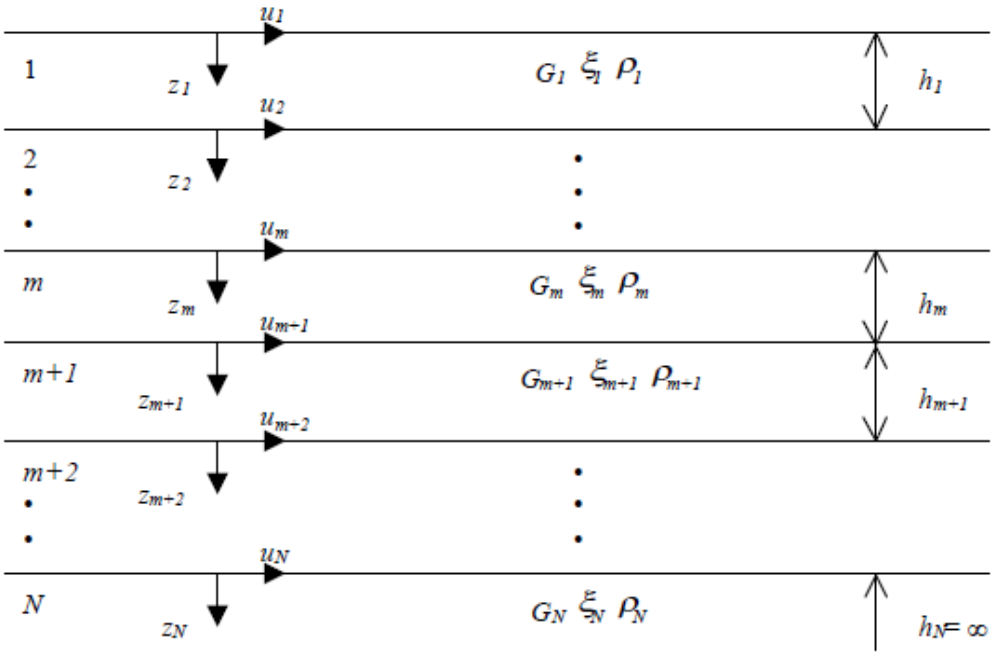


Figura 1: Esempio di stratigrafia per riferimento.

dove E e F dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano l'ampiezza d'onda che viaggia rispettivamente verso l'alto (-z) e verso il basso (+z), mentre k^* rappresenta il numero d'onda complesso dato dalla seguente espressione:

$$k^* = \omega\sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \tag{8}$$

Il taglio invece è dato da:

$$\tau(z,t) = G^* \frac{dU}{dz} e^{i\omega t} = ik^* G^* \left[E e^{i(\omega t + k^* z)} + F e^{i(\omega t - k^* z)} \right] e^{i\omega t} \tag{9}$$

Per il generico strato *m* di spessore h_m gli spostamenti, rispettivamente in sommità (z = 0) ed al fondo (z = h_m), sono:

$$u_m(0,t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \tag{10}$$

$$u_m(h_m,t) = \left(E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \right) e^{i\omega t} \tag{11}$$

Poiché deve essere rispettata la congruenza sullo spostamento all'interfaccia tra gli strati, ovvero lo spostamento in sommità ad uno strato deve essere uguale allo spostamento sul fondo di quello immediatamente sopra, se ne deduce che:

$$u_m(z = h_m, t) = u_{m+1}(z = 0, t) \tag{12}$$

Usando la (10), (11) e la (12), ne consegue che

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \tag{13}$$

Il taglio in sommità ed al fondo dell'*m*-esimo strato è dato da:

$$\tau_m(0,t) = ik_m^* G_m^* \left[E_m - F_m \right] e^{i\omega t} \tag{14}$$

$$\tau_m(h_m,t) = ik_m^* G_m^* \left[E_m e^{ik_m^* h_m} - Fe^{ik^* h_m}\right] e^{i\omega t} \tag{15}$$

Poiché fra uno strato e l'altro il taglio deve essere continuo si ha

$$\tau_m(z = h_m, t) = \tau_{m+1}(z = 0, t) \tag{16}$$

ovvero

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*}\left(E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}\right) \tag{17}$$

Sommando la (13) alla (17) e sottraendo la (17) alla (13) si ottiene

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m \left(1 + \alpha_m^*\right) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m \left(1 - \alpha_m^*\right) e^{-ik_m^* h_m} \tag{18}$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m \left(1 - \alpha_m^*\right) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m \left(1 + \alpha_m^*\right) e^{-ik_m^* h_m} \tag{19}$$

dove α_m^* rappresenta il coefficiente di impedenza complesso al contorno tra gli strati *m* ed *m+1*, ed è dato dalla seguente espressione:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} \tag{20}$$

Poiché in superficie il taglio è nullo,

$$\tau_1(0,t) = ik_1^* G_1^* \left[E_1 - F1\right] e^{i\omega t} = 0$$

si deduce che $E_1 = F_1$.

Le equazioni (18) e (19) possono essere successivamente applicate agli strati successivi da 2 ad m. La funzione di trasferimento A_{mn} che lega gli spostamenti in sommità degli strati *m* ed *n* è definita dalla seguente espressione:

$$A_{mn} = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \tag{21}$$

A_{mn} rappresenta la funzione di trasferimento, ovvero la funzione che mette in relazione il modulo della deformazione tra i punti *m* e *n*.

In pratica lo stato deformativo di una stratigrafia rimane definito una volta nota la deformazione di un suo qualsiasi punto. Inoltre, poiché la velocità e l'accelerazione sono legati allo spostamento,

$$\dot{u}(z,t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z,t) \qquad \ddot{u}(z,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z,t) \tag{22}$$

La funzione di trasferimento A_{mn} può essere espressa anche in funzione delle velocità e dell'accelerazione al tetto degli strati *n* ed *m*:

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \tag{23}$$

La deformazione tangenziale rimane definita alla profondità *z* e al tempo *t* dalla relazione:

$$\gamma(z,t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^*\left(Ee^{ik^+ z} - Fe^{-ik^+ z}\right) e^{i\omega t} \tag{24}$$

E la corrispondente tensione tangenziale, dalla seguente espressione:

$$\tau(z,t) = G^* \gamma(z,t) \tag{25}$$

Ai fini di una corretta interpretazione del problema della risposta sismica locale, risulta utile riprodurre la rappresentazione schematica di Figura 2 in cui è riportata la terminologia utilizzata per lo studio del moto sismico di un deposito che poggia su un basamento roccioso.

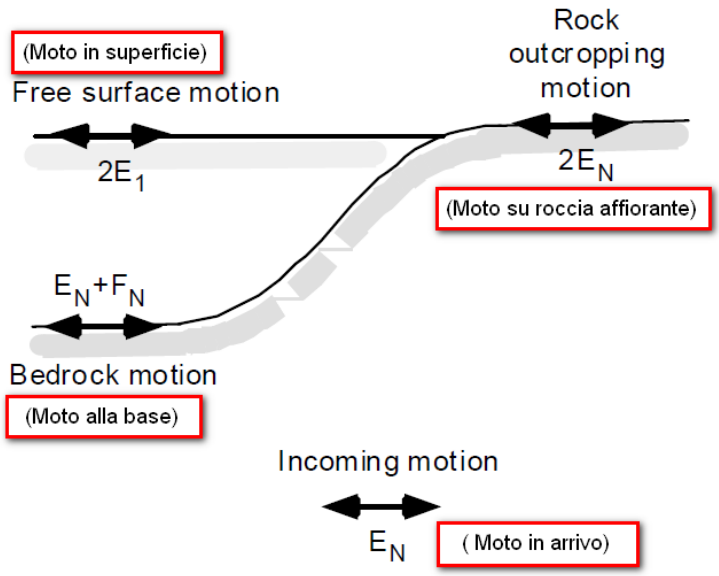


Figura 2: Schema di riferimento e terminologia utilizzata.

Le onde di taglio si propagano verticalmente attraverso il bedrock con ampiezza pari ad E_N; al tetto del bedrock, sotto il deposito degli strati di terreno, il moto ha un'ampiezza pari a E_N+F_N. Sulla roccia affiorante, poiché le tensioni tangenziali sono nulle ($E_N = F_N$), il moto avrà ampiezza pari a $2E_N$. La funzione di trasferimento dal bedrock al bedrock-affiorante è la seguente:

$$A_{NN}(\omega) = \frac{2E_N}{E_N + F_N} \tag{26}$$

A è non lineare poiché *G* è funzione di *γ*. Nella procedura di calcolo infatti, da una stima iniziale del modulo di deformazione al taglio, si ottiene la tensione ipotizzando un legame lineare, per poi ottenere un nuovo valore di *γ*. Grazie a questo valore aggiornato si valuta un nuovo modulo *G* così da ripetere la procedura fino a quando la differenza tra la deformazione aggiornata e quella ottenuta dalla precedente iterazione viene ritenuta accettabile. Il modello per *G(γ)* adoperato è quello suggerito da Ishibashi e Zhang (1993) che tiene conto degli effetti della pressione di confinamento e dell'indice di plasticità:

$$G = G_{max} \cdot K(\gamma, PI)(\sigma'_m)^{m(\gamma,PI)-m_0} \tag{24}$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5\left\{1 + tanh\left[ln\left(\frac{0.000102+n(PI)}{\gamma}\right)^{0.492}\right]\right\} \tag{25}$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272\left\{1 - tanh\left[ln\left(\frac{0.000556}{\gamma}\right)^{0.4}\right]\right\}exp(-0.0145PI^{1.3}) \tag{26}$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & per\ \ PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & per\ \ 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & per\ \ 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & per\ \ PI > 70 \end{cases} \tag{27}$$

dove G_{max} è dato dalla relazione

$$G_{max} = \rho V_s^2 \tag{28}$$

dove ρ è la densità del terreno e V_s la velocità di propagazione delle onde di taglio nello stesso. La (28) fornisce il valore iniziale di G per la prima iterazione.

