



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 Cavriago



Regione Emilia-Romagna	Soggetto realizzatore  ENGEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY www.engeo.it <i>Direttori tecnici:</i> Dr. Geol. Carlo Caleffi Dr. Geol. Francesco Cerutti Dr. Geol. Matteo Baisi Dr.ssa Olga Brontesi Dr. Geol. Alessandro Ferrari Dr.ssa Geol. Melinda Raimondo	Data Aprile 2025 MS3
---------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------



INDICE

1.	Introduzione.....	4
1.1.	Motivazione dello studio di 3° livello.....	5
1.2.	Articolazione dello studio.....	6
2.	Indagini ed analisi.....	8
2.1.	Sondaggio a carotaggio continuo.....	9
2.2.	Prova sismica in foro di tipo Down-Hole.....	10
2.3.	Rilievo sismico HVSR mediante tromografo.....	12
2.4.	Prove sismiche di tipo MASW.....	15
3.	Analisi di risposta sismica locale.....	18
3.1.	Pericolosità sismica di base.....	20
3.2.	Segnali in input.....	20
3.3.	Modello geofisico del sottosuolo.....	21
3.3.1.	Litologia.....	21
3.3.2.	Determinazione della Vs e del bedrock sismico.....	21
3.3.3.	Curva di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G ₀) in funzione della deformazione.....	23
3.4.	Procedura di analisi RSL.....	25
3.4.1.	Metodo lineare equivalente.....	25
3.4.2.	Soluzione alla singola iterazione mediante FEM.....	27
3.4.3.	Smorzamento.....	28
3.4.4.	Procedimento iterativo.....	29
3.4.5.	Interpretazione dei risultati.....	29
3.5.	Analisi dei risultati.....	29
3.5.1.	Spettro di risposta elastico normalizzato.....	32
3.6.	Modelli e risultati della modellazione numerica.....	33
3.6.1.	RSL.1 per il sito "Palazzetto dello sport".....	34
3.6.2.	RSL.2 per il sito "Magazzini comunali".....	37
3.6.3.	RSL.3 per il sito "Via della Repubblica".....	39
3.6.4.	RSL.4 per il sito "Corte Tegge".....	42
3.6.5.	RSL.5 per il sito "Quercioli".....	45
3.6.6.	RSL.6 per il sito "Parco dello sport".....	48
3.6.7.	RSL.7 per il sito "Ghiardo".....	51
3.7.	Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello.....	55
4.	Criticità del metodo.....	57
4.1.	Considerazioni sul bedrock sismico.....	57
5.	Elaborati cartografici.....	59
5.1.	Carta delle indagini.....	60
5.2.	Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica (CGT_MS).....	62
5.3.	Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	65





RELAZIONE ILLUSTRATIVA

5.4.	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).....	68
5.5.	Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s)	69
5.6.	Carta di microzonazione sismica	72
5.7.	Carta dello scuotimento atteso	73
6.	Bibliografia	76
7.	Allegati	78



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 Cavriago, effettuato su incarico dell'Unione Val d'Enza (cfr. Determinazione n° 331 del 08/05/2024) e finanziato con contributi di cui alla Determina n. 743 del 17/01/2024 della Regione Emilia-Romagna.

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.

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 2 "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. 978/2023" della deliberazione di Giunta regionale n. 1884 del 06/11/2023 "OCDPC 24 marzo 2023, n. 978 - Attuazione dell'art. 2 comma 1 lett. b). Approvazione elenco degli enti locali destinatari dei contributi per studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite di emergenza" (da qui in avanti "Allegato 2 della delibera regionale");
- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.2, Roma, dicembre 2020 - 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").

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 (cfr. paragrafo 1.1).

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

I relativi dati vengono forniti anche in formato vettoriale (*shapefile*) secondo quanto indicato nel punto "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 2 della delibera regionale.

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.



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 3° livello

Il Comune di Cavriago è già dotato di uno studio di microzonazione sismica di secondo livello di approfondimento, certificato dalla Regione Emilia-Romagna (prot. n. 01.09.2021.0789150.E), in data 21/07/2021, redatto da ENGEO 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 4007/2012.

Nell'ambito di tale studio, per il territorio urbanizzato e urbanizzabile, definito in accordo con Unione Val d'Enza e l'Amministrazione Comunale, è stata effettuata, tramite le procedure semplificate previste appunto dal secondo livello, una microzonazione con attribuzione di differenti fattori di amplificazione, che hanno lo scopo di consentire una valutazione comparativa della pericolosità sismica.

Tali studi, in estrema sintesi, hanno portato alle seguenti conclusioni:

- nell'intero Comune le accelerazioni e le velocità impresse dai sismi sono amplificate verso la superficie per effetto della struttura stratigrafica del sottosuolo;
- le indagini geognostiche e geofisiche disponibili e realizzate *ex-novo* per il presente studio di Microzonazione Sismica hanno portato all'individuazione di 1 microzona omogenea in prospettiva sismica;
- le indagini geofisiche hanno evidenziato, in termini di frequenze naturali del sottosuolo e di velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri di profondità, un modello sismostratigrafico del sottosuolo abbastanza regolare, compatibile con l'assetto tettonico-stratigrafico tipico delle zone pianeggianti caratterizzato da frequenti interdigitazioni tra terreni fini e materiali più grossolani;
- l'interpretazione delle indagini tromografiche effettuate, in genere, ha evidenziato picchi di ampiezza significativa associabili al contrasto di impedenza dovuto al passaggio tra la copertura coesiva e i sottostanti depositi granulari; dal momento che questo passaggio si verifica quasi sempre nei primi metri di profondità, detti picchi sono caratterizzati da frequenze elevate;
- nel presente studio si è assimilato al *bedrock* sismico il primo orizzonte di depositi prevalentemente grossolani di conoide alluvionale (ghiaie, ghiaie sabbiose, sabbie ghiaiose, limi sabbioso-ghiaiosi), generalmente di spessore $H > 5\text{m}$, in virtù del fatto che presenta valori di V_s molto maggiori di quelli dei terreni fini soprastanti;
- in considerazione dell'assetto litostratigrafico ricostruito e dei profili di V_s misurati, gli areali oggetto di microzonazione sismica del territorio comunale di Cavriago sono stati assimilati generalmente al "Margine di tipo B", tranne che per il settore ricadente sul terrazzo del Ghiardo dove sono state applicate le tabelle relative al "Margine di tipo A", previsti nell'Allegato A2 della Delibera della Giunta della Regione Emilia-Romagna 2193/2015;
- 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.

Alla luce di quanto sopra indicato, per migliorare il quadro delle conoscenze locali, si è ritenuto opportuno effettuare, all'interno del territorio comunale, uno studio con approfondimento di 3° livello e svolgere 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 3° livello è costituito pertanto nelle seguenti fasi:

1. acquisizione e analisi critica dei dati pregressi, in parte già contenuti nel precedente studio di secondo livello, e del patrimonio cartaceo e informativo messo a disposizione dall'Ufficio Tecnico del Comune di Cavriago;
2. pianificazione della nuova campagna d'indagini;
3. realizzazione di n° 1 sondaggio a carotaggio continuo fino alla profondità di 30 m, con prova sismica Down-Hole in foro per la misura delle Vs;
4. realizzazione di n° 3 prove sismiche di tipo MASW, finalizzate alla definizione del profilo sismostratigrafico di aree in cui i dati sismici pregressi risultavano assenti o insufficienti;
5. realizzazione di n° 4 prove HVSr per la determinazione della frequenza caratteristica del terreno in corrispondenza delle medesime aree indagate da prova MASW e della prova sismica Down-Hole;
6. aggiornamento secondo gli standard più recenti, con inserimento dei dati relativi alle nuove indagini, delle seguenti cartografie di primo e secondo livello:
 - o Carta delle indagini;
 - o Carta Geologico-Tecnica;
 - o Carta delle frequenze naturali dei terreni;
 - o Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica;
 - o Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs);
7. valutazione della risposta sismica locale in n° 7 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. 5.2.0 di STACEC;
8. calcolo dei fattori di amplificazione, per i n° 7 siti indagati, per un tempo di ritorno $T_R=475$ anni, con smorzamento $\zeta=5\%$, relativi ai seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico:
 - o $F_{PGA} = PGA/PGA_0$, 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;
 - o $F_{SA} = SA/SA_0$, 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 $0.5s \leq T \leq 1.5s$.
- 9. redazione delle cartografie di microzonazione sismica di 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),
 - $0.7s \leq T \leq 1.1s$ (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).

2. INDAGINI ED ANALISI

Di seguito vengono descritte le indagini specifiche effettuate per la microzonazione di 3° livello, la cui ubicazione è rappresentata graficamente in Fig. 1, oltre che nella Carta delle indagini alla scala 1:5'000.

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

I report di tutte le indagini di nuova esecuzione sono consultabili nell'Elaborato 7 – Nuove indagini.

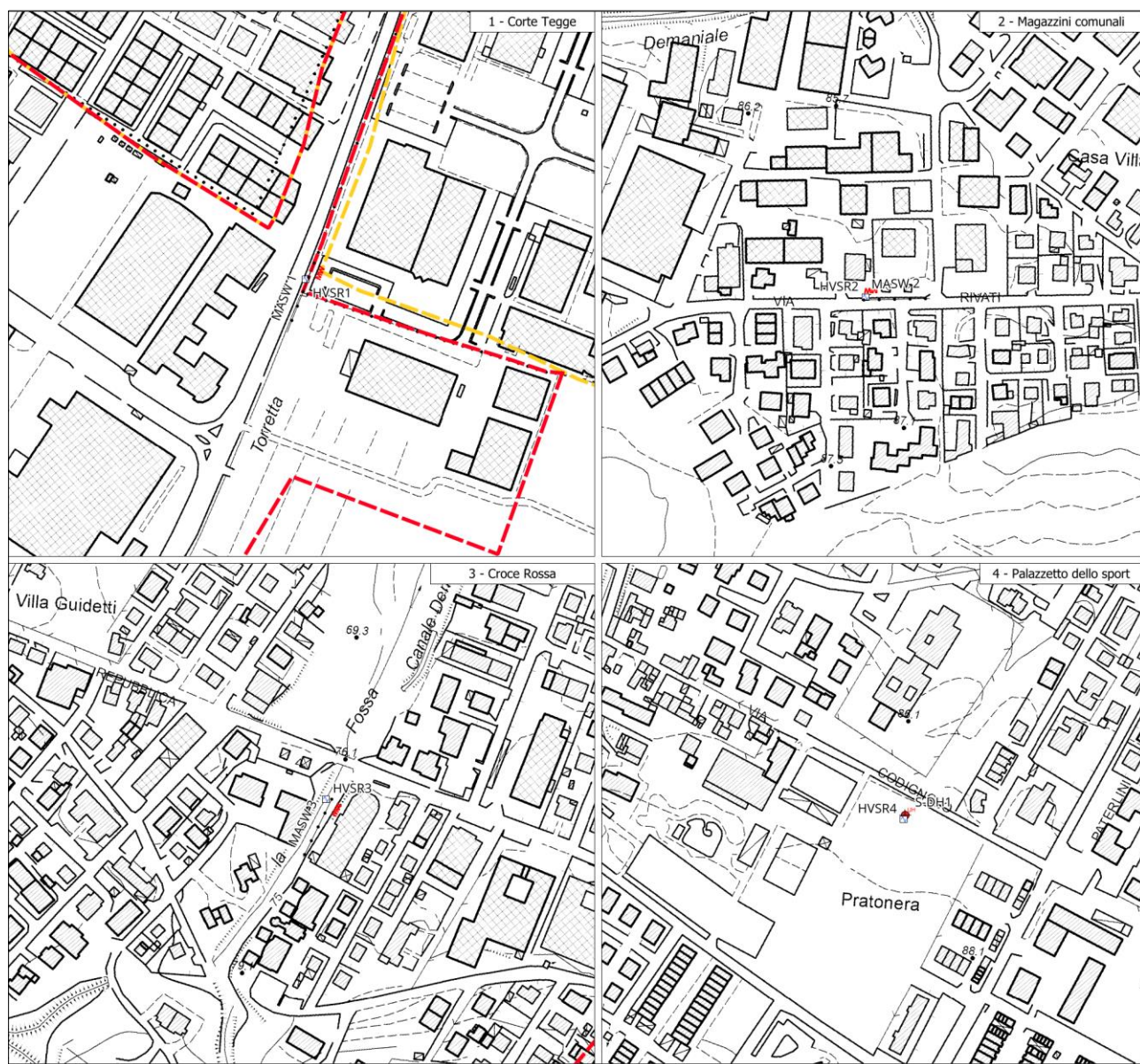


FIG. 1 – UBICAZIONE DELLE INDAGINI EFFETTUATE PER L'ANALISI DI 3° LIVELLO

2.1. Sondaggio a carotaggio continuo

Durante la campagna indagine è stato eseguito, da parte della ditta Beduschi Geotecnica di San Daniele Po (CR), un sondaggio verticale a carotaggio continuo spinto a una profondità di 30 metri dal piano campagna.

