



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna
Comune di Soragna



<p>Regione Emilia-Romagna</p>	<p>Soggetto realizzatore</p>  <p>Direzione tecnica Dott. Geol. Carlo Caleffi Dott. Geol. Francesco Cerutti</p> <p>Collaboratori Dott. Geol. Matteo Baisi Dott.ssa Geol. Melinda Raimondo Dott. Lorenzo Dalle Luche</p>	<p>Data Ottobre 2022</p> <p>MS3</p>
-----------------------------------	---	--



INDICE

1.	Introduzione	4
1.1	Motivazione dello studio di terzo livello.....	5
1.2	Articolazione dello studio	6
2.	Indagini ed analisi.....	9
2.1	Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono.....	10
2.2	Indagine mediante sismocono.....	13
2.3	Rilievo sismico HVSR mediante tromografo	15
3.	Analisi di risposta sismica locale	17
3.1	Pericolosità sismica di base.....	18
3.2	Segnali in input.....	19
3.3	Modello geofisico del sottosuolo.....	20
3.3.1	Litologia	20
3.3.2	Determinazione della V_s e del bedrock sismico.....	20
3.3.3	Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione	23
3.1	Procedura di analisi RSL	25
3.1.1	Metodo lineare equivalente	25
3.1.2	Soluzione alla singola iterazione mediante FEM	27
3.1.3	Smorzamento	28
3.1.4	Procedimento iterativo.....	29
3.1.5	Interpretazione dei risultati.....	29
3.2	Analisi dei risultati.....	30
3.2.1	Spettro di risposta elastico normalizzato	33
3.3	Risultati della modellazione numerica	35
3.3.1	RSL per il sito "S. Maria - Castellina" (034036P141).....	35
3.3.2	RSL per il sito "Scuola Cesare Battisti-Soragna" (034036P142).....	38
3.3.3	RSL per il sito "Carzeto" (034036P143)	41
3.3.4	RSL per il sito "S. Caterina - Diolo" 034036P144	44
3.3.5	RSL per il sito "S. Famiglia-Soragna" 034036P145.....	47
3.4	Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello	49
3.5	Verifica del rischio di liquefazione	52
3.5.1	Analisi dei risultati	57
4.	Criticità del metodo.....	59
4.1	Considerazioni sul bedrock sismico	59
5.	Elaborati cartografici	62



5.1	Carta delle indagini	63
5.2	Carta Geologico – Tecnica per la Microzonazione sismica	64
5.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni	66
5.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).....	67
5.4.1	Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.....	68
5.5	Carta della velocità delle onde di taglio S.....	69
5.6	Carte di microzonazione sismica.....	69
5.7	Carte dello scuotimento atteso	71
6.	Bibliografia	73
7.	Allegati.....	76

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	3 di 76



1. INTRODUZIONE

Nella presente Relazione vengono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nel corso dello Studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Soragna, effettuato su incarico del Comune di Soragna (cfr. Determinazione n° 241 del 22/07/2022) e finanziato con contributi di cui alla Delibera di Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 1885 del 15/11/2021.

Gli studi di Microzonazione Sismica hanno l'obiettivo di razionalizzare le conoscenze in merito alle alterazioni che lo scuotimento sismico può subire in superficie e di fornire informazioni utili al governo del territorio, alla progettazione, alla pianificazione per l'emergenza e alla ricostruzione post sisma.

La MS consente di suddividere il territorio esaminato in base alla presenza e alla distribuzione dei fenomeni di possibile amplificazione dello scuotimento, legati alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche delle singole aree considerate, e ai possibili fenomeni di instabilità e deformazione permanente attivati dal sisma. L'insieme di queste conoscenze sul comportamento dei terreni durante un evento sismico e sui possibili effetti indotti dallo scuotimento è un indispensabile strumento di prevenzione e di riduzione del rischio sismico, particolarmente efficace, se realizzato e applicato durante la pianificazione urbanistica, per indirizzare le scelte di trasformazione verso aree a minore pericolosità.

Tutte le attività svolte e in particolare l'elaborazione e la redazione degli elaborati richiesti, sono state effettuate nel rispetto dei seguenti riferimenti tecnici:

- Allegato A2 "Criteri per la realizzazione degli studi di Microzonazione Sismica e Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui all'ordinanza del capo dipartimento della protezione civile n. 780/2021" della deliberazione di Giunta regionale n. 1885 del 15/11/2021 "OCDPC 20 maggio 2021, n. 780 - Attuazione dell'art.2, comma 1, lett. a) e comma 2. Approvazione dei criteri per l'attribuzione, la concessione e la liquidazione di contributi e per la realizzazione e presentazione degli elaborati relativi a studi di Microzonazione Sismica e Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza" (da qui in avanti "Allegato A2 della delibera regionale")
- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.2, Roma, dicembre 2020 - Elaborato e approvato nell'ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica, nominata con DPCM 21 aprile 2011 (da qui in avanti "SRAI")
- "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (da qui in avanti "ICMS")
- Atto di coordinamento tecnico per gli studi di microzonazione sismica ai sensi della LR 24/2017 approvato con DGR 476/2021¹ e integrato con DGR 564/2021² (da qui in avanti "indirizzi regionali")

¹ DGR 476/2021. Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n. 476 del 12 aprile 2021: Aggiornamento dell'"Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)" di cui alla deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019, n. 630. BURERT n. 111 del 20/04/2021 - Parte seconda n. 93.

² DGR 564/2021. Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n. 564 del 26 aprile 2021: Integrazione della propria deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)". BURERT n. 137 del 12/05/2021 - Parte seconda n. 113.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	4 di 76



Tali riferimenti tecnici, negli anni, sono stati soggetti a vari aggiornamenti che hanno comportato profonde modifiche, non solo nella metodologia di archiviazione dei dati e nella rappresentazione grafica dei differenti tematismi, ma anche di natura concettuale.

Per quanto riguarda le aree oggetto di studio, sono state prese in esame le stesse porzioni di territorio urbanizzato indagate con l'approfondimento di secondo livello.

Gli elaborati redatti, predisposti in versione digitale pdf (risoluzione 300 dpi), vengono elencati nel capitolo 7.

I relativi dati vengono forniti anche in formato vettoriale (*shapefile*) secondo quanto indicato nel paragrafo "Indicazioni per l'archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell'analisi della condizione limite per l'emergenza" dell'Allegato A2 della delibera regionale.

Per la loro archiviazione e l'*editing* dei documenti sono stati seguiti gli standard di riferimento più recenti disponibili nel sito web del Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni: gli SRAI (Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica), Versione 4.2.

L'inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei relativi parametri è stato effettuato tramite l'utilizzo dell'apposito software: "MS - SoftMS" nella versione 4.2.

1.1 Motivazione dello studio di terzo livello

Il Comune di Soragna è già dotato di uno studio di microzonazione sismica di secondo livello di approfondimento, redatto da Ambiter s.r.l., conforme agli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" e agli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica", secondo quanto previsto dall'OPCM 3907/2010, così come validato dalla Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica in data 06/02/2014.

Come indicato nel capitolo 6 della Relazione illustrativa, tale studio ha consentito di formulare le seguenti considerazioni:

1. *Il territorio del Comune di Soragna è interessato nel sottosuolo (sepolto da una spessa coltre di depositi fluviali), da un sistema di grandi pieghe asimmetriche con andamento anticlinalico, formatesi attraverso molteplici faglie inverse e sovrascorrimenti. Tale sistema è noto come "External Thrust Front" ed è potenzialmente riattivabile nel contesto sismogenetico della pianura padana; non è pertanto possibile escludere a priori il manifestarsi di eventi sismici con epicentro nel Comune di Soragna.*
2. *Attualmente non sono state rilevate faglie superficiali.*
3. *Per quanto riguarda il potenziale di liquefazione, lo studio ha messo in evidenza un rischio basso. Occorre tuttavia rilevare che la presenza di paeloalvei, caratterizzati da limi sabbiosi e sabbie limose, che attraversano, da nord a sud, il territorio comunale e la falda idrica attestata a profondità prossime al piano campagna, determinando la sostanziale saturazione dei depositi superficiali, non esclude in caso di sisma con Magnitudo > 5 la possibilità che si verifichino fenomeni di liquefazione.*

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	5 di 76



4. *Nel territorio comunale, in relazione all'assetto altimetrico e alla morfologia pianeggiante, non sono presenti dissesti morfologici; non sono inoltre possibili fenomeni di amplificazione locale dovuti all'assetto topografico.*
5. *I risultati delle analisi hanno permesso di accertare che in tutto il territorio comunale le accelerazioni e le velocità, impresse dal sisma di riferimento, sono amplificate verso la superficie per effetto della struttura stratigrafica del sottosuolo.*
6. *Relativamente al punto precedente, in particolare, è emerso che:*
 - *le zone meridionali del territorio comunale (Microzona 3) sono maggiormente suscettibili di amplificazione delle accelerazioni e delle velocità rispetto a quelle settentrionali, per effetto di due fattori:*
 - *il bedrock sismico è caratterizzato dai depositi appartenenti al quaternario marino per minore profondità, rispetto al piano campagna, dell'alto strutturale sepolto relativo all'Esternal Thrust Front (ETF);*
 - *nella zona sud il rapporto litologie grossolane (ghiaie e sabbie) e litologie fini (argille e limi) è decisamente inferiore a quello delle zone a nord;*
 - *nel sito di Carzeto (Microzona 1) la presenza di una rilevante impedenza tra i terreni argillosi e limosi superficiali e i terreni sabbiosi sottostanti, relativi ad un antico paleoalveo del Fiume Po, comporta fattori di amplificazione delle accelerazioni e delle velocità maggiori rispetto alle altre zone del territorio comunale con caratteristiche stratigrafiche similari.*

Lo scopo di questo lavoro è dunque la valutazione dell'effettivo grado di pericolosità derivante dai fenomeni di liquefazione dei terreni, quantificato tramite l'”Indice Potenziale di Liquefazione” LPI, attribuito a tutte le verticali oggetto di verifica.

Contestualmente, per migliorare il quadro delle conoscenze locali, si è ritenuto opportuno effettuare delle analisi di Risposta Sismica Locale, in corrispondenza di alcune situazioni stratigrafiche tipo, così da verificare la validità del modello interpretativo e consentire di valutare al meglio la vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio esistente.

Per quanto non trattato nel presente approfondimento, (in particolare: evoluzione della classificazione sismica, sismicità storica, assetto strutturale e stratigrafico generale, con relative sezioni) si rimanda agli elaborati dello studio di secondo livello.

1.2 Articolazione dello studio

Lo studio di microzonazione di terzo livello è consistito pertanto nelle seguenti fasi:

1. pianificazione della nuova campagna d'indagini;
2. realizzazione di n° 5 prove penetrometriche statiche con punta elettrica, piezocono e cono sismico fino a -30 m da p.c. o a rifiuto, finalizzate all'effettuazione di analisi di Risposta Sismica Locale e alla valutazione del potenziale rischio di liquefazione;
3. realizzazione di n° 7 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono, per la valutazione del potenziale rischio di liquefazione;

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	6 di 76



4. realizzazione di n° 13 prove HVSR per la determinazione della frequenza caratteristica del terreno in corrispondenza delle aree urbanizzate individuate dal precedente studio di 2° livello;
5. aggiornamento secondo gli standard più recenti, con inserimento dei dati relativi alle nuove indagini, delle seguenti cartografie di primo e secondo livello:
 - Carta delle indagini;
 - Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione sismica;
 - Carta delle frequenze naturali dei terreni;
 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS);
 - Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s);
6. valutazione della riposta sismica locale in n° 5 siti in cui si riteneva di poter disporre di sufficienti dati per la definizione del modello geofisico del sottosuolo. L'elaborazione della RSL è stata realizzata mediante codice di calcolo LSR 2D (*Local Sismic Response 2D*) Ver. 5.0 di STACEC;
7. calcolo dei fattori di amplificazione, per i n° 5 siti indagati, per un tempo di ritorno $TR=475$ anni, con smorzamento $\zeta=5\%$, relativi ai seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico:
 - $FA_{PGA} = PGA/PGA_0$, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ al suolo di riferimento e PGA è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ alla superficie del sito;
 - $FA_{SA} = SA/SA_0$, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T :
 - SA1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - SA2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$,
 - SA3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$,
 - SA4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;
 - $FH_{SI} = SI/SI_0$, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di *Housner*) al suolo di riferimento e SI l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di *Housner*) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T :
 - SI1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - SI2 per $0,5s \leq T \leq 1,0s$,
 - SI3 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$.
8. Redazione delle cartografie di microzonazione sismica Livello 3 relative agli 8 parametri indicati al punto precedente, oltre che allo scuotimento in accelerazione (cm/s^2) atteso al sito per gli intervalli di periodi:
 - $0,1s \leq T \leq 0,5s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM}),
 - $0,4s \leq T \leq 0,8s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - $H_{SM, 0,4-0,8 s}$),

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	7 di 76



- $0,7s \leq T \leq 1,1s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7-1,1\ s}$),
 - $0,5s \leq T \leq 1,5s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5-1,5\ s}$),
9. Verifiche a liquefazione su n° 12 verticali.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	8 di 76



2. INDAGINI ED ANALISI

Di seguito vengono descritte le indagini specifiche effettuate per la microzonazione di III livello, la cui ubicazione è rappresentata graficamente in Fig. 1, oltre che nella Carta delle indagini alla scala 1:10'000.

I punti di indagine sono stati individuati, in accordo con i Tecnici del Comune, tenendo conto dell'approfondimento di secondo livello.

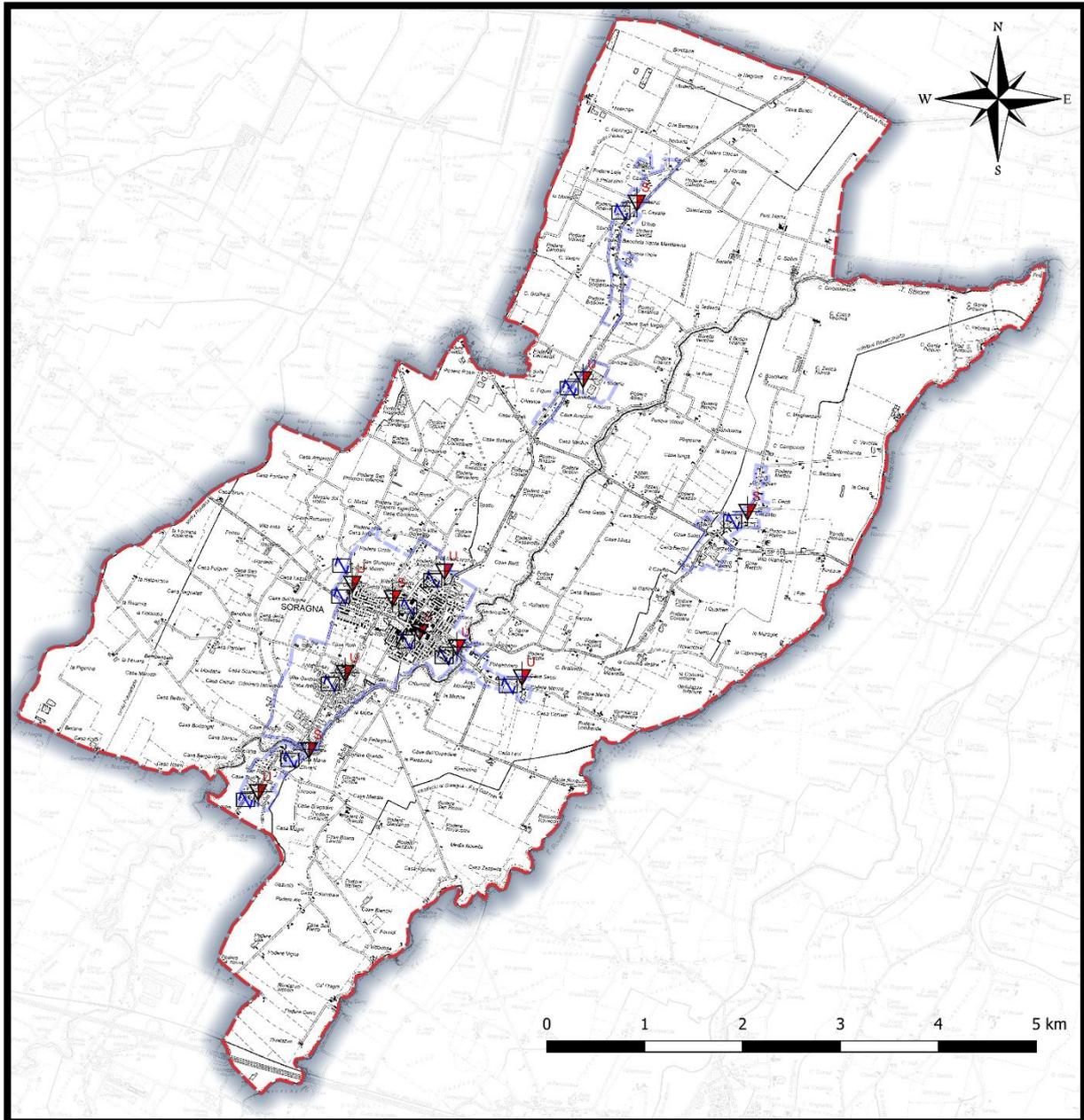


Fig. 1 - Ubicazione delle indagini effettuate per l'analisi di 3° livello

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	9 di 76



2.1 Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono

Nel corso della campagna d'indagine, sono state eseguite, da parte della ditta SOCOTEC s.a.s. di Ferrara, n° 12 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (cfr. All. 3), n° 5 delle quali attrezzate con cono sismico (cfr. paragrafo 2.2). Le indagini sono state eseguite utilizzando un penetrometro GeoMill da 200 kN di spinta massima con punta Tecnopenta G1-CPL2IN, montato su autocarro Mercedes Unimog 4 X 4.

Ciascuna prova è consistita nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta elettrica dotata di piezocono, di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ($V = 2 \text{ cm/s} \pm 0.5 \text{ cm/s}$). La penetrazione avviene attraverso un dispositivo di spinta, che agisce su una batteria di aste (aste cave con il cavo di trasmissione dati all'interno), alla cui estremità inferiore è collegata la punta con piezocono.

Lo sforzo necessario per l'infissione viene determinato a mezzo di un opportuno sistema di misura estensimetrico collegato alla punta ed al manicotto dell'attrito laterale, e da un trasduttore di pressione per la misura della pressione interstiziale dei pori, cioè il carico idraulico istantaneo presente nell'intorno della punta, attraverso un setto poroso opportunamente saturato e disareato.

I dati delle resistenze alla punta, al manicotto laterale, della pressione dei pori e dell'inclinazione della punta vengono registrate su supporti magnetici e successivamente elaborati.

Le dimensioni della punta/manicotto sono standardizzate, e precisamente:

- diametro di base del cono $\phi = 35.7 \text{ mm}$
- area della punta conica $A_p = 10 \text{ cm}^2$
- angolo apertura del cono $B = 60^\circ$

Nei diagrammi e nelle tabelle riportati in All. 2 e All. 3 sono riportati i seguenti valori di resistenza (rilevati dalle letture di campagna, durante l'infissione dello strumento):

- q_c (MPa) = resistenza alla punta (conica);
- f_s (kPa) = resistenza laterale (manicotto);
- U (kPa) = pressione dei pori (setto poroso);

I parametri sopra descritti sono rilevati ad intervalli regolari di 2 cm.

Per quanto riguarda le indagini pregresse si dispone di n° 8 prove CPT dotate di punta meccanica, n° 1 prova CPTe a punta elettrica, n° 14 prove CPTU attrezzate con piezocono per la misura delle pressioni interstiziali.

Nelle seguenti immagini a titolo di esempio vengono riportati i grafici relativi ai parametri q_c (cfr. Fig. 2) e f_s (cfr. Fig. 3) delle prove SCPTU.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	10 di 76

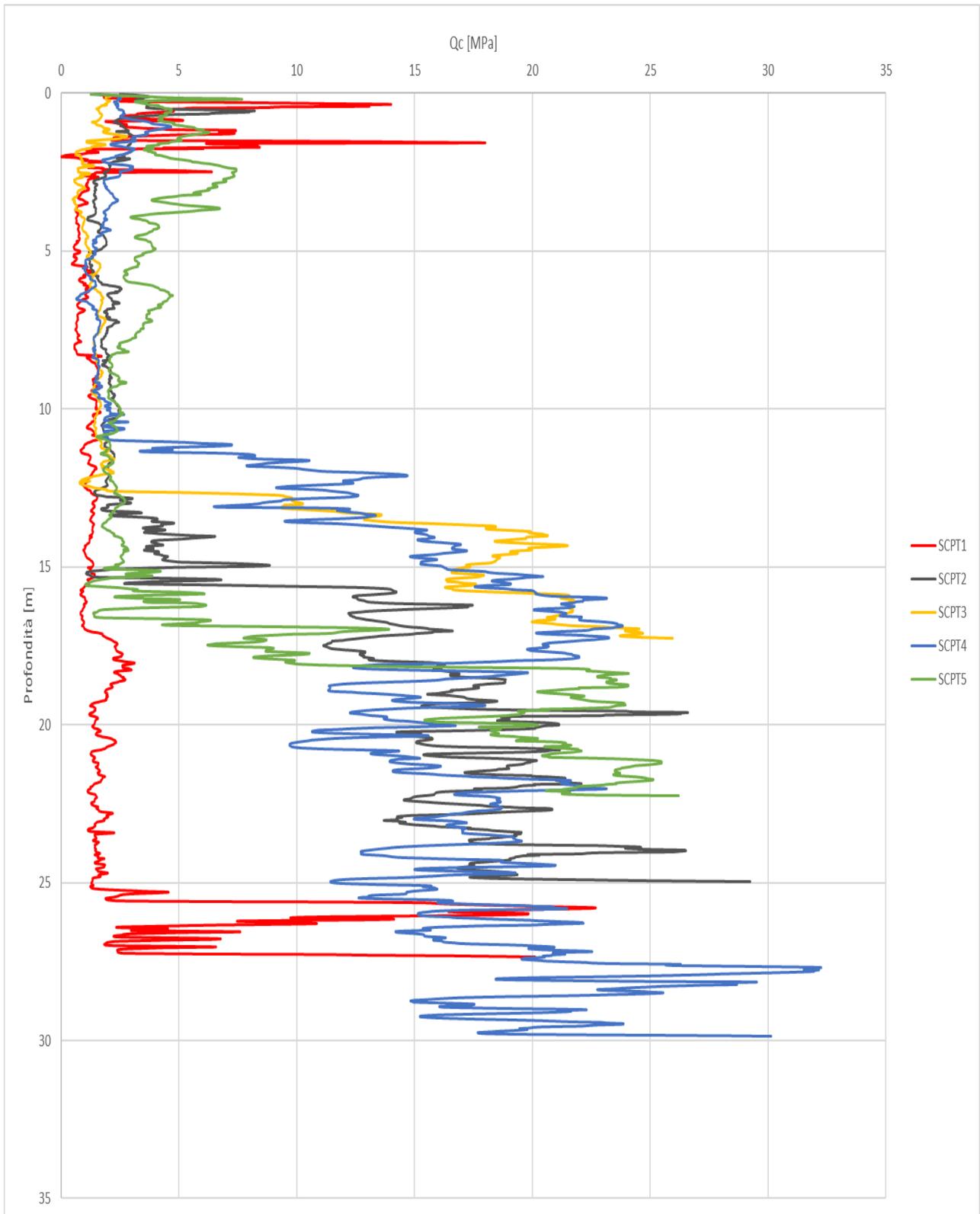


Fig. 2 - Andamento della resistenza q_c in funzione della profondità per le 5 prove SCPTU

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	11 di 76

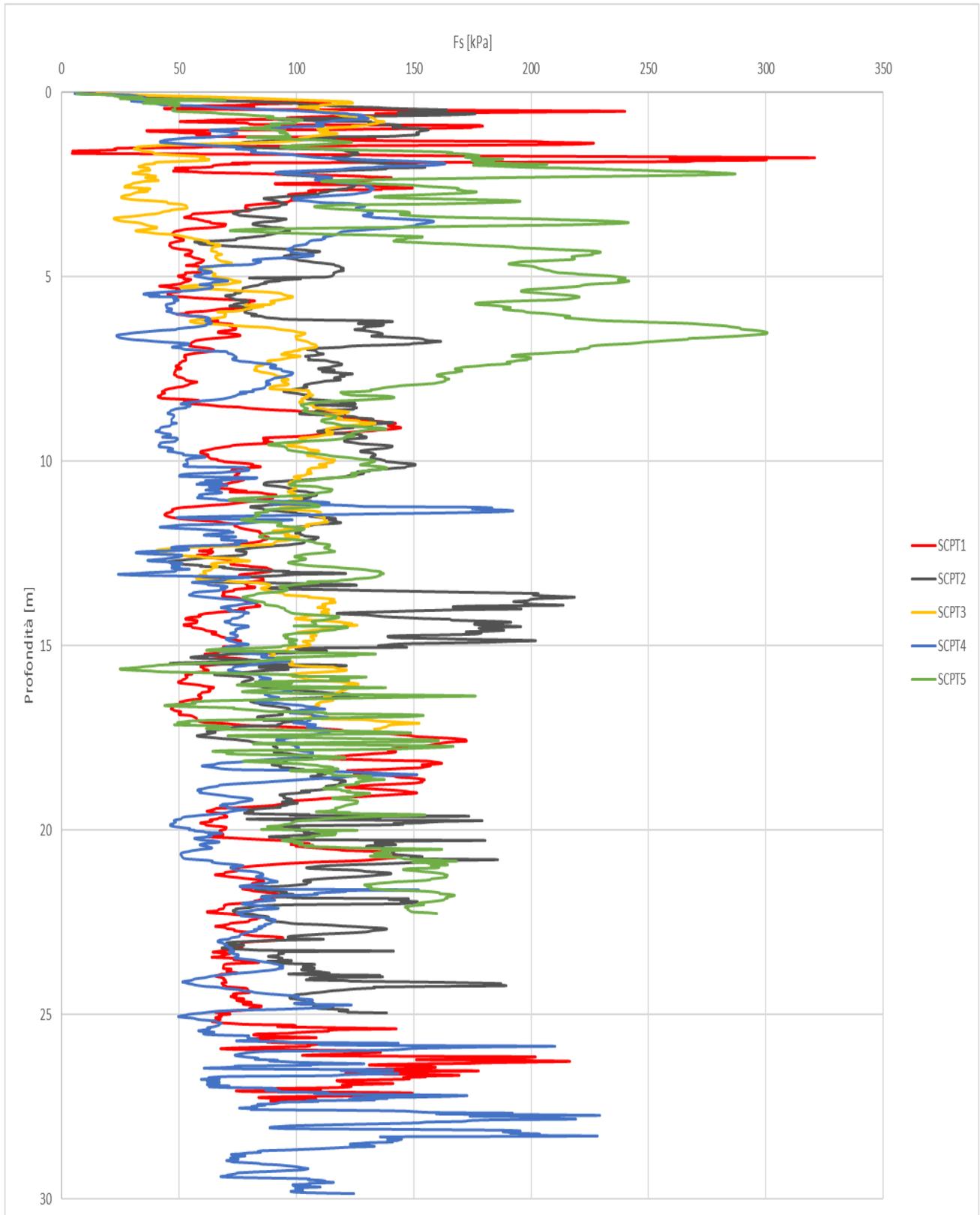


Fig. 3 - Andamento del parametro fs in funzione della profondità per le 5 prove SCPTU

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	12 di 76



2.2 Indagine mediante sismocono

Per verificare le caratteristiche sismiche dei terreni sono state realizzate n° 5 prove mediante sismocono eseguite durante la realizzazione delle prove penetrometriche (denominate SCPTU 1, SCPTU 2, SCPTU 3, SCPTU 4 e SCPTU 5), attrezzando lo strumento con una punta con piezocono e geofoni

Oltre ai normali parametri della prova CPTU registrati ogni 2 cm, nella prova con sismocono, ad ogni metro di profondità, viene sospesa l'infissione, e, a piano campagna, vengono generate delle onde di taglio (onde S) percuotendo orizzontalmente, con una mazza, una trave vincolata al terreno, per avere un sismogramma con una prevalente fase S.