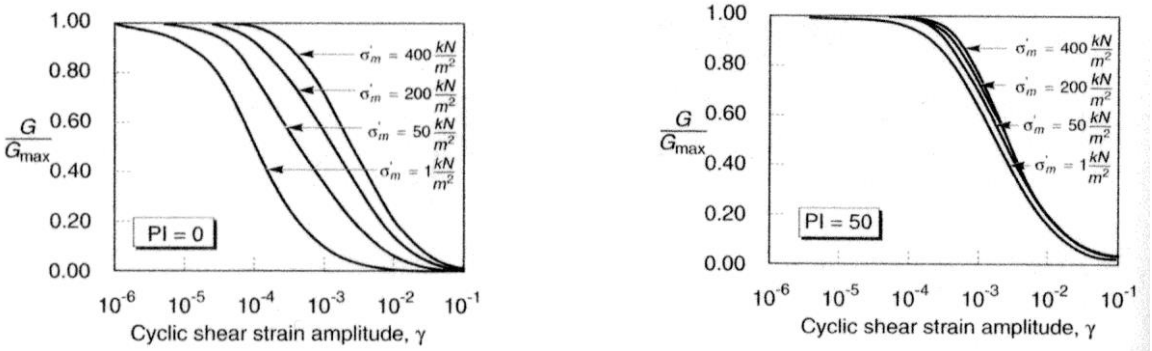


Figura 2: Influenza della pressione di confinamento e della plasticità sul modulo di deformazione al taglio.

Per quanto riguarda invece il coefficiente di smorzamento viscoso ξ, in conseguenza del modello introdotto dalla (24) si ha:

$$\xi = 0.333\,\frac{1+exp\left(-0.0145\,PI^{1.3}\right)}{2}\left[0.586\left(\frac{G}{G_{max}}\right)^2 - 1.547\frac{G}{G_{max}} + 1\right] \tag{29}$$

da cui si deduce che anche ξ deve essere ricalcolato ad ogni iterazione.

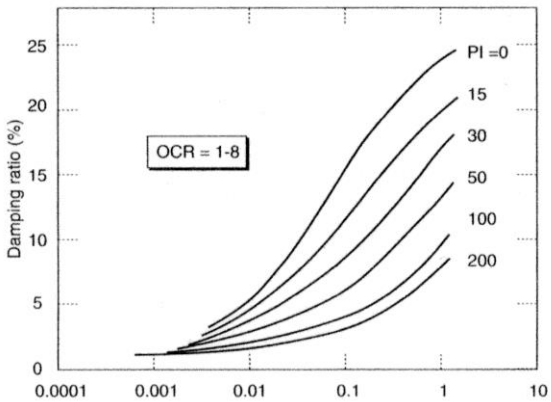
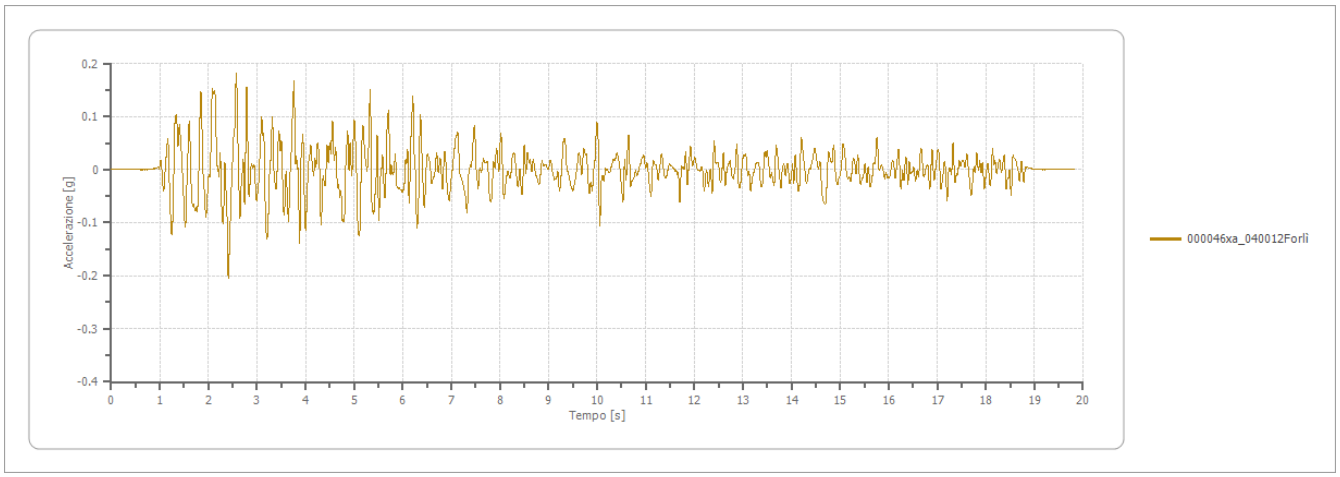
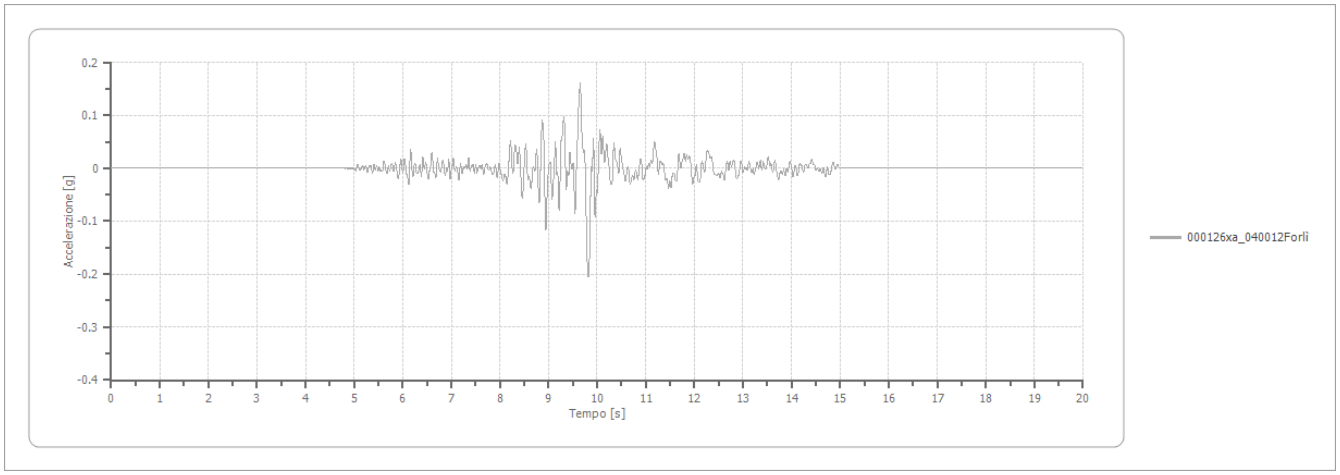
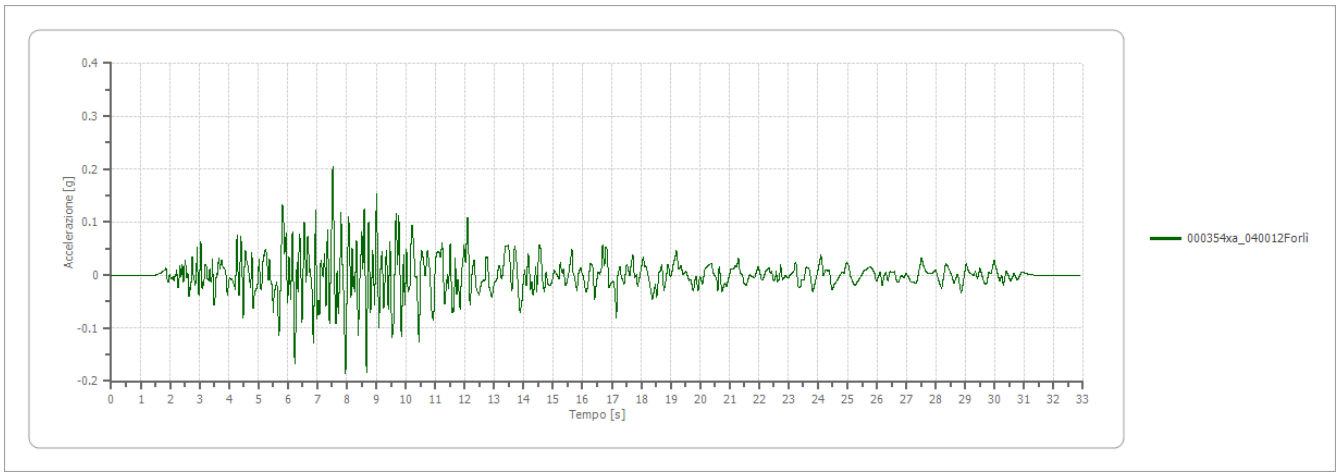


Figura 3: Influenza della plasticità sul coefficiente di smorzamento viscoso.