Il sondaggio è stato attrezzato con un tubo in PVC per l'esecuzione della prova Down-Hole (cfr. paragrafo 2.2).

Nell'indagine è stata utilizzata una sonda a rotazione impiegando per la perforazione un carotiere semplice fino a 30 m di profondità.

Nella litostratigrafia allegata (cfr. Elaborato 7) sono riportate:

- le suddivisioni stratigrafiche con relative quote e le descrizioni litologiche effettuate direttamente in campagna con metodi speditivi;
- la determinazione speditiva di campagna del valore di pocket penetrometer, espressi in KPa;
- il livello di falda misurato durante l'esecuzione della perforazione.



FIG. 2 – UBICAZIONE DEL SONDAGGIO A CAROTTAGGIO CONTINUO REALIZZATO PER IL PRESENTE STUDIO

2.2. Prova sismica in foro di tipo Down-Hole

Tra le varie indagini sismiche realizzate al fine di definire le caratteristiche sismiche dei terreni è stata eseguita un'indagine tipo Down-Hole. A tale scopo il sondaggio S1, al termine della perforazione, è stato attrezzato con un tubo in PVC del diametro di 3 pollici. Tale tubo è stato reso solidale con il terreno mediante cementazione con boiaccia di cemento iniettato mediante pompa a bassa pressione.

Una volta che il cemento ha fatto presa, si è proceduto all'esecuzione della prova sismica del tipo Down-Hole.

La prova Down-Hole è stata eseguita con cadenza delle misure pari ad un metro, dal p.c. fino a fondo foro, ad una profondità di 30 metri, utilizzando un sismografo collegato ad un geofono da foro tridimensionale con almeno una terna di geofoni orientati secondo gli assi $x - y - z$.

Gli impulsi sismici sono stati originati con procedure specifiche in modo da generare, oltre alle onde di compressione (Onde P), anche onde a componente di taglio orizzontale (onde SH).

Le prove sismiche Down-Hole sono eseguite con lo scopo di misurare la velocità delle onde sismiche dirette, che si propagano dalla superficie nel terreno in profondità, energizzando il terreno in direzione verticale e in direzione trasversale (parallelamente al suolo).

Nel primo caso sono generate prevalentemente onde di compressione (onde P) che si propagano in profondità e vengono registrate al meglio dal geofono verticale (asse z).

Nel secondo caso verranno generate prevalentemente onde di taglio (onde S) visibili principalmente sui geofoni con l'asse posto orizzontalmente (assi x e y).

Il sistema di ricezione, costituito da un geofono tridimensionale da foro ad ancoraggio elettromeccanico, viene calato nel foro, sino alla profondità massima di investigazione e progressivamente sollevato dell'interdistanza propria di ciascuna indagine (nel caso in esame 1 m).

Le onde di taglio hanno velocità inferiori rispetto a quelle di compressione e quindi raggiungono il geofono triassiale quando il primo fronte d'onda di compressione è già transitato. Questo passaggio purtroppo costituisce un disturbo per la misura delle onde trasversali, in quanto i geofoni orizzontali si trovano ancora in movimento all'arrivo dell'onda trasversale o di taglio. Per migliorare il rapporto fra l'energia dell'onda di compressione e l'energia dell'onda trasversale (di taglio) a favore di quest'ultima, si realizza una doppia energizzazione orizzontale con verso opposto.

L'analisi dei dati prevede un sismogramma per le forme d'onda relative al geofono verticale (asse z) e in un altro sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni orizzontali (assi x e y).

L'interpretazione delle informazioni così acquisite consente di ricostruire l'andamento delle velocità delle onde sia di pressione che di taglio in funzione della profondità.

Nella seguente Fig. 3 si riporta una fotografia eseguita durante la realizzazione dell'indagine.



FIG. 3 – REALIZZAZIONE DELLA PROVA SISMICA DOWN-HOLE IN COMUNE DI CAVRIAGO

In Fig. 4 viene riportato il grafico, in funzione della profondità, della velocità delle sole onde S derivate dall'elaborazione della prova, grazie alle quali è possibile determinare anche la categoria sismica del sottosuolo.

La velocità equivalente delle onde sismiche di taglio, ($V_{s,eq}$), è definita come:

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

dove h_i e V_i sono lo spessore e la velocità delle onde dello strato i-esimo di fondazione, N il numero degli strati e H la profondità del substrato.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Nel caso in esame, si è determinata una $V_{s,30}$ pari a **404.3 m/s**.

I reports completi sono contenuti nell'Elaborato 7.

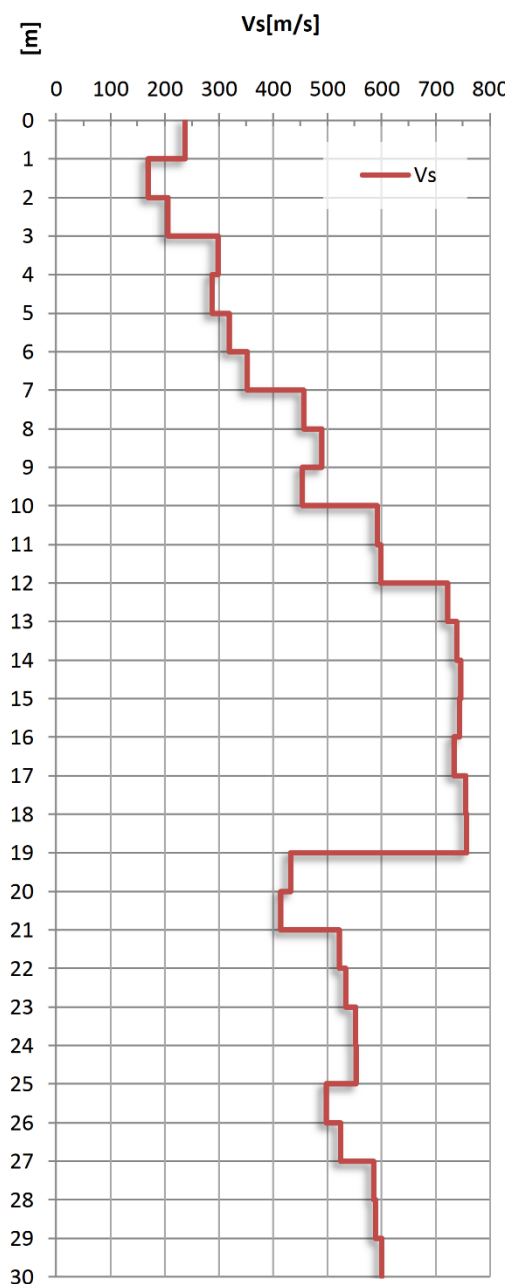


FIG. 4 – GRAFICO Vs DERIVANTE DALLA PROVA DOWN-HOLE

2.3. Rilievo sismico HVSR mediante tromografo

Ai fini della determinazione della frequenza caratteristica dei suoli sono state eseguite in tutto n° 4 prove HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) tramite tromografo digitale, di cui 3 in corrispondenza dei punti in cui sono state eseguite le prove sismiche MASW e 1 in corrispondenza della prova Down-Hole.

Le prove sono state condotte utilizzando un sismometro a stazione singola (tromografo digitale) 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

è stato misurato dallo strumento in termini di velocità attraverso tre velocimetri, uno per ogni direzione di misura (X, Y e Z).

Nella figura Fig. 5 sottostante si riporta una fotografia della strumentazione su uno dei punti d'indagine.



FIG. 5 – FOTOGRAFIA DELLA STRUMENTAZIONE DURANTE L'ACQUISIZIONE DI UNA PROVA HVSR

Le misure registrate sono state poi elaborate e restituite graficamente in forma di spettri H/V (rapporto H/V in funzione della frequenza, cfr. Fig. 6) e spettri delle singole componenti (componente del moto in funzione della frequenza per ognuna delle tre direzioni cfr., Fig. 7).

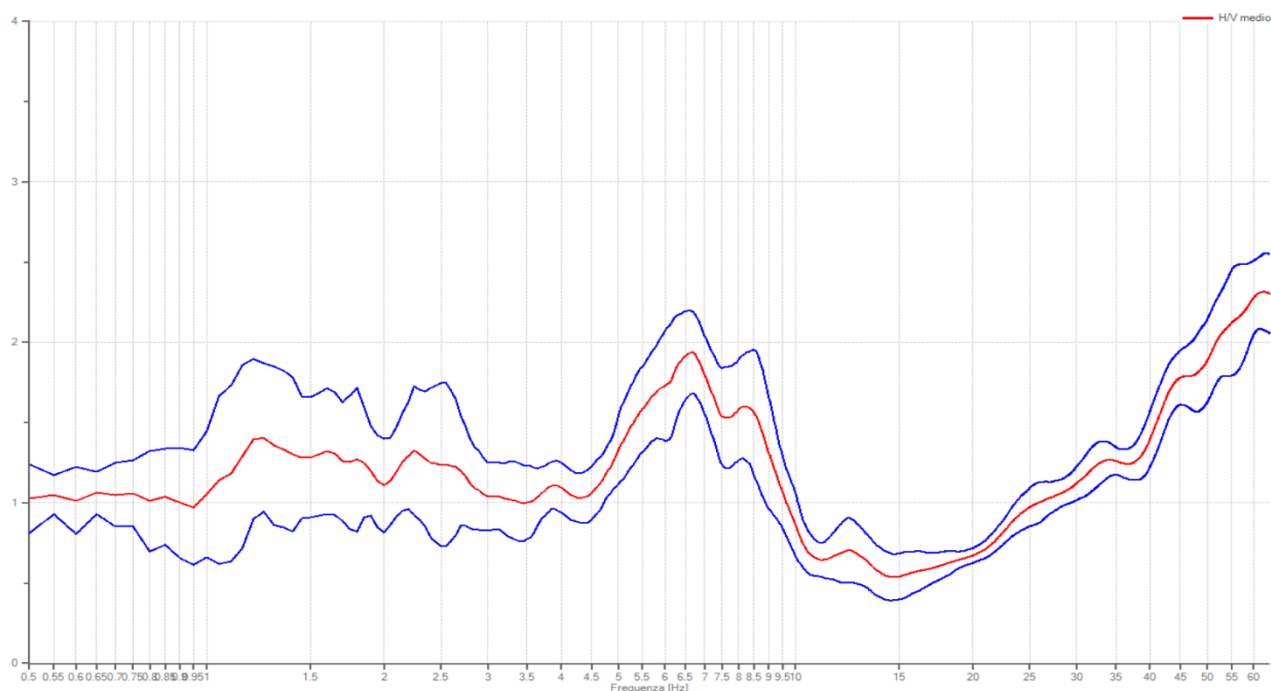


FIG. 6 - RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE DELLA PROVA 035017P129