Tramite sensori sismici, presenti all'interno della punta penetrometrica, e adeguato acquirente dinamico, è possibile rilevare e registrare i segnali prodotti in superficie e, di conseguenza, determinare i tempi necessari alle onde S per percorrere il tratto da piano campagna fino alla profondità a cui si trova il geofono (cfr. Fig. 4).

Attraverso il rapporto distanza/tempo di percorrenza, è possibile determinare, direttamente e con buona precisione, le velocità delle onde S, caratterizzando i vari strati di terreno attraversati.

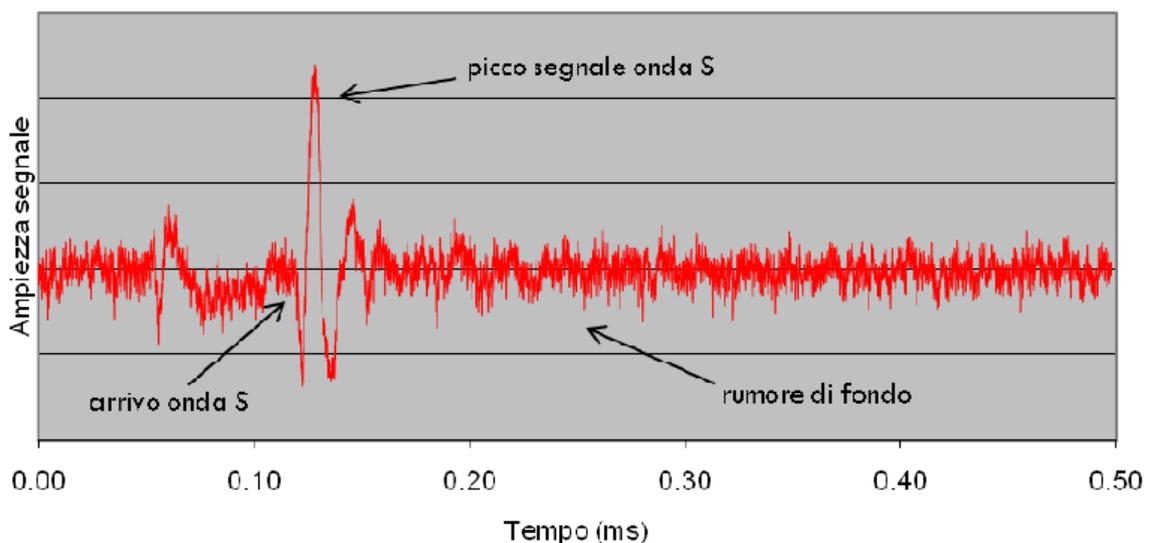


Fig. 4 - Esempio di sismogramma del segnale registrato a 10 m di profondità

In pratica, la prova con sismocono si può considerare come una prova *Down-Hole* a tutti gli effetti.

Nella seguente Fig. 5 viene riportato il grafico, in funzione della profondità, della velocità delle sole onde S, registrate nel corso delle 5 prove SCPTU effettuate per il presente studio.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	13 di 76

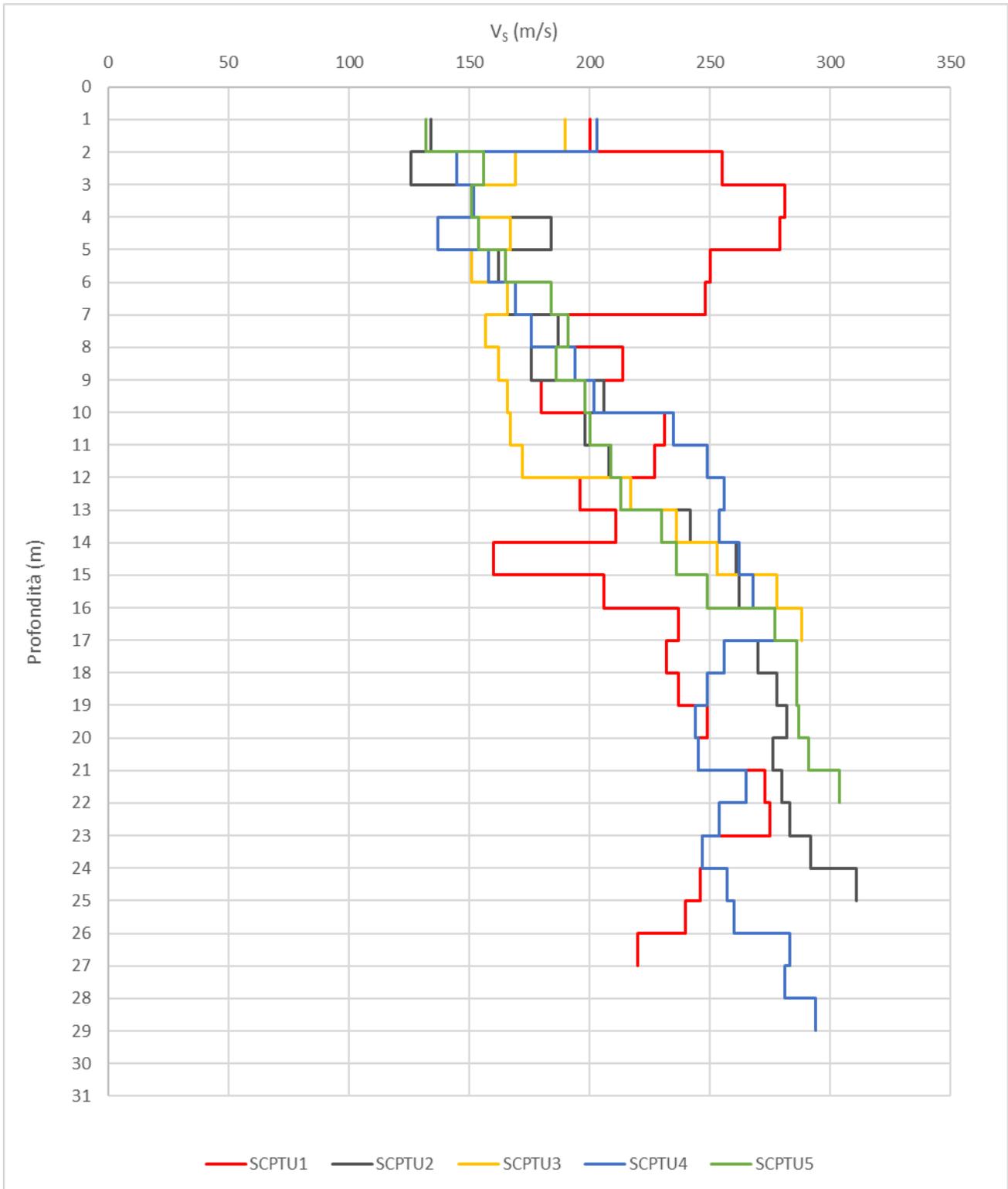


Fig. 5 - Valori di V_s in funzione della profondità misurati dalle prove SCPTU



2.3 Rilievo sismico HVSR mediante tromografo

Ai fini della determinazione della frequenza caratteristica dei suoli in corrispondenza dei punti delle indagini CPTU e SCPTU sono state eseguite n° 13 prove HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) tramite tromografo digitale.

Le prove sono state condotte utilizzando un sismometro a stazione singola (tromografo digitale con sensori da 2 Hz) in grado di registrare i microtremori lungo le due direzioni orizzontali (X, Y) e lungo quella verticale (Z), di un ampio intervallo di frequenze (0.1-100 Hz) e per una durata sufficientemente lunga (mediamente 20 minuti). Il moto indotto nel terreno viene acquisito dallo strumento in termini di velocità attraverso tre velocimetri, uno per ogni direzione di misura (X, Y e Z).

Le misure registrate sono state poi elaborate e restituite graficamente in forma di spettri H/V (cfr. Fig. 6).

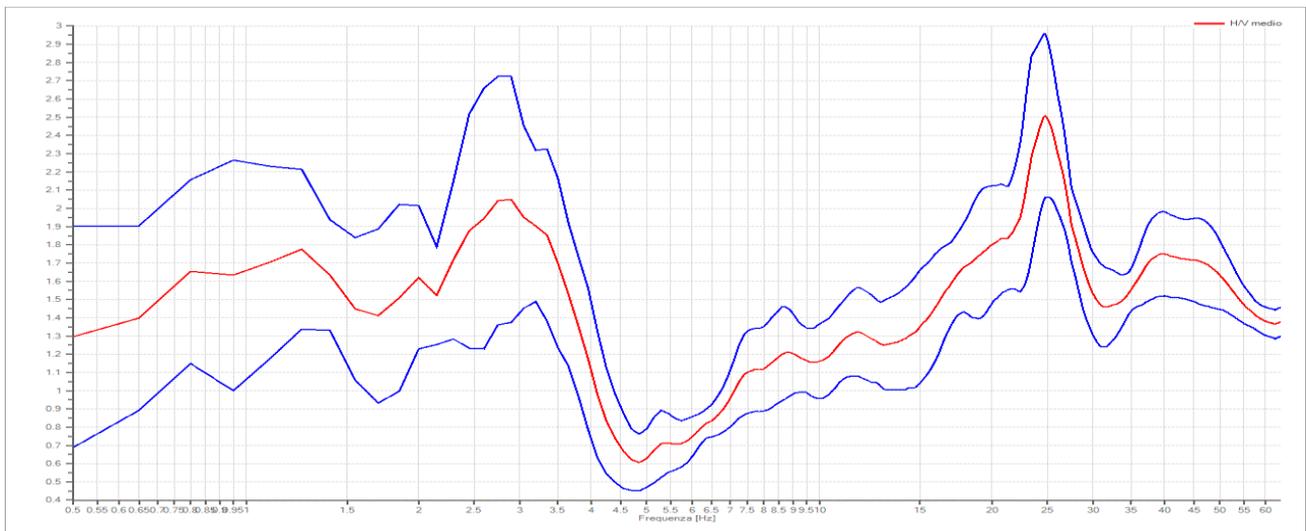


Fig. 6 – Grafico del rapporto H/V misurato dalla prova 034036P130

I risultati dei rilievi sismici mediante tromografo sono riportati in All. 1; mentre, nella seguente Tab. 1, sono indicate le frequenze principali corrispondenti ai picchi d'amplificazione individuati.

Codice MS3 ³	Picco (Hz)
034036P121	1.11
034036P122	2.15
034036P123	3.60
034036P124	0.85
034036P125	3.05
034036P126	0.90

³ Codice da normativa regionale

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	15 di 76



Codice MS3³	Picco (Hz)
034036P127	1.00
034036P128	0.90
034036P129	5.40
034036P130	1.25
034036P131	0.90
034036P132	1.45
034036P133	5.15

Tab. 1 - Riepilogo dei picchi d'amplificazione misurati con le nuove prove HVSR



3. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Di seguito vengono fornite alcune informazioni di carattere generale sulle procedure di valutazione di risposta sismica locale, valide per tutti i siti indagati. Nei successivi paragrafi, saranno quindi illustrati i risultati della RSL per ciascun sito. Nel complesso sono state eseguite analisi di risposta sismica locale su n° 5 verticali, la cui ubicazione è riportata nella seguente Fig. 7.

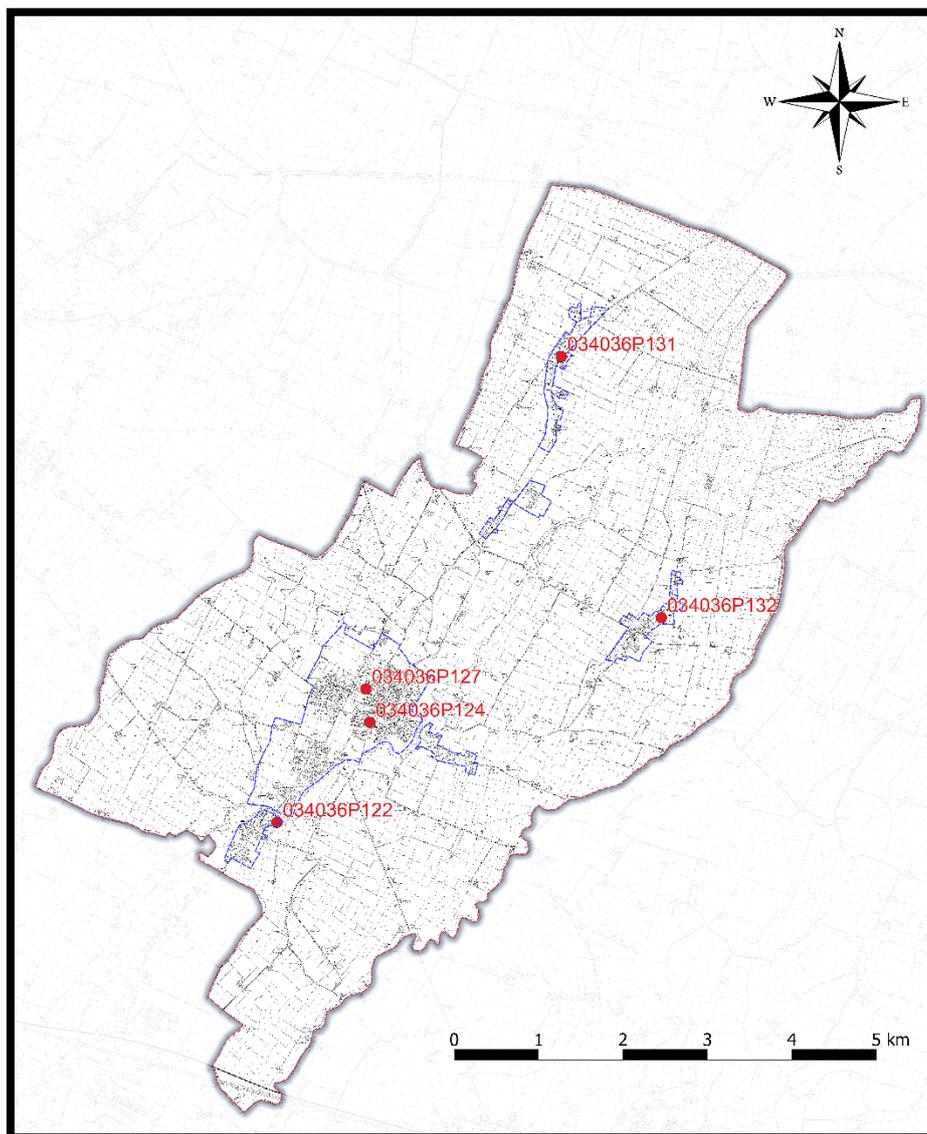


Fig. 7 - Ubicazione delle verticali utilizzate per l'analisi di risposta sismica locale

In corrispondenza di tutte le verticali di analisi è stata eseguita una misura diretta della velocità delle onde S in funzione della profondità, tramite prova penetrometrica statica con

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	17 di 76



punta elettrica, piezocono e cono sismico (SCPTU). Inoltre, è stata eseguita anche un'indagine HVSR.

Nella seguente tabella si riporta un elenco dettagliato delle verticali di indagine, coincidenti con le prove SCPTU eseguite:

Codice MS3 ⁴	Nome
034036P141	S. Maria - Castellina
034036P142	Scuola Cesare Battisti-Soragna
034036P143	Carzeto
034036P144	S. Caterina - Diolo
034036P145	S. Famiglia - Soragna

Tab. 2 - Elenco delle verticali su cui è stata effettuata la risposta sismica locale

3.1 Pericolosità sismica di base

Nell'ambito della microzonazione sismica i parametri di riferimento (PGA su suolo di categoria A, spettri di risposta rappresentativi e segnali di riferimento) sono definiti dall'Allegato A4 della DGR 2193/2015 della Regione Emilia-Romagna.

In particolare, l'Allegato A4 contiene:

- la forma dello spettro di risposta normalizzato rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) in Emilia-Romagna;
- le indicazioni per il reperimento e l'utilizzo dei segnali di riferimento selezionati.
- Le indicazioni per il calcolo dei valori di $a_{ref,g}$ (10% di probabilità di superamento in 50 anni) di ogni sito indagato;

Per i punti di indagine il parametro $a_{ref,g}$, che varia in funzione del sito indagato, risulta compreso nel seguente intervallo (Tab. 3):

$a_{ref,g} (a_g/g)$
$0.100 < a_{ref,g} < 0.125$

Tab. 3 - Valori di $a_{ref,g}$ (10% di probabilità di superamento in 50 anni)

⁴ Codice da normativa regionale

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	18 di 76



3.2 Segnali in input

Quali segnali di input sismico sono stati utilizzati quelli forniti dalla piattaforma WebGIS sviluppata da EUCENTRE per la Regione Emilia-Romagna nell'ambito dell'accordo "Acquisizione del servizio di rilevamento a scala regionale del rischio sismico degli edifici residenziali ordinari e aggiornamento dei segnali di riferimento per la stima della risposta sismica locale negli studi di microzonazione sismica di terzo livello di approfondimento"⁵.

I segnali sismici sono rappresentativi dello scuotimento atteso, per un periodo di ritorno di 475 anni (10% di probabilità di superamento in 50 anni), sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018, ovvero con V_{s30} superiore a 800 m/s.

Tutti i segnali sono stati selezionati attraverso una procedura che valuta la similarità tra le forme spettrali di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nelle banche dati. Il confronto viene effettuato con lo spettro di risposta indicato dalla NTC 2018, con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni.

Il servizio fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2018. Per le n° 3 verticali che ricadono nelle località di Soragna o Castellina, (P141 – S. Maria, P142 – Scuola Cesare Battisti, P145 –S. Famiglia) sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo 14715 (cfr. Tab. 4), mentre per le verticali P143 – Carzeto e P144 - S. Caterina, situate più a N, sono stati utilizzati quelli riferiti al nodo 14716 (cfr. Tab. 5).

Gli accelerogrammi sono stati estratti per tempi di ritorno di 475 anni e sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto dalle NTC per ogni verticale di indagine.

M _w	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.20	29.90	1.69 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.11 %	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.69	38.07	0.86 %	NGA RSN1091_NORTHV_VAS000.AT2
5.60	18.00	0.82 %	ESM IT.LRS..HNE.D.19980909.112800.C.ACC.ASC
6.20	78.79	2.27 %	NGA RSN2989_CHICHI.05_CHY102N.AT2
6.60	31.00	0.53 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.50	57.74	2.79 %	NGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP247.AT2

Tab. 4 – Sismi estratti riferiti al nodo 14715

M _w	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.20	29.90	1.55 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
6.93	94.31	1.50 %	NGA RSN797_LOMAP_RIN000.AT2
5.60	18.00	0.74 %	ESM IT.LRS..HNE.D.19980909.112800.C.ACC.ASC

⁵ [R.E.R.\(eucentre.it\)](http://R.E.R.(eucentre.it))

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	19 di 76



M _w	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.60	31.00	0.47 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.50	57.74	2.55 %	NGA RSN8167 SANSIMEO DCP247.AT2
6.60	90.00	1.54 %	KiKnet FKOH060503201053.NS2
5.40	26.40	2.19 %	ESM 4A.MI05..HNE.D.20090409.005259.C.ACC.ASC

Tab. 5 - Sismi estratti riferiti al nodo 14716

3.3 Modello geofisico del sottosuolo

La valutazione della risposta sismica locale richiede un'accurata modellazione delle caratteristiche geofisiche del sottosuolo, principalmente basata sui seguenti parametri:

- litologia;
- velocità delle onde sismiche di taglio (V_s);
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione e densità in situ,

Tale modellazione va estesa in profondità fino al raggiungimento del *bedrock* sismico, cioè un mezzo che a livello teorico presenta velocità delle onde di taglio (V_s) superiori a 800 m/s.

A proposito della definizione del *bedrock* sismico, si rimanda al par. 4 - Criticità del metodo, in cui la questione viene discussa approfonditamente.

3.3.1 Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati stratigrafici ottenuti dalle prove SCPTU e CPTU (cfr. par. 2.1); laddove necessario, le informazioni sono state integrate con la stratigrafia di pozzi, posizionati in prossimità di ciascun sito, fornita dal database geologico della Regione Emilia-Romagna.

3.3.2 Determinazione della V_s e del *bedrock* sismico

Per quanto riguarda la velocità delle onde S in funzione della profondità si è fatto riferimento alle misure delle prove con cono sismico (n° 5 SCPTU) fino alla massima profondità indagata e per i livelli inferiori, utili per la definizione del *bedrock* sismico, si è integrato con i dati delle prove HVSR.

Indagine	Tipo indagine	Vs30	Indagine	Tipo indagine	Vs30	Indagine	Tipo indagine	Vs30
034036P122	HVSR	265	034036P132	HVSR	272	034036P52	HVSR	284
034036P124	HVSR	265	034036P110	HVSR	249	034036P55	HVSR	215
034036P127	HVSR	289	034036P15	HVSR	276	034036P62	HVSR	248
034036P131	HVSR	255	034036P36	HVSR	215	034036L1	MASW	267

Tab. 6 - Vs₃₀ ricavata dalle diverse indagini

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	20 di 76



La V_s è stata discretizzata per strati omogenei, in funzione principalmente della litologia, per consentire la realizzazione di un modello non troppo complesso.

Si è constatato, infatti, che l'introduzione di un eccessivo numero di strati nel software di calcolo, che sarebbero stati opportuni per seguire più fedelmente l'andamento della V_s con la profondità, introduce una complessità che non migliora i risultati.

Mediante il processo sopra descritto si giunge ad una prima discretizzazione della V_s in funzione della profondità. Per i primi 25-30 m sono stati ritenuti più significativi i risultati delle prove SCPTU mentre per le profondità maggiori si è fatto riferimento principalmente alle prove HVSR.

A tal proposito, l'interpretazione delle prove HVSR ha tenuto conto anche dell'interpretazione geologica del sito, soprattutto in relazione alla definizione del bedrock.

In particolare, nella gran parte delle prove effettuate è stato riscontrato un picco nell'intervallo di frequenza tra 0.75 e 1.25 Hz (cfr. Fig. 8), interpretabile come un contrasto d'impedenza attestato tra i 100 e 150 m di profondità, in aumento da sud verso nord. Nelle restanti verticali sono stati invece acquisiti picchi a frequenze maggiori, variabili tra 1.45 e 5 Hz, associati alla presenza sia di lenti ghiaiose o sabbiose, che ad un probabile livello d'impedenza più superficiale, stimato a circa 50÷70 m di profondità.

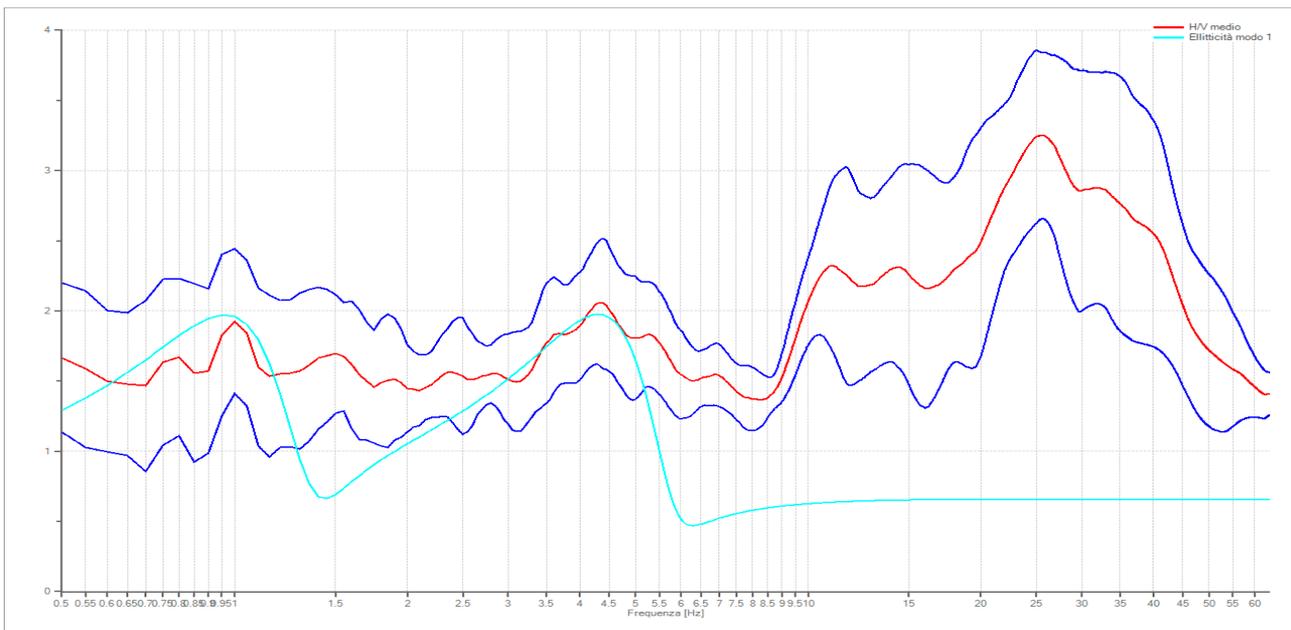


Fig. 8 - Esempio di prova HVSR (034036P127) con picchi a 1.00 e 4.3 Hz

Sulla base delle profondità ipotizzate, il contrasto alle basse frequenze potrebbe corrispondere, nel settore più meridionale (in prossimità di Castellina), al contatto tra Sintema emiliano romagnolo inferiore (AEI) e superiore (AES); mentre, più a nord, andrebbe identificato con una superficie più recente posta nella porzione più profonda dell'AES. Il picco più superficiale (1.5-2.5 Hz), individuato sia in studi regionali che in quelli di microzonazione sismica di terzo livello redatti da Engeo nel comune limitrofo di Busseto,

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	21 di 76



viene invece associato al limite tra il subsistema di “Villa Verucchio” e quello di “Agazzano”.