Sono stati utilizzati i tre accelerogrammi forniti dalla normativa Emilia Romagna per il comune di Forlì (046 – 126 – 354).



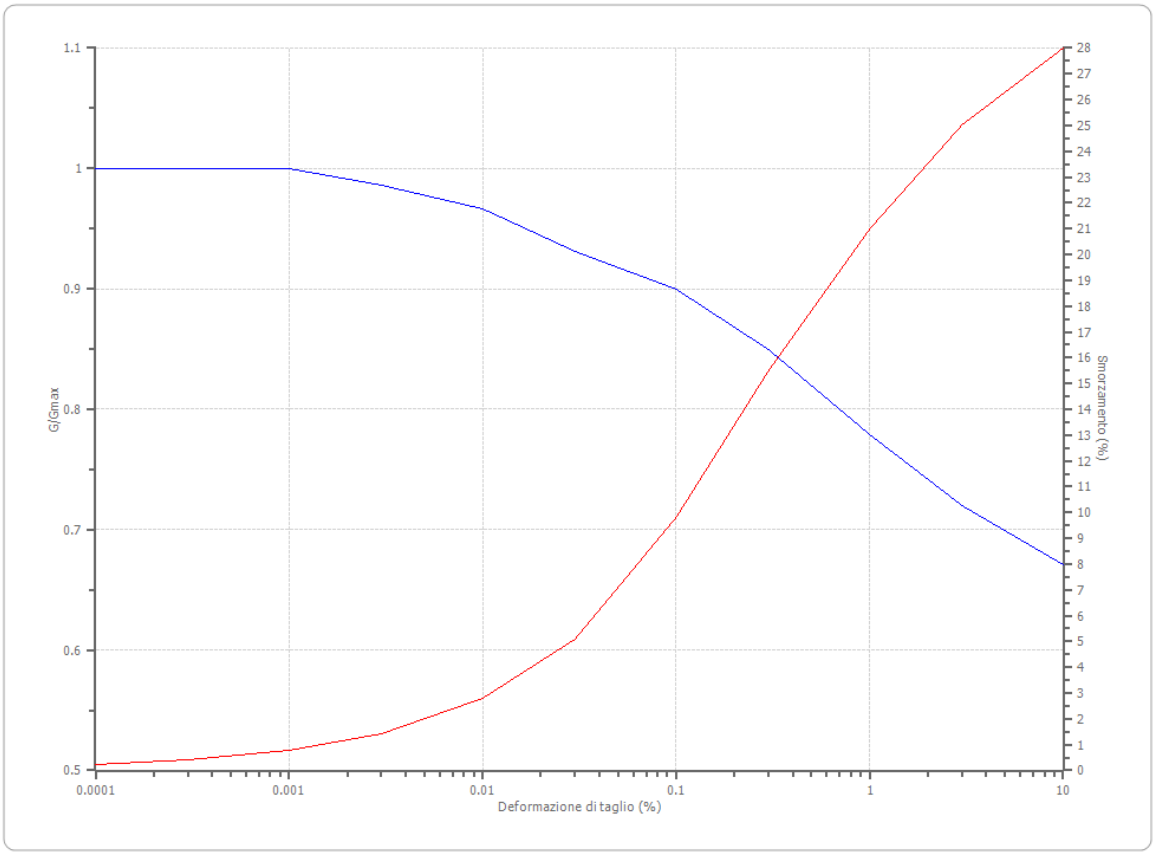




Terreni

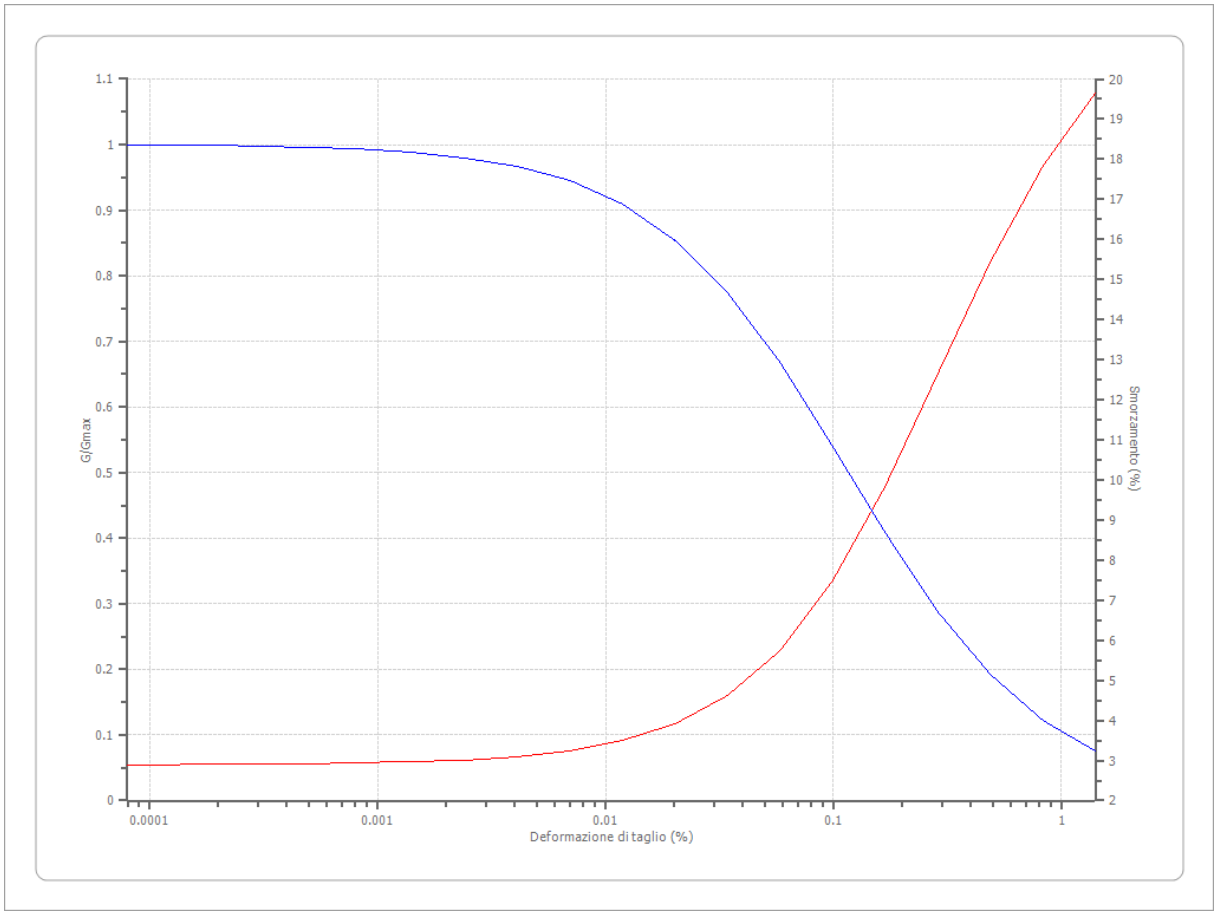
Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.240
0.0003	1.000	0.0003	0.420
0.001	1.000	0.001	0.800
0.003	0.986	0.003	1.400
0.010	0.966	0.010	2.800
0.030	0.931	0.030	5.100
0.100	0.900	0.100	9.800
0.300	0.850	0.300	15.500
1.000	0.779	1.000	21.000
3.000	0.720	3.000	25.000
10.000	0.671	10.000	28.000