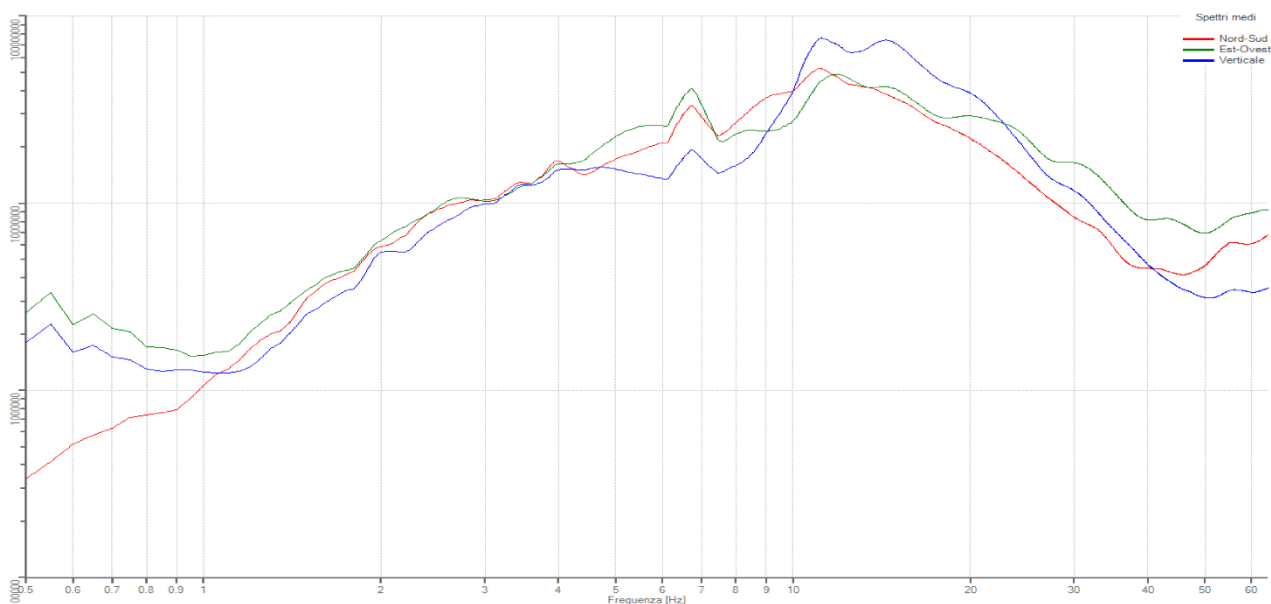


FIG. 7 - SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI DELLA PROVA 035017P129

A riguardo, va sottolineato come il confronto fra questi due tipi di grafici consente di distinguere i picchi di frequenza dovuti a disturbi nel corso della misurazione, in cui tutte le componenti hanno lo stesso andamento, da quelli dovuti a motivi stratigrafici, in cui la componente verticale, a differenza delle altre due, presenta un minimo locale.

Dalla prova tromografica è possibile ottenere la frequenza di risonanza caratteristica del sito (Nakamura Y., 1989).

I reports completi sono riportati nell'Elaborato 7, mentre, nella seguente Tab. 1, sono indicate le frequenze primarie (F) e secondarie (F1) corrispondenti ai picchi d'amplificazione individuati.



Codice MS3 ³	N. prova	Picco primario F	Ampiezza A	Picco secondario F1	Ampiezza A1
035017P129	HVSR1	6.51	1.90	1.30	1.35
035017P130	HVSR2	0.80	1.30	4.00	0.90
035017P131	HVSR3	6.60	2.70	0.95	1.00
035017P132	HVSR4	8.00	4.80	17.00	3.00

TAB. 1 – RIEPILOGO DEI PICCHI DI AMPLIFICAZIONE MISURATI CON LE NUOVE PROVE HVSR

2.4. Prove sismiche di tipo MASW

Sempre al fine di definire le caratteristiche sismiche del territorio indagato sono state eseguite n°3 misure di sismica attiva di tipo MASW.

La tecnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) è una tecnica di prospezione sismica che, attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro V_{s30} (velocità media delle onde S nei primi 30 m).

In un mezzo stratificato le onde di superficie (Rayleigh) danno vita al fenomeno della dispersione, cioè lunghezze d'onda diverse si propagano con diverse velocità di fase e gruppo: le componenti ad alta frequenza (con piccola lunghezza d'onda) "sentono" solamente gli strati più superficiali del suolo, mentre le componenti a più bassa frequenza "sentono" anche gli strati più profondi consentendo quindi di determinarne le caratteristiche.

Il metodo si sviluppa attraverso la determinazione delle proprietà dispersive del mezzo individuabili dall'analisi dello spettro di velocità dei dati. Il range di frequenza si sviluppa comunemente tra i 5 Hz e i 70 Hz, fornendo informazioni sino a profondità di circa 30 m a seconda della rigidità del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e più bassa frequenza identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati con distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m (la lunghezza dello stendimento incide sulla focalizzazione del segnale nello spettro di velocità) che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di un punto di energizzazione effettuata tipicamente ad una distanza compresa fra 2 e 20 m dal primo geofono.

Nel dettaglio, l'indagine è stata realizzata con un sismografo a 24 canali, utilizzando geofoni verticali con frequenza caratteristica di 4.5 Hz posizionati a 2 m l'uno dall'altro; come sorgente è stata utilizzata una mazza da 9 Kg battente su piastra in PVC alla distanza di 5 m dal primo geofono, l'energizzazione è stata eseguita 5 volte e i segnali acquisiti sono stati sommati (*stacking* del segnale) al fine di amplificare il segnale.

Ulteriori specifiche di acquisizione sono contenute nel report riportato in allegato.

³ Codice da normativa regionale



L'analisi dei dati acquisiti mediante le prove MASW avviene attraverso le seguenti fasi:

1. Calcolo dello spettro di velocità;
2. Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori;
3. Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs.

L'elaborazione delle prove MASW è avvenuta tenendo in considerazione la curva HV ottenuta dalle misure HVSR eseguite in corrispondenza di ciascuna prova. Nello specifico, il modello è stato tarato considerando le risultanze della misura sismica HVSR per i passaggi sismostratigrafici profondi, altrimenti poco visibili.

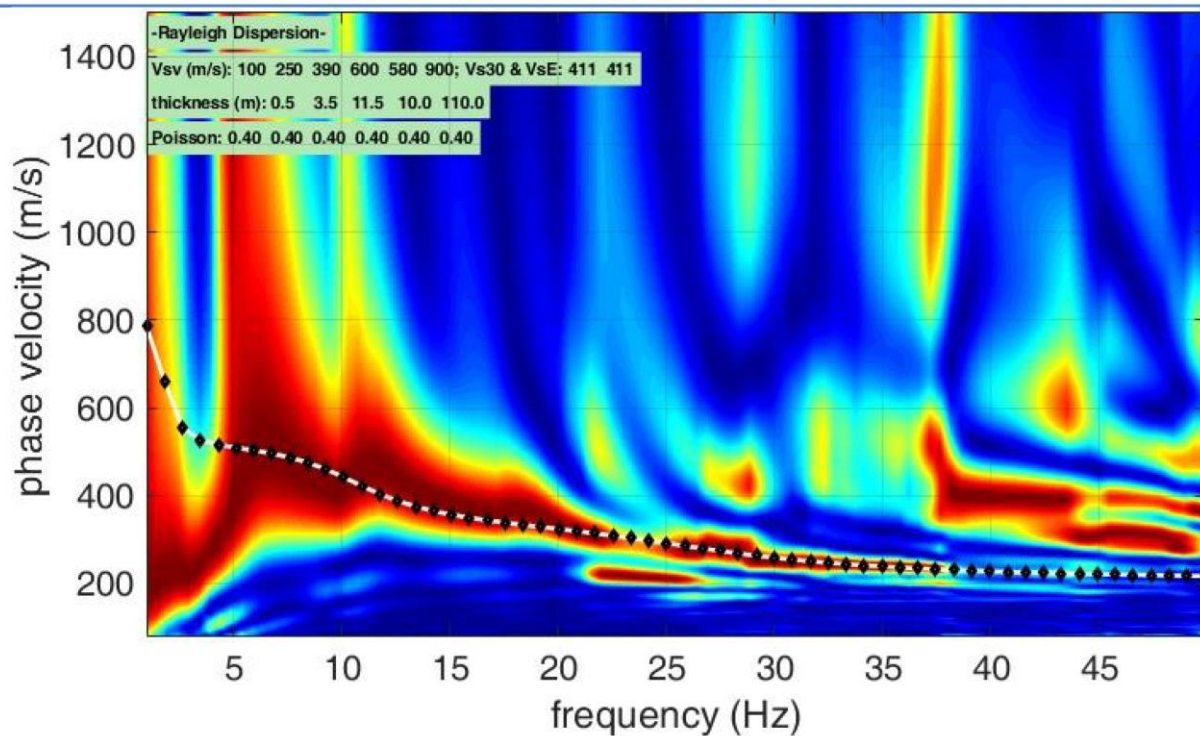
In Fig. 8 si riporta, a titolo esemplificativo, uno spettro di velocità e una curva HVSR con sovrapposta la curva del modello ottenuto.

I risultati delle indagini eseguite sono riportati nell'Elaborato 7, mentre nella tabella di seguito si riportano i valori di Vs30 ottenuti.

Codice MS3 ³	N. prova	V _{s30} (m/s)
035017L69	MASW1	319
035017L70	MASW2	427
035017L71	MASW3	411

TAB. 2 – RIEPILOGO DEI VALORI DI V_{s30} OTTENUTI

Modello sintetico su spettro MASW



Modello sintetico su spettro HVSR

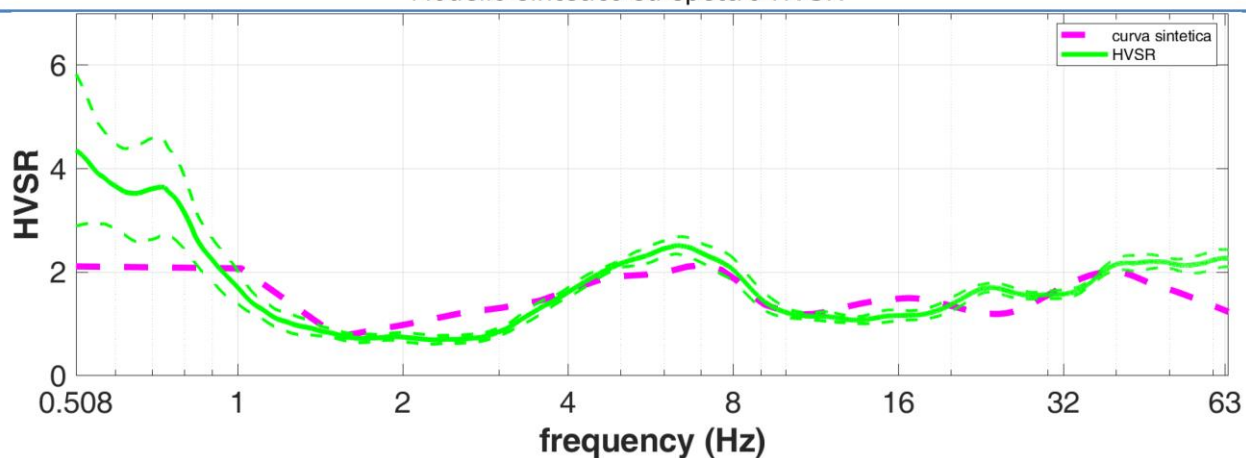


FIG. 8 – MODELLO SINTETICO SU SPETTRO MASW E SU CURVA HVSR

3. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'analisi di 3° livello, per il Comune di Caviglioglio, è stata realizzata su sette siti in cui si disponevano informazioni sufficientemente affidabili in termini di profilo sismostratigrafico.

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 stati presi in esame 22 profili delle velocità delle onde di taglio S in funzione della profondità, di cui 3 ottenuti per i punti d'indagine sismica appositamente realizzati per il presente studio tramite prove sismiche di tipo MASW. Inoltre, è stata eseguita una prova sismica in foro di tipo Down-Hole all'interno del foro di sondaggio a carotaggio continuo realizzato ex-novo.