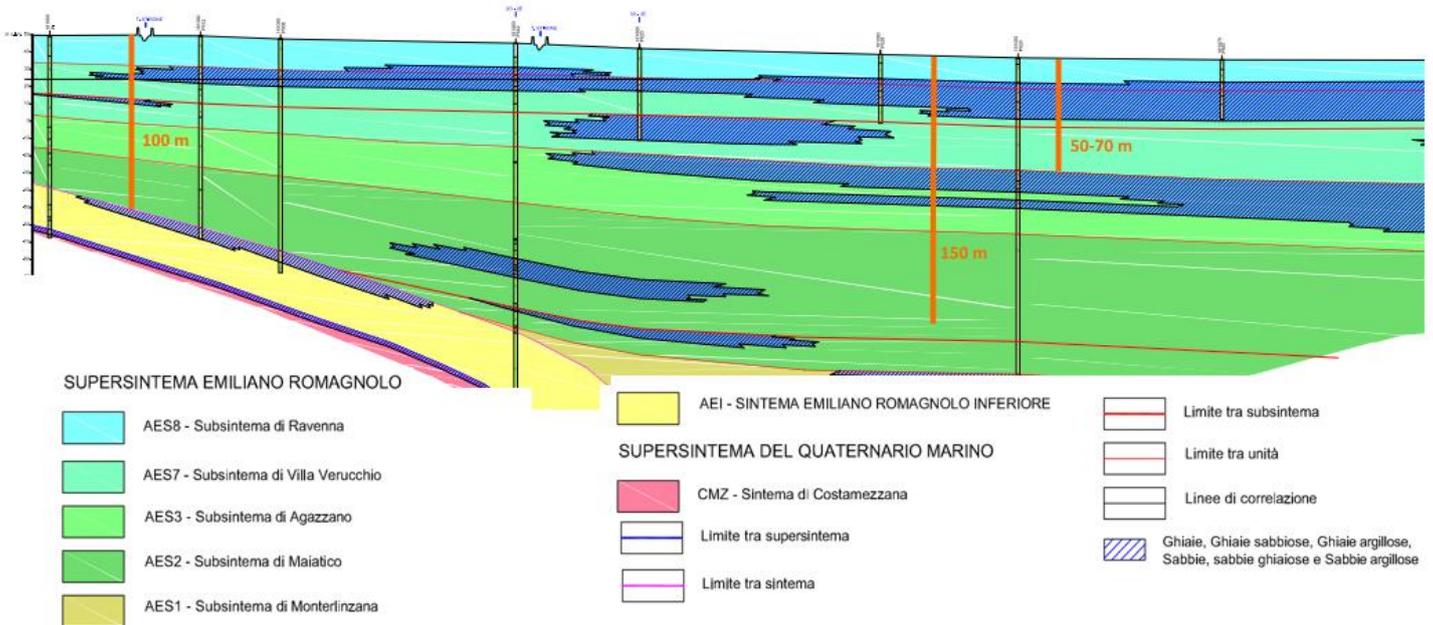


Fig. 9 - Stralcio da sez. 1 dell’elaborato 2.3 “Sezioni geologiche” dello studio di microzonazione sismica di livello 2 del Comune di Soragna redatto da Ambiter

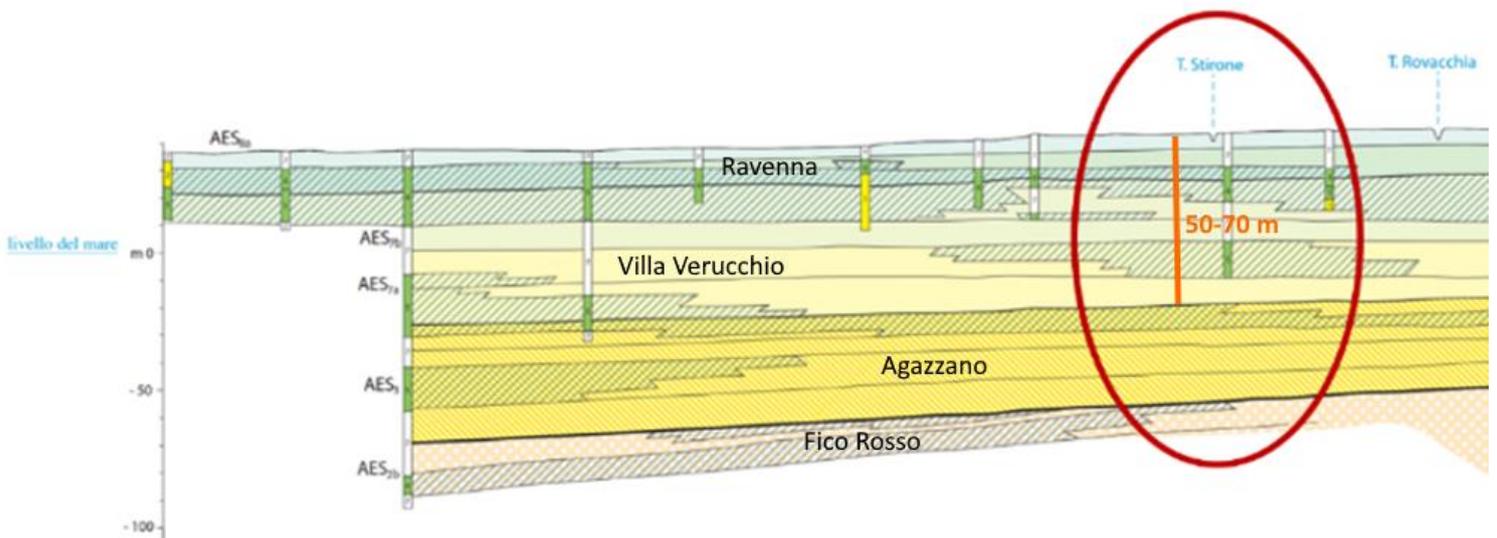


Fig. 10 - Stralcio della Sez. 39 scaricata dal sito del Servizio Geologico RER

In Fig. 11 è riportato un esempio di discretizzazione della V_s per la definizione di un modello sismostratigrafico valido, in generale, per l’intero territorio comunale.

Per ulteriori valutazioni relative alla definizione del bedrock sismico si rimanda al par. 4.1 - Considerazioni sul bedrock sismico.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	22 di 76

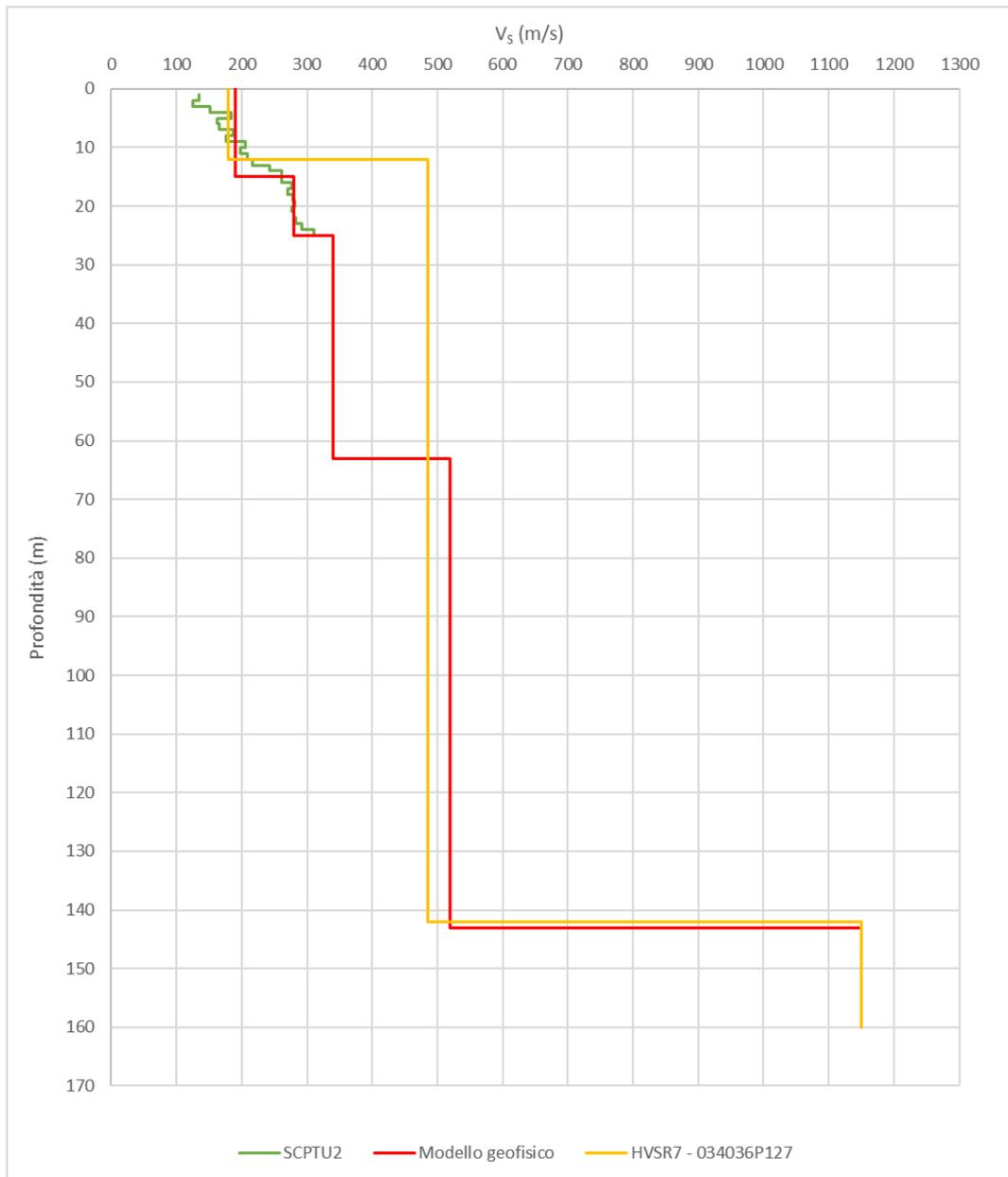


Fig. 11 - Esempio di discretizzazione della V_s per la definizione del modello sismostratigrafico

3.3.3 Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G_0) in funzione della deformazione

Per la valutazione delle curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidità, G/G_0) in funzione della deformazione di taglio γ , sono state utilizzate curve presenti in letteratura, scelte in funzione della descrizione litologica e, dove disponibili, dei parametri geotecnici.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	23 di 76



In particolare, per i depositi argillosi e limosi sono state utilizzate le curve di Vucetic & Dobry, (1993),⁶ per i depositi sabbiosi Sand Seed & Idriss (1970)⁷ e per le ghiaie Rollins (1998)⁸, (cfr. Tab. 7).

Campione	Litologia	α	β	η	λ
Vucetic & Dobry PI=0	Argilla e limo	23.21	0.88	26.91	2.50
Vucetic & Dobry PI=15	Argilla e limo	9.52	0.82	25.96	2.32
Vucetic & Dobry PI=30	Argilla e limo	18.74	0.98	11.52	1.58
Sand Seed & Idriss	Sabbia	13.05	0.93	22.28	2.3
Rollins	Ghiaia	39.01	1.11	22.38	2.61

Tab. 7 - Riepilogo dei parametri caratteristici delle curve da letteratura

Nelle seguenti figure sono riportate le curve di interpolazione per i parametri G/G_0 (Fig. 12) e D (Fig. 13) provenienti da letteratura.

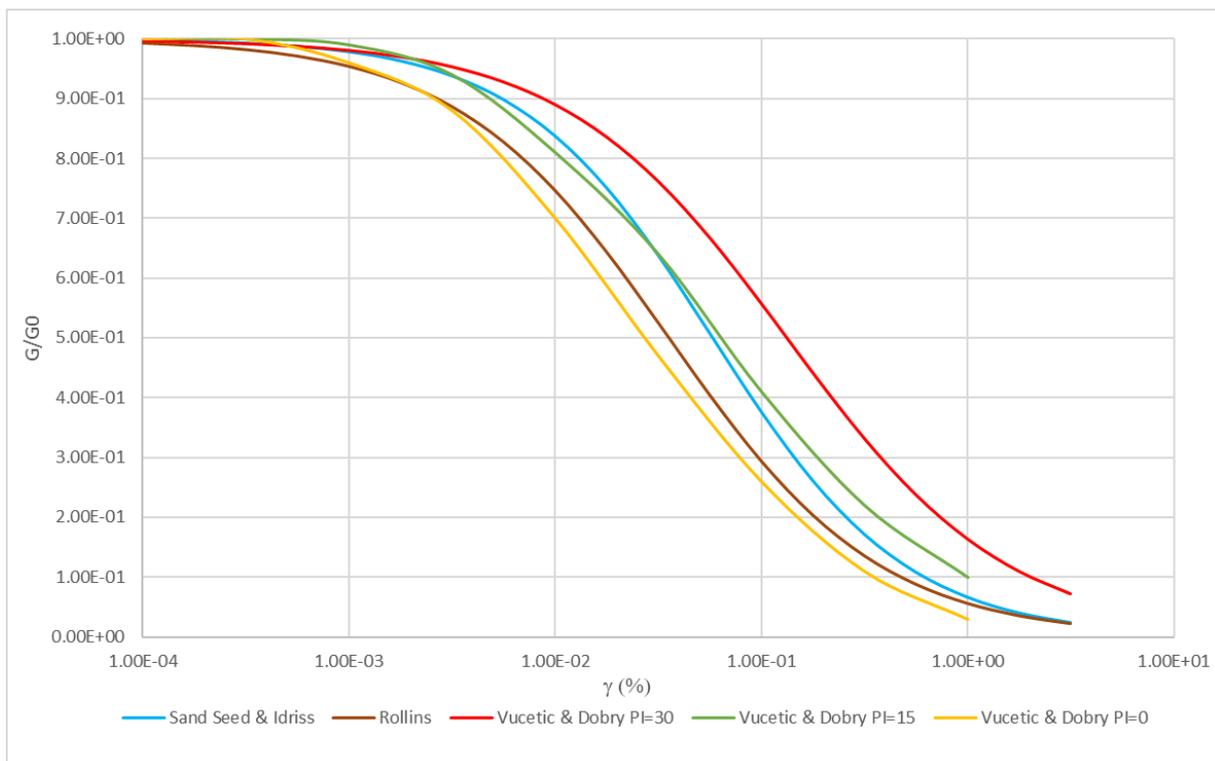


Fig. 12 - Grafico delle curve di interpolazione G/G_0 in funzione della deformazione

⁶ M. Vucetic; R. Dobry – 1991 – Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response - Journal of Geotechnical Engineering, [Vol. 117, Issue 1](#).

⁷ H. B. Seed; I. M. Idriss – 1970 – Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses – University of California Berkeley Structural Engineers and Mechanics.

⁸ Rollins K.M., Evans M., Diehl N. and Daily W. – 1998 – Shear modulus and damping relationships for gravels. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., 124 (5), 396-405.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	24 di 76

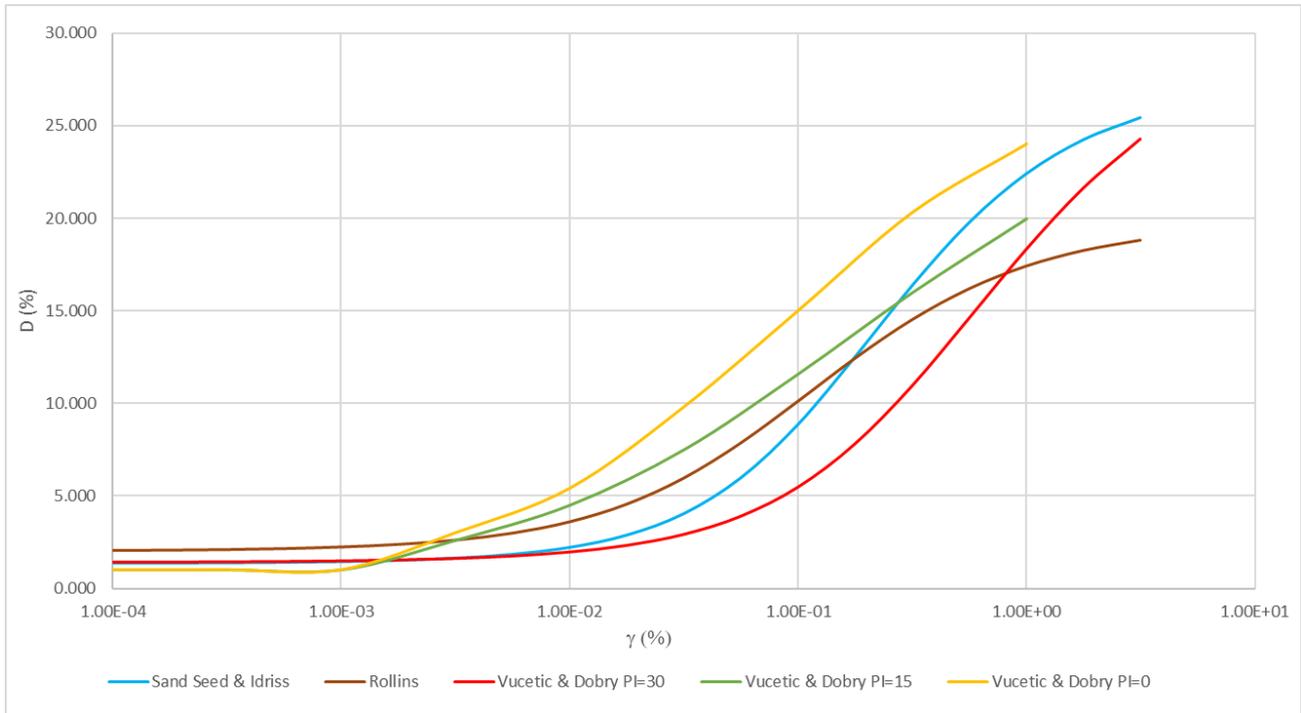


Fig. 13 - Grafico delle curve di interpolazione D in funzione della deformazione

3.1 Procedura di analisi RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo LSR 2D (*Local Sismic Response 2D*) Ver. 5.0 di STACEC.

Il codice di calcolo LSR2D consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale, come nel caso in esame, è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

3.1.1 Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	25 di 76



fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Fig. 14. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

dove:

- G = Modulo di taglio;
- η = viscosità del mezzo;

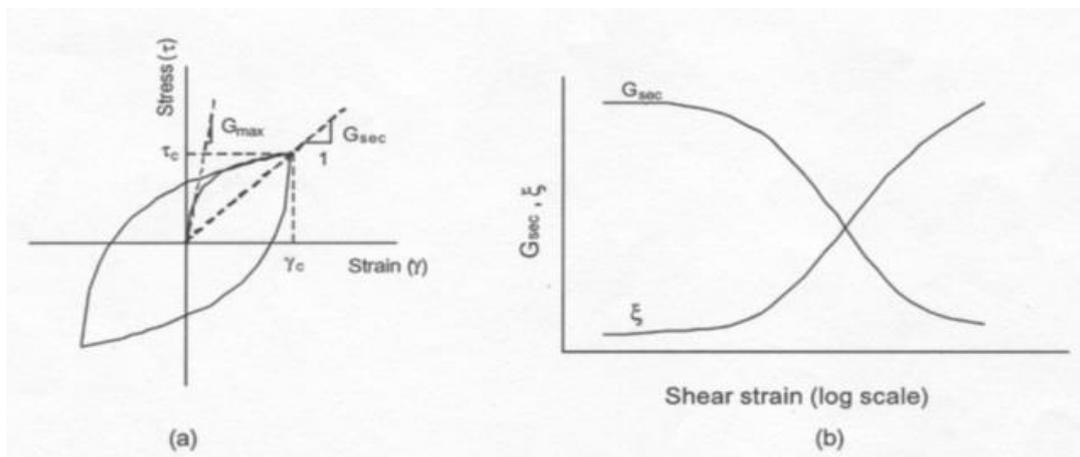


Fig. 14 - Modello lineare equivalente
(a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Fig. 14. Il modulo di taglio equivalente, G , è preso considerando il modulo di taglio secante G_s .

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	26 di 76



È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva $G_s - \gamma$ non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva $\tau - \gamma$ e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{dt}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma} \gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento D , definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

- ΔW^{dissp} = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- W^{max} = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Fig. 14b).

3.1.2 Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell'i-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (Fig. 15) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g$$

dove:

M = matrice di massa del sistema;

C = matrice di smorzamento del sistema;

K = matrice di rigidità del sistema;

\ddot{u}, \dot{u}, u = rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;

a_g = vettore di accelerazione alla base;

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	27 di 76



Tale equazione vale per ogni istante di tempo t_n e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni t_n viene ottenuta a partire dalle seguenti relazioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

dove:

Δt = incremento temporale tra l'istante di tempo t_n e t_{n-1}

β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25

γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50

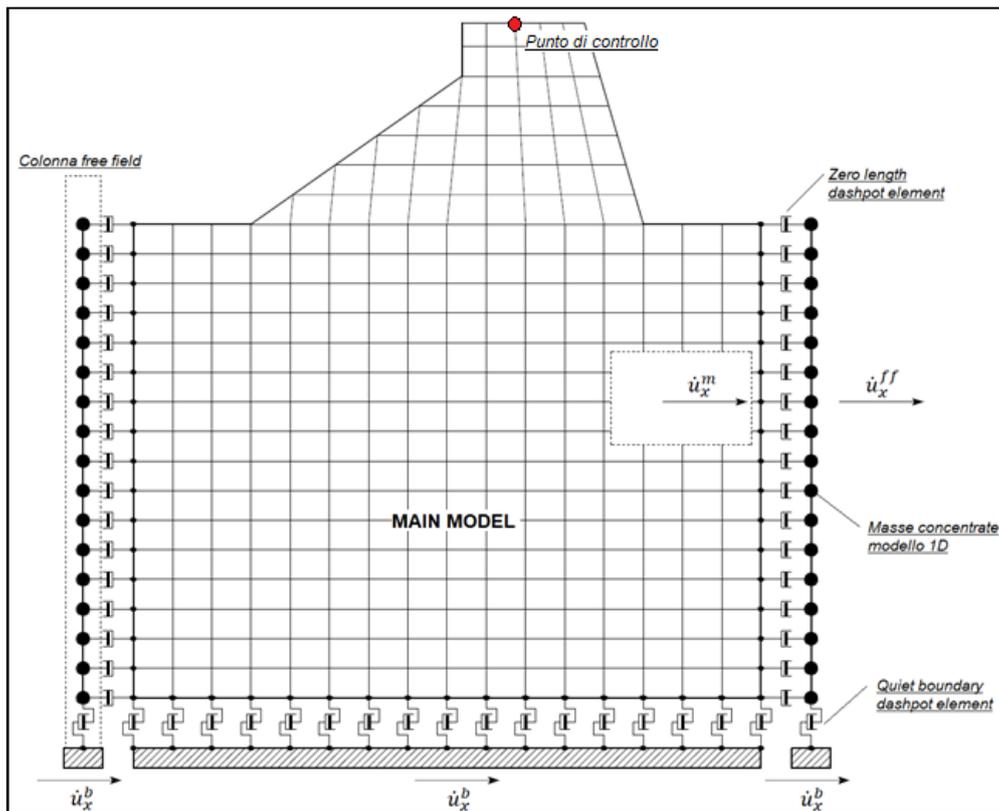


Fig. 15 - Discretizzazione FEM del terreno

3.1.3 Smorzamento

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute a loro volta come:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	28 di 76



$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q$$

dove:

- α_q e β_q = coefficienti di smorzamento alla Reyleigh;

Tali coefficienti vengono ottenuti a partire dal rapporto di smorzamento viscoso del singolo elemento e dalla relazione seguente:

$$\begin{aligned} \dot{u}_n &= \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n] \\ u_n &= u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n] \end{aligned}$$

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

$$D_q = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q \omega \right)$$

dove:

- ω_1 = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$ con $n = \omega_i / \omega_1$ (approssimato all'intero pari più grande) e ω_i frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

3.1.4 Procedimento iterativo

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidezza e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico, è il seguente:

1. definizione di curve $G = G(\gamma)$ e $D = D(\gamma)$ per i diversi strati;
2. inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni (G_0 e D_0);
3. calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato (γ_1);
4. aggiornamento dei valori $G_1 = G(\gamma_1)$ e $D_1 = D(\gamma_1)$;
5. iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$).

3.1.5 Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM.

Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione in superficie in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	29 di 76



3.2 Analisi dei risultati

I risultati delle analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.0 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

- La funzione di trasferimento del segnale sismico dal *bedrock* alla superficie;
- Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA – di cui in Fig. 16 si riporta un esempio) e lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità (PSV di cui in Fig. 17 si riporta un esempio); gli spettri rappresentati sono ottenuti come mediana dei valori degli spettri di tutti i segnali sismici in output.
- La curva di variazione dell'accelerazione con la profondità (di cui in Fig. 18 si riporta un esempio);
- Il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FA_{PGA}), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudovelocità (FH_{IS}) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido. In sostanza viene calcolato il rapporto degli indici di Housner negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s, per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido). I rapporti risultano pertanto:

$$FH_{IS\ 0.1-0.5} = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt}$$

$$FH_{IS\ 0.5-1.0} = \frac{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt}$$

$$FH_{IS\ 0.5-1.5} = \frac{\int_{0.5}^{1.5} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.5} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt}$$

- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudoaccelerazione (FA_{SA}) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido in diversi intervalli. I rapporti risultano pertanto:

$$FA_{SA\ 0.1-0.5} = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{superficie}(T)dt}{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{suolo\ rigido}(T)dt}$$

$$FA_{SA\ 0.4-0.8} = \frac{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{superficie}(T)dt}{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{suolo\ rigido}(T)dt}$$

$$FA_{SA\ 0.7-1.1} = \frac{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{superficie}(T)dt}{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{suolo\ rigido}(T)dt}$$

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	30 di 76



$$FA_{SA\ 0.5-1.5} = \frac{\int_{0.5}^{1.5} PSA_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.5} PSA_{suolo\ rigido}(T)dt}$$

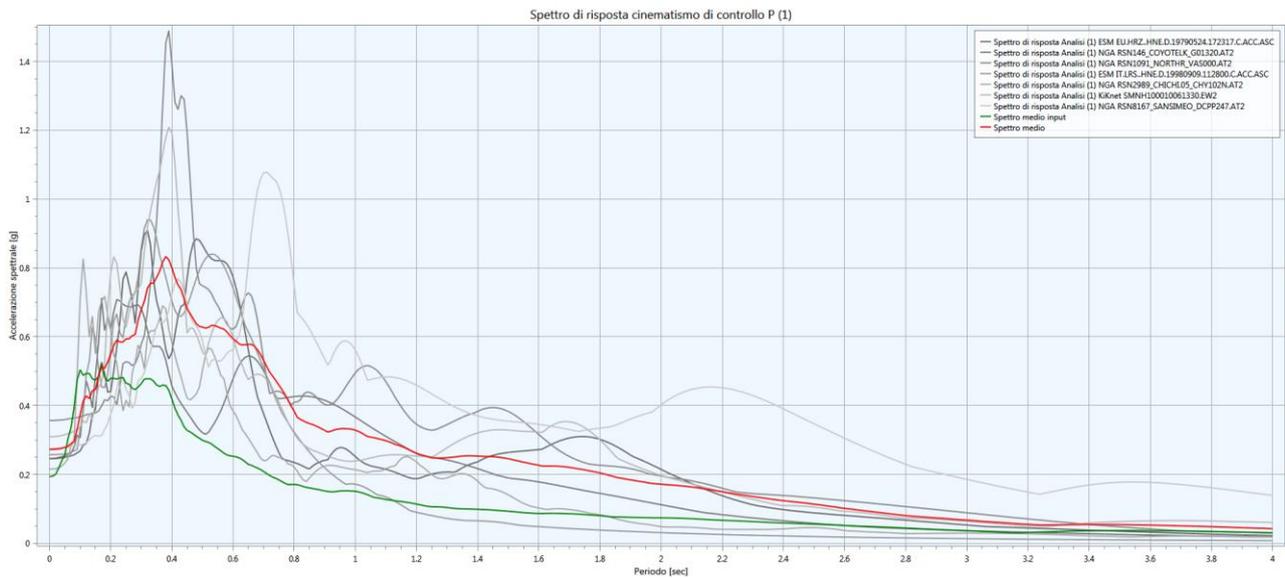


Fig. 16 - Esempio di spettro elastico in accelerazione (in grigio gli spettri dei singoli accelerogrammi, in verde lo spettro medio di input, in rosso lo spettro medio di output)

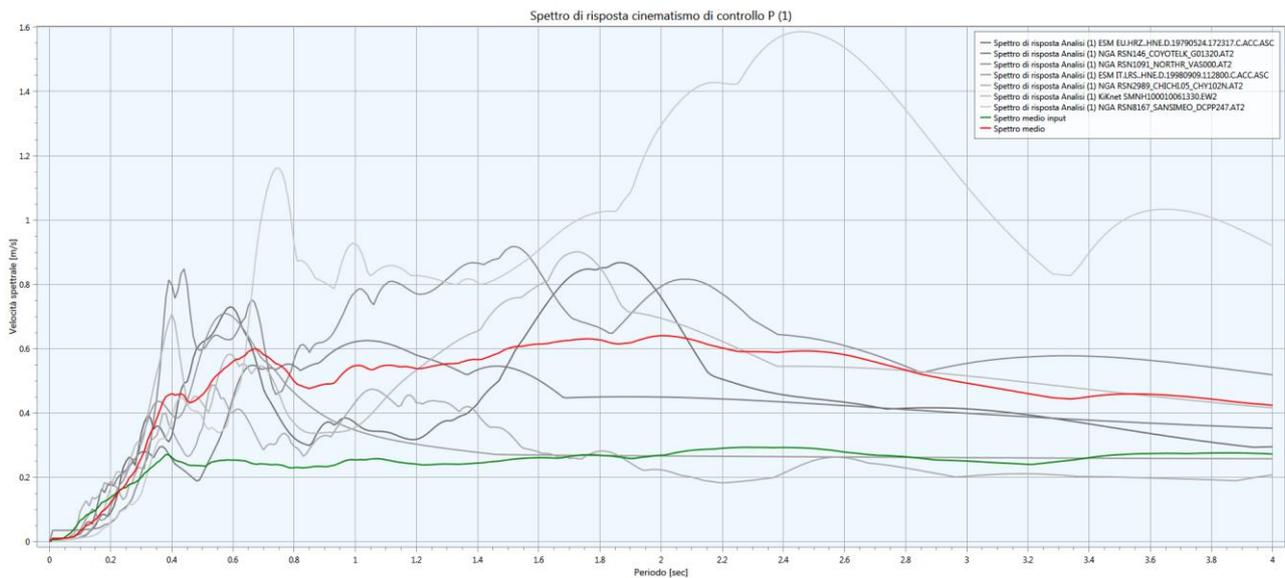


Fig. 17 - Spettro elastico in velocità (in grigio gli spettri dei singoli accelerogrammi, in verde lo spettro medio di input, in rosso lo spettro medio di output)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	31 di 76

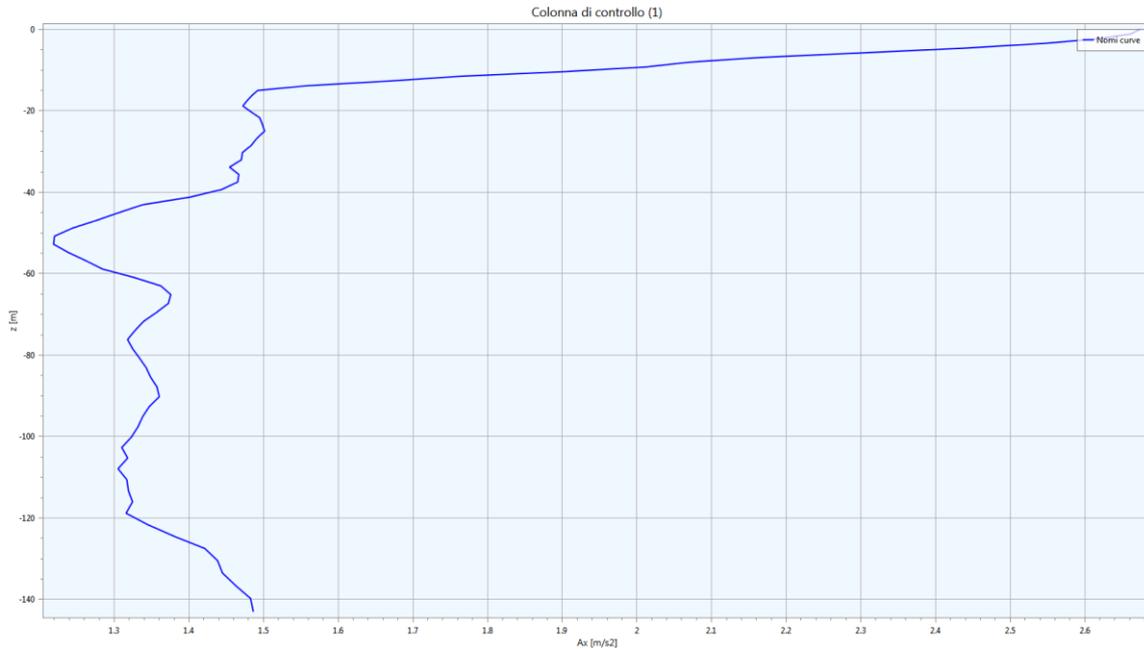


Fig. 18 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

I fattori di amplificazione in accelerazione e velocità sono ottenuti direttamente dal programma di calcolo confrontando lo spettro medio degli accelerogrammi in input con quello ottenuto dagli accelerogrammi in output. In Fig. 19 è riportato il grafico relativo, generato da LSR2D.

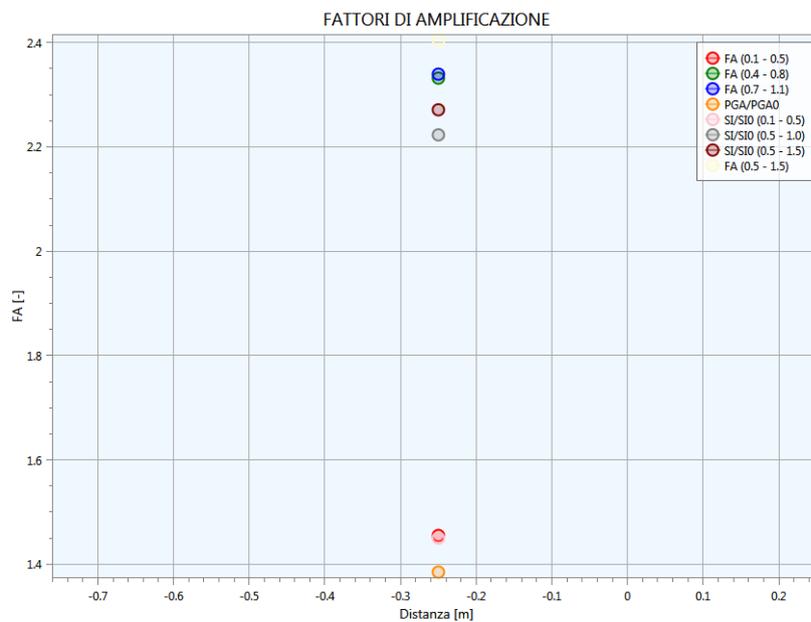


Fig. 19 - Grafico dei fattori di amplificazione



3.2.1 Spettro di risposta elastico normalizzato

Le verifiche progettuali delle strutture richiedono anche i parametri espressi secondo i parametri di normativa (a_g , F_0 , T_B , T_C , T_C^* , T_D , C_C , S , η); per questo motivo è necessario dapprima normalizzare lo spettro elastico ricavato dalla risposta sismica locale. Considerato che la procedura di normalizzazione dello spettro non è prevista dalle NTC 2018 si sono seguite le indicazioni fornite dalle Ordinanze P.C.M N° 24 del 12/5/2017 e n° 55 del 24/4/2018, modificate per la sola determinazione di T_D^9 con il metodo di *Newmark-Hall*¹⁰.

La normalizzazione dello spettro è avvenuta attraverso la seguente metodologia:

- Dallo spettro in pseudoaccelerazione calcolato con la RSL (SA) si determina il periodo proprio (TA) per il quale è massimo il valore dello stesso;
- Si calcola il valore medio dello spettro (SA_m) nell'intorno di TA tra 0.5 TA e 1.5 TA. Questo valore viene assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$SA_m = \int_{0.5TA}^{1.5TA} SA(T) dT$$

- Si determina lo spettro di pseudovelocità (SV) a partire da quello di accelerazione, moltiplicando le ordinate spettrali di quest'ultimo per l'inverso della corrispondente frequenza circolare $\omega = 2\pi/T$:

$$SV(T) = SA(T) * \frac{T}{2\pi}$$

e quindi si individua il periodo (TV) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità;

- Si calcola il valore medio dello spettro (SV_m) nell'intorno di TV tra 0.8 TV e 1.2 TV:

$$SV_m = \frac{1}{0.4 * TV} \int_{0.8TV}^{1.2TV} SV(T) dT$$

- Si determina il periodo in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_c = 2\pi * \frac{SV_m}{SA_m}$$

- Si determina lo spettro di pseudospostamento (SD) a partire da quello di velocità e quindi si individua il periodo (TD) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudospostamento;

- Si calcola il valore medio dello spettro (SD_m) nell'intorno di TD tra 0.8 TD e 1.2 TD:

$$SD_m = \frac{1}{0.4 * TD} \int_{0.8TD}^{1.2TD} SD(T) dT$$

⁹ La modifica del valore di T_D si è resa necessaria poiché la formula indicata dalle ordinanze porta ad una evidente sovrastima dello spettro nel tratto tra T_C e T_D .

¹⁰ Newmark NM, Hall WJ, Earthquake Spectra and Design, EERI Monograph Series, 1982.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	33 di 76



h) Si calcola il valore di T_D con la formula:

$$T_D = 2\pi * \frac{SD_m}{SV_m}$$

i) Si determina $T_B = 1/3 * T_C$

j) Si determina il valore di F_0 come rapporto SA_m/a_{max} , dove a_{max} è ricavato dalla seguente equazione:

$$a_{max} = \left(\frac{S_e(T = 0.01 s)}{SA_m} - \frac{0.01}{T_B} \right) * \left(\frac{SA_m}{1 - \frac{0.01}{T_B}} \right)$$

k) Si applicano le seguenti equazioni riportate in NTC 2018 (Cap. 3.2.3.2.1) per la determinazione dei tratti dello spettro tra $T_A=0$, T_B , T_C , T_D , fino a un T di interesse.

l)

- $0 \leq T \leq T_B$ $S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta * F_0} * \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$
- $T_B \leq T \leq T_C$ $S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0$
- $T_C \leq T \leq T_D$ $S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left(\frac{T_C}{T} \right)$
- $T_D \leq T$ $S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	34 di 76



3.3 Risultati della modellazione numerica

Di seguito vengono presentati in dettaglio i risultati delle analisi effettuate sulle n° 5 verticali studiate.

3.3.1 RSL per il sito "S. Maria - Castellina" (034036P141)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Limo argilloso	0.00	-24.00	24.00	17.00	240.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Ghiaie argillose	-24.00	-50.00	26.00	19.50	480.00	Rollins
Limo argilloso con ghiaia in subordine	-50.00	-99.00	49.00	20.00	600.00	Vucetic & Dobry, PI = 0
Bedrock	-99.00	-	-	21.00	800.00	-

Tab. 8 - Modello geofisico della verticale "S. Maria - Castellina"

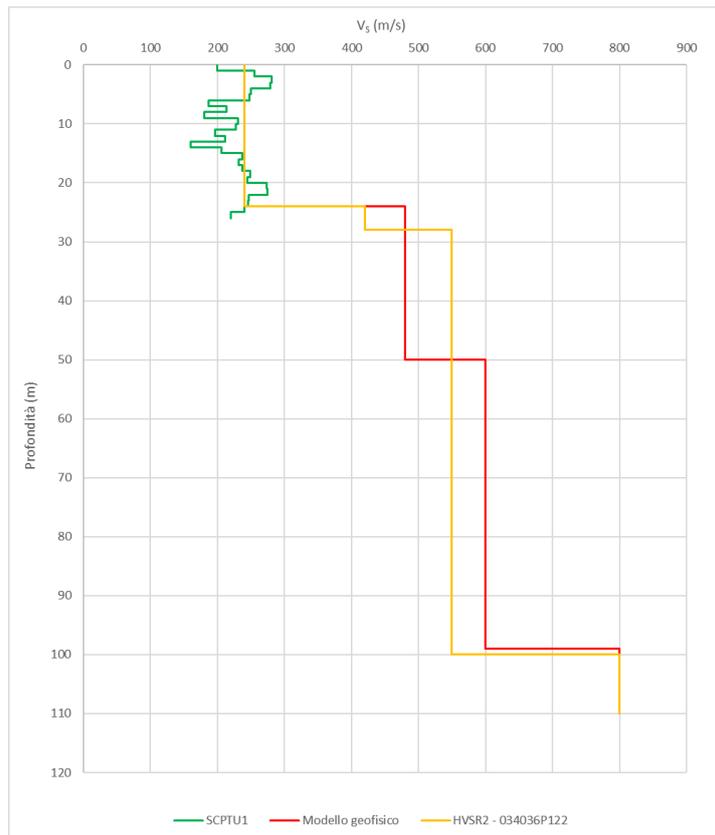


Fig. 20 - Discretizzazione della V_s lungo la verticale "S. Maria - Castellina"

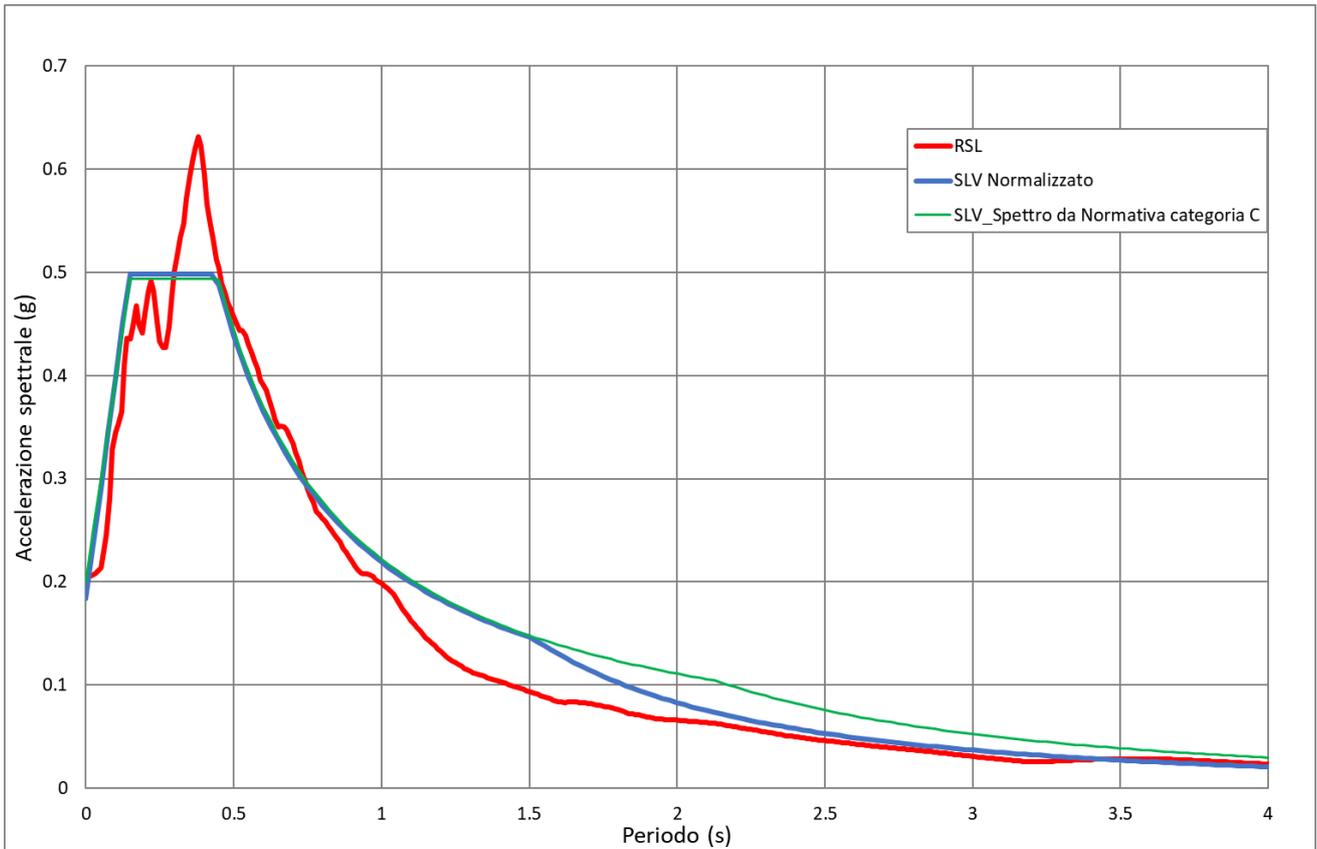


Fig. 21 - Spettro medio di risposta in accelerazione e spettro medio normalizzato per la verticale "S. Maria - Castellina", confrontati con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo C

$a_{max} (T=0)$	F_0	T_c^*	η	S	T_b	T_c	T_d
0.184	2.713	0.310	1.000	1.000	0.147	0.440	1.513

Tab. 9 - Parametri normalizzati per la verticale "S. Maria - Castellina"

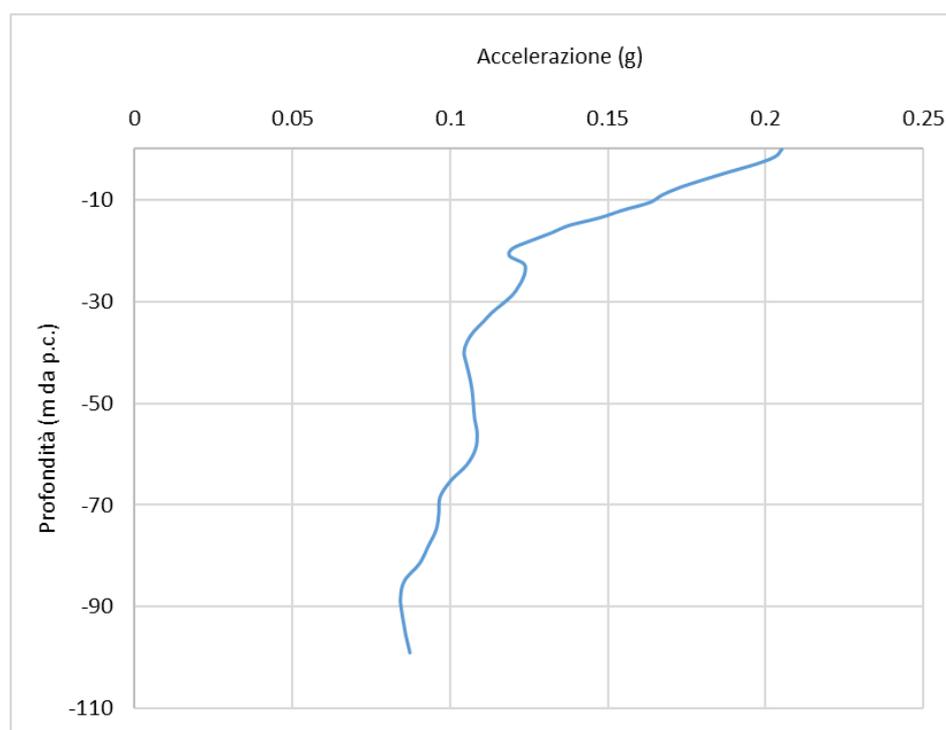


Fig. 22 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale “S. Maria - Castellina”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.63	1.8	-10.26%
FA (0.4-0.8 s)	2.26	2.4	-6.30%
FA (0.5-1.5 s)	2.03	2.7	-32.79%
FA (0.7-1.1 s)	2.11	2.8	-32.92%
PGA/PGA ₀	1.52	1.7	-12.17%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.67	1.9	-13.77%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	2.17	2.7	-24.45%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	2.00	2.9	-44.75%

Tab. 10 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale “S. Maria - Castellina”



3.3.2 RSL per il sito "Scuola Cesare Battisti-Soragna" (034036P142)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Limo argilloso	0.00	-15.00	15.00	17.00	190.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Sabbia	-15.00	-25.00	10.00	18.50	280.00	Sand Seed & Idriss
Argilla con livelli sabbiosi	-25.00	-63.00	38.00	19.50	340.00	Vucetic & Dobry, PI = 15
Argilla con livelli sabbiosi/ghiaiosi	-63.00	-143.00	80.00	21.00	520.00	Vucetic & Dobry, PI = 0
Bedrock	-143.00	-	-	22.00	1180.00	-

Tab. 11 - Modello geofisico della verticale "Scuola Cesare Battisti-Soragna"

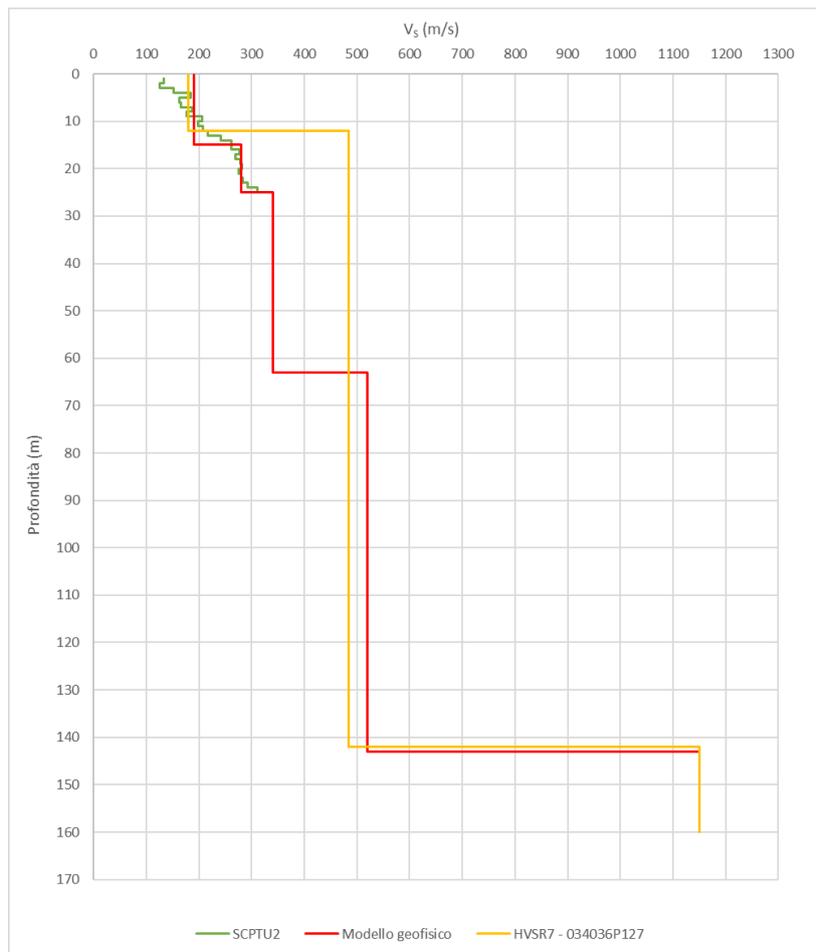


Fig. 23 - Discretizzazione della V_s lungo la verticale "Scuola Cesare Battisti-Soragna"

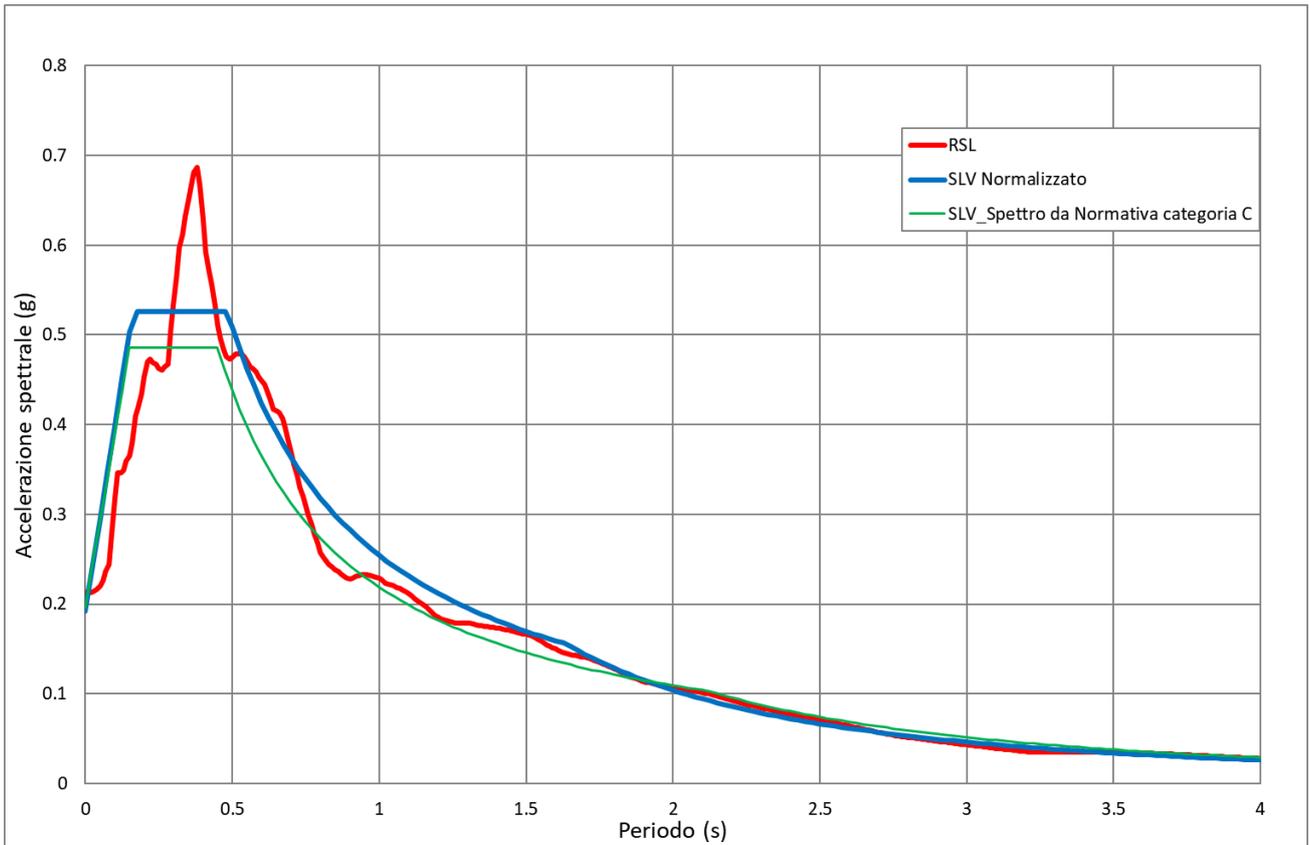


Fig. 24 - Spettro medio di risposta in accelerazione e spettro medio normalizzato per la verticale “Scuola Cesare Battisti-Soragna”, confrontati con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	η	S	Tb	Tc	Td
0.192	2.741	0.341	1.000	1.000	0.161	0.484	1.638

Tab. 12 - Parametri normalizzati per la verticale “Scuola Cesare Battisti-Soragna”