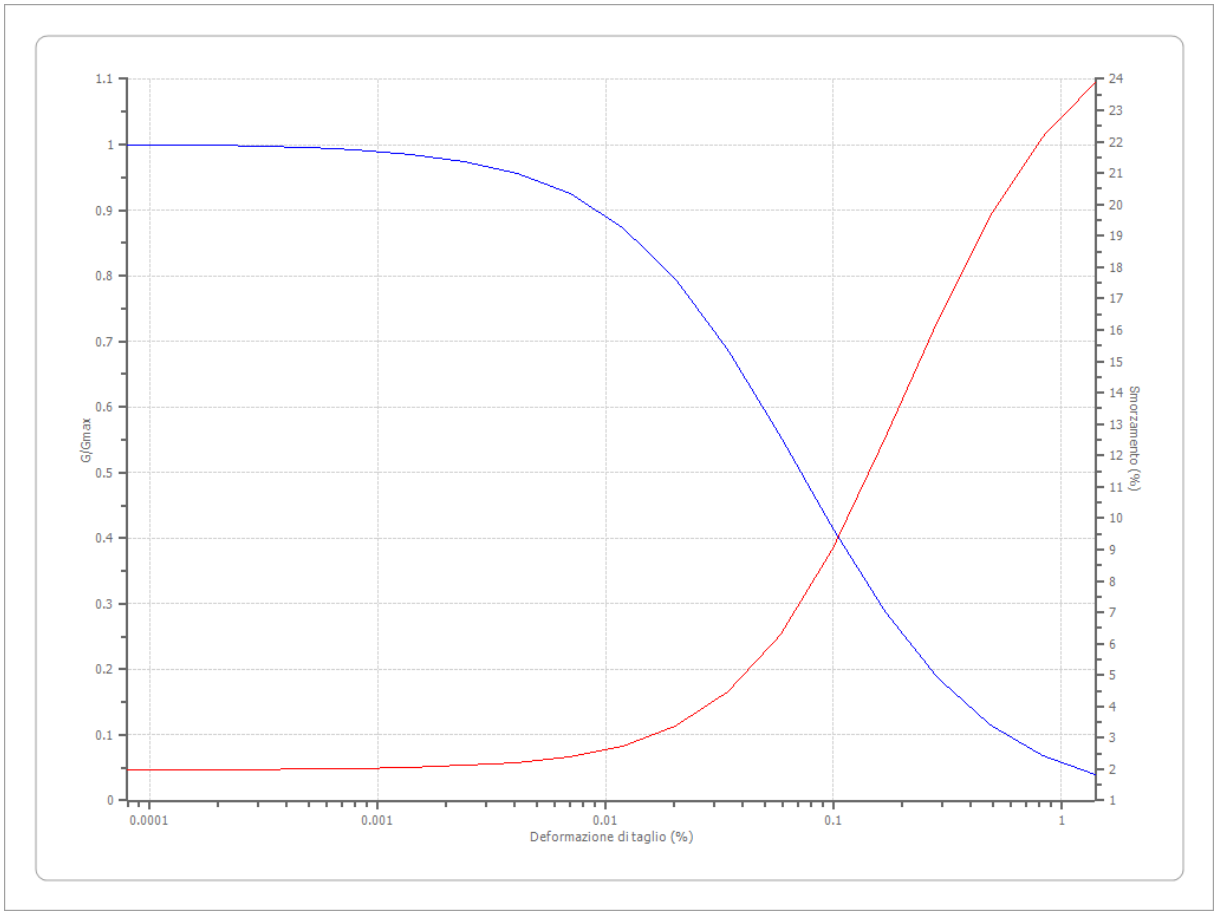
Lombardia - Argille limose

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00008	1.000	0.00008	2.891
0.0001	0.9992	0.0001	2.8959
0.0002	0.9986	0.0002	2.8994
0.0003	0.9976	0.0003	2.9053
0.0005	0.9959	0.0005	2.9154
0.0008	0.9931	0.0008	2.9326
0.0014	0.9883	0.0014	2.962
0.0024	0.9802	0.0024	3.012
0.0041	0.9667	0.0041	3.0975
0.007	0.9445	0.007	3.2433
0.0119	0.9089	0.0119	3.4917
0.0202	0.854	0.0202	3.9125
0.0343	0.7742	0.0343	4.616
0.0583	0.6677	0.0583	5.7552
0.099	0.5408	0.099	7.4855
0.1684	0.4084	0.1684	9.848
0.2862	0.2881	0.2862	12.6362
0.4866	0.1918	0.4866	15.4287
0.8272	0.1221	0.8272	17.8243
1.4063	0.0754	1.4063	19.6357



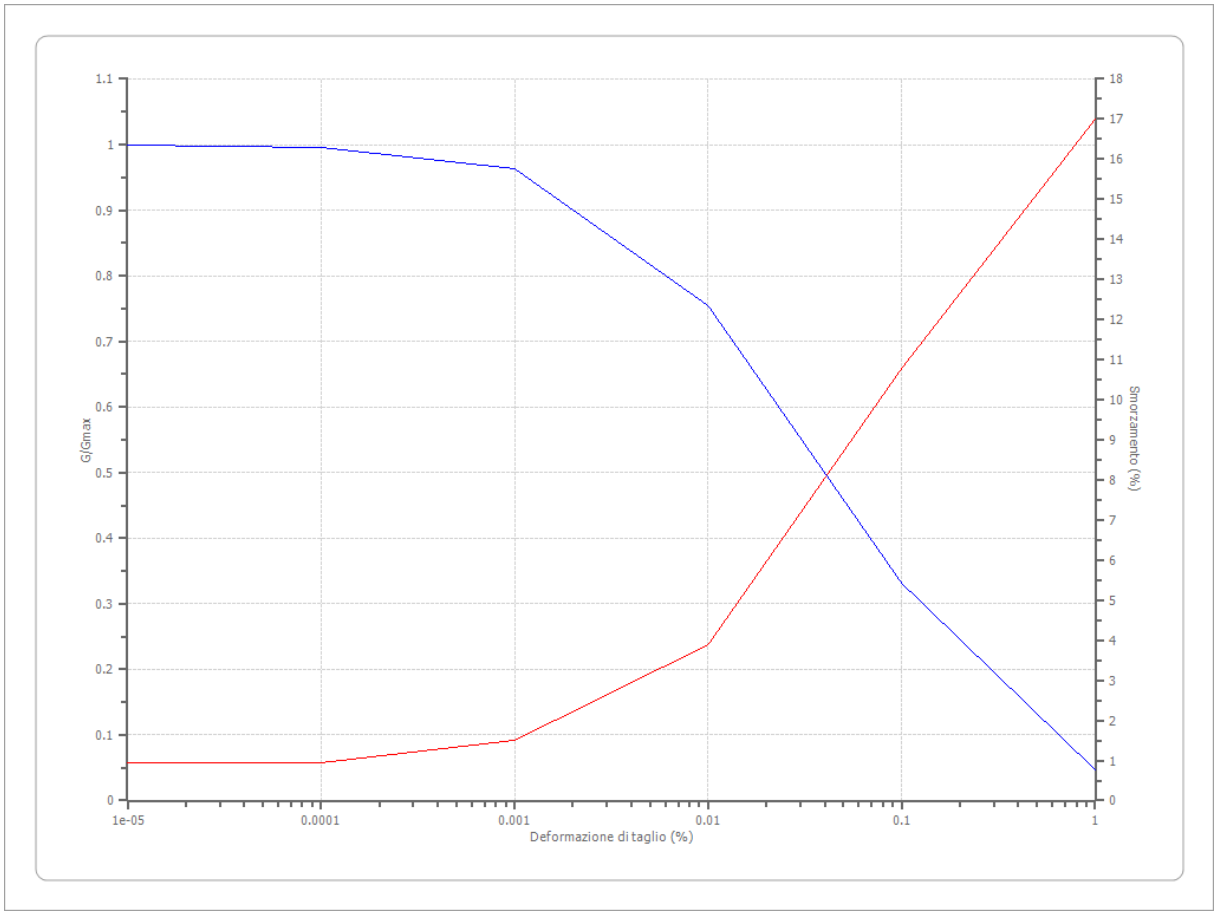
Lombardia - Limi sabbiosi

Deformazione %	**G/Gmax**	**Deformazione %**	**Smorzamento %**
0.00008	1.000	0.00008	1.9826
0.0001	0.99915	0.0001	1.98695
0.0002	0.9985	0.0002	1.9903
0.0003	0.9974	0.0003	1.9962
0.0005	0.9953	0.0005	2.0067
0.0008	0.9918	0.0008	2.02525
0.0014	0.98555	0.0014	2.05825
0.0024	0.97465	0.0024	2.11705
0.0041	0.956	0.0041	2.222
0.007	0.9246	0.007	2.4103
0.0119	0.87385	0.0119	2.7498
0.0202	0.7964	0.0202	3.36165
0.0343	0.6886	0.0343	4.4464
0.0583	0.556	0.0583	6.2701
0.099	0.41535	0.099	9.0215
0.1684	0.2876	0.1684	12.55055
0.2862	0.1867	0.2862	16.2968
0.4866	0.11545	0.4866	19.6163
0.8272	0.0691	0.8272	22.15295
1.4063	0.0405	1.4063	23.89285



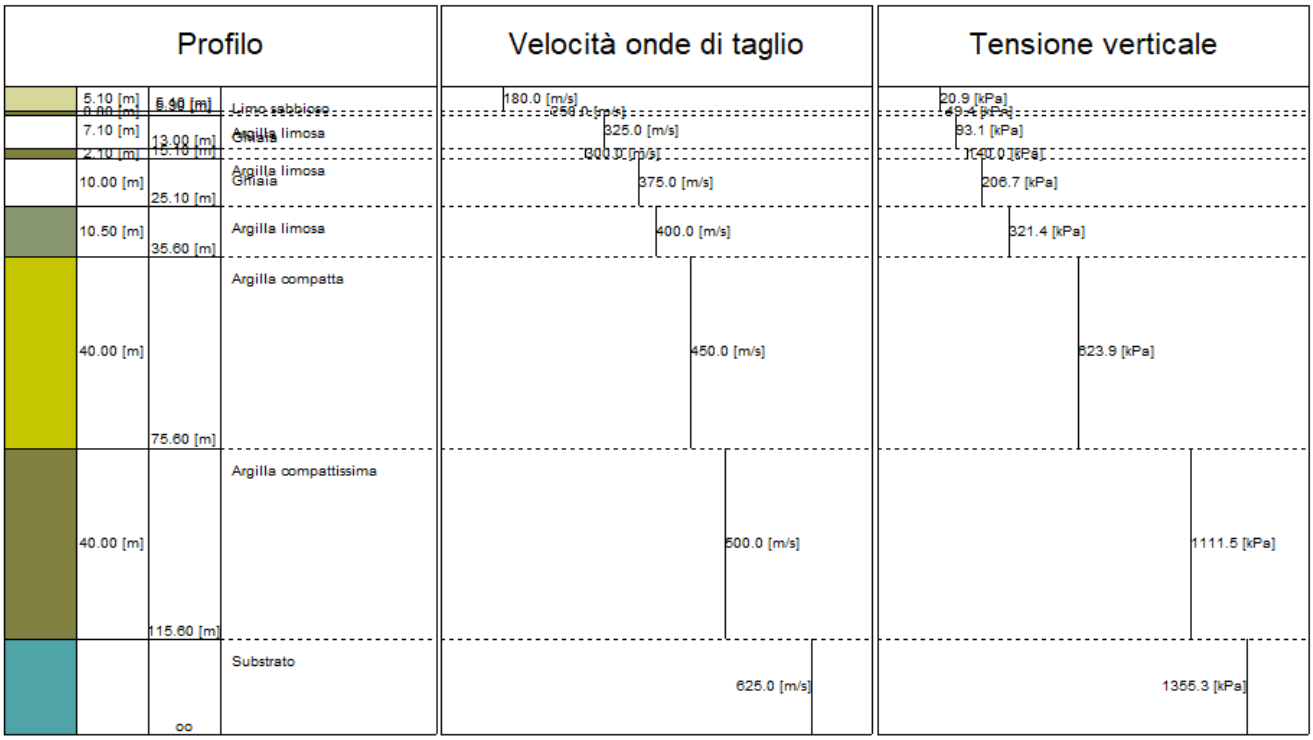
Lombardia - Ghiaie

Deformazione %	**G/Gmax**	**Deformazione %**	**Smorzamento %**
0.00001	1.000	0.00001	0.9488
0.0001	0.996	0.0001	0.9488
0.001	0.9624	0.001	1.4981
0.010	0.754	0.010	3.8938
0.100	0.3311	0.100	10.7935
1.000	0.0476	1.000	17.0087