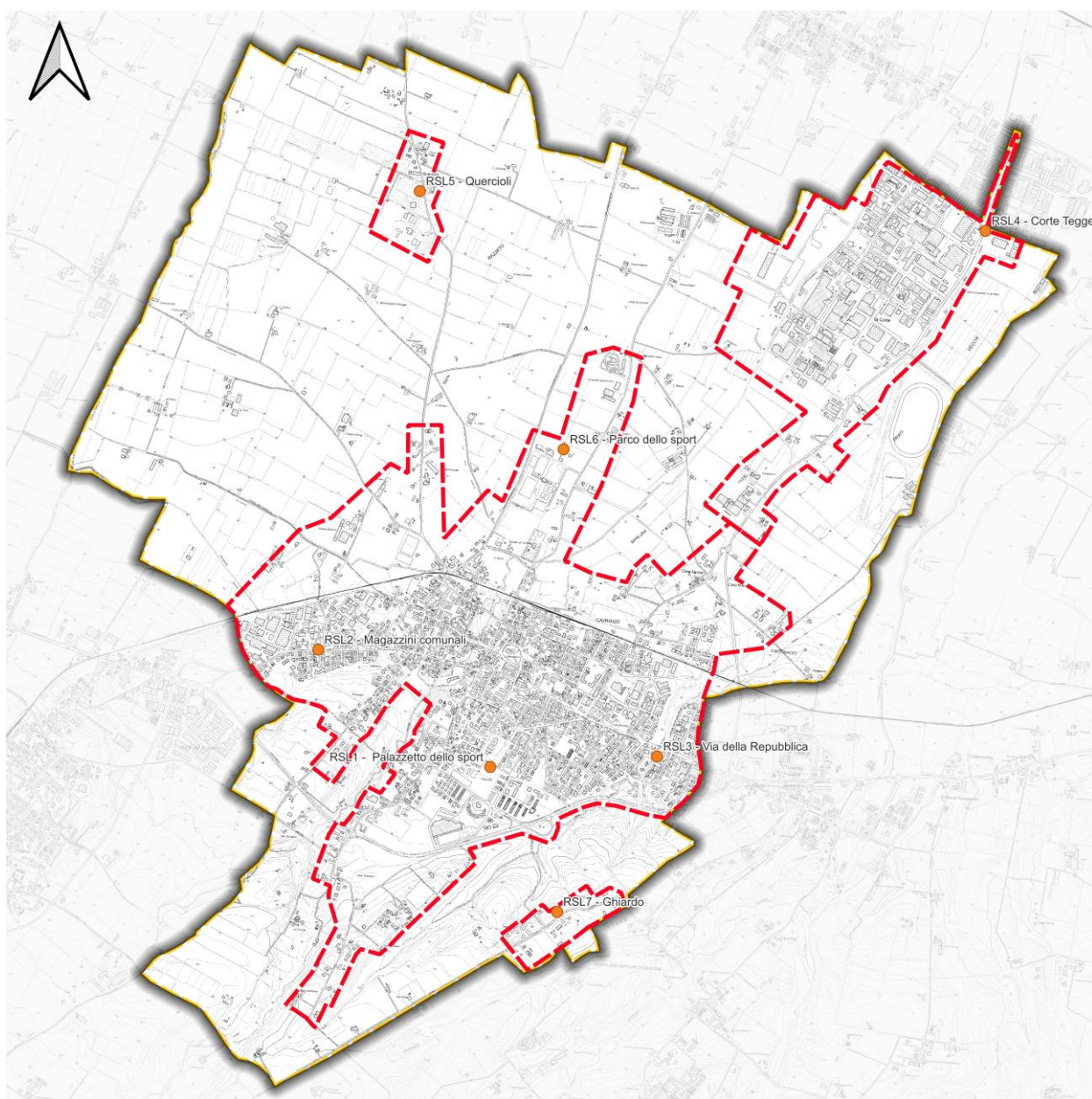


FIG. 9 – UBICAZIONE DELLE VERTICALI UTILIZZATE PER L'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE IN COMUNE DI CAVRIGLIO



Tutte le verticali delle misure dirette di Vs ottenute sono state opportunamente esaminate tenendo conto delle risultanze degli approfondimenti condotti nel precedente studio di microzonazione sismica di livello 2 (al quale si rimanda per i dettagli).

Per quanto riguarda il presente studio, l'analisi di risposta sismica locale è stata quindi effettuata su n° 7 verticali di indagine (cfr. Fig. 9) rappresentative di altrettante aree i cui modelli sismostratigrafici hanno consentito di affinare la zonazione effettuata nel precedente studio. Su 3 verticali di analisi è stata eseguita una misura della velocità delle onde S in funzione della profondità, tramite prova MASW congiuntamente a un'indagine HVSR, mentre su 1 verticale è stata eseguita una misura diretta delle Vs tramite prova sismica Down-Hole in foro. Per le restanti 3 verticali si è fatto riferimento a dati pregressi, in particolare alle indagini sismiche eseguite per lo studio di microzonazione sismica di 2° livello.

Nella seguente tabella si riporta un elenco dettagliato delle indagini sismiche utilizzate per ricavare i n° 7 modelli sismostratigrafici sui quali è stata eseguita l'analisi di risposta sismica locale:

Codice MS3 ³	Tipo prova	X ⁴	Y ⁴	Verticale modello sismostratigrafico	MOPS
035017P128	DH	145530	4958297	1 – Palazzetto dello sport	2001
035017L50	MASW	145514	4958341		
035017L32	MASW	145430	4958208		
035017L70	MASW	144562	4958939	2 – Magazzini comunali	2001
035017L10	MASW	144674	4958765		
035017L21	MASW	144592	4959165		
035017L22	MASW	144537	4959203		
035017L27	MASW	145098	4959329		
035017L71	MASW	146453	4958372	3 – Via della Repubblica	2001
035017L54	MASW	146483	4958030		
035017L36	MASW	146748	4959247		
035017L69	MASW	148255	4961262	4 – Corte Tegge	2001
035017L45	MASW	148188	4961075		
035017P3	DH	146988	4960587		
035017L42	MASW	147592	4961178	5 – Quercioli	2001
035017L39	MASW	145143	4961474		
035017L38	MASW	145073	4961789		
035017L23	MASW	145920	4960044	6 – Parco dello sport	2001
035017L48	MASW	144573	4959482		
035017L24	MASW	145748	4959709		
035017L25	MASW	145698	4959451	7 – Ghiardo	2001
035017L53	MASW	145913	4957517		

TAB. 3 - ELENCO DELLE PROVE SISMICHE UTILIZZATE PER L'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE SULLE N° 7 VERTICALI INDIVIDUATE PER IL COMUNE DI CAVRIAGO

⁴ Coordinate espresse nel sistema WGS84 / UTM zona 33 N

Si ribadisce che l'analisi di risposta sismica locale è stata sviluppata con riferimento allo stato limite SLV utilizzando un tempo di ritorno di 475 anni.

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 (cfr. Tab. 4):

$a_{ref,g} (a_g/g)$
$0.125 < a_{ref,g} < 0.175$

TAB. 4 – VALORI DI A_{REFG} (10% DI PROBABILITÀ IN 50 ANNI)

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 tutte le verticali sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo 15831 (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.

⁵ R.E.R. (eucentre.it)



M _w	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.20	29.90	2.01 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.32 %	NGA RSN146 COYOTELK G01320.AT2
6.69	17.07	1.02 %	NGA RSN1091 NORTHV VAS000.AT2
5.60	18.00	0.97 %	ESM IT.LRS..HNE.D.19980909.112800.C.ACC.ASC
6.20	78.79	2.69 %	NGA RSN2989 CHICHI.05 CHY102N.AT2
6.60	31.00	0.62 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.50	57.74	3.31 %	NGA RSN8167 SANSIMEO DCP247.AT2

TAB. 5 – SISMI ESTRATTI RIFERITI AL NODO 15831

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 spinta in profondità fino a raggiungere il *bedrock* sismico, che teoricamente dovrebbe essere uno strato con velocità $V_s > 800$ m/s.

A proposito della definizione del *bedrock* sismico, si rimanda al paragrafo 4.1 in cui la questione viene discussa approfonditamente.

3.3.1. Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati sia i dati pregressi disponibili d'archivio redatto durante lo studio di microzonazione sismica di 2° livello e sia quelli acquisiti da archivio comunale, integrati con i dati stratigrafici del sondaggio a carotaggio continuo realizzato *ex-novo*.

Alcune valutazioni in merito agli spessori sono state inoltre eseguite mediante i risultati delle indagini sismiche appositamente realizzate durante il presente studio (cfr. par. 2).

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 alla misura della prova Down-Hole spinta fino alla profondità di 30 m e, per i livelli inferiori, delle prove MASW integrate con i dati delle prove HVSR, utili per la definizione del *bedrock* sismico.

Sono stati utilizzati, inoltre, i risultati delle indagini sismiche pregresse (di tipo MASW, ReMi e HVSR) acquisite da archivio comunale e/o già inserite nel precedente studio di MS.

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.

La gran parte delle prove HVSR effettuate hanno evidenziato picchi di ampiezza significativa associabili al contrasto di impedenza dovuto al passaggio tra la copertura coesiva e i sottostanti depositi granulari. E dal momento che questo passaggio si verifica quasi sempre nei primi metri di profondità, detti picchi sono caratterizzati da frequenze elevate.

Per tale motivo, individuare a scala comunale superfici di impedenza a media profondità è perlopiù proibitivo.

Del resto, un recente studio (Mascandola et al., 2018), condotto a scala sovraregionale proprio per individuare il tetto del *bedrock* sismico in Pianura Padana, conclude che tale tetto non può essere identificato con un'unica superficie di discontinuità in quanto varia arealmente in funzione del grado di consolidazione dei sedimenti, che a sua volta dipende dal carico litostatico e dal grado di deformazione e quindi dall'evoluzione stratigrafica e tettonica locale.

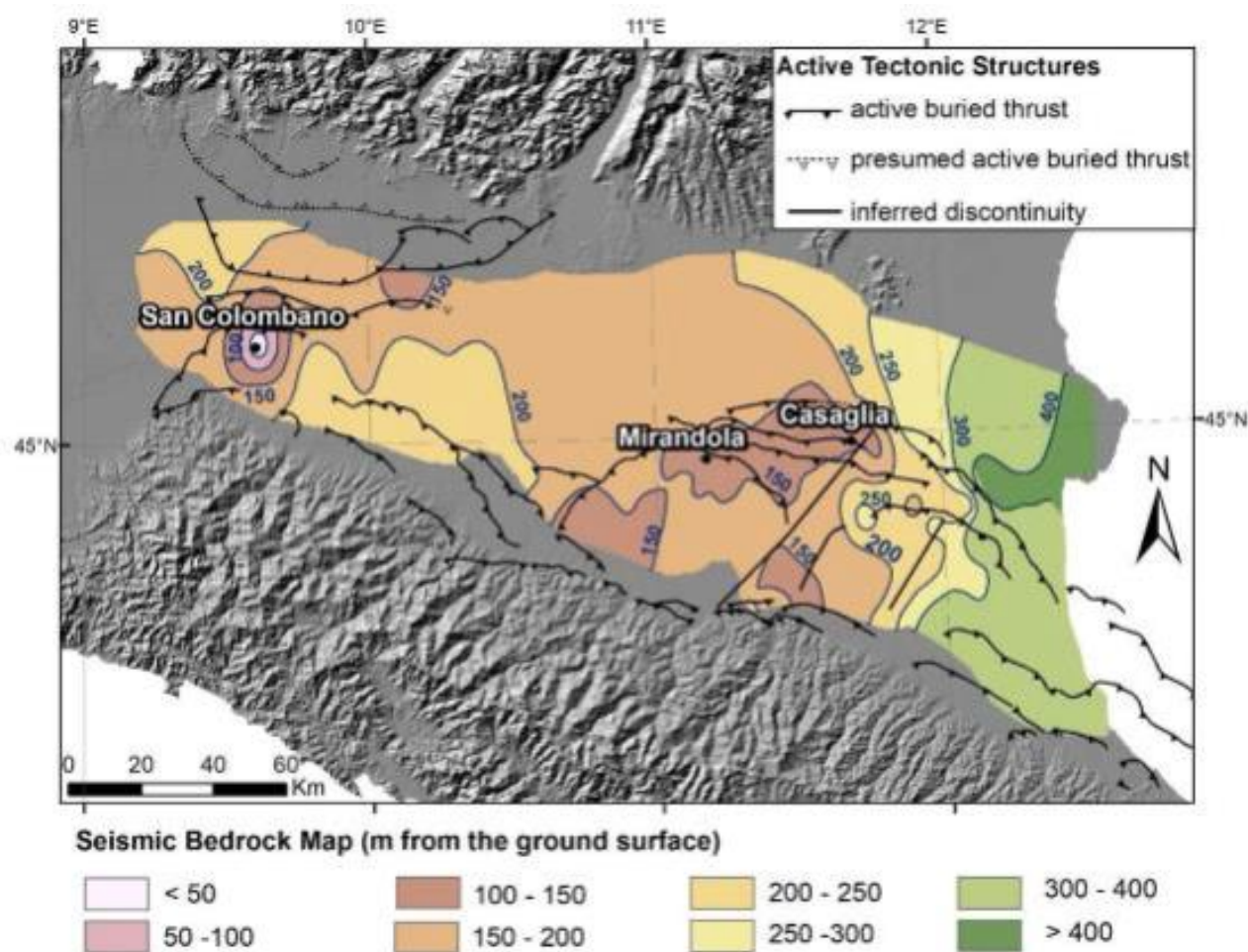


FIG. 10 – MAPPA DELLA PROFONDITÀ DEL *BEDROCK* SISMICO (DA MASCANDOLA ET AL., 2018)

Alla luce di quanto sopra affermato e come già evidenziato nel precedente studio di 2° livello, al quale si rimanda per i dettagli, si è assimilato al *bedrock* sismico il primo orizzonte di depositi prevalentemente grossolani di conoide alluvionale (ghiaie, ghiaie sabbiose, sabbie ghiaiose, limi sabbioso-ghiaiosi), generalmente di spessore $H > 5\text{m}$, in virtù del fatto che presentano generalmente valori di V_s molto maggiori di quelli dei terreni fini soprastanti.