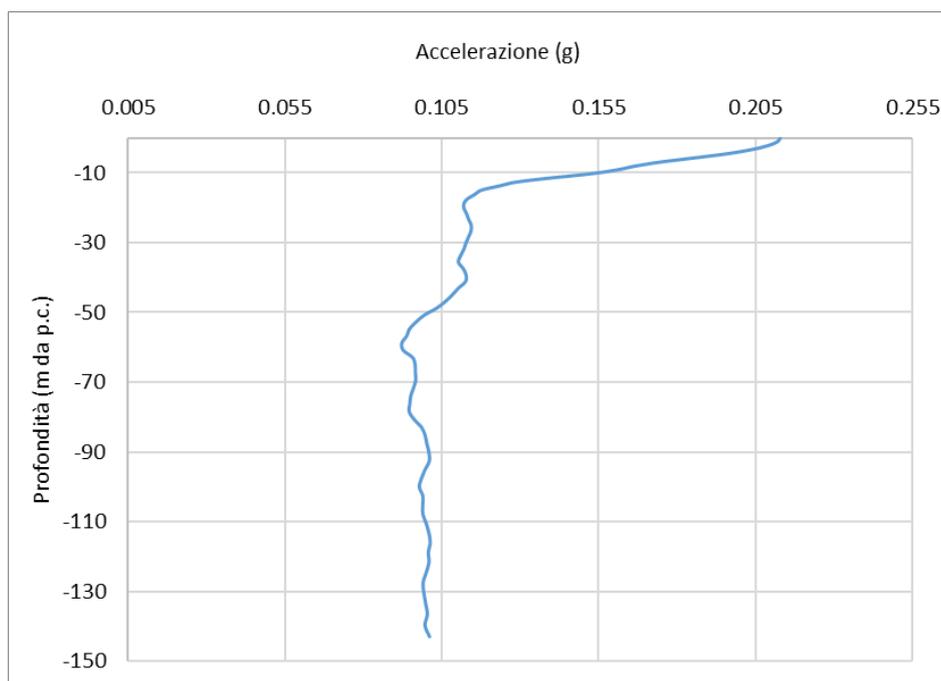


Fig. 25 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale “Scuola Cesare Battisti-Soragna”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.71	1.8	-5.46%
FA (0.4-0.8 s)	2.51	2.4	4.54%
FA (0.5-1.5 s)	2.52	2.7	-7.03%
FA (0.7-1.1 s)	2.41	2.8	-16.39%
PGA/PGA ₀	1.59	1.7	-7.06%
SI/Sl ₀ (0.1-0.5 s)	1.73	1.9	-10.00%
SI/Sl ₀ (0.5-1.0 s)	2.39	2.7	-12.89%
SI/Sl ₀ (0.5-1.5 s)	2.42	2.9	-20.07%

Tab. 13 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale “Scuola Cesare Battisti-Soragna”



3.3.3 RSL per il sito "Carzeto" (034036P143)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Limo argilloso	0.00	-11.00	11.00	17.00	170.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Sabbia	-11.00	-29.00	18.00	18.00	260.00	Sand Seed & Idriss
Argilla con livelli sabbiosi	-29.00	-73.00	44.00	19.00	435.00	Vucetic & Dobry, PI = 15
Argilla con livelli sabbiosi/ghiaiosi	-73.00	-145.00	72.00	20.00	215.00	Vucetic & Dobry, PI = 0
Bedrock	-145.00	-	-	22.00	1100.00	-

Tab. 14 - Modello geofisico della verticale "Carzeto"

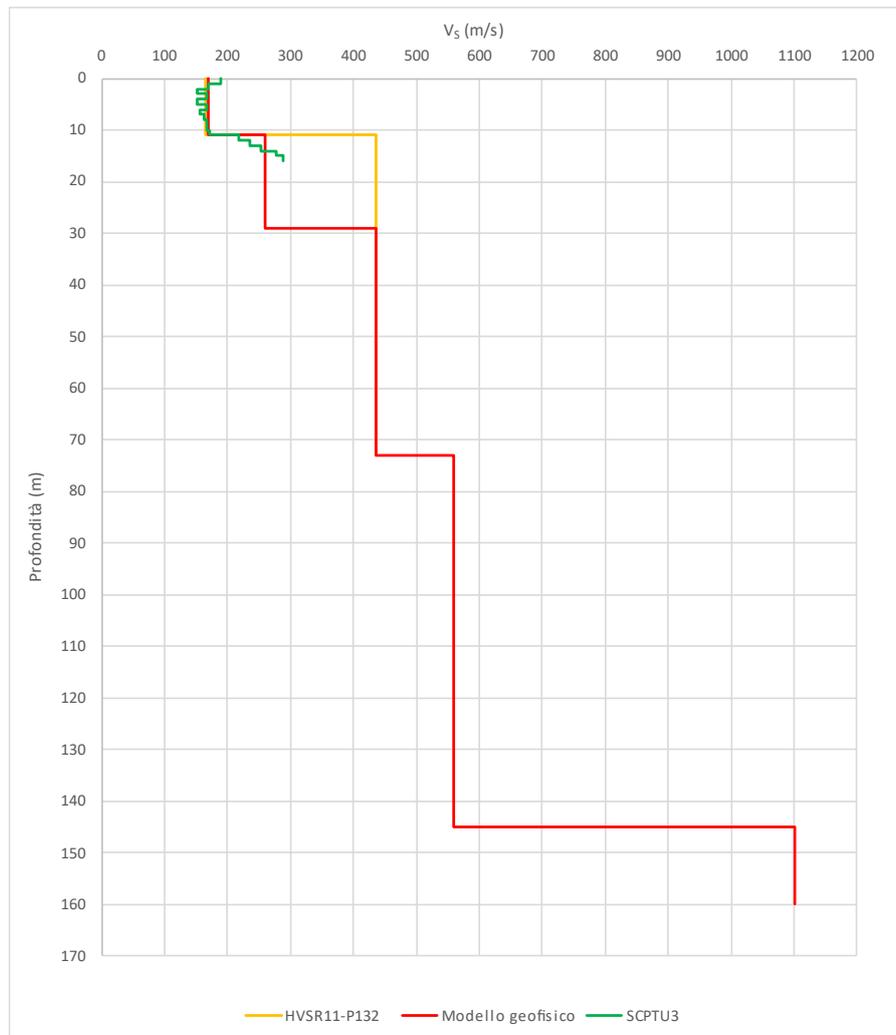


Fig. 26 - Discretizzazione della V_s lungo la verticale "Carzeto"

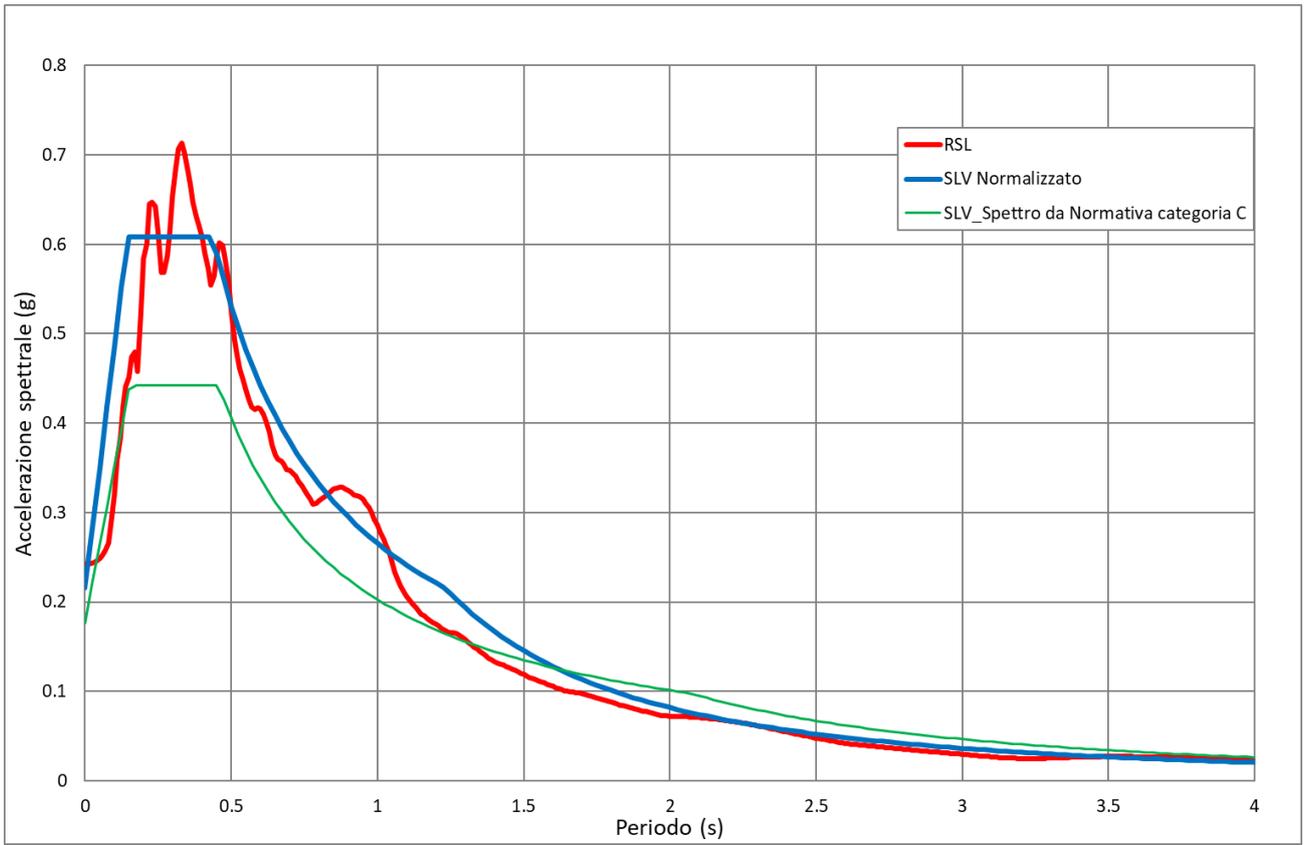


Fig. 27 - Spettro medio di risposta in accelerazione e spettro medio normalizzato per la verticale "Carzeto", confrontati con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td
0.215	2.825	0.307	1.000	1.000	0.145	0.436	1.234

Tab. 15 - Parametri normalizzati per la verticale "Carzeto"

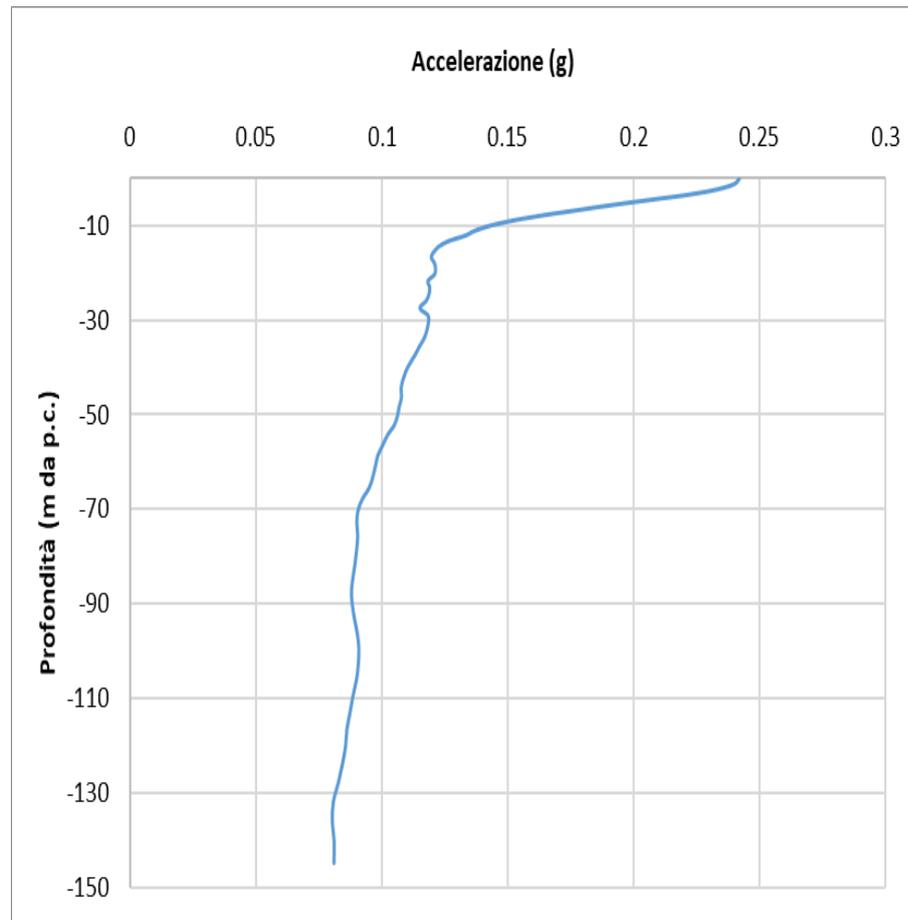


Fig. 28 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale “Carzeto”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	2.19	1.8	17.66%
FA (0.4-0.8 s)	2.86	2.7	5.71%
FA (0.5-1.5 s)	2.80	3.1	-10.72%
FA (0.7-1.1 s)	2.92	3.2	-9.52%
PGA/PGA ₀	2.05	1.7	16.97%
SI/Sl ₀ (0.1-0.5 s)	2.28	2	12.29%
SI/Sl ₀ (0.5-1.0 s)	2.85	3	-5.32%
SI/Sl ₀ (0.5-1.5 s)	2.72	3.3	-21.50%

Tab. 16 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale “Carzeto”



3.3.4 RSL per il sito "S. Caterina - Diolo" 034036P144

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Limo argilloso	0.00	-9.00	9.00	17.50	165.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Sabbia	-9.00	-30.00	21.00	18.00	255.00	Sand Seed & Idriss
Argilla con livelli sabbiosi	-30.00	-68.00	38.00	19.00	370.00	Vucetic & Dobry, PI = 15
Argilla con livelli sabbiosi/ghiaiosi	-68.00	-147.00	79.00	20.00	530.00	Vucetic & Dobry, PI = 0
Bedrock	-147.00	-	-	22.00	1050.00	-

Tab. 17 - Modello geofisico della verticale "S. Caterina - Diolo"

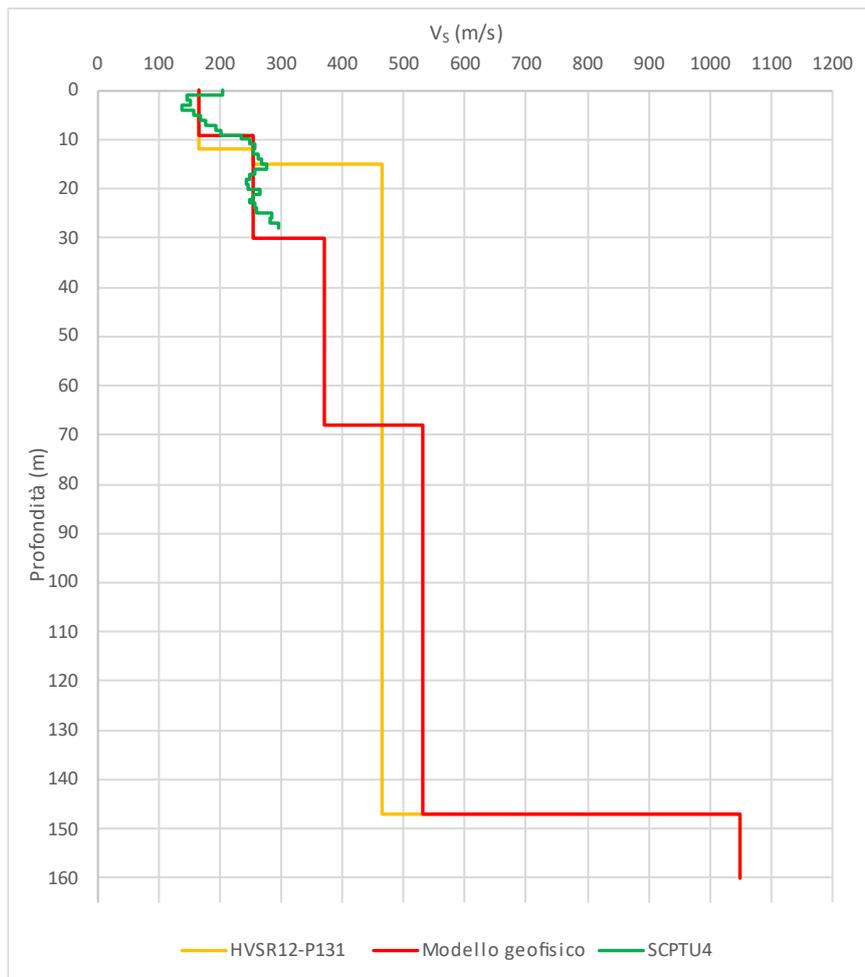


Fig. 29 - Discretizzazione della V_s lungo la verticale "S. Caterina - Diolo"

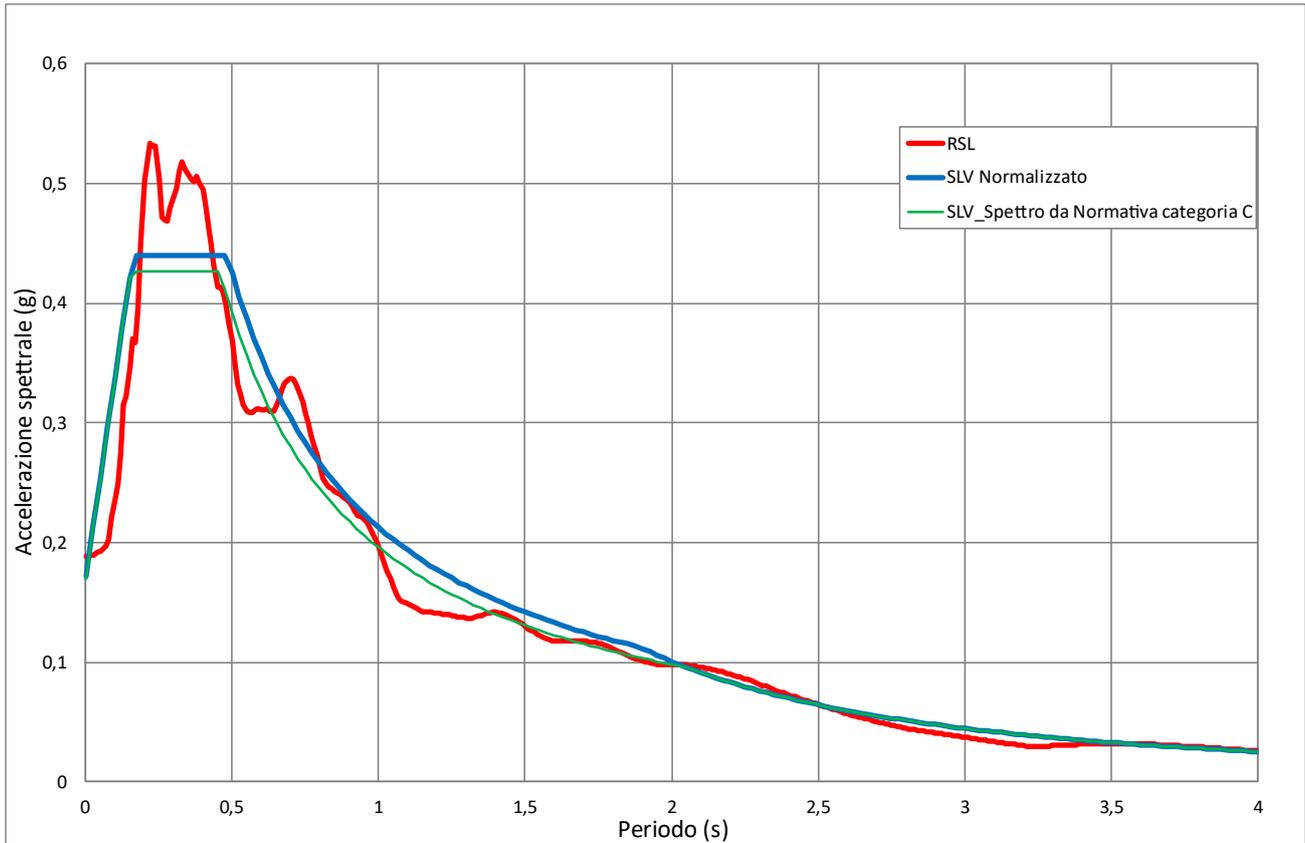


Fig. 30 – Spettro medio di risposta in accelerazione e spettro medio normalizzato per la verticale “S. Caterina - Diolo”, confrontati con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td
0.172	2.564	0.341	1.000	1.000	0.161	0.484	1.420

Tab. 18 – Parametri normalizzati per la verticale “S. Caterina - Diolo”

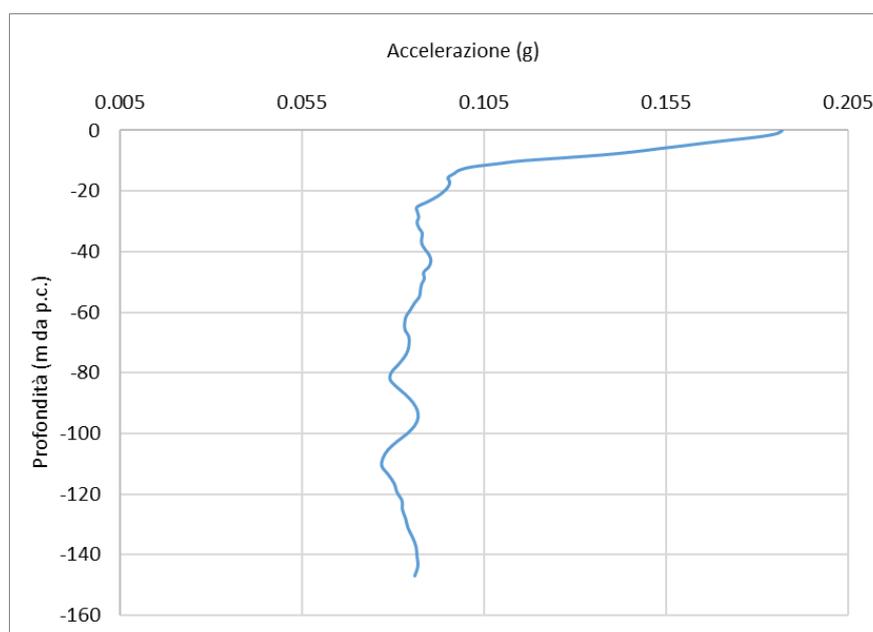


Fig. 31 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale “S. Caterina - Diolo”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.75	1.8	-2,86%
FA (0.4-0.8 s)	2.35	2.4	-2,13%
FA (0.5-1.5 s)	2.35	2.7	-14,89%
FA (0.7-1.1 s)	2.38	2.8	-17,65%
PGA/PGA ₀	1.65	1.7	-3,03%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.79	1.9	-6,15%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	2.26	2.7	-19,47%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	2.23	2.9	-30,04%

Tab. 19 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale “S. Caterina - Diolo”

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	46 di 76



3.3.5 RSL per il sito "S. Famiglia-Soragna" 034036P145

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Limo argilloso	0.00	-16.00	16.00	17.50	190.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Sabbia	-16.00	-22.00	6.00	19.00	290.00	Sand Seed & Idriss
Argilla con livelli sabbiosi	-22.00	-55.00	33.00	20.00	400.00	Vucetic & Dobry, PI = 15
Argilla con livelli sabbiosi/ghiaiosi	-55.00	-138.50	83.50	20.50	540.00	Vucetic & Dobry, PI = 0
Bedrock	-138.50	-	-	22.00	1070.00	-

Tab. 20 – Modello geofisico della verticale "S. Famiglia-Soragna"

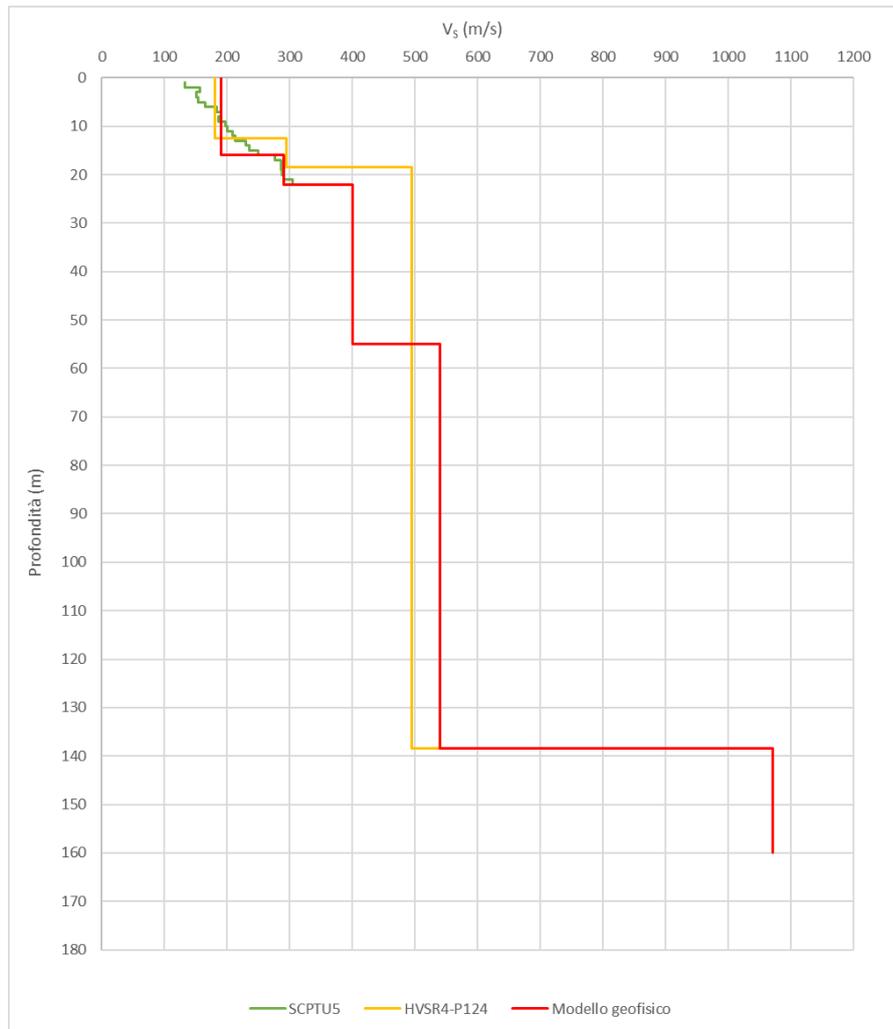


Fig. 32 – Discretizzazione della Vs lungo la verticale "S. Famiglia-Soragna"