Stratigrafia

n.	Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	Gmax [MPa]	Peso unità vol. [kN/m³]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1	Limo sabbioso	--	5.1	Lombardia - Limi sabbiosi	59.45	18.0	180.0	20.9
2	Argilla limosa	5.1	0.8	Lombardia - Argille limose	121.05	19.0	250.0	49.4
3	Ghiaia	5.9	7.1	Lombardia - Ghiaie	215.34	20.0	325.0	93.1
4	Argilla limosa	13.0	2.1	Lombardia - Argille limose	183.49	20.0	300.0	140.0
5	Ghiaia	15.1	10.0	Lombardia - Ghiaie	301.03	21.0	375.0	206.7
6	Argilla limosa	25.1	10.5	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	342.51	21.0	400.0	321.4
7	Argilla compatta	35.6	40.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	454.13	22.0	450.0	623.9
8	Argilla compattissima	75.6	40.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	560.65	22.0	500.0	1111.5
9	Substrato	oo	--	Smorzamento costante	876.02	22.0	625.0	1355.3



Strato con falda: 2

Strato rilevamento accelerogramma: 9 Affiorante

Elaborazione

Numero di iterazioni	8
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima	0.5
Tipo di modulo elastico	Shake
Massimo errore percentuale di convergenza	5.49 E-02

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.150 [s]
Tvi	0.700 [s]
Tao	0.150 [s]
Tvo	0.390 [s]
Sami	4.540 [m/s²]
Svmi	0.242 [m/s]
Samo	7.278 [m/s²]
Svmo	0.378 [m/s]
Fa	**1.603 [-]**
Fv	**1.563 [-]**
TB	0.109 [s]
TC	0.327 [s]
TD	2.683 [s]
SA(0)	0.271 [g]
SA(TB)	0.742 [g]

Fattori di amplificazione su intensità spettrale

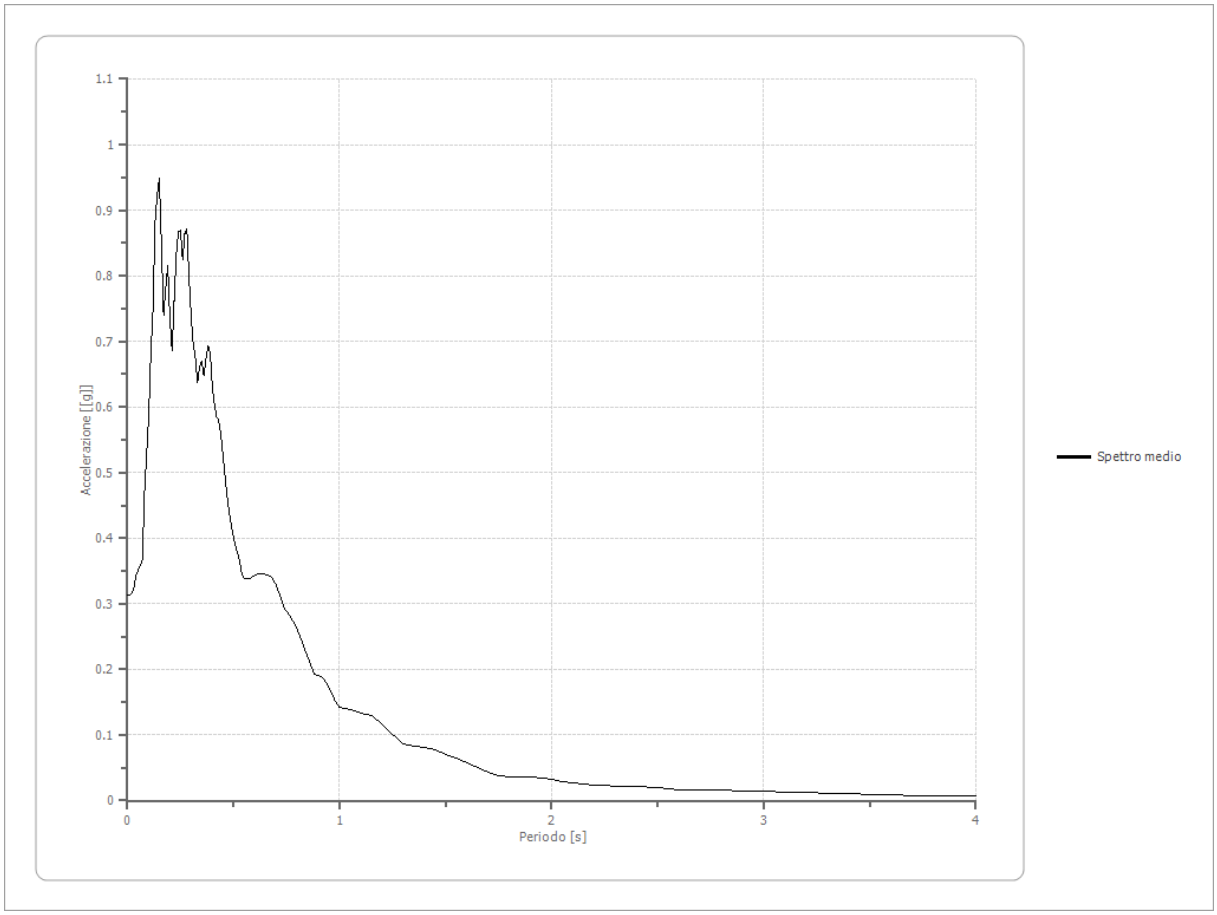
Periodo minino [s]	Periodo massimo [s]	Int. Housner input [m]	Int. Housner output [m]	Int. Housner input/output [m]	FA
0.100	0.500	0.074	0.123	0.200	1.647
0.400	0.800	0.094	0.144	0.500	1.527
0.700	1.100	0.088	0.132	0.636	1.500
0.500	1.500	0.206	0.307	0.333	1.487