Tali depositi, come mostra lo stralcio della sezione 36 (cfr. Fig. 11), tratta dal sito web del Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna, che attraversa il settore orientale del Comune con andamento SW-NE, sono riferibili

al Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), con spessori generalmente in diminuzione verso settentrione da oltre 15 a meno di 10 m; nel settore industriale di Corte Tegge dove, alle quote inferiori, il primo orizzonte di depositi grossolani è riferibile al Subsintema di Ravenna (AES8).

In tutte le verticali studiate, pertanto, il *bedrock* è di tipo non rigido e presenta $V_s < 800$ m/s.

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

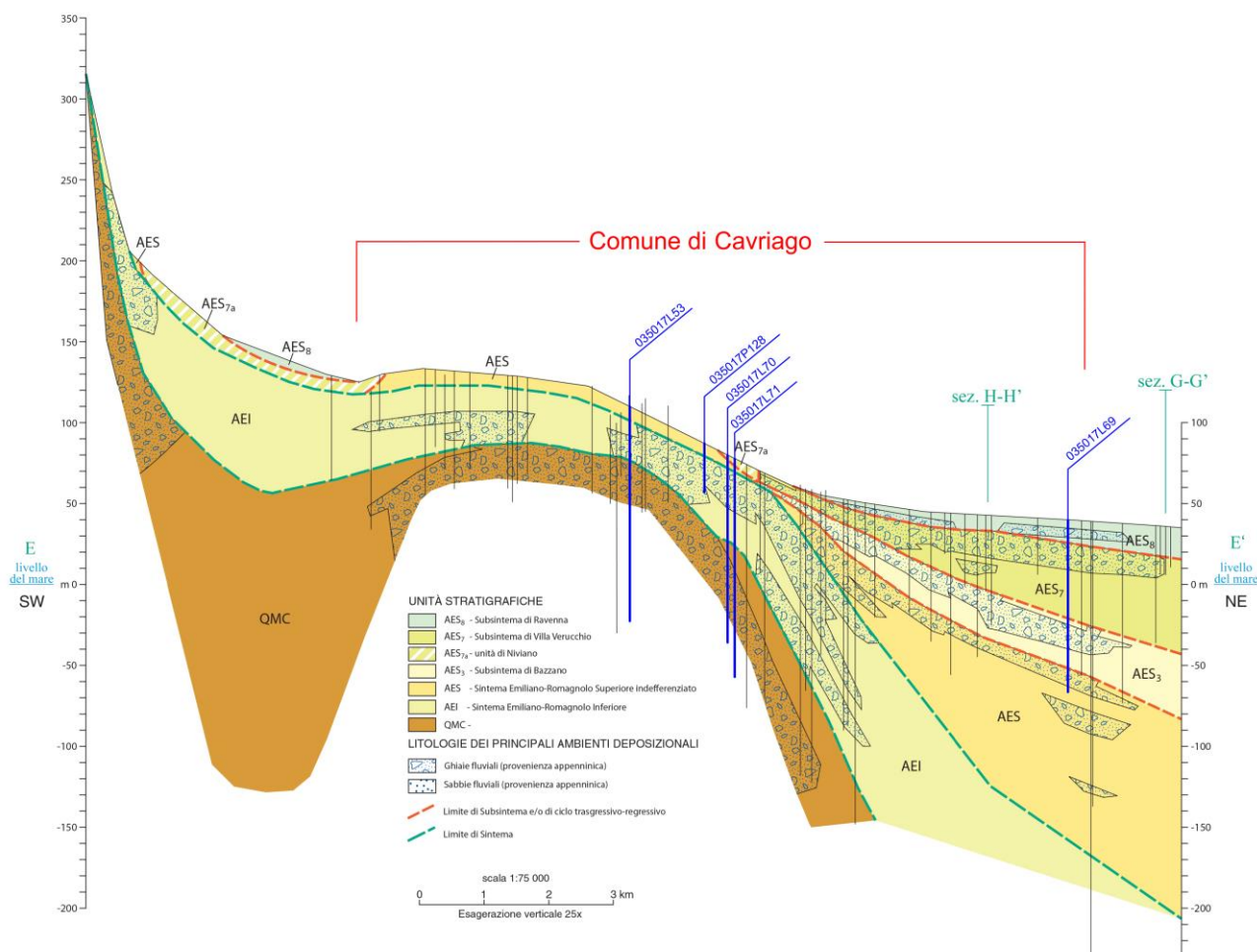


FIG. 11 – STRALCIO DELLA SEZIONE 36 TRATTA DAL SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA CON INDICATE LE PROVE REALIZZATE EX-NOVO PER IL PRESENTE STUDIO IN COMUNE DI CAVRIAGO

3.3.3. Curva di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (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 (rigidezza, 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.

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

Tipo di curva	Litologia	α	β	η	λ
Vucetic & Dobry PI=30	Argilla e limo	5.12	0.81	30.24	3.06
Vucetic & Dobry PI=15	Argilla e limo	9.52	0.82	25.96	2.32
Sand Seed & Idriss	Sabbia	14.12	0.93	27.50	3.14

TAB. 6 – RIEPILOGO DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DELLE CURVE DA LETTERATURA

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

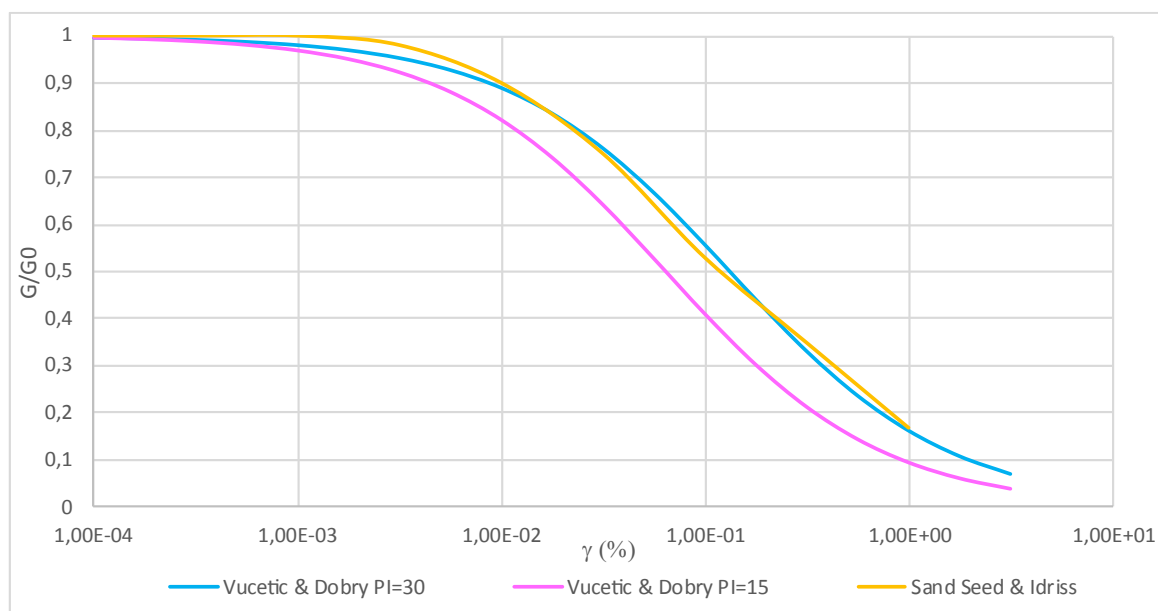


FIG. 12 – GRAFICO DELLE CURVE G/G_0 IN FUNZIONE DELLA DEFORMAZIONE

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.

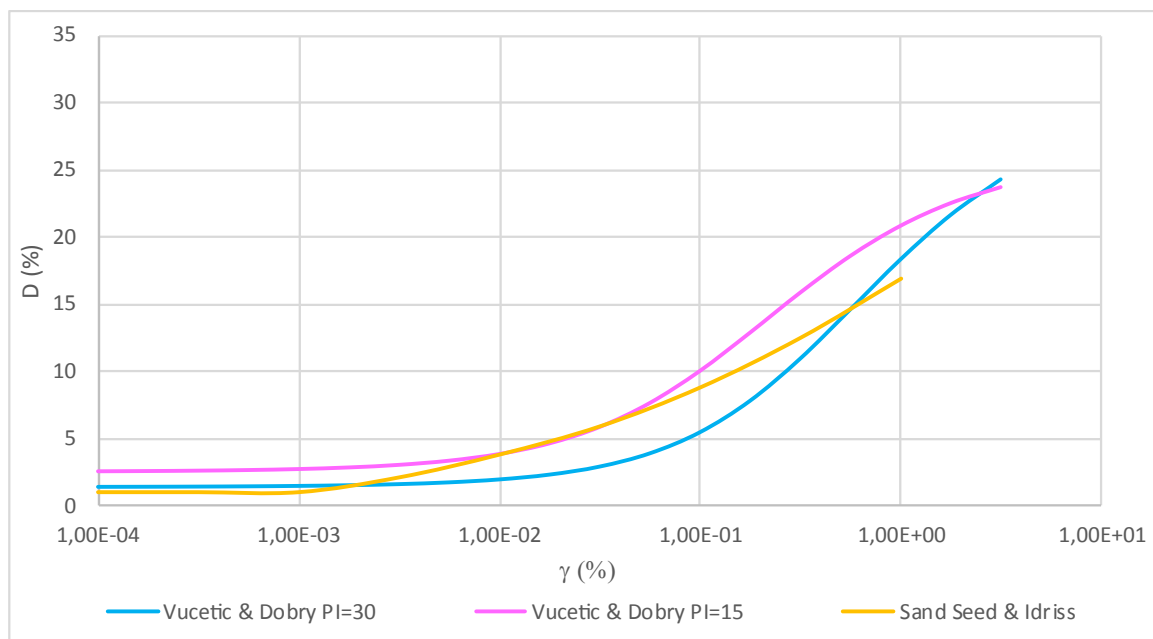


FIG. 13 - GRAFICO DELLE CURVE D IN FUNZIONE DELLA DEFORMAZIONE

3.4. 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. 5.2.0 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.