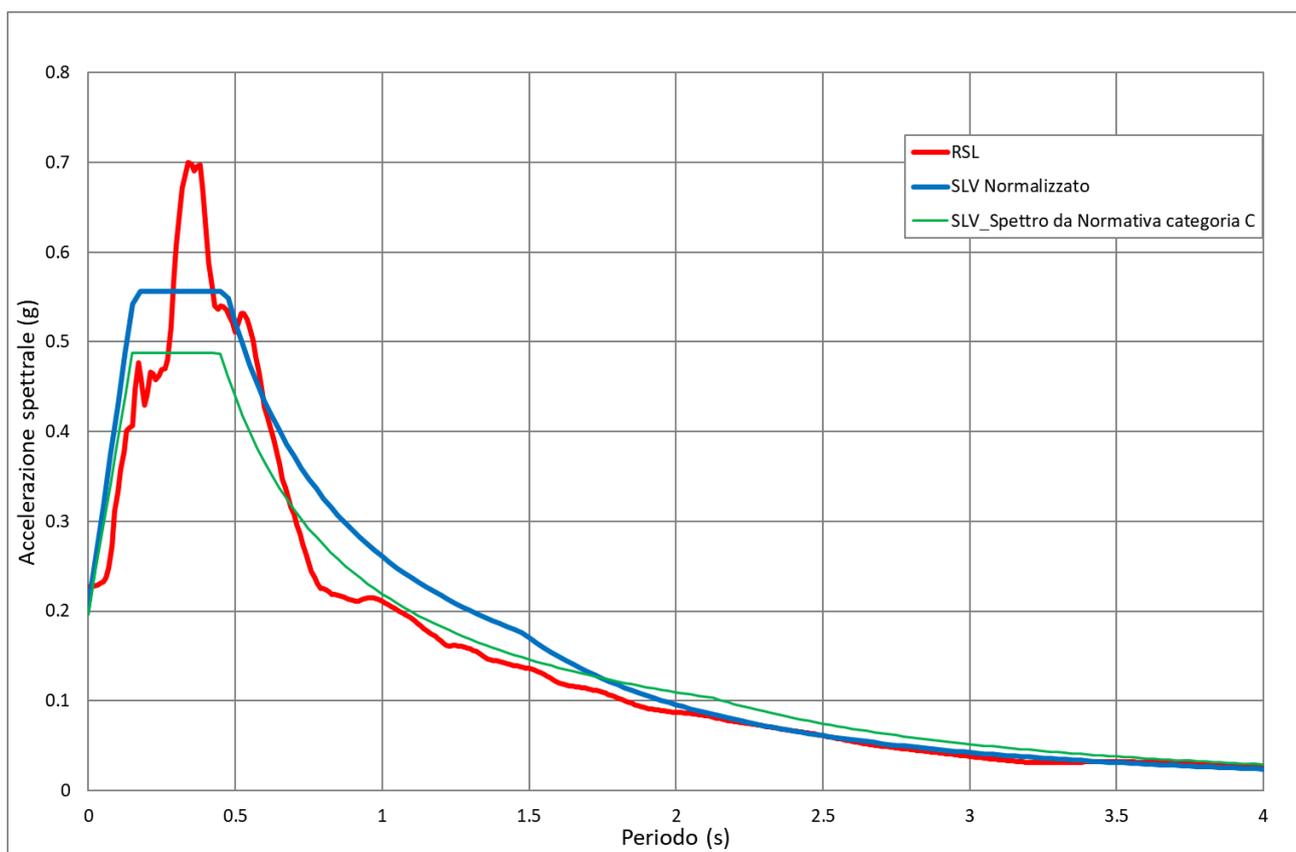


Fig. 33 - Spettro medio di risposta in accelerazione e spettro medio normalizzato per la verticale "S. Famiglia-Soragna", confrontati con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	η	S	Tb	Tc	Td
0.204	2.724	0.330	1.000	1.000	0.156	0.469	1.468

Tab. 21 - Parametri normalizzati per la verticale "S. Famiglia - Soragna"

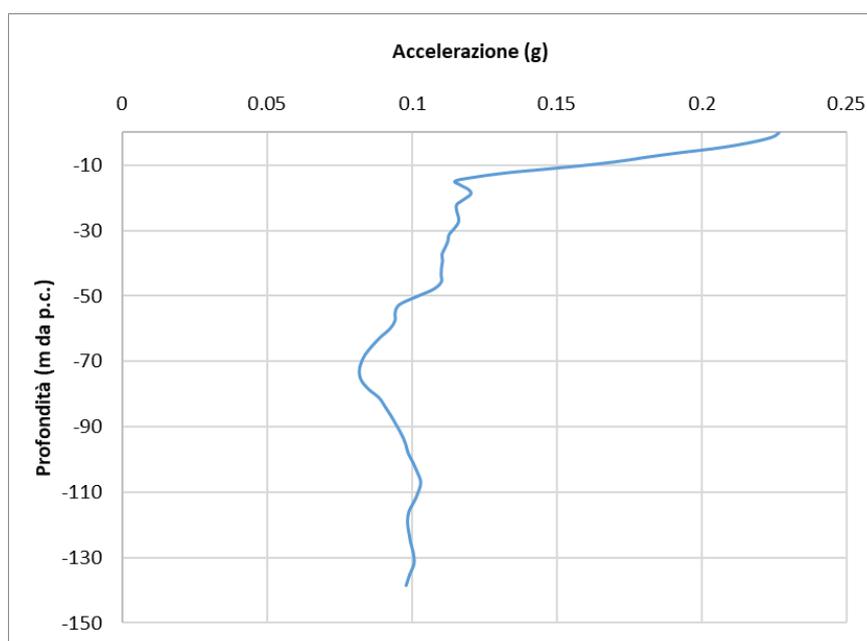


Fig. 34 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale "S. Famiglia-Soragna"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.79	1.8	-0.48%
FA (0.4-0.8 s)	2.43	2.4	1.06%
FA (0.5-1.5 s)	2.31	2.7	-16.90%
FA (0.7-1.1 s)	2.15	2.8	-29.94%
PGA/PGA ₀	1.69	1.7	-0.36%
SI/Sl ₀ (0.1-0.5 s)	1.86	1.9	-2.37%
SI/Sl ₀ (0.5-1.0 s)	2.27	2.7	-18.71%
SI/Sl ₀ (0.5-1.5 s)	2.25	2.9	-28.79%

Tab. 22 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale "S. Famiglia - Soragna"

3.4 Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello

Nella successiva tabella vengono presentati in sintesi i raffronti (in percentuale) tra i valori dei fattori di amplificazione calcolati con la RSL e quelli derivanti dall'applicazione dagli abachi RER.

Le differenze percentuali positive indicano valori più alti per i fattori da RSL rispetto a quelli degli abachi, mentre differenze negative il contrario. In sostanza le differenze percentuali negative indicano che gli abachi risultano più cautelativi della RSL.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	49 di 76



La tabella utilizza, inoltre, l'effetto semaforo per evidenziare la maggiore o minore coerenza tra i fattori di amplificazione da RSL e quelli degli abachi.

	SCPTU1	SCPTU2	SCPTU3	SCPTU4	SCPTU5
FA_{PGA}	-10,26%	-5,46%	17,66%	-2,86%	-0,48%
FA_{SA1 0.1-0.5}	-6,30%	4,54%	5,71%	-2,13%	1,06%
FA_{SA2 0.4-0.8}	-32,79%	-7,03%	-10,72%	-14,89%	-16,90%
FA_{SA3 0.7-1.1}	-32,92%	-16,39%	-9,52%	-17,65%	-29,94%
FA_{SA4 0.5-1.5}	-12,17%	-7,06%	16,97%	-3,03%	-0,36%
FH_{SI1 0.1-0.5}	-13,77%	-10,00%	12,29%	-6,15%	-2,37%
FH_{SI 0.5-1.0}	-24,45%	-12,89%	-5,32%	-19,47%	-18,71%
FH_{SI 0.5-1.5}	-44,75%	-20,07%	-21,50%	-30,04%	-28,79%

Tab. 23 - Raffronto tra i risultati delle analisi di secondo livello e terzo livello

L'analisi della Tab. 23 evidenzia che, in generale, gli abachi sovrastimano, di norma, non eccessivamente, lo scuotimento.

Differentemente, a Carzeto, con la RSL, in 4 casi (**FA_{PGA}**, **FA_{SA1 0.1-0.5}**, **FA_{SA4 0.5-1.5}**, **FH_{SI1 0.1-0.5}**) sono stati calcolati fattori di amplificazione maggiori di quelli desumibili con un'analisi di secondo livello, in analogia a quanto riscontrato per l'**FA_{SA1 0.1-0.5}** dei 2 siti del Capoluogo, "Scuola Cesare Battisti" e "S. Famiglia", dove però le differenze risultano veramente esigue.

Infine, va notato come gli abachi sono particolarmente cautelativi nel definire i valori di **FH_{SI 0.5-1.5}**.

Un ulteriore confronto può essere effettuato a livello di spettri di risposta in pseudoaccelerazione.

In Fig. 35 viene proposto il confronto tra gli spettri di risposta in pseudoaccelerazione da RSL e gli spettri semplificati per la categoria di sottosuolo C da NTC 2018 (relativi ai nodi 14715 e 14716), per un tempo di ritorno T_R uguale a 475 anni (corrispondente a una probabilità di superamento del 10% in 50 anni).

In questo caso, sono evidenti i picchi tra 0.2 e 0.4 s circa, con valori di accelerazione spettrale molto più elevati di quelli dello spettro semplificato, mentre all'esterno di tale intervallo di periodo, in generale, le curve non presentano significative differenze.

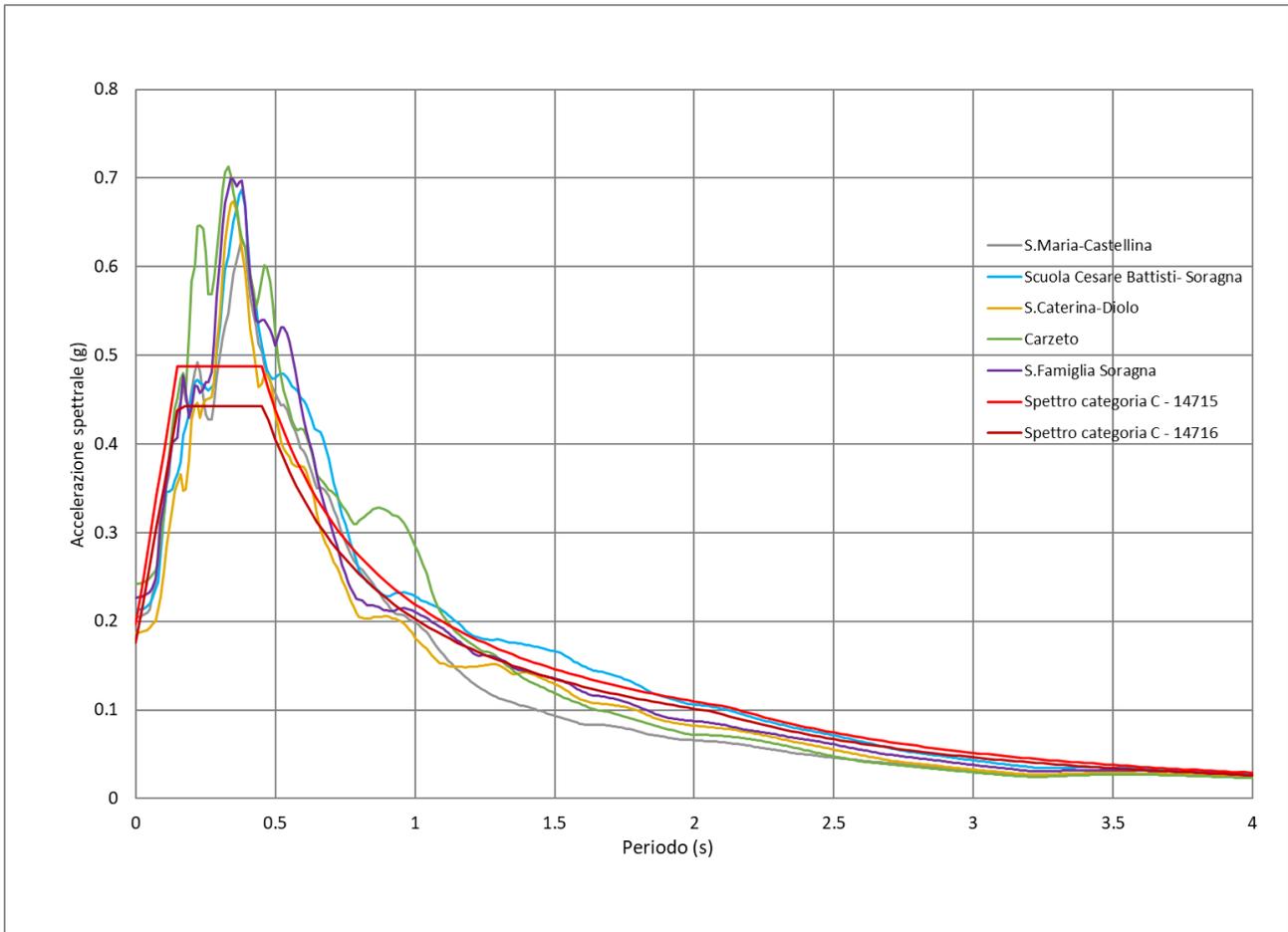


Fig. 35 - Confronto tra gli spettri di risposta in pseudoaccelerazione da RSL e lo spettro semplificato per la categoria di sottosuolo C da NTC 2018

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	51 di 76



3.5 Verifica del rischio di liquefazione

Il rischio di liquefazione è stato valutato prendendo in considerazione n° 12 verticali tra quelle indagate nel presente studio mediante prove CPTU e SCPTU.

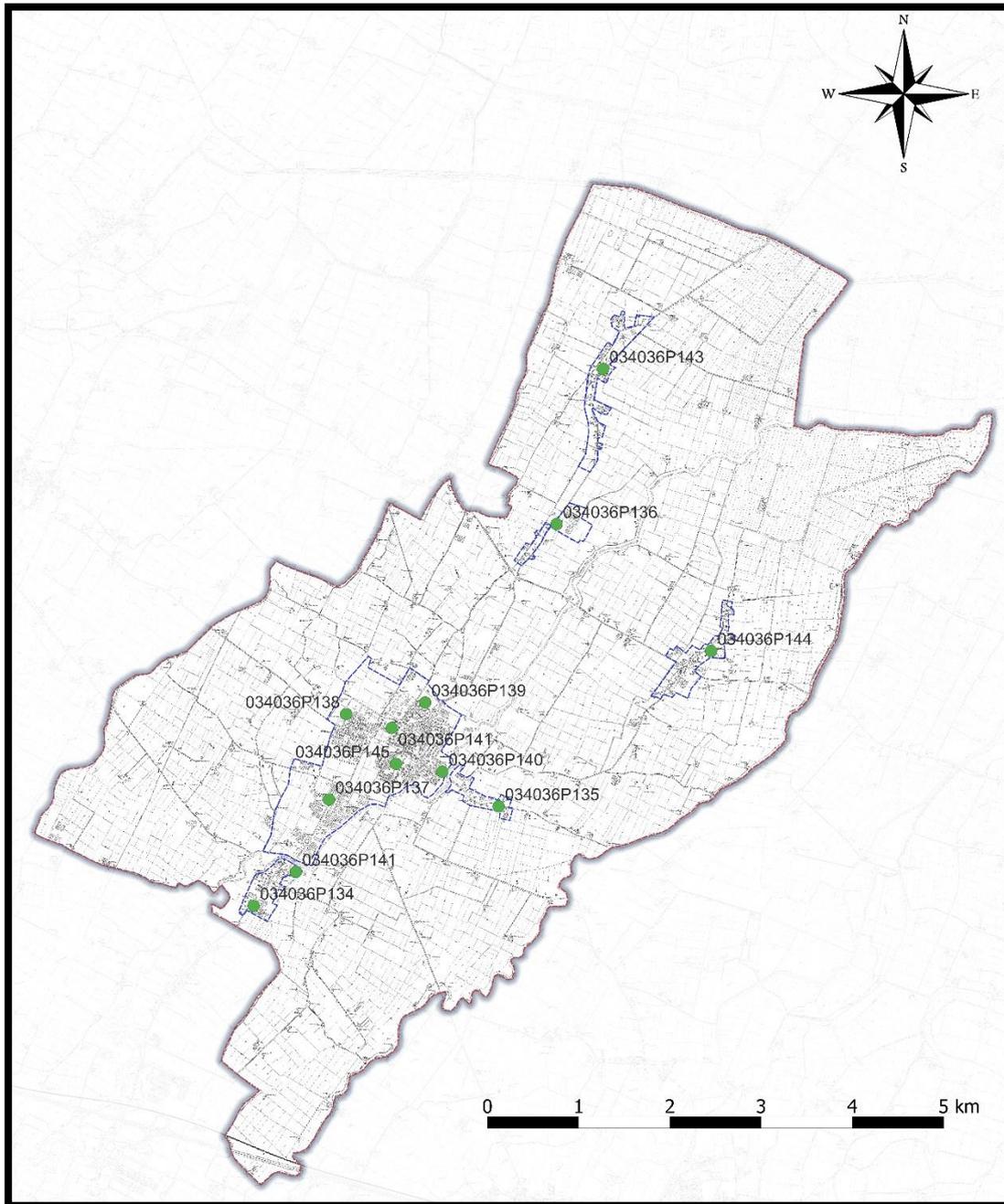


Fig. 36 – Stralcio ubicazione indagini utilizzate per verifica a liquefazione

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	52 di 76



Per liquefazione s'intende un processo d'incremento della pressione del fluido interstiziale che causa, in un terreno non coesivo saturo (sabbia, limo non plastico), la diminuzione della resistenza a taglio a seguito dello scuotimento sismico, dando luogo a deformazioni permanenti significative.

La liquefazione consiste quindi in una diminuzione della resistenza del terreno, a seguito del raggiungimento della condizione di fluidità. La perdita totale della resistenza viene raggiunta quando la pressione dell'acqua che riempie gli interstizi arriva a uguagliare la pressione di confinamento, rendendo nulle le tensioni efficaci trasmesse attraverso le particelle solide. Una volta che il terremoto ha innescato il processo di liquefazione, la massa del suolo resta in movimento fino a che non raggiunge una nuova condizione di stabilità.

Il rischio di liquefazione può essere stimato con metodi semplificati da prove CPTU mediante il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione LPI di *Iwasaki et al.* (1982). Le prove CPTU sono preferibili alle semplici CPT per la migliore ripetibilità delle misure e per la continuità dei profili penetrometrici. L'indice LPI¹¹ è un parametro di sintesi che, mediante un valore numerico compreso tra 0 e 100, quantifica i possibili effetti della liquefazione in superficie, tenendo conto di severità dell'azione sismica, e di profondità, spessore e valore del fattore di sicurezza degli strati liquefacibili.

Per poter valutare la severità degli effetti *Iwasaki* ha proposto la scala riportata in Tab.

24

Valori di I_L	Rischio di liquefazione
$I_L = 0$	Molto basso
$0 < I_L \leq 5$	Basso
$5 < I_L \leq 15$	Alto
$15 < I_L$	Molto alto

Tab. 24- Valutazione del rischio di liquefazione secondo *Iwasaki*

Valutazioni più recenti riportate da *Sonmez* (2003), basate su sismi di magnitudo inferiore a quelli utilizzati da *Iwasaki* consigliano tuttavia di rimodulare le classi di pericolosità come riportato in Tab. 25.

¹¹ LPI = Liquefaction Potential Index è tradotto con IL = Indice di Liquefazione nella cartografia di MS



LPI = 0.00 - Liquefaction risk null
LPI between 0.00 and 2.00 - Liquefaction risk low
LPI between 2.00 and 5.00 - Liquefaction risk moderate
LPI between 5.00 and 15.00 - Liquefaction risk high
LPI > 15.00 - Liquefaction risk very high

Tab. 25 - Valutazione del rischio di liquefazione secondo *Sonmez*

L'indice LPI è calcolato con riferimento ad una verticale di prova. Gli effetti bi- e tri-dimensionali sono trascurati. Tale semplificazione può condurre talora a stime errate. In particolare, se la liquefazione in un sito è limitata a lenti isolate, la liquefazione in superficie può non manifestarsi anche per valori significativi di LPI. Viceversa, uno strato liquefatto sottile, profondo, molto diffuso ed esteso può determinare rottura del terreno e "*lateral spreading*" anche per bassi valori di LPI. La variabilità ed eterogeneità naturale delle condizioni stratigrafiche e geotecniche può spiegare la non sempre buona correlazione tra i valori dell'indice LPI e le evidenze di liquefazione.

L'indice LPI è definito nel modo seguente:

$$LPI = \int_0^{20} F W(LPIz) dz$$

dove:

- F(z) è una variabile con valori compresi tra 0 e 1, definita ad ogni profondità $0 \leq z \leq 20_{\text{m}}$ in funzione del valore che, a quella profondità, assume il fattore di sicurezza alla liquefazione FSL
- w(z) è un fattore di peso della profondità.

In sostanza il rischio di liquefazione tiene conto del fattore di sicurezza calcolato strato per strato, ma ne valuta la significatività su tutto lo spessore del deposito.

Il fattore di sicurezza alla liquefazione è definito nel modo seguente:

$$FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot k_{\sigma}$$

dove:

$CRR_{7.5}$ = Rapporto di resistenza ciclica per M=7.5 (*Cyclic Resistance Ratio*)

MSF = fattore di scala della magnitudo (*Magnitude Scale Factor*)

K_{σ} = Fattore di correzione per la pressione di confinamento

CSR = rapporto di tensione ciclica (*Cyclic Stress Ratio*)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	54 di 76



Nelle verifiche effettuate nel presente studio, per il calcolo del CRR è stato utilizzato il metodo NCEER (modificato da *Robertson* 2009) implementato dal programma CLIQ della *GeoLogismiki*. In Fig. 37 viene presentata, in forma di *flow-chart*, la procedura di calcolo di CRR utilizzata dal programma per la verifica con il metodo NCEER.

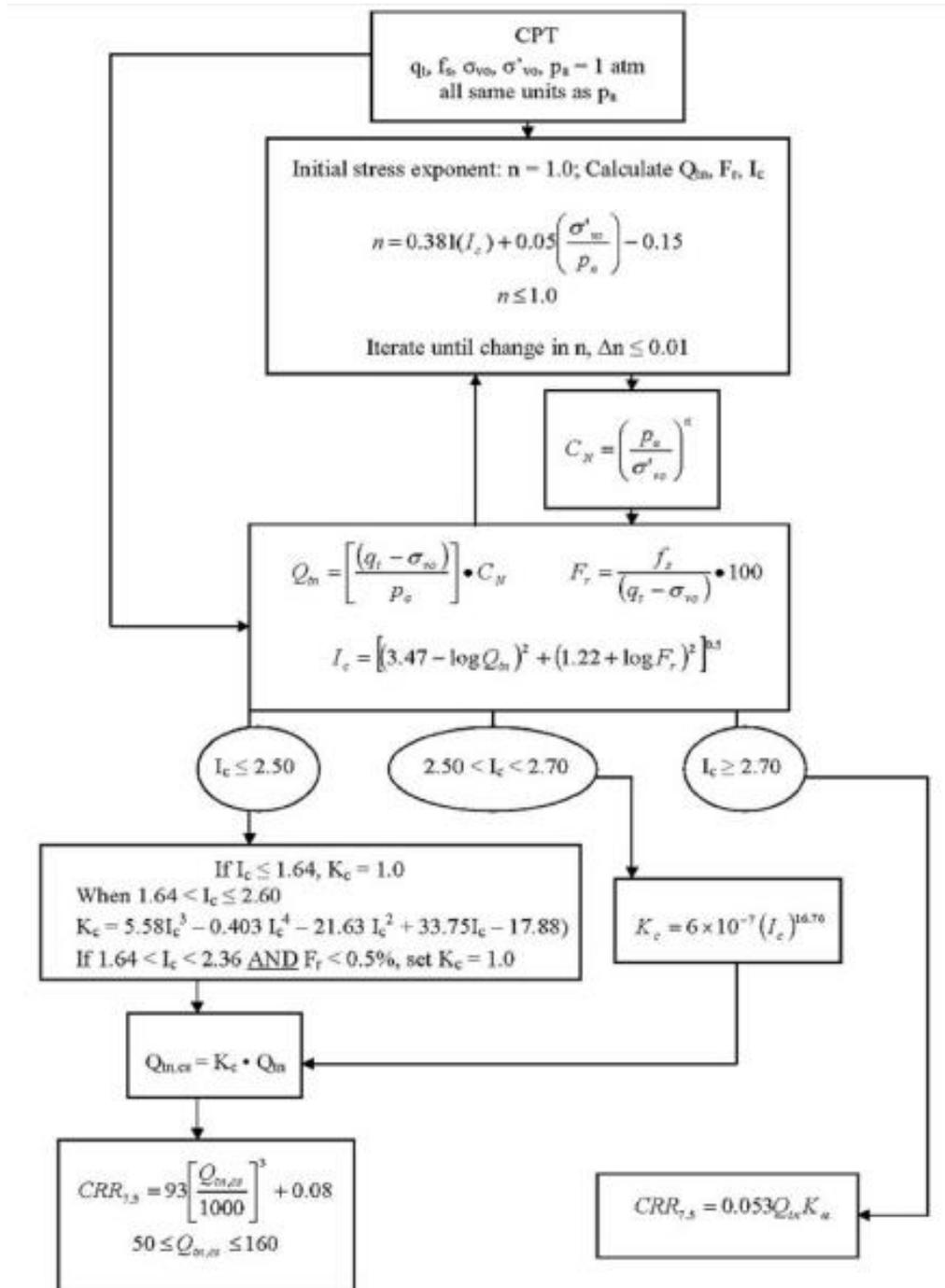


Fig. 37 - Flow chart della procedura di verifica NCEER modificata da *Robertson* (2009)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	55 di 76



Esaminando la zonazione Sismogenetica ZS9 dell'IMCS, il valore massimo della zona di riferimento in cui è incluso il Comune di Soragna (Zona 913, cfr. Fig. 38) è pari a $M_w=5.9$. Si tratta di eventi sismici originati da movimenti prevalentemente compressivi, a NW, e distensivi, a SE, con meccanismi trascorrenti nelle zone di svincolo, che dissecano la continuità longitudinale delle strutture.

Il maggior numero di terremoti che si verificano nella zona 913 presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 12 e 20 km, con profondità efficace di 13 km.

Sulla base dei meccanismi focali, sono previsti valori "cautelativi" di massima magnitudo (M_{wmax2}) pari a $= 6.14$. È questo, pertanto, il valore utilizzato, prudenzialmente, per le verifiche a liquefazione.