Fattori di amplificazione Pga/Pga0

Spettro	Pga/Pga0
046	1.406
126	1.678
348	1.510

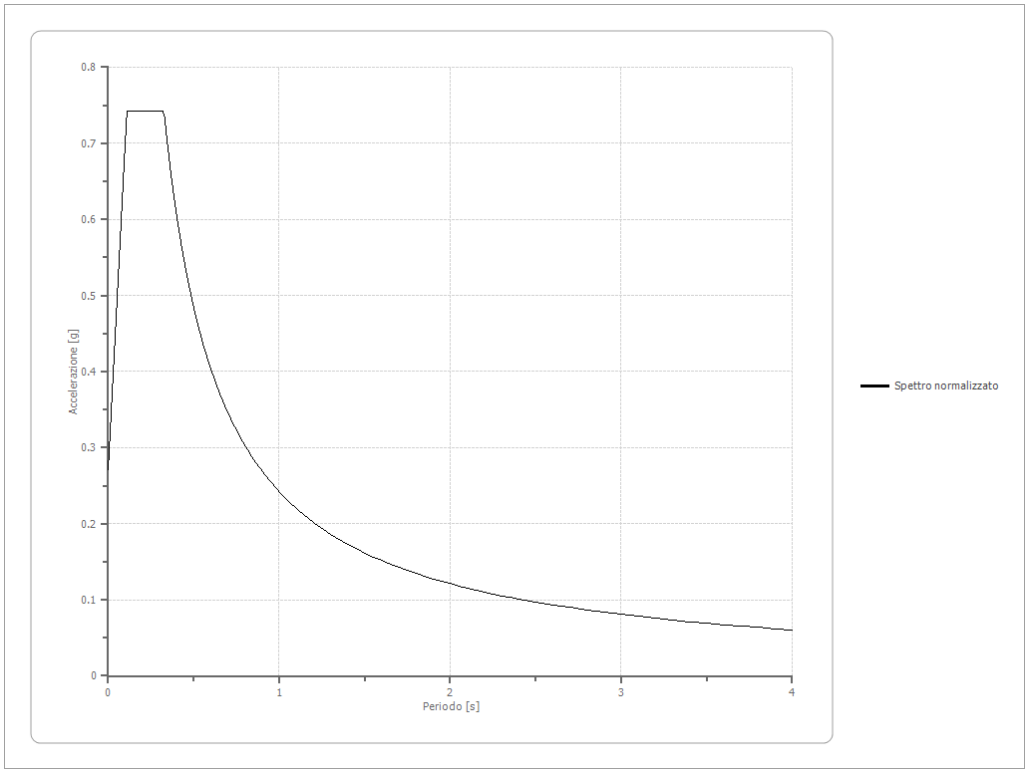
Spettro medio di risposta elastico

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.3140	0.26	0.8254	0.52	0.3756	0.98	0.1519	2.25	0.0228
0.01	0.3140	0.27	0.8636	0.53	0.3621	1.00	0.1420	2.30	0.0225
0.02	0.3176	0.28	0.8718	0.54	0.3436	1.05	0.1388	2.35	0.0219
0.03	0.3244	0.29	0.7985	0.55	0.3376	1.10	0.1340	2.40	0.0210
0.04	0.3441	0.30	0.7389	0.56	0.3378	1.15	0.1305	2.50	0.0189
0.05	0.3515	0.31	0.6951	0.57	0.3376	1.20	0.1163	2.60	0.0171
0.06	0.3588	0.32	0.6751	0.58	0.3387	1.25	0.1007	2.70	0.0160
0.07	0.3673	0.33	0.6367	0.60	0.3433	1.30	0.0863	2.80	0.0153
0.08	0.4674	0.34	0.6628	0.62	0.3465	1.35	0.0836	2.90	0.0148
0.09	0.5283	0.35	0.6696	0.64	0.3453	1.40	0.0815	3.00	0.0141
0.10	0.5851	0.36	0.6482	0.66	0.3437	1.45	0.0778	3.10	0.0132
0.11	0.6812	0.37	0.6728	0.68	0.3401	1.50	0.0708	3.20	0.0121
0.12	0.7465	0.38	0.6940	0.70	0.3297	1.55	0.0647	3.30	0.0116
0.13	0.8830	0.39	0.6801	0.72	0.3119	1.60	0.0573	3.40	0.0106
0.14	0.9243	0.40	0.6326	0.74	0.2913	1.65	0.0495	3.50	0.0094
0.15	0.9480	0.41	0.6037	0.76	0.2842	1.70	0.0431	3.60	0.0084
0.16	0.8490	0.42	0.5857	0.78	0.2731	1.75	0.0384	3.70	0.0081
0.17	0.7396	0.43	0.5792	0.80	0.2606	1.80	0.0369	3.80	0.0077
0.18	0.7819	0.44	0.5577	0.82	0.2451	1.85	0.0361	3.90	0.0074
0.19	0.8153	0.45	0.5259	0.84	0.2276	1.90	0.0353	4.00	0.0070
0.20	0.7347	0.46	0.4931	0.86	0.2099	1.95	0.0338		
0.21	0.6860	0.47	0.4625	0.88	0.1929	2.00	0.0318		
0.22	0.7621	0.48	0.4368	0.90	0.1910	2.05	0.0296		
0.23	0.8319	0.49	0.4173	0.92	0.1872	2.10	0.0273		
0.24	0.8679	0.50	0.4013	0.94	0.1780	2.15	0.0252		
0.25	0.8695	0.51	0.3874	0.96	0.1649	2.20	0.0239		



Spettro normalizzato di risposta elastico

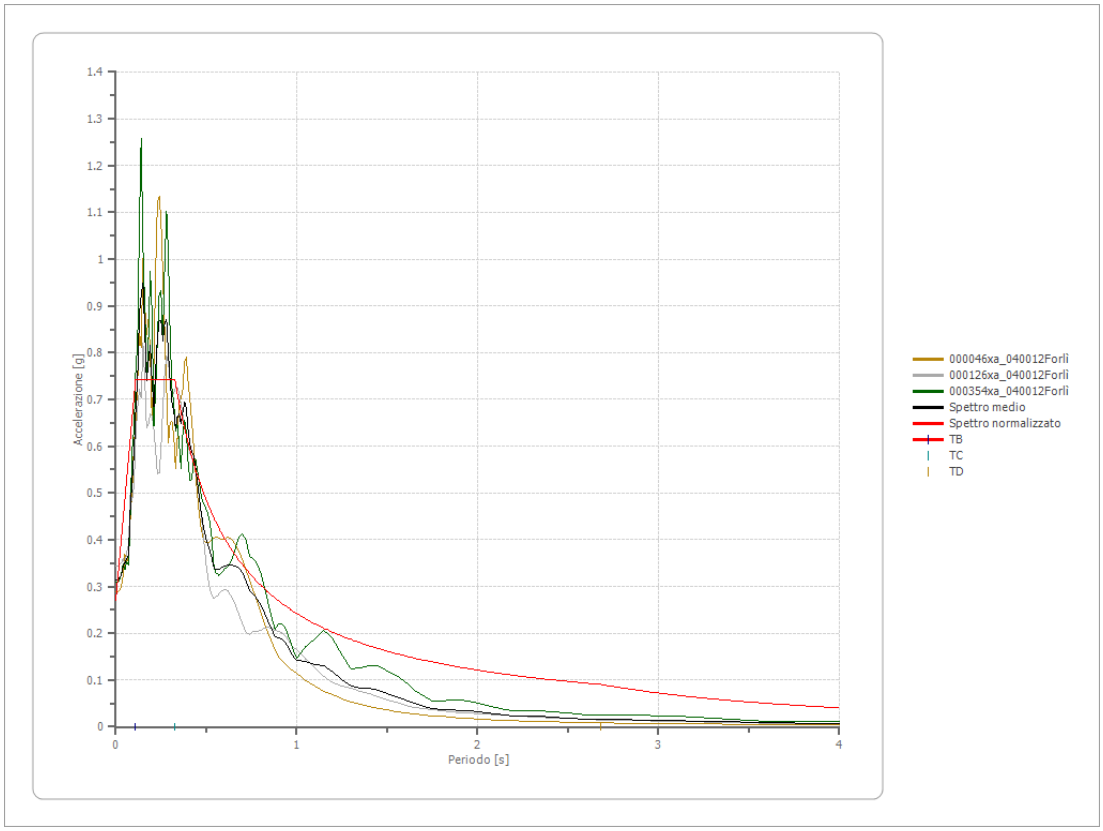
Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2707	0.26	0.7419	0.52	0.4660	0.98	0.2473	2.25	0.1077
0.01	0.3140	0.27	0.7419	0.53	0.4572	1.00	0.2423	2.30	0.1054
0.02	0.3573	0.28	0.7419	0.54	0.4487	1.05	0.2308	2.35	0.1031
0.03	0.4006	0.29	0.7419	0.55	0.4406	1.10	0.2203	2.40	0.1010
0.04	0.4438	0.30	0.7419	0.56	0.4327	1.15	0.2107	2.50	0.0969
0.05	0.4871	0.31	0.7419	0.57	0.4251	1.20	0.2019	2.60	0.0932
0.06	0.5304	0.32	0.7419	0.58	0.4178	1.25	0.1939	2.70	0.0897
0.07	0.5737	0.33	0.7343	0.60	0.4039	1.30	0.1864	2.80	0.0865
0.08	0.6170	0.34	0.7127	0.62	0.3908	1.35	0.1795	2.90	0.0836
0.09	0.6602	0.35	0.6924	0.64	0.3786	1.40	0.1731	3.00	0.0808
0.10	0.7035	0.36	0.6731	0.66	0.3672	1.45	0.1671	3.10	0.0782
0.11	0.7419	0.37	0.6549	0.68	0.3564	1.50	0.1615	3.20	0.0757
0.12	0.7419	0.38	0.6377	0.70	0.3462	1.55	0.1563	3.30	0.0734
0.13	0.7419	0.39	0.6213	0.72	0.3366	1.60	0.1515	3.40	0.0713
0.14	0.7419	0.40	0.6058	0.74	0.3275	1.65	0.1469	3.50	0.0692
0.15	0.7419	0.41	0.5910	0.76	0.3188	1.70	0.1425	3.60	0.0673
0.16	0.7419	0.42	0.5770	0.78	0.3107	1.75	0.1385	3.70	0.0655
0.17	0.7419	0.43	0.5635	0.80	0.3029	1.80	0.1346	3.80	0.0638
0.18	0.7419	0.44	0.5507	0.82	0.2955	1.85	0.1310	3.90	0.0621
0.19	0.7419	0.45	0.5385	0.84	0.2885	1.90	0.1275	4.00	0.0606
0.20	0.7419	0.46	0.5268	0.86	0.2818	1.95	0.1243		
0.21	0.7419	0.47	0.5156	0.88	0.2754	2.00	0.1212		
0.22	0.7419	0.48	0.5048	0.90	0.2692	2.05	0.1182		
0.23	0.7419	0.49	0.4945	0.92	0.2634	2.10	0.1154		
0.24	0.7419	0.50	0.4846	0.94	0.2578	2.15	0.1127		
0.25	0.7419	0.51	0.4751	0.96	0.2524	2.20	0.1101		



Parametri spettro normalizzato

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0.271	2.740354	--	0.109	0.327	2.683	0.271	0.742	1.321