3.4.1. 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 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;

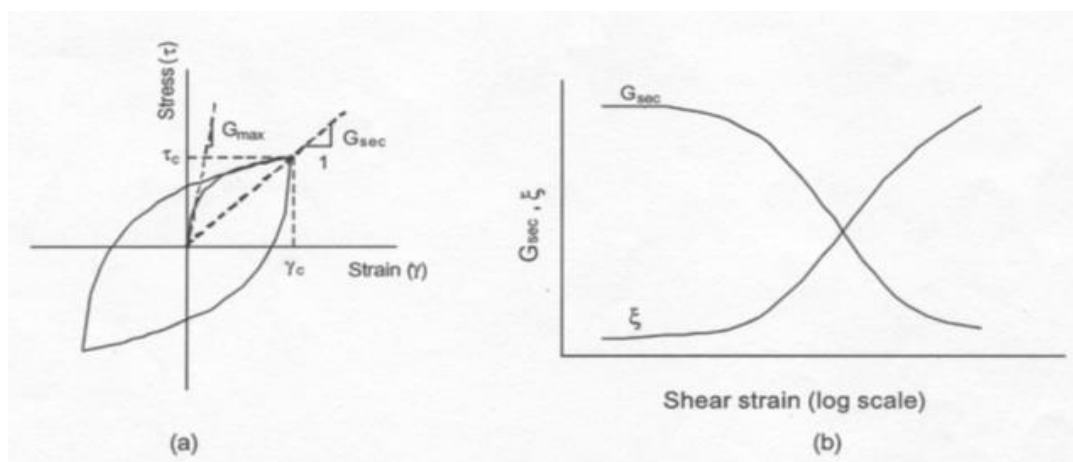


FIG. 14 – MODELLO LINEARE EQUIVALENTE A) CURVE TENSIONE – DEFORMAZIONI; B) VARIAZIONE DEL MODULO

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 .

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:

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

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. 14 b).

3.4.2. 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 (cfr. Fig. 14) 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;

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

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

dove:

Δt = incremento temporale tra l'istante di tempo tn e $tn - 1$

β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25

γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50

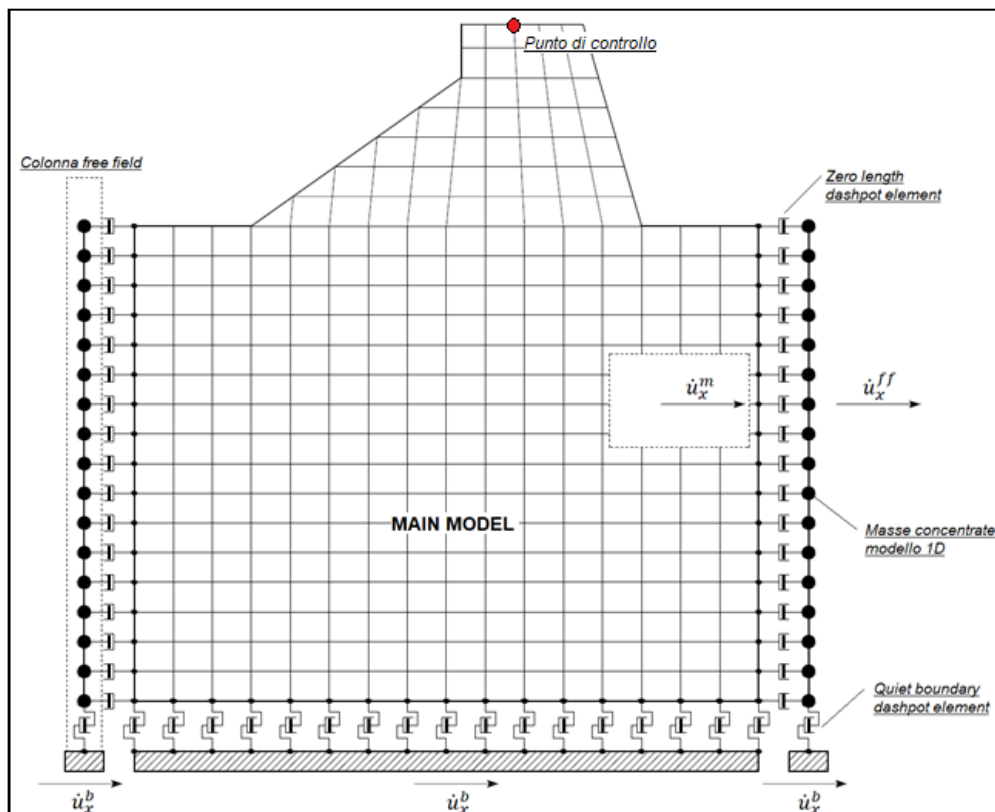


FIG. 15 – DISCRETIZZAZIONE FEM DEL TERRENO

3.4.3. 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:

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

dove:

- α_q e β_q = coefficienti di smorzamento alla Rayleigh;

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.

3.4.4. 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 rigidità 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 ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$).

3.4.5. 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.

3.5. Analisi dei risultati

I risultati delle analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.2.0 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per i siti in esame:

- La funzione di trasferimento del segnale sismico dal *bedrock* alla superficie;
- Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione con smorzamento $\zeta=5\%$ (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:

$$\begin{aligned} FH_{IS\ 0.1-0.5} &= \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt} \\ FH_{IS\ 0.5-1.0} &= \frac{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt} \end{aligned}$$

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

- 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:

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

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

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

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

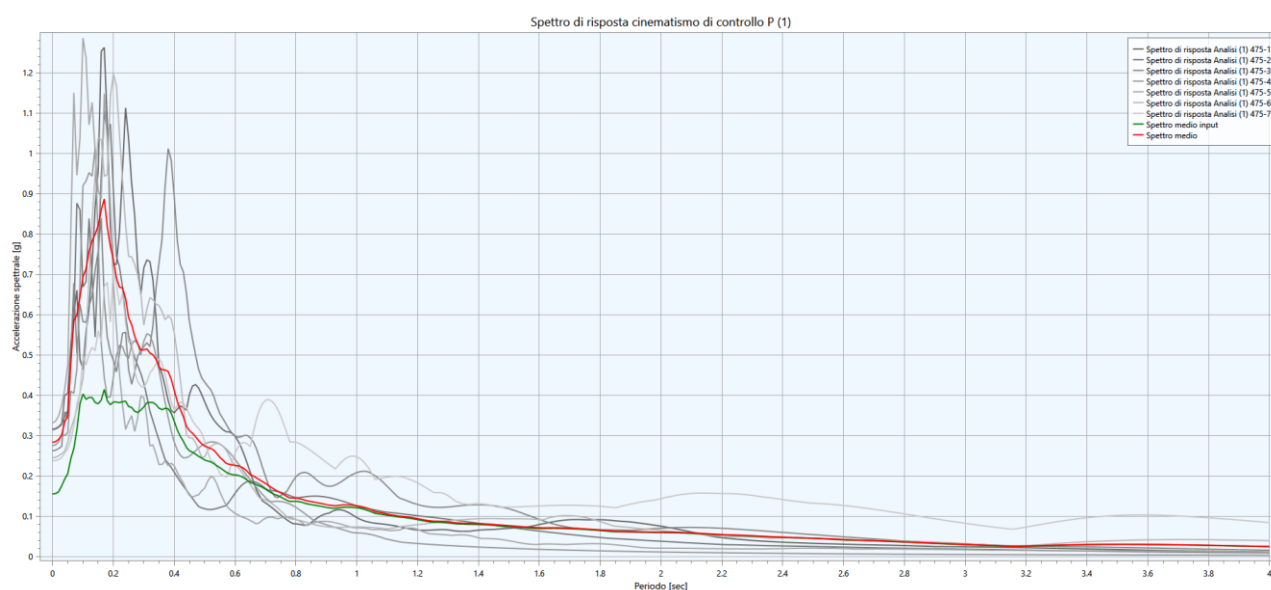


FIG. 16 – ESEMPIO DI SPETTRO ELASTICO IN ACCELERAZIONE (IN GRIGIO GLI SPETTRI DEI SINGOLI ACCELEROGRAMMI, IN VERDE LO SPETTRO MEDIO DI INPUT, IN ROSSO LO SPETTRO MEDIO DI OUTPUT)

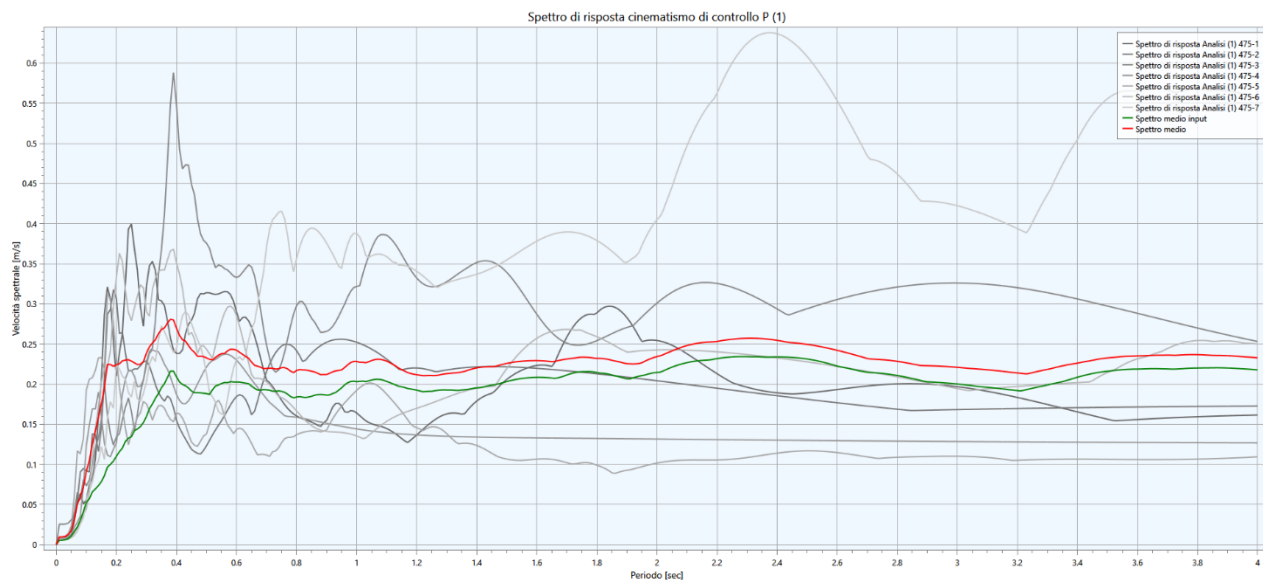


FIG. 17 - SPETTRO ELASTICO IN VELOCITÀ (IN GRIGIO GLI SPETTRI DEI SINGOLI ACCELEROGRAMMI, IN VERDE LO SPETTRO MEDIO DI INPUT, IN ROSSO LO SPETTRO MEDIO DI OUTPUT)

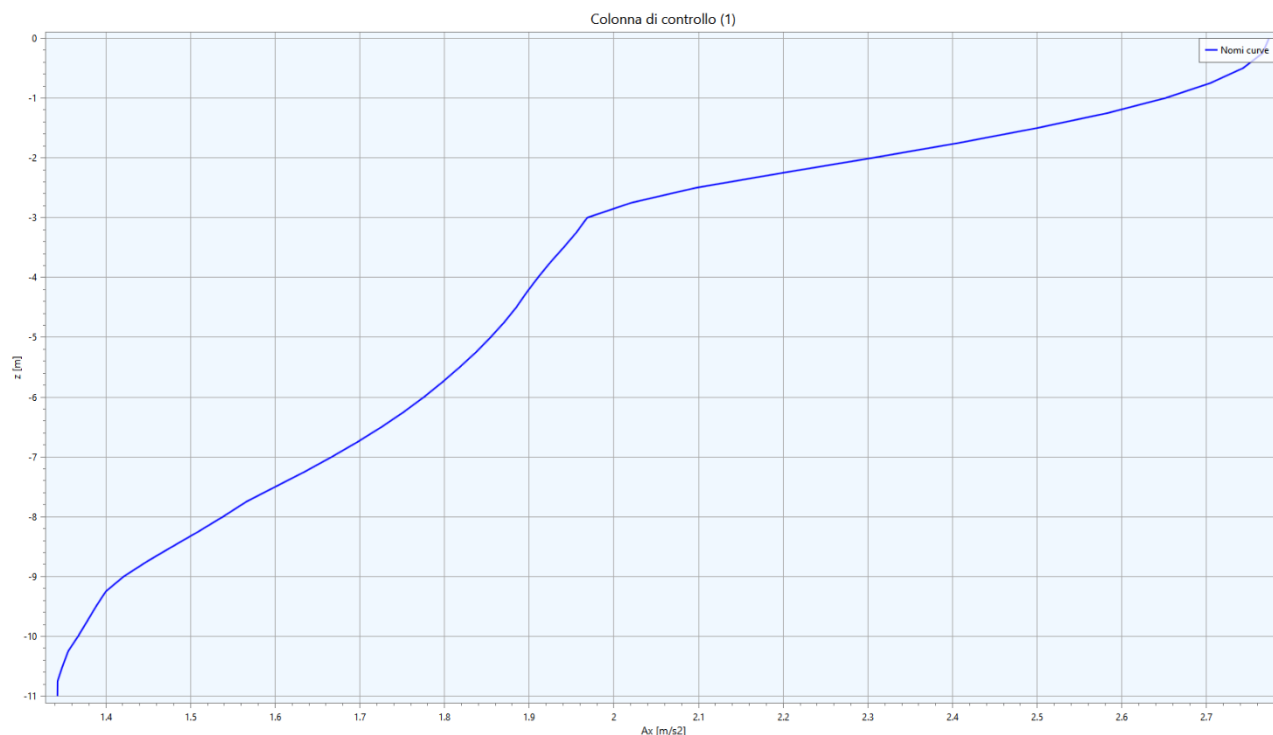


FIG. 18 - VARIAZIONE DELL'ACCELERAZIONE CON LA PROFONDITÀ

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.