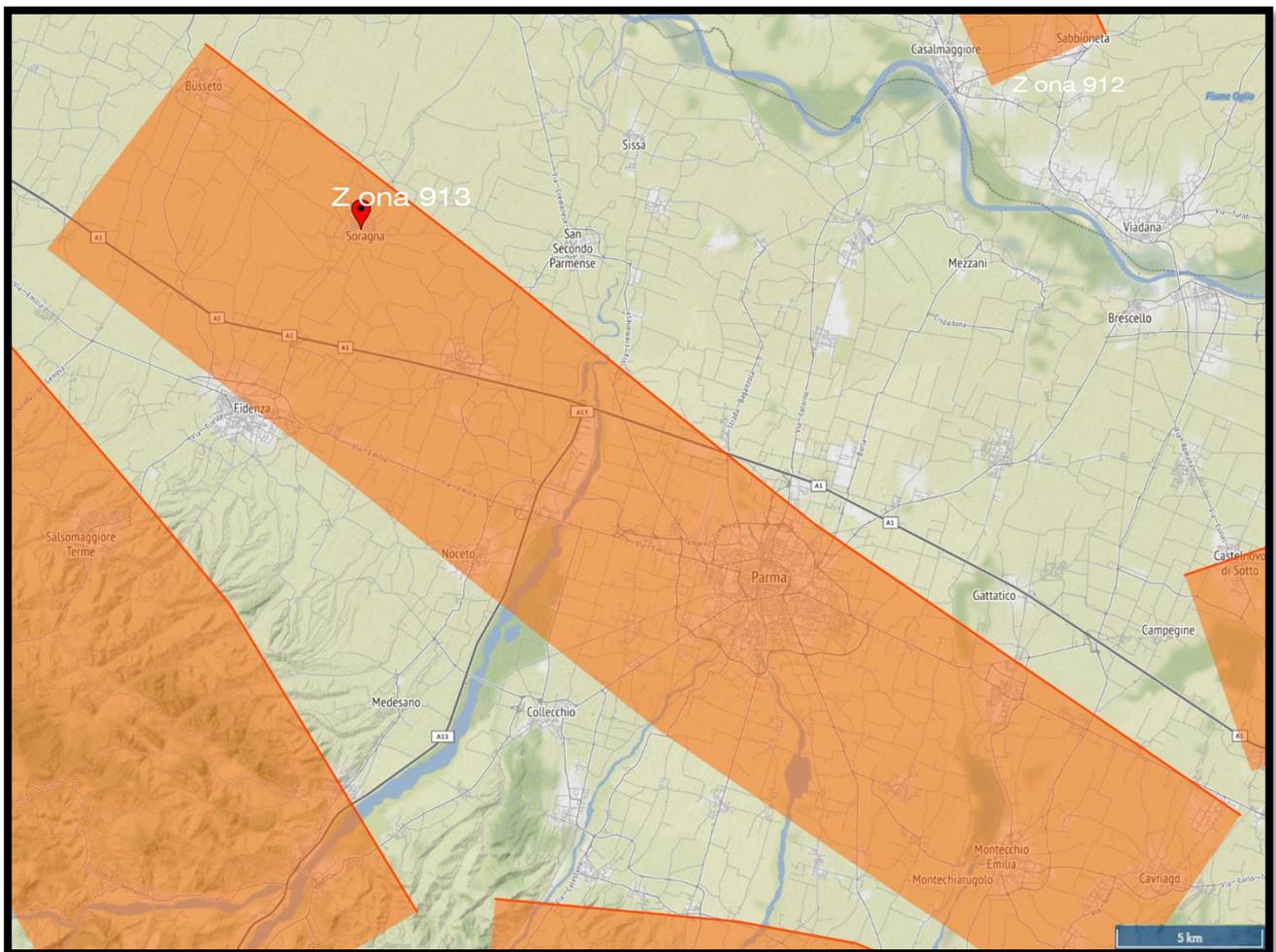


Fig. 38 - Classificazione ZS9- zona 913.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	56 di 76



Altro parametro indispensabile è la massima accelerazione attesa al sito, ricavata in questo caso dall'analisi di RSL e variabile da 0.16 a 0.21 ag.

Nelle verifiche, a titolo cautelativo, è stato impostato il livello di falda con terremoto in atto a 2 m da p.c.

3.5.1 Analisi dei risultati

Per ciascuna prova è stato prodotto un report che contiene sia i grafici interpretativi della prova stessa (resistenze penetrometriche, litologia, ecc.), sia i grafici relativi alla liquefazione ed in particolare (cfr. Fig. 39):

- Il confronto tra CSR e CRR
- La variazione del fattore di sicurezza con la profondità
- La cumulata del valore di LPI con la profondità
- La cumulata del valore dei cedimenti con la profondità

Nel complesso, il rischio di liquefazione risulta praticamente nullo in relazione alle caratteristiche deposizionali dei diversi siti.

In Tab. 26 vengono rappresentati i valori di LPI calcolati mediante il metodo di Robertson; tutte le indagini vengono definite a rischio di liquefazione molto basso poiché presentano un fattore inferiore all'unità.

Tipologia di prova	Codice prova	LPI
CPTu	034036P134	0
CPTu	034036P135	0.464
CPTu	034036P136	0.174
CPTu	034036P137	0.032
CPTu	034036P138	0.09
CPTu	034036P139	0.185
CPTu	034036P140	0
SCPTu	034036P141	0
SCPTu	034036P142	0
SCPTu	034036P143	0
SCPTu	034036P144	0.303
SCPTu	034036P145	0.01

Tab. 26 - Valori di LPI calcolati

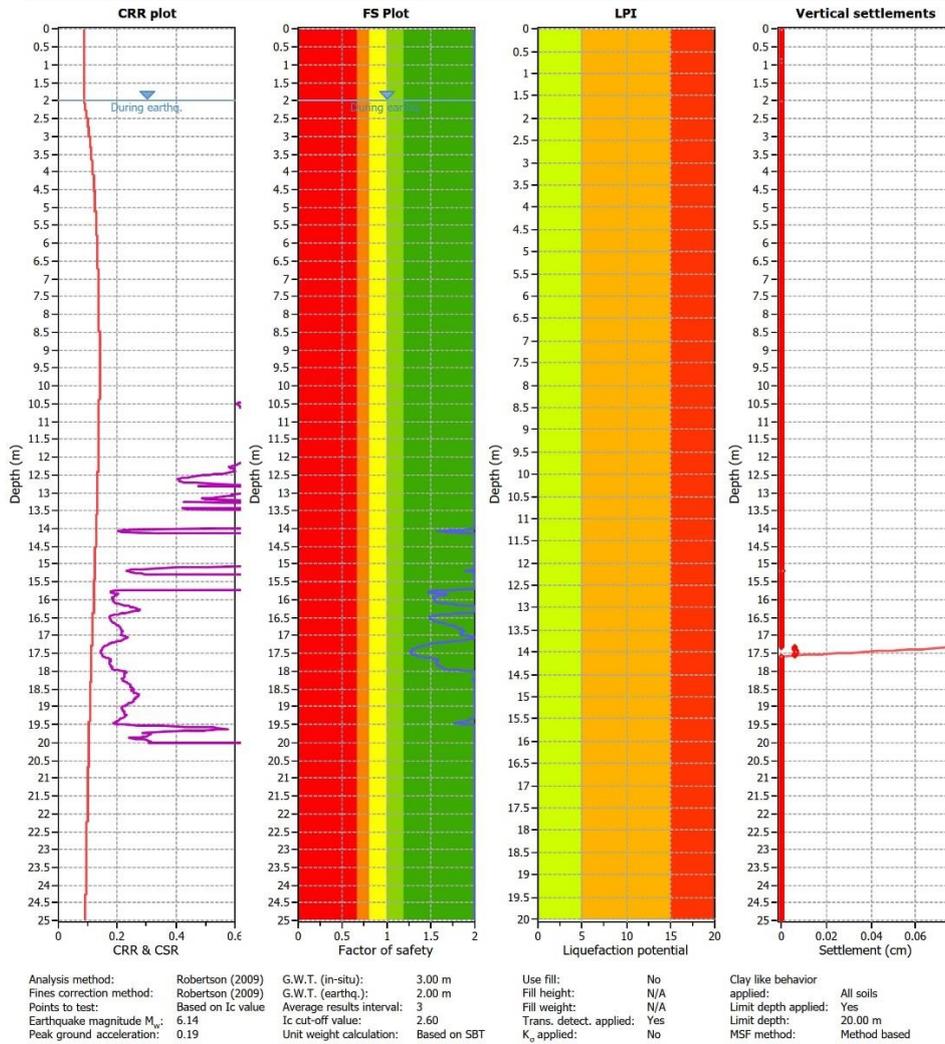


EN GEO S.r.l.
ENGINEERING GEOLOGY

Engeo
Via Anna Maria Adorni 2- 43121 Parma
info@engeo.it
www.engeo.it

Project: Microzonazione sismica III livello
Location: Soragna (PR)

CPT: 034036P142
Total depth: 24.96 m



CLiq v.3.5.2.5 - CPTU data presentation & interpretation software - Report created on: 16/12/2022, 10:21:18
Project file: L:\SRGN.01.2249 - MS3 Soragna\Accessori\LORENZO\Liquefazione\Clq Soragna.clq

F.S. color scheme

- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

Fig. 39 - Grafici di CSR-CRR, dei fattori di sicurezza FS e dell'indice di liquefazione (LPI), valutati per la prova 034036P142 "Scuola Cesare Battisti"

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	58 di 76



Le verifiche effettuate consentono di affermare che il rischio di liquefazione risulta nullo in 5 verticali e basso nelle altre 7 delle 12 indagate.

Ciò non esclude tuttavia la possibilità che su verticali diverse si possano ottenere fattori di rischio più elevati. Permane, pertanto, l'obbligo di verifica a liquefazione in fase di progettazione, come previsto dalle NTC.

4. CRITICITÀ DEL METODO

Lo studio di 3° livello è stato basato su un numero considerevole di indagini e prove che hanno consentito una buona definizione delle problematiche sul territorio.

È importante, tuttavia, precisare che i risultati in termini di amplificazione sismica riportati nei paragrafi precedenti sono riferiti ai soli modelli esposti nel par. 3.3, cioè a modelli che tengono conto della sola sismostratigrafia riscontrata nei n° 5 punti in cui si disponeva di un modello geofisico sufficientemente approfondito.

Considerata la variabilità litologica della zona, gli studi effettuati non possono essere considerati esaustivi di tutti i potenziali assetti litostratimetrici e geofisici del territorio comunale.

I risultati in termini di liquefazione, discussi nel par. 3.5.1, tengono anch'essi conto della stratigrafia riscontrata nel corso delle indagini e mettono in luce come il territorio del Comune di Soragna sia caratterizzato da un rischio praticamente nullo.

In questo caso, dunque, l'omogeneità dei risultati fa ritenere che siano state indagate la maggior parte delle situazioni potenzialmente critiche in termini di liquefazione.

Come già detto, tuttavia, ciò non esclude la possibilità che su verticali diverse si possano ottenere fattori di rischio più elevati. Permane, pertanto, l'obbligo di verifica a liquefazione in fase di progettazione, come previsto dalle NTC.

La problematica principale relativa ai metodi di analisi della risposta sismica locale utilizzati, a parte il problema ben noto dell'adozione del modello 1D, è la definizione del *bedrock* sismico.

4.1 Considerazioni sul *bedrock* sismico

La definizione del *bedrock* sismico, cioè del sismostrato che presenta velocità delle onde di taglio $V_s \geq 800$ m/s, costituisce un elemento di notevole importanza nell'ambito delle valutazioni di risposta sismica locale.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	59 di 76



In letteratura (Martelli et alii¹², 2013 e Martelli et alii¹³, 2014) è indicato che “*il maggiore contrasto di impedenza si ha in genere tra la base del sistema emiliano-romagnolo superiore (AES), datata tra 350.000 e 450.000 anni, e la base del subsistema AES6, datata circa 230.000-250.000 anni (RER e ENI-Agip, 1998)*”.

In realtà oggi si tende ad individuare il *bedrock* sismico, soprattutto in pianura, in corrispondenza di un elevato contrasto di impedenza sismica, cioè laddove il rapporto tra le velocità dello strato superficiale e quello più profondo supera il valore di 2÷2.5.

In ogni caso, è bene evidenziare che il *bedrock* sismico, inteso come lo strato entro (e sotto) il quale la velocità delle onde sismiche permane superiore agli 800 m/s, risulta pressoché non individuabile nella zona studiata con i metodi diretti e, comunque, difficilmente raggiungibile anche con metodi indiretti, vista la sua elevata profondità.

Nel caso del territorio comunale di Soragna, per l'individuazione del *bedrock* sismico si è fatto affidamento ai risultati delle prove HVSR eseguite appositamente per questo studio, adeguatamente correlate con le conoscenze geologiche e stratigrafiche disponibili.

In particolare, delle cinque misure ubicate in corrispondenza delle verticali ove è stata effettuata l'analisi di RSL, quattro evidenziano un importante contrasto d'impedenza ad una profondità compresa tra i 100 e 150 metri. Il salto di velocità, nel caso della verticale “S. Maria- Castellina”, si attesta a circa 100 m ed è attribuito al passaggio tra sistema emiliano romagnolo superiore e inferiore, dove è stata riscontrata una velocità delle onde di taglio di 800 m/s. Per le restanti verticali (Scuola Cesare Battisti, S. Famiglia, S. Caterina), situate invece nei tratti centrale e settentrionale del territorio comunale, il contrasto d'impedenza viene rilevato tra i 135 e 150 m di profondità ed è associato con una superficie più recente posta nella porzione più profonda dell'AES. La velocità delle onde di taglio, in questo caso, risulta compresa tra 1000 e 1200 m/s.

In merito alla verticale di Carzeto, il contrasto d'impedenza viene rilevato ad una quota inferiore, circa 70 m da p.c., dove la velocità delle onde di taglio raggiunge i 560 m/s. Il picco in questo caso, in accordo con la letteratura (Martelli et alii¹⁴, 2013 e Martelli et alii¹⁵, 2014) e lo studio di microzonazione sismica di terzo livello eseguito per il comune limitrofo di Busseto, viene associato al passaggio tra il Subsistema di “Agazzano” e il Subsistema di “Villa Verucchio”.

¹² L. Martelli, L. Calabrese, G. Ercolessi, P. Severi, G. Tarabusi, D. Pileggi, S. Rosselli, L. Minarelli, F. Pergalani, M. Compagnoni, G. Vannucchi, C. Madiati, J. Facciorusso, V. Fioravante, D. Giretti, M. Mucciarelli, E. Priolo, G. Laurenzano – (2014) Cartografia speditiva dell'amplificazione e del rischio di liquefazione nelle aree epicentrali del terremoto dell'Emilia 2012 (ML=5.9). Atti del 32 convegno GNGTS 2013

¹³ L. Martelli, P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tendo, D. Gerosa, D. Albarello, F. Guerrini, E. Lunedei, D. Pileggi, F. Pergalani, M. Compagnoni, V. Fioravante e D. Giretti (2014) *Analysis of the local seismic hazard for the stability tests of the main bank of the Po River (northern Italy)*, Boll. Geof. Teor. Appl., 55, 119-134

¹⁴ L. Martelli, L. Calabrese, G. Ercolessi, P. Severi, G. Tarabusi, D. Pileggi, S. Rosselli, L. Minarelli, F. Pergalani, M. Compagnoni, G. Vannucchi, C. Madiati, J. Facciorusso, V. Fioravante, D. Giretti, M. Mucciarelli, E. Priolo, G. Laurenzano – (2014) Cartografia speditiva dell'amplificazione e del rischio di liquefazione nelle aree epicentrali del terremoto dell'Emilia 2012 (ML=5.9). Atti del 32 convegno GNGTS 2013

¹⁵ L. Martelli, P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tendo, D. Gerosa, D. Albarello, F. Guerrini, E. Lunedei, D. Pileggi, F. Pergalani, M. Compagnoni, V. Fioravante e D. Giretti (2014) *Analysis of the local seismic hazard for the stability tests of the main bank of the Po River (northern Italy)*, Boll. Geof. Teor. Appl., 55, 119-134

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	60 di 76



La mancata ricezione di quest'ultimo contrasto nelle altre verticali analizzate, è probabilmente legata alla presenza di corpi ghiaiosi e sabbiosi superficiali, attestati a circa 30 m di profondità, in grado di mascherare il segnale sottostante. Tale particolarità è evidenziata nel diagramma di Fig. 40 che compara gli spettri H/V delle differenti prove HVSR: laddove si riscontrano picchi superficiali (3-4.5 Hz), il segnale intermedio viene attenuato mentre quello profondo, a 140 m di profondità (0.8-1 Hz), viene rilevato; al contrario, in corrispondenza di Carzeto (curva blu), i corpi ghiaiosi non determinano picchi accentuati ed il contrasto d'impedenza a 70 m è ben visibile (1.5 Hz).

Alla luce di queste considerazioni, si è pertanto deciso di estendere la presenza del salto di velocità tra il subsistema di "Agazzano" e quello di "Villa Verrucchio" anche alle altre verticali di risposta sismica locale analizzate.

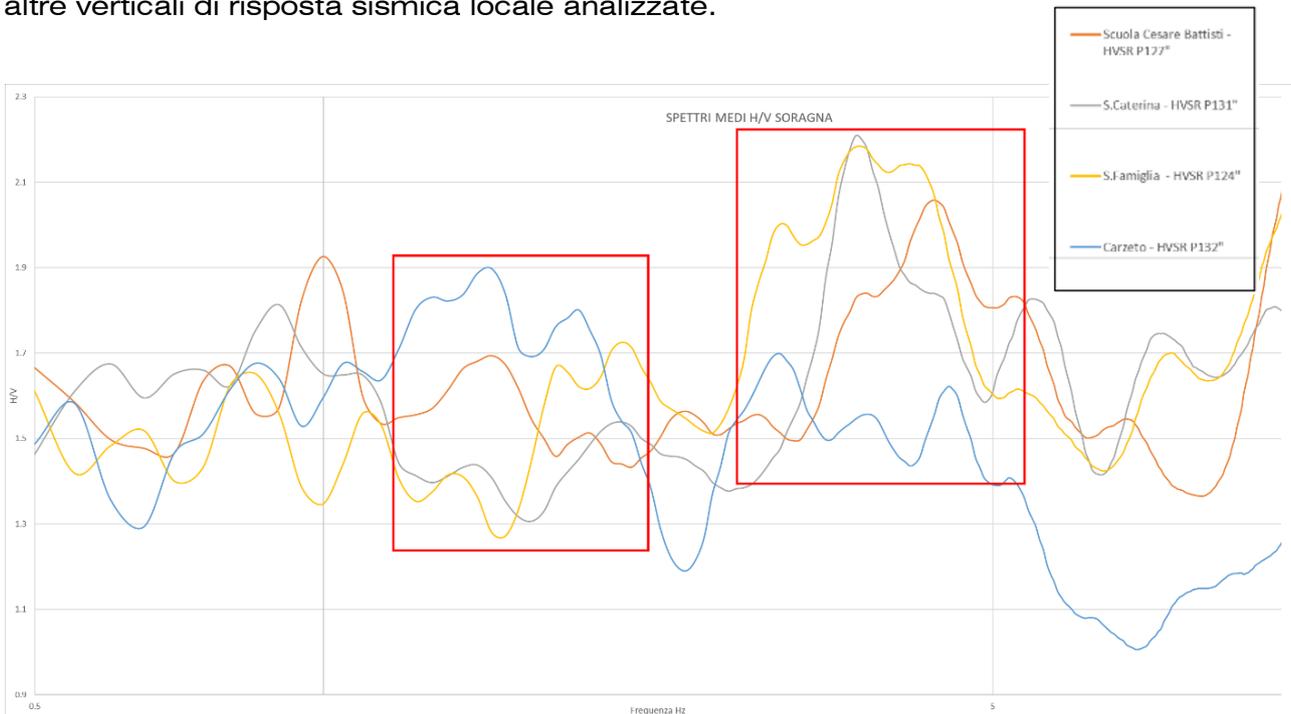


Fig. 40 : spettri H/V delle differenti prove HVSR.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	61 di 76



5. ELABORATI CARTOGRAFICI

Le cartografie di seguito descritte sono redatte in scala 1:10'000 o 1:5'000. Il primo ordine di grandezza viene impiegato per gli elaborati che prendono in considerazione l'intero territorio comunale; in particolare la Carta delle indagini, la Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione sismica ed infine la Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS). La scala di dettaglio viene invece utilizzata per focalizzare l'attenzione sulle aree urbanizzate, questo è il caso della Carta delle frequenze naturali dei terreni, della Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) e di tutte le cartografie di microzonazione sismica di terzo livello. La disposizione delle aree urbanizzate e dei relativi tagli cartografici all'interno del quadro d'unione viene illustrata in Fig. 41.

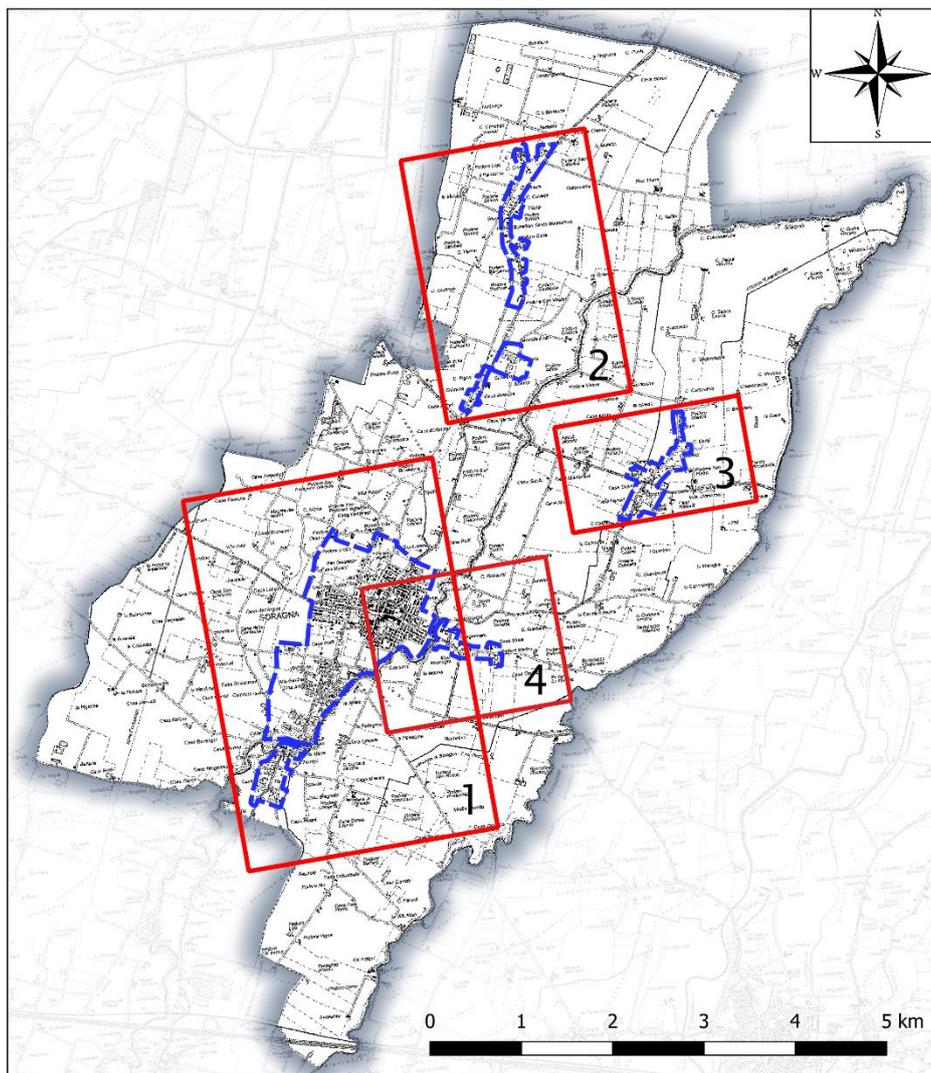


Fig. 41 - Quadro d'unione dei tagli cartografici adottati

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	62 di 76



5.1 Carta delle indagini

Nella Carta delle indagini sono riportate le ubicazioni di tutte le indagini geognostiche e/o sismiche inserite nel database geognostico a corredo dello studio.

Tale cartografia costituisce un aggiornamento di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello.

Le prove sono state distinte in base alla tipologia come raffigurato nella legenda riportata in stralcio nella seguente Fig. 42.

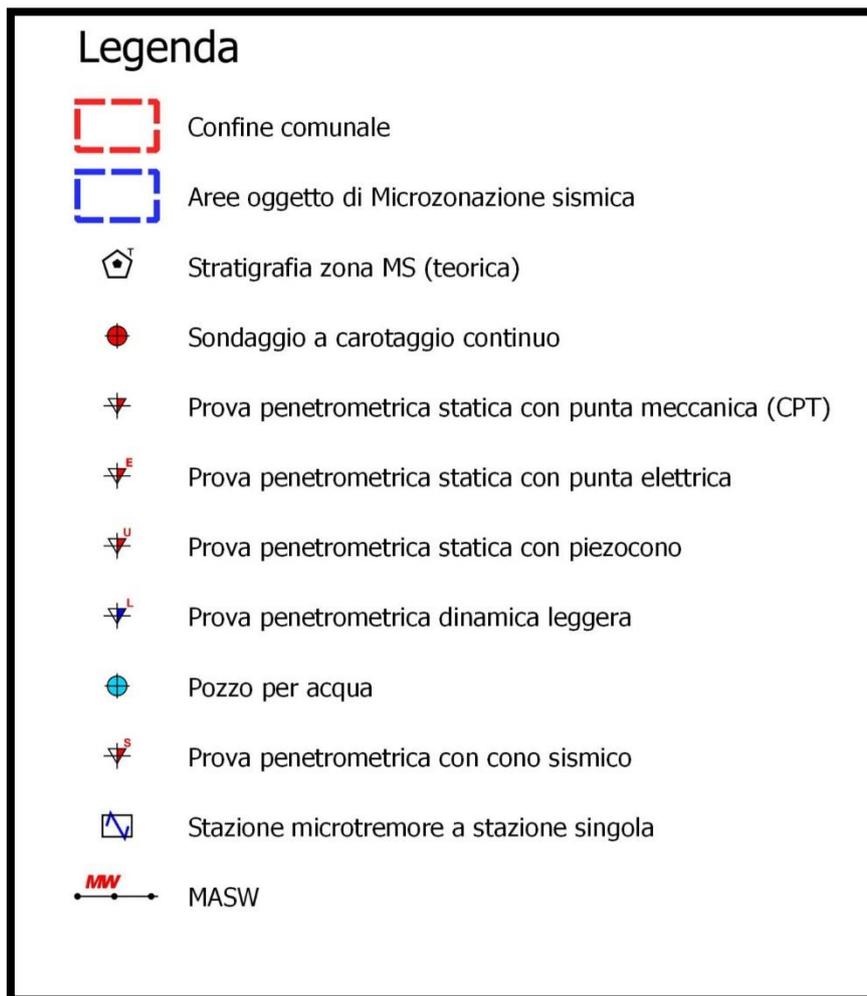


Fig. 42 – Legenda della Carta delle indagini

In Tab. 27 – Riepilogo delle indagini presenti sul territorio comunale vengono riportati il numero e la tipologia di indagini presenti sul territorio studiato, acquisite dal precedente studio o realizzate *ad hoc* per il 3° livello.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	63 di 76



<u>TIPO PROVA</u>	<u>provenienti da studio di 2° livello MS</u>	<u>effettuate per il 3° livello MS</u>	<u>TOTALE</u>
Sondaggi a carotaggio continuo	13	-	13
Prove CPT	8	-	8
Prove CPTE	1		1
Prove CPTU	14	7	21
Prove SCPTU	-	5	5
Prove DL	20		20
Pozzi per acqua	56	-	56
Prove HVSR	6	13	19
Prova MASW	1		1

Tab. 27 – Riepilogo delle indagini presenti sul territorio comunale

5.2 Carta Geologico - Tecnica per la Microzonazione sismica

Nella Carta geologico-tecnica sono rappresentati gli elementi geologici e morfologici locali d'interesse per l'analisi della pericolosità sismica (in particolare quelli che possono modificare il moto sismico in superficie), quali: le tipologie delle coperture, le forme di superficie e sepolte e gli elementi geologici ed idrogeologici.

Tale cartografia costituisce un aggiornamento di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello.

Nel presente studio, si è fatto inoltre riferimento alla seguente documentazione, opportunamente verificata mediante sopralluoghi di campagna:

- Cartografia CARG Foglio 181 "Parma Nord" alla scala 1:50.000, Servizio Geologico d'Italia;
- "Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna". Sezione 181070 alla scala 1:10.000, Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna;
- indagini puntuali e lineari, per la descrizione delle quali si rimanda al precedente paragrafo (5.1).