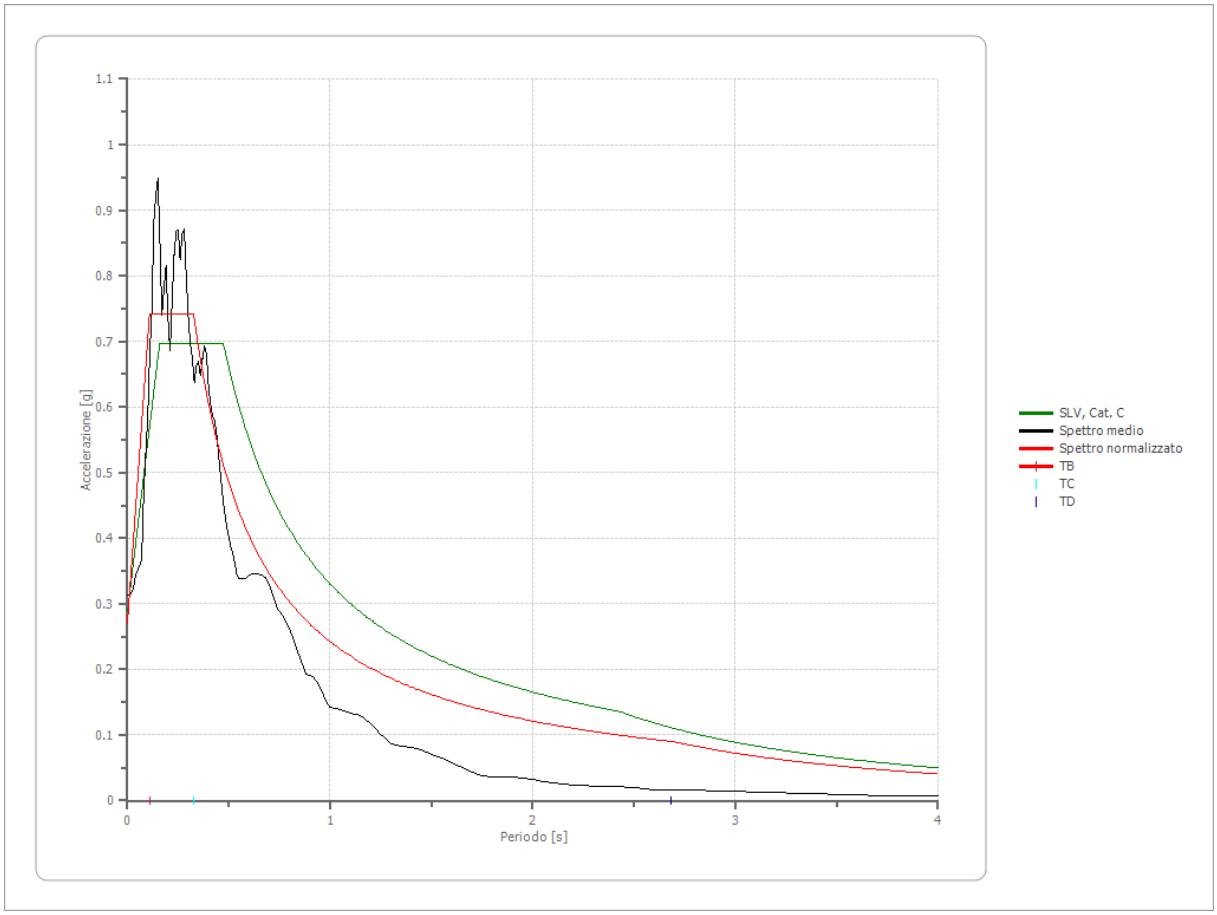
Confronto tra gli spettri



Confronto spettro normativa

Tipo di spettro: Spettro di risposta elastico

	Operatività SLO	Danno SLD	Salvaguardia vita SLV	Prev. collasso SLC
Tr [anni]	30	50	475	975
ag [g]	0.066	0.084	0.205	0.257
Fo	2.4	2.392	2.426	2.484
Tc* [s]	0.263	0.272	0.305	0.317
Ss	1.50	1.50	1.40	1.32
St	1.00	1.00	1.00	1.00
Cc	1.63	1.61	1.55	1.53
TB [s]	0.143	0.146	0.158	0.162
TC [s]	0.429	0.439	0.474	0.486
TD [s]	1.864	1.936	2.420	2.628
Se(0) [g]	0.099	0.126	0.287	0.338
Se(TB) [g]	0.238	0.301	0.697	0.841

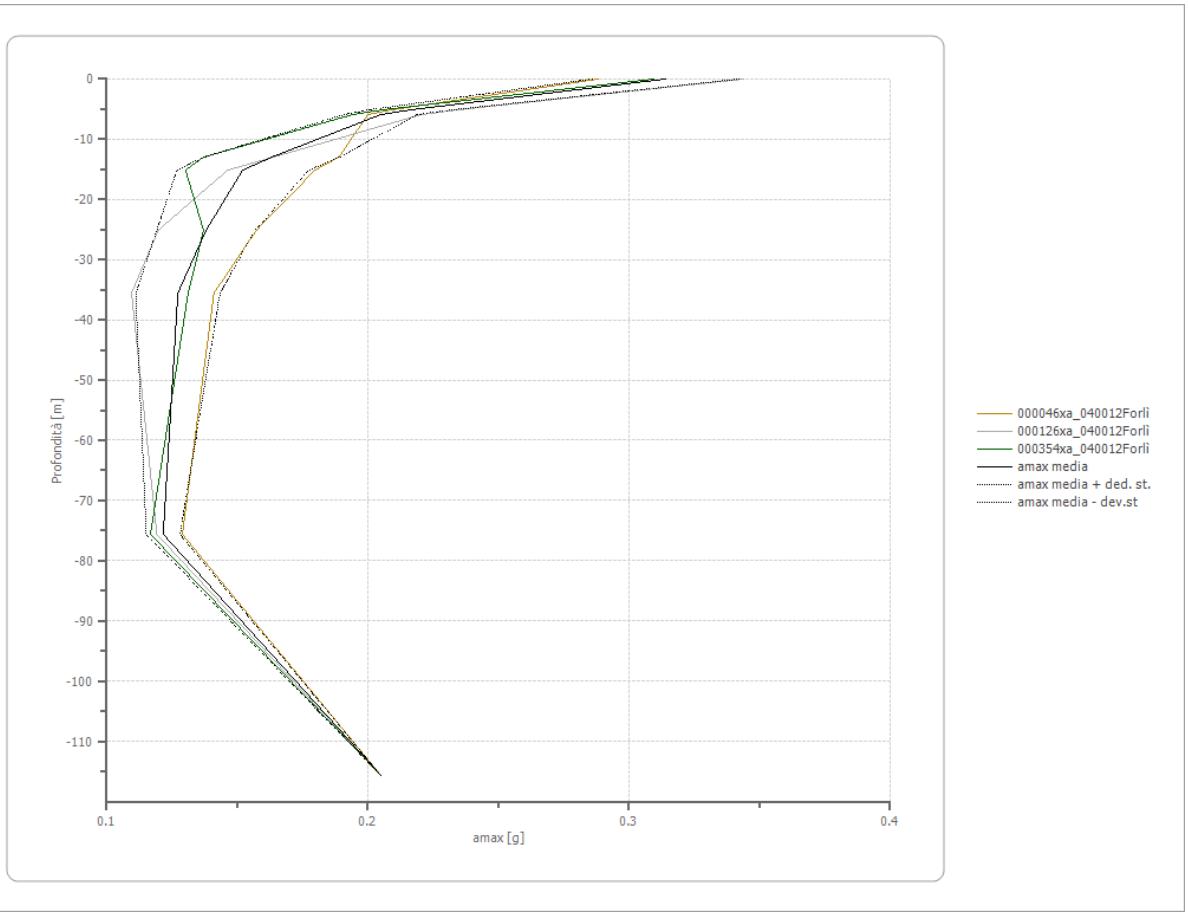


Dai grafici si nota che lo spettro normalizzato supera lo spettro della normativa per SLV per terreni di categoria sismica C dal tratto T0 – Tb e parte di Tb-Tc.

Di seguito la diffusione delle accelerazioni nella colonna stratigrafica proposta.

Profilo a max

	0.0 [m]	5.1 [m]	5.9 [m]	13.0 [m]	15.1 [m]	25.1 [m]	35.6 [m]	75.6 [m]	115.6 [m]
000046xa_040012Forlì [g]	0.288	0.209	0.200	0.189	0.180	0.157	0.141	0.129	0.205
000126xa_040012Forlì [g]	0.344	0.235	0.221	0.164	0.146	0.120	0.109	0.119	0.205
000354xa_040012Forlì [g]	0.310	0.206	0.194	0.137	0.130	0.137	0.131	0.117	0.205
media [g]	0.314	0.216	0.205	0.163	0.152	0.138	0.127	0.122	0.205
Dev. St. [g]	0.028	0.016	0.014	0.026	0.025	0.019	0.016	0.006	0.000



Il confronto fra i risultati ottenuti dal terzo livello e le tabelle fornite dal DGR 630 è qui di seguito mostrato:

	da D.G.R. 630/2019	Spettro 046	Spettro 126	Spettro 354
F.A. PGA	1.6	1.406	1.678	1.510
F.A. SI1	1.9	1.647	1.634	1.659
F.A. SI2	2.5	1.537	1.544	1.505
F.A. SI3	2.7	1.554	1.485	1.433

Come si può notare i valori ricavati dall'analisi di terzo livello risultano quasi tutti inferiori a quelli di normativa DGR 630 per la categoria MARGINE di tipo B (l'unico che lo supera leggermente è quello dello spettro 126 per FA PGA) sono invece abbastanza vicini a quello ricavato dalla microzonazione sismica del PSC del Comune di Forlì (1.5)

Per quanto concerne la PERICOLOSITA' SISMICA DEL SITO, il DGR 630 fornisce alcune indicazioni su i fenomeni da considerare:

1. aree suscettibili di liquefazione o densificazione;
2. aree di versante instabili e potenzialmente instabili;
3. aree con rapide variazioni della profondità del bedrock sismico, come ad esempio le valli strette e profondamente incise, nelle quali il modello geologico non può essere assimilato ad un modello fisico monodimensionale
4. aree suscettibili di effetti differenziali (zone di contatto laterale tra litotipi con caratteristiche fisico – meccaniche molto diverse, zone di faglia attiva e capace, zone concavità sepolte).