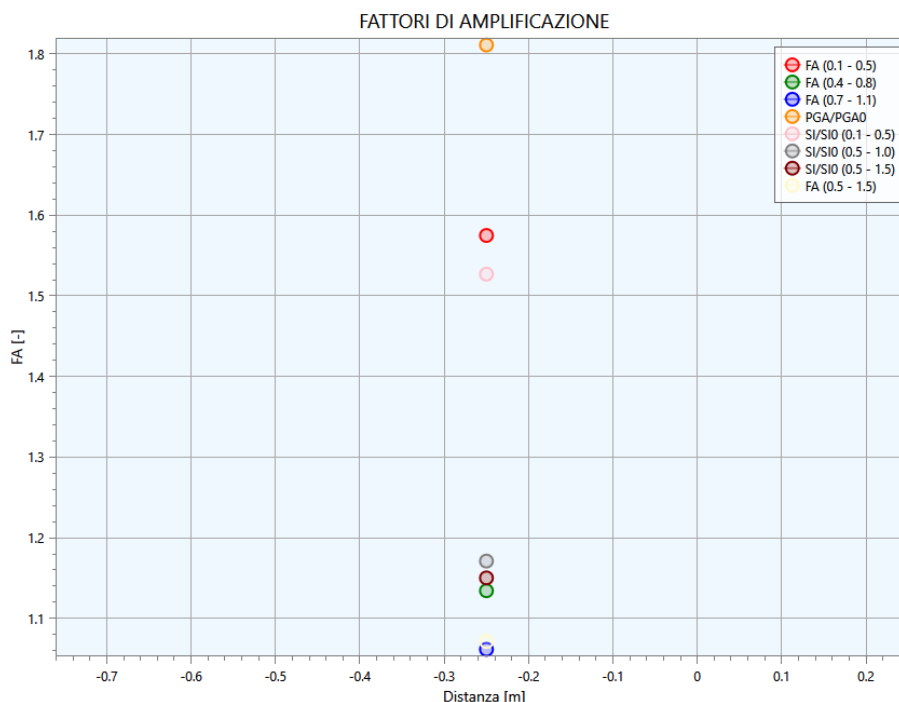


FIG. 19 – GRAFICO DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

3.5.1. 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 ⁸ con il metodo di Newmak-Hall⁹.

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;

⁸ 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 .

⁹ Newmark NM, Hall WJ, Earthquake Spectra and Design, EERI Monograph Series, 1982.

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

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

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

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

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

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

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

- 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)

$$d. \quad 0 \leq T \leq T_B \quad S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta * F_0} * \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$e. \quad T_B \leq T \leq T_C \quad S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0$$

$$f. \quad T_C \leq T \leq T_D \quad S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

3.6. Modelli e risultati della modellazione numerica

Di seguito vengono presentati in dettaglio i modelli sismostratigrafici adottati ed i risultati delle analisi effettuate sulle 7 verticali rappresentative delle aree studiate.

Gli spettri medi di risposta in accelerazione e lo spettro normalizzato vengono messi a confronto con lo spettro da normativa relativo alla categoria sismica di quel sito.

3.6.1. RSL.1 per il sito “Palazzetto dello sport”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-3.00	3.00	18.00	170	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-3.00	-11.00	8.00	19.00	300	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-11.00	-	-	22.00	560	-

TAB. 7 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “PALAZZETTO DELLO SPORT”

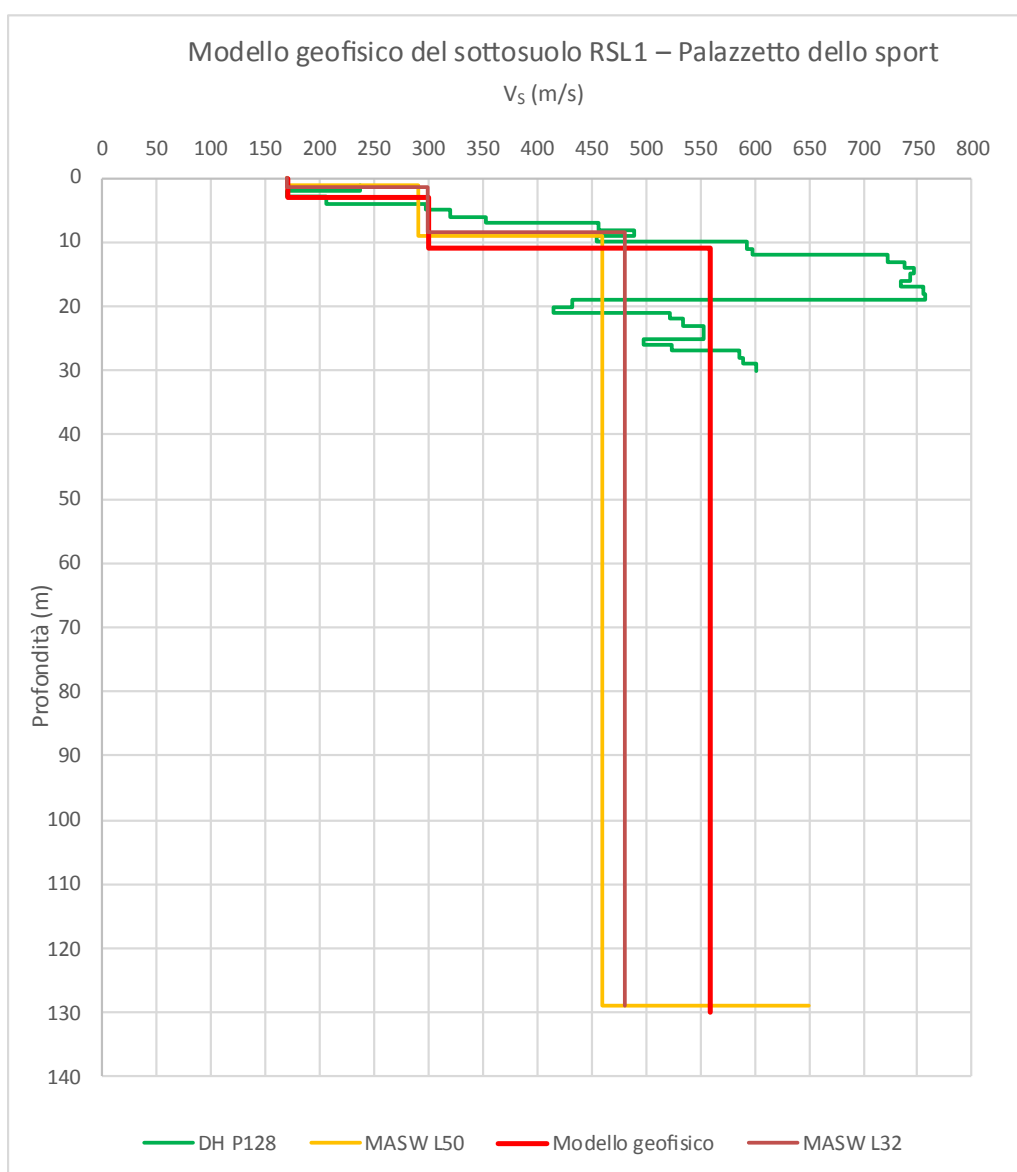


FIG. 20 – DISCRETIZZAZIONE DELLA V_s LUNGO LA VERTICALE “PALAZZETTO DELLO SPORT”

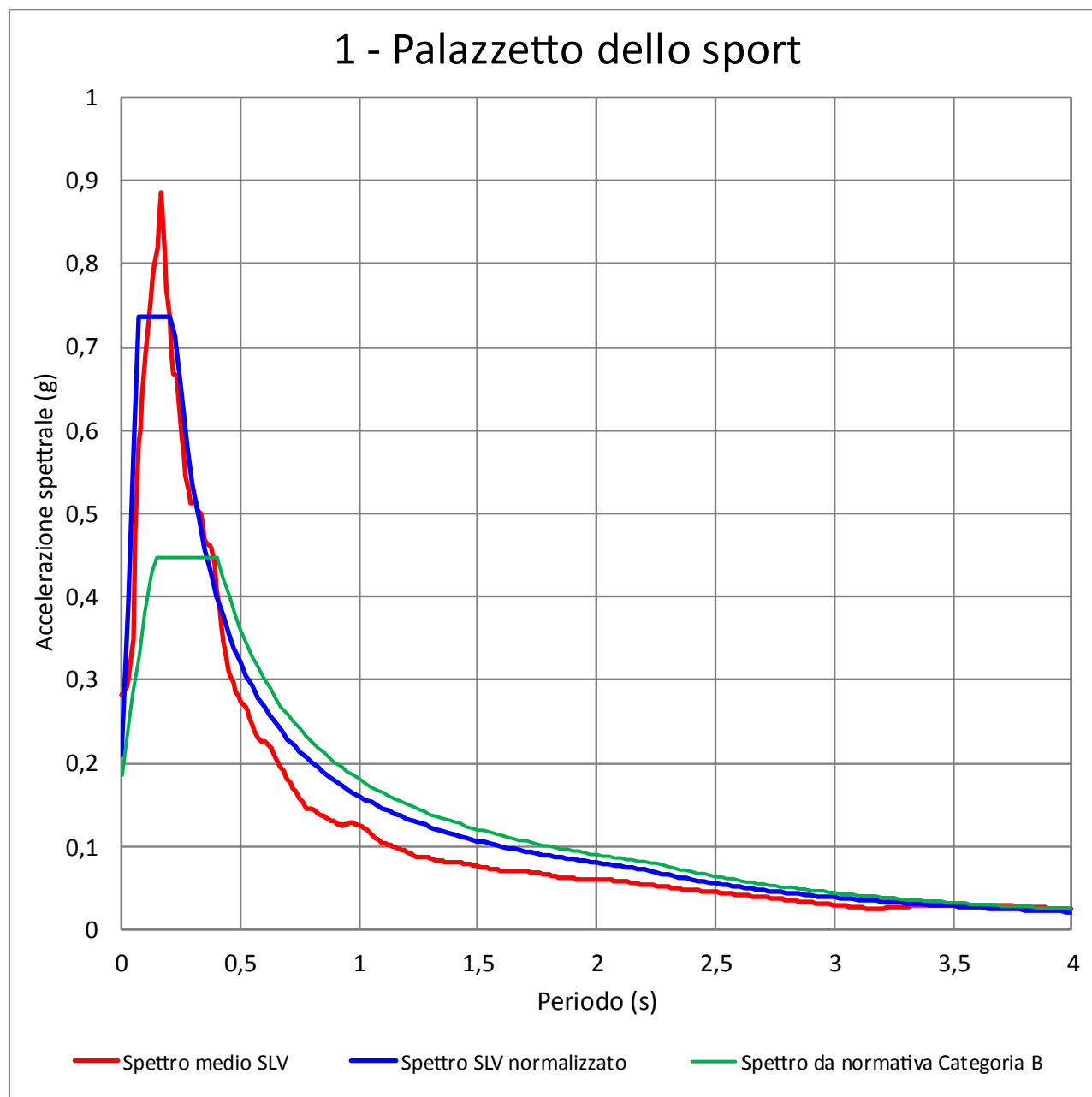


FIG. 21 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "PALAZZETTO DELLO SPORT" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.210	3.507	0.153	1.000	1.000	0.073	0.218	2.172	1.420