Nella Carta Geologico-tecnica, come si osserva in Fig. 43, dovendo attenersi agli standard di rappresentazione degli SRAI, sulla base delle caratteristiche tessiturali e degli ambienti genetico-deposizionali, sono state distinte le seguenti tipologie di terreni di copertura:

- **ML** – *Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità*: interessano la maggior parte del territorio comunale e sono il risultato di una deposizione in ambiente di piana inondabile, di canale fluviale e argine prossimale.
- **CL** – *Argille inorganiche di medio - bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre*: si riscontrano in settori di dimensioni relativamente

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	64 di 76



contenute, situati nei tratti NE e SO del territorio comunale e sono il risultato di una deposizione in ambiente di piana inondabile ed argine distale.

Sono stati inoltre indicati gli ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura distinguendo, tra quelli proposti negli standard:

- **pi** – Piana inondabile;
- **es** – Argine/ barre/ canali.

Sempre in Fig. 43, si osserva che nella Carta geologico-tecnica sono stati indicati anche:

- Forme di superficie e sepolte
 - Asse di paleoalveo;
- Elementi geologici e idrogeologici
 - Pozzo o sondaggio che raggiunto il substrato geologico
 - Pozzo o sondaggio che non ha raggiunto il substrato geologico
 - Presenza della falda in aree con sabbie e/o ghiaie con indicazione della profondità (m) del tetto della falda.

Infine, sono state indicate le tracce delle sezioni geologico-tecniche già redatte per gli studi di microzonazione di 2° livello.

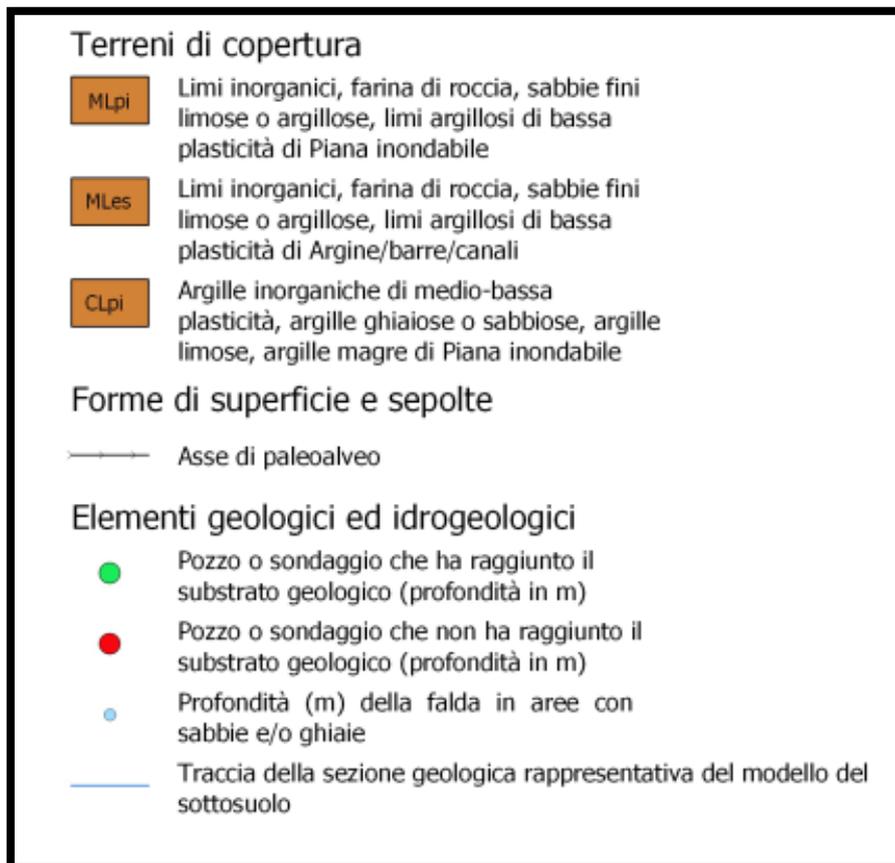


Fig. 43: Stralcio da legenda della Carta geologico-tecnica

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	65 di 76



5.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

Sulla base di tutti i dati tomografici disponibili, sia contenuti nell'Archivio Comunale, sia di nuova acquisizione, è stata redatta la Carta delle frequenze naturali dei terreni.

Tale cartografia costituisce un aggiornamento di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello.

In questa carta sono stati riportati tutti i punti di misura (19), con associati i risultati delle singole prove. In particolare, sono stati indicati il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (frequenza principale) e, quando presente, un secondo picco significativo (frequenza secondaria), meno evidente del primo (F_1).

Sono stati tralasciati i picchi con frequenze superiori ai 20 Hz, in quanto di scarso significato ai fini del presente studio.

Gli indirizzi tecnici a cui si è fatto riferimento prescrivono, per rendere graficamente più evidenti le variazioni in relazione alla posizione, di utilizzare colorazioni differenti per distinguere le prove a seconda della frequenza principale ottenuta. Inoltre, sono state utilizzate simbologie diverse a seconda che la prova sia caratterizzata, in corrispondenza della frequenza principale, da un alto contrasto di impedenza ($H/V > 3$) o da più bassi contrasti di impedenza (ampiezza $H/V \leq 3$) come raffigurato nella legenda riportata in Fig. 44.

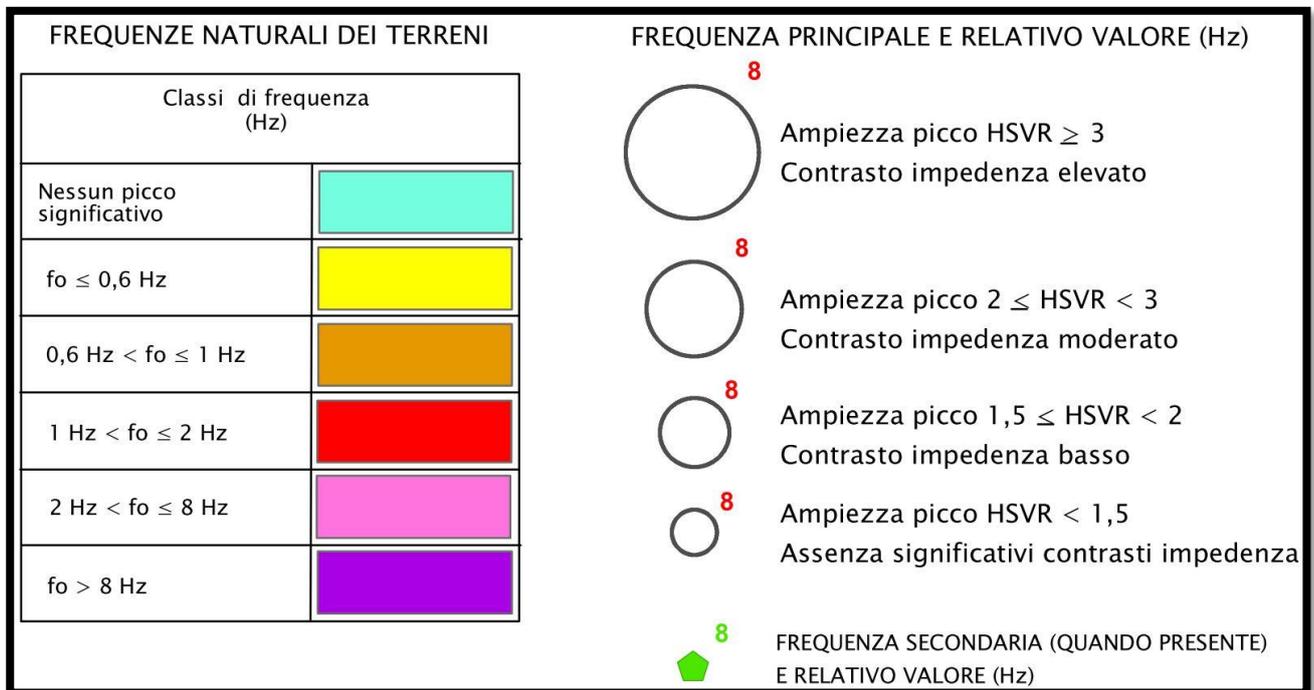


Fig. 44 - Legenda della Carta delle frequenze

L'elaborato cartografico, in particolare, schematizza e supporta le valutazioni relative al modello geofisico adottato, illustrate in dettaglio al 4.1.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	66 di 76



Si osserva infatti che:

- La maggior parte dei punti di misura situati nelle località di Soragna e Diolo presentano una frequenza principale tra 0.6 ed 1 Hz; tale intervallo viene associato ad un contrasto di impedenza profondo, attestato a 135-145 m di profondità.
- Le verticali ubicate a Carzeto individuano delle frequenze principali maggiori, comprese tra 1 e 2 Hz e relative ad un salto di velocità più superficiale, collocato a circa 70 m di profondità.
- Quest'ultimo, associato al passaggio tra i Subsintemi di "Villa Verucchio" e "Agazzano", viene generalmente individuato quando nei punti d'indagine circostanti non si riscontrano frequenze principali maggiori di 2 Hz, riconducibili a lenti ghiaiose o sabbiose sovrastanti.
- La contenuta ampiezza delle frequenze principali individuate ($1.5 < HVSR < 2$) suggerisce che anche i picchi profondi siano, in parte, attenuati dalla presenza di intercalazioni ghiaiose o sabbiose superficiali.

5.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), rappresenta il documento fondamentale del primo livello di approfondimento. Nel presente studio viene proposta una revisione di tale cartografia che tiene conto sia delle verifiche a liquefazione effettuate per il terzo livello di approfondimento, che degli standard più recenti.

In generale, in questa cartografia il territorio in esame viene distinto a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti categorie:

- 1. zone stabili.** Si tratta di zone con affioramento di un substrato rigido e morfologia pianeggiante o poco acclive, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura e in cui non sono richiesti ulteriori approfondimenti.
- 2. zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.** Si tratta di aree in cui sono attese amplificazioni del moto sismico, causate dall'assetto litostratigrafico e/o morfologico locale.
- 3. zone di attenzione per instabilità.** Si tratta di zone nelle quali effetti sismici attesi e predominanti, oltre i fenomeni di amplificazione, sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio, quali instabilità di versante (frane attive e quiescenti), liquefazioni e densificazione.

Dalla lettura della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica si osserva che in corrispondenza delle aree esaminate in Comune di Soragna, sono assenti sia le zone "stabili" che quelle "di attenzione per instabilità" mentre si riscontrano due differenti zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	67 di 76



5.4.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Zona 2001 (cfr. Fig. 45) – Successione stratigrafica costituita da depositi di origine alluvionale, caratterizzata da uno strato superiore, di circa 25 m di spessore, composta da una miscela di argille e limi e da uno strato inferiore di argille e limi con ghiaie in subordine. Il substrato geologico, stimato a circa 100 m di profondità è composto da un’alternanza di terreni coesivi sovraconsolidati (CO) e terreni granulari debolmente cementati (GR).

Zona 2002 (Fig. 45) – Successione stratigrafica costituita da depositi di origine alluvionale, caratterizzata da uno strato superiore, di circa 15 m di spessore, composto da una miscela di argilla e limi, da uno strato intermedio, di circa 10 m di spessore, di sabbie e sabbie debolmente ghiaiose e da uno strato inferiore di argille e limi con sabbie e sabbie ghiaiose in subordine. Il substrato geologico, stimato intorno ai 140 m di profondità, è composto da un’alternanza di terreni coesivi sovraconsolidati (CO) e terreni granulari debolmente cementati (GR).

ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

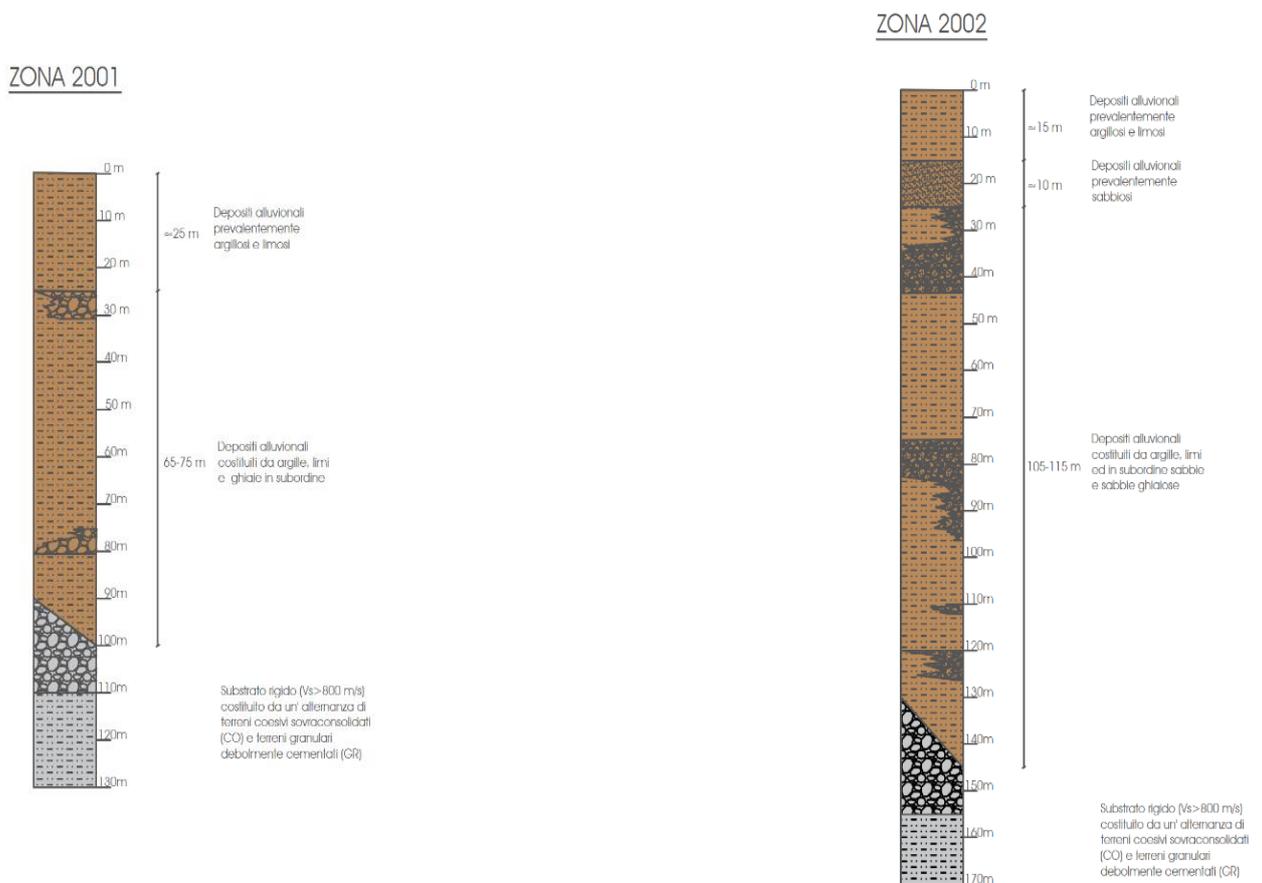


Fig. 45: Colonnine litostratigrafiche sintetiche, rappresentative delle microzone stabili suscettibili di amplificazioni locali

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	68 di 76



5.5 Carta della velocità delle onde di taglio S

In ottemperanza ai riferimenti tecnici citati nelle premesse, è stata redatta una Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s) riferita a tutte le aree oggetto di studio.

In essa sono ubicati tutti i punti di misura, distinguendoli a seconda della tipologia di prova effettuata (MASW o prova tomografica) e indicando il corrispondente valore di V_{s30} (in m/s), dove:

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

h_i = spessore (in metri) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m);

V_{s_i} = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m).

5.6 Carte di microzonazione sismica

Nelle Carte di microzonazione sismica di Livello 3, in scala 1: 5.000, il territorio è suddiviso sulla base dei seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico, calcolati per un tempo di ritorno $TR=475$ anni, con smorzamento $\zeta =5\%$ (cfr. capitolo 3):

- $FA_{PGA} = PGA/PGA_0$, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ al suolo di riferimento e PGA è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ alla superficie del sito;
- $FA_{SA} = SA/SA_0$, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T :
 - SA1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - SA2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$,
 - SA3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$,
 - SA4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;
- $FHSI = SI/SI_0$, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di *Housner*) al suolo di riferimento e SI l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di *Housner*) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T :
 - SI1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - SI2 per $0,5s \leq T \leq 1,0s$,
 - SI3 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	69 di 76



Nella seguente tabella (cfr. Tab. 28) sono indicate le analisi di Risposta Sismica Locale utilizzate per calcolare i sopraindicati parametri, al variare della microzona e del taglio cartografico considerato, specificando sito, prova SCPTU e paragrafo cui fare riferimento.

Zona	Tipo di zona	Taglio cartografico	Sito RSL	SCPTU	Paragrafo
2001	stabile suscettibile di amplificazioni locali	1	S. Maria - Castellina	034036P141	3.3.1
2002	stabile suscettibile di amplificazioni locali	1	Scuola Cesare Battisti - Soragna	034036P142	3.3.2
		1, 4	S. Famiglia - Soragna	034036P145	3.3.5
		2	S. Caterina - Diolo	034036P144	3.3.4
		3	Carzeto	034036P143	3.3.3

Tab. 28 - Associazione tra i differenti settori di territorio e l'analisi di Risposta Sismica Locale che ha consentito di determinare i parametri rappresentativi dello scuotimento sismico

In Fig. 46 è riportata la legenda utilizzata per accorpare i parametri di amplificazione per le Carte di microzonazione sismica, così come indicato negli standard di rappresentazione SRAI.

Parametro di amplificazione ³⁴	Simbolo
1.1 - 1.2	
1.3 - 1.4	
1.5 - 1.6	
1.7 - 1.8	
1.9 - 2.0	
2.1 - 2.2	
2.3 - 2.4	
2.5 - 3.0	
3.1 - 3.5	
>3.5	

Fig. 46 - Legenda adottata per l'accorpamento dei fattori di amplificazione nelle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali



Inoltre, all'interno delle Carte di microzonazione, utilizzando la legenda riportata in Fig. 47, sono stati inseriti anche i risultati delle prove di verifica alla liquefazione, descritte nel par. 3.5 e riportate in All. 4.

Verticale di verifica alla liquefazione con indicato il valore di IL



Fig. 47 - Legenda adottata per la visualizzazione della verifica alla liquefazione

5.7 Carte dello scuotimento atteso

Quali ultimi elaborati grafici, come prescritto dall'Allegato A2 della delibera regionale, sono state redatte le carte della distribuzione sul territorio dei valori di H_{SM} , parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2).

Tale parametro è definito come il prodotto dell'*Acceleration Spectrum Intensity* (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione, calcolato per un determinato intervallo di periodi, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

Gli intervalli di periodi considerati sono:

- $0,1s \leq T \leq 0,5s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM}),
- $0,4s \leq T \leq 0,8s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4-0,8\ s}$),
- $0,7s \leq T \leq 1,1s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7-1,1\ s}$),
- $0,5s \leq T \leq 1,5s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5-1,5\ s}$).
-

I valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$, per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, per i punti della griglia INGV, per un tempo di ritorno T_R uguale a 475 anni (corrispondente a una probabilità di superamento del 10% in 50 anni), sono forniti dal file *all_4_coord.kmz*, nella cartella *Allegato_4.zip*, disponibile nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Per gli altri intervalli di periodo sono, invece, stati calcolati, sempre per $T_R=475$ anni, dallo spettro su suolo A utilizzando i dati di accelerazione spettrale ($Se(T)$) forniti da INGV¹⁶

¹⁶ Montaldo V., Meletti C., 2007. Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3, <http://esse1.mi.ingv.it/d3.html>

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	71 di 76



nell'ambito degli studi per la redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274.

In particolare, considerato che i dati di accelerazione spettrale vengono forniti per periodi di 0.10, 0.15, 0.30, 0.40, 0.50, 0.75, 1.50, 2.00 secondi, per valutare i valori di ASI negli intervalli di periodo sopra citati è stato necessario procedere a interpolazioni, per ottenere i valori a 0.7, 0.8 e 1.1 secondi.

Una volta calcolati, i valori di H_{SM} sono stati riportati nelle varie carte di scuotimento atteso, grazie a un'etichetta riferita a ciascun poligono esaminato; mentre il colore indica l'appartenenza dello stesso a una delle classi con intervallo pari a 100 definite dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

$H_{SM} \leq 0,21g$ $H_{0408} \leq 0,14g$ $H_{0711} \leq 0,09g$	204, 204, 204
$0,22g \leq H_{SM} \leq 0,38g$ $0,15g \leq H_{0408} \leq 0,25g$ $0,10g \leq H_{0711} \leq 0,16g$	0, 255, 255
$0,39g \leq H_{SM} \leq 0,54g$ $0,26g \leq H_{0408} \leq 0,34g$ $0,17g \leq H_{0711} \leq 0,22g$	85, 255, 0
$0,55g \leq H_{SM} \leq 0,70g$ $0,35g \leq H_{0408} \leq 0,45g$ $0,23g \leq H_{0711} \leq 0,29g$	255, 255, 0
$0,71g \leq H_{SM} \leq 0,85g$ $0,46g \leq H_{0408} \leq 0,55g$ $0,30g \leq H_{0711} \leq 0,35g$	255, 170, 0
$0,86g \leq H_{SM} \leq 0,99g$ $0,56g \leq H_{0408} \leq 0,65g$ $0,36g \leq H_{0711} \leq 0,45g$	252, 0, 0
$H_{SM} \geq 1g$ $H_{0408} \geq 0,66g$ $H_{0711} \geq 0,46g$	204, 0, 204

N.B.: H_{0515} come H_{0711}

Fig. 48 - Legenda adottata per l'accorpamento dei valori di H_{SM}

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	72 di 76



6. BIBLIOGRAFIA

- Albarello D., Castellaro S. (2011): TECNICHE SISMICHE PASSIVE: INDAGINI A STAZIONE SINGOLA, Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2 - 2011, Appendice I e II, pp 50-62
- Ambiter s.r.l. (2012): Studi di microzonazione sismica con approfondimenti di primo e secondo livello del comune di Soragna, con dichiarazione di conformità da parte della Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica
- Baldi M., Baldini U., Bevivino R., Castagnetti S., Daminelli R., Gianferrari C., Marcellini A., Martelli L. e Tinto A. (2010): UNIONE TERRE DI CASTELLI: VALIDAZIONE DELLA MICROZONAZIONE SISMICA DI II LIVELLO (2010) - 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale Geofisica della Terra Solida, Prato
- Bernini M., Papani G. (1987) - Alcune considerazioni sulla struttura del margine appenninico emiliano tra lo Stirone e l'Enza (e sue relazioni con il sistema del Taro). L'Ateneo Parmense - Acta Naturalia, 24, 219-240.
- Boulanger, R. W. and Idriss, I. M. (2014) "CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures", Report UCD/CGM- 14/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 138 pp.
- Gruppo di lavoro MS (2008): INDIRIZZI E CRITERI PER LA MICROZONAZIONE SISMICA. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd
<https://www.protezionecivile.it/it/pubblicazione/indirizzi-e-criteri-la-microzonazione-sismica>
- GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION - SESAME European research project, dicembre 2004
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proceedings 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Berkeley, 32-56.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K, and Yasuda, S, (1978), "A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan", 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, pp. 885-896,
- Marcellini A., Martelli L, Tinto A., Daminelli R. (2009): L'amplificazione sismica negli "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	73 di 76



- Martelli L., L. Calabrese, G. Ercolessi, P. Severi, G. Tarabusi, D. Pileggi, S. Rosselli, L. Minarelli, F. Pergalani, M. Compagnoni, G. Vannucchi, C. Madaia, J. Facciorusso, V. Fioravante, D. Giretti, M. Mucciarelli, E. Priolo, G. Laurenzano – (2014) Cartografia speditiva dell’amplificazione e del rischio di liquefazione nelle aree epicentrali del terremoto dell’Emilia 2012 (ML=5.9). Atti del 32 convegno GNGTS 2013
- Martelli L., P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tento, D. Gerosa, D. Albarello, F. Guerrini, E. Lunedei, D. Pileggi, F. Pergalani, M. Compagnoni, V. Fioravante e D. Giretti (2014) Analysis of the local seismic hazard for the stability tests of the main bank of the Po River (northern Italy), Boll. Geof. Teor. Appl., 55, 119-134
- Meletti C. e Valensise G., (2004): ZONAZIONE SIMOGENETICA ZS9-APP. 2 AL RAPPORTO CONCLUSIVO. In: “Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall’Ordinanza PCm 3274 del 20 marzo 2003 ”. Rapporto per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici
- MICROZONAZIONE SISMICA, UNO STRUMENTO CONSOLIDATO PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO. L’esperienza della Regione Emilia-Romagna (2012) – Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli
- Montaldo V., Meletti C., 2007. Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3, <http://esse1.mi.ingv.it/d3.html>
- National Center for Earthquake Engineering Research (1998) - Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.
- NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D’ITALIA alla scala 1:50.000 – FOGLIO 181, Parma Nord – REGIONE EMILIA-ROMAGNA, S.EL.CA. s.r.l., Firenze 2009
- Newmark NM, Hall WJ, Earthquake Spectra and Design, EERI Monograph Series, 1982
- Robertson, P.K. and Wride, C.E., (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 35(3): 442-459.
- Robertson, P.K., (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied strength Using the Cone Penetration Test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 136(6): 842-853
- Robertson P.K., Cabal K.L. (2015) “Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering 6th edition. Gregg Drilling & testing Inc.
- Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily W.D. (1998) – Shear modulus and damping relationships for gravels. JGGE, 124, 396-405
- Seed H. B., Idriss I. M. – 1970 – Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses – University of California Berkeley Structural Engineers and Mechanics

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	74 di 76



- SONMEZ H. (2003) – Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). Environ. Geology 44(7), pp. 862–871
- Vucetic M., Dobry R. – 1991 – Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, Issue 1

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	75 di 76



7. ALLEGATI

Nel corso dello studio sono stati redatti, oltre alla presente relazione Illustrativa, i seguenti elaborati grafici:

Elaborato		scala
1	Carta delle indagini	1:10.000
2	Carta Geologico – Tecnica per la Microzonazione sismica (CGT MS)	1:10.000
3	Carta delle frequenze naturali dei terreni	1:5.000
4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)	1:10.000
5	Carta della velocità delle onde di taglio S (Vs)	1:5.000
6	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FH_{PGA}	1:5.000
7	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA} 0.1s < T_o < 0.5s$	1:5.000
8	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA} 0.4s < T_o < 0.8s$	1:5.000
9	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA} 0.7s < T_o < 1.1s$	1:5.000
10	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA} 0.5s < T_o < 1.5s$	1:5.000
11	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_S 0.1s < T_o < 0.5s$	1:5.000
12	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS} 0.5s < T_o < 1.0s$	1:5.000
13	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS} 0.5s < T_o < 1.5s$	1:5.000
14	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - H_{SM}	1:5.000
15	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{SM} 0.4s-0.8s$	1:5.000
16	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{SM} 0.7s-1.1s$	1:5.000
17	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{SM} 0.5s-1.5s$	1:5.000

Inoltre, alla presente relazione, sono allegati

- All. 1 - Prove HVSR;
- All. 2 - Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono;
- All. 3 - Prove penetrometriche con sismocono;
- All. 4 - Verifiche a liquefazione

contenenti le indagini e le verifiche di nuova esecuzione.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2022	1	76 di 76