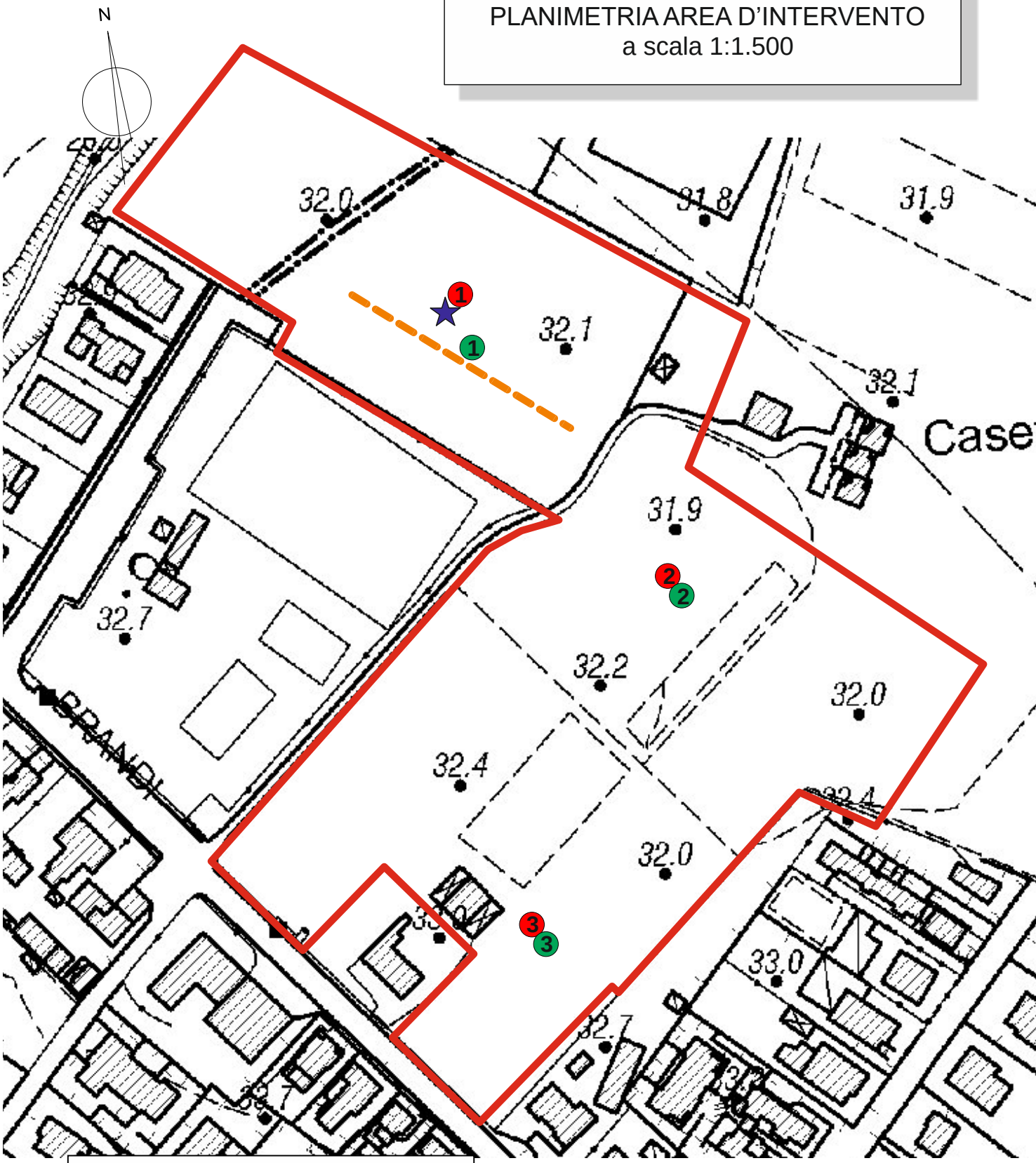
Data la natura pianeggiante e stratigraficamente omogenea di tutto il comparto, si possono escludere gli scenari 2, 3 e 4.

Inoltre è stata esclusa la possibilità di liquefazione.

L'analisi di terzo livello ha mostrato dei risultati che, pur essendo superiori per accelerazione alla normativa nazionale, sono in linea con quanto previsto nelle indicazioni del DGR 630 e della microzonazione sismica del comune di Forlì.

Casadio Mario

PLANIMETRIA AREA D'INTERVENTO
a scala 1:1.500



LEGENDA:

- SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO
- PROVA PENETROMETRICA STATICA
- PROVA HVSR
- STENDIMENTO SISMICO
- AREA PUA

Casadio&Co
geologia
acustica
ambiente

SOGEO s.r.l.	COMMITTENTE: Casadio & Co. di Casadio Mario	SOND.N°: S.1	PROF.(m): 30.00
	CANTIERE: Via Querzoli - Carpena (FC)	QUOTA (m): p.d.c.	
	PERFORATRICE: CMV MK900 D1	LATITUDINE (°): 44.102119°	
	METODO PERFORAZ.: Carotaggio continuo	LONGITUDINE (°): 12.072616°	
RIVESTIMENTO: Ø 127 mm	ATTREZZO PERFORAZ.: Carotiere semplice Ø 101 mm	DATA INIZ-FINE: 07/01/2021-07/01/2021	
PIEZOMETRO: Installato piezometro Norton Ø 2" a -24.00 m dal p.d.c. (fissurato da -3.0 a -24.0 m)		SCALA: 1:100	
RIF.PREV.N°: 269-20	CERTIFICATO N°: C21-001	RAPPORTO N°: --------	DATA DI EMISSIONE: 08/01/2021	PAGINA N°: 1 di 1

Scala 1:100	P.P. I [daN/cm²]	Vane Test [daN/cm²]	Profondita'	Stratigrafia	Descrizione	Campioni	Campioni Rim.	S.P.T. [n. colpi] P.A.	Falda	Pz.Norton	Tubo Down Hole
1	2.4 / 2.8	0.70 / 0.90	0.50		Limo argilloso di colore marrone, con calcinelli e radici						
2	2.4 / 2.4	0.40			Limo e limo sabbioso di colore grigio chiaro e beige, con venature ocra, con intercalazioni di limo argilloso e con abbondanti calcinelli. Da -2.10 a -2.30 m limo con sabbia. Da -4.50 m limo argilloso di colore bruno						
3	1.7 / 1.3	0.40 / 0.40									
4	3.0 / 1.2	1.00									
5	1.7 / 0.8		4.70		Limo sabbioso di colore grigio-nocciola variegato						
6	1.0 / 1.2 / 1.1	0.40 / 0.50 / 0.50	5.10 / 5.90		Argilla limosa di colore bruno, passante gradualmente a limo argilloso di colore grigio-marrone. Presenza di calcinelli						
7			7.00		Ghiaia media-fine, arrotondata, con sabbia, di colore marrone-ocra poi grigio-marrone						
8			7.50		Limo argilloso di colore grigio-bruno passante, da -7.20 m, a limo con sabbia giallastra, poi sabbia						
9											
10					Ghiaia media-fine, talora grossolana, arrotondata, in matrice limo sabbiosa di colore marrone-giallastro. A -8.10 m livello, S = 5 cm, di limo. Da -12.0 m circa ghiaia da fine a grossolana						
11											
12											
13			13.00								
14	3.6 / 1.4 / 2.0	1.60 / 0.80 / 0.90			Argilla con limo di colore grigio-giallastro e ocra, con calcinelli e veli limo sabbiosi. Da -13.40 a -13.90 m e da -14.0 a -14.2 m colore grigio-azzurro, con venature marroni. Da -14.60 m passa gradualmente a limo argilloso, poi a limo e limo sabbioso						
15	2.6 / 2.5	1.10 / 0.90	15.10								
16			15.50		Ghiaia media-fine, con sabbia limosa di colore grigio-giallastro						
17					Ghiaia, da media-fine a grossolana, arrotondata e subarrotondata, in matrice limo sabbiosa di colore grigio-marrone e marrone-giallastro. Da -18.0 a -18.9 m passa a ghiaia con sabbia. Da -18.90 m livello, S = 10 cm, di limo sabbioso						
18											
19											
20			20.00		Ghiaia media-fine e sabbia, talora limosa, di colore giallo-ocra, con livelli centimetrici di limo						
21			20.60								
22					Ghiaia, da media-fine a grossolana, arrotondata e subarrotondata, in matrice limo sabbiosa di colore marrone-giallastro. Presenti livelli a matrice dominante						
23											
24										24.00	
25			24.80 / 25.10		Ghiaia media fine in matrice limo argillosa di colore grigio						
26	4.4 / 3.7	2.10 / 1.70			Argilla limosa di colore grigio, con veli limo sabbiosi. Presenza di bioclasti e di veli nerastri con sostanza organica						
27	4.3 / 3.7	2.20 / 2.00									
28	2.7 / 2.7	1.10 / 1.20									
29	2.9 / 3.9	1.20 / 1.40									
30	2.8 / 3.8	1.60 / 1.40	30.00								

Lo Sperimentatore

Il Direttore del Laboratorio