TAB. 8 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "PALAZZETTO DELLO SPORT"

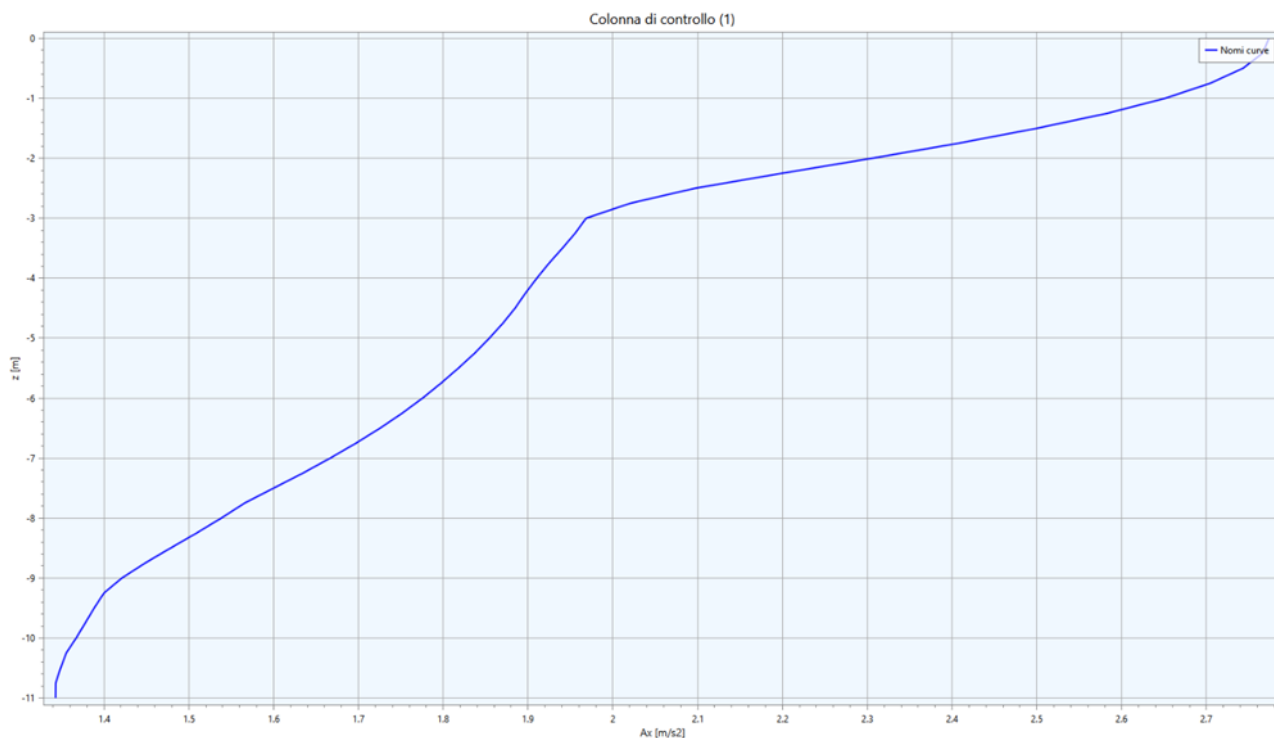


FIG. 22 - ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "PALAZZETTO DELLO SPORT"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.57	1.70	-7.65%
FA (0.4-0.8 s)	1.13	1.90	-40.53%
FA (0.7-1.1 s)	1.06	2.30	-53.91%
FA (0.5-1.5 s)	1.07	2.10	-49.05%
PGA/PGA ₀	1.81	1.60	13.13%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.52	1.70	-10.59%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.17	2.10	-44.29%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.15	2.00	-42.50%

TAB. 9 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "PALAZZETTO DELLO SPORT"

3.6.2. RSL.2 per il sito "Magazzini comunali"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-3.00	3.00	18.00	200	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-3.00	-9.00	6.00	19.00	340	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-9.00	-	-	22.00	500	-

TAB. 10 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "MAGAZZINI COMUNALI"

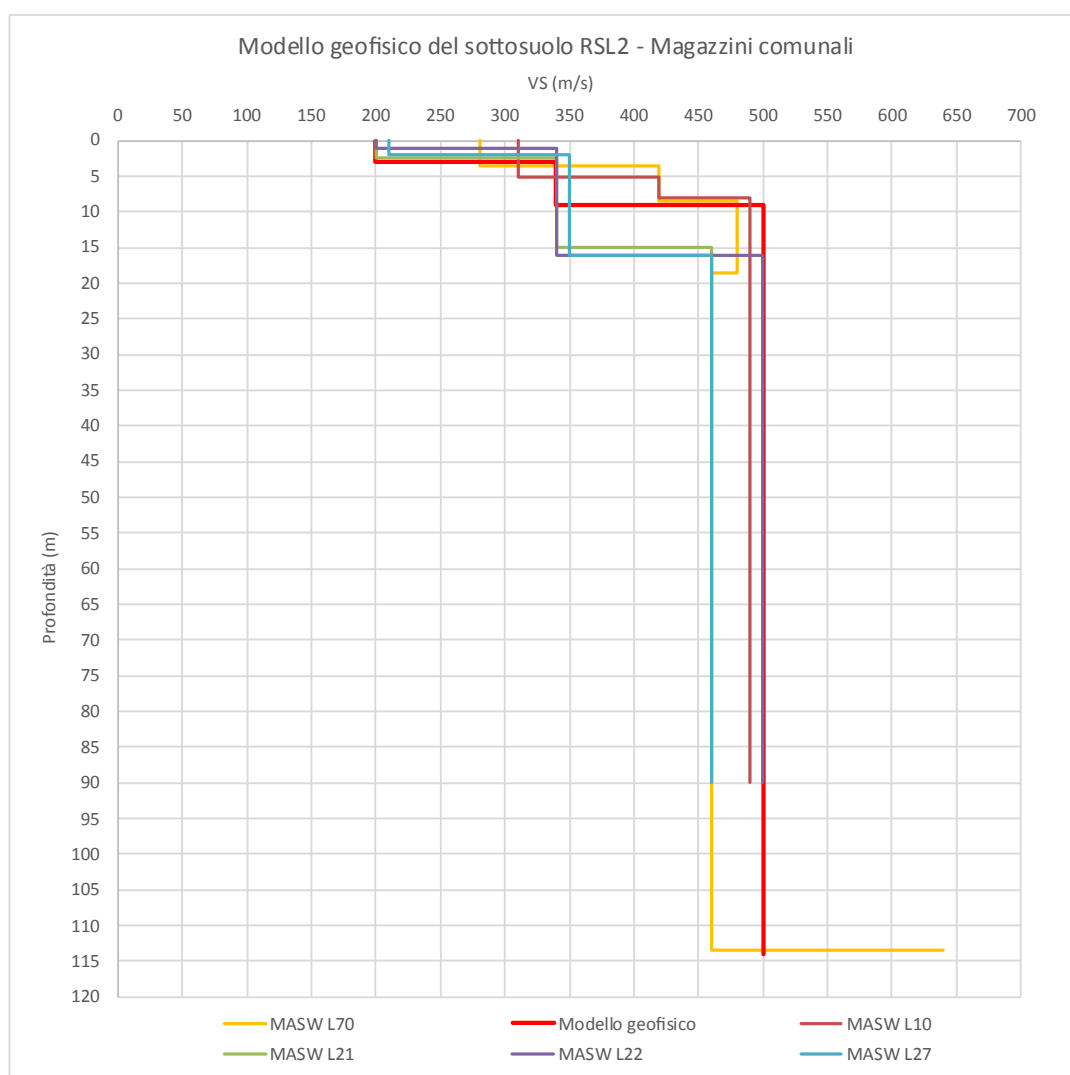


FIG. 23 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "MAGAZZINI COMUNALI"

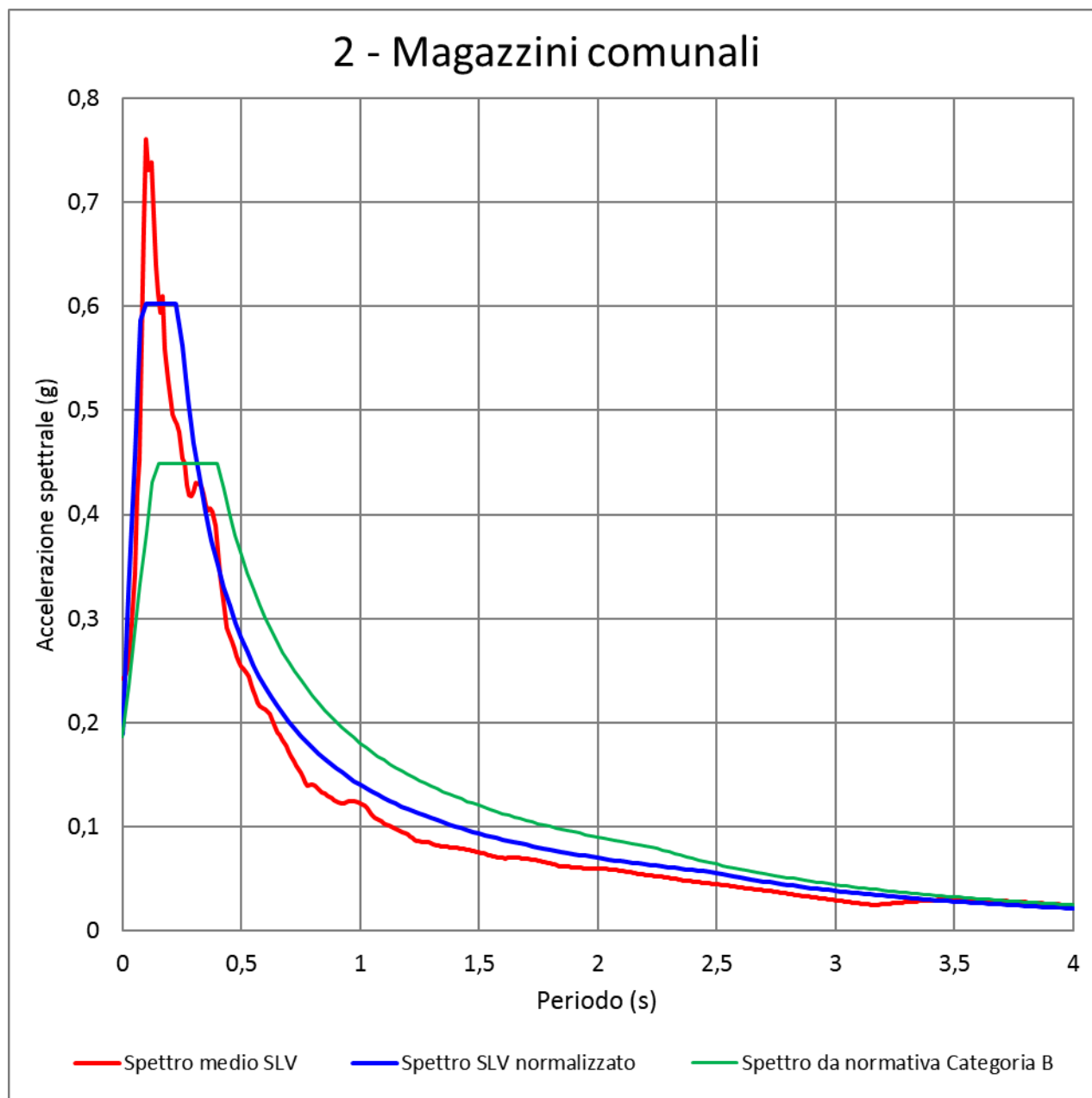


FIG. 24 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "MAGAZZINI COMUNALI" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.190	3.171	0.165	1.000	1.000	0.078	0.234	2.465	1.420

TAB. 11 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "MAGAZZINI COMUNALI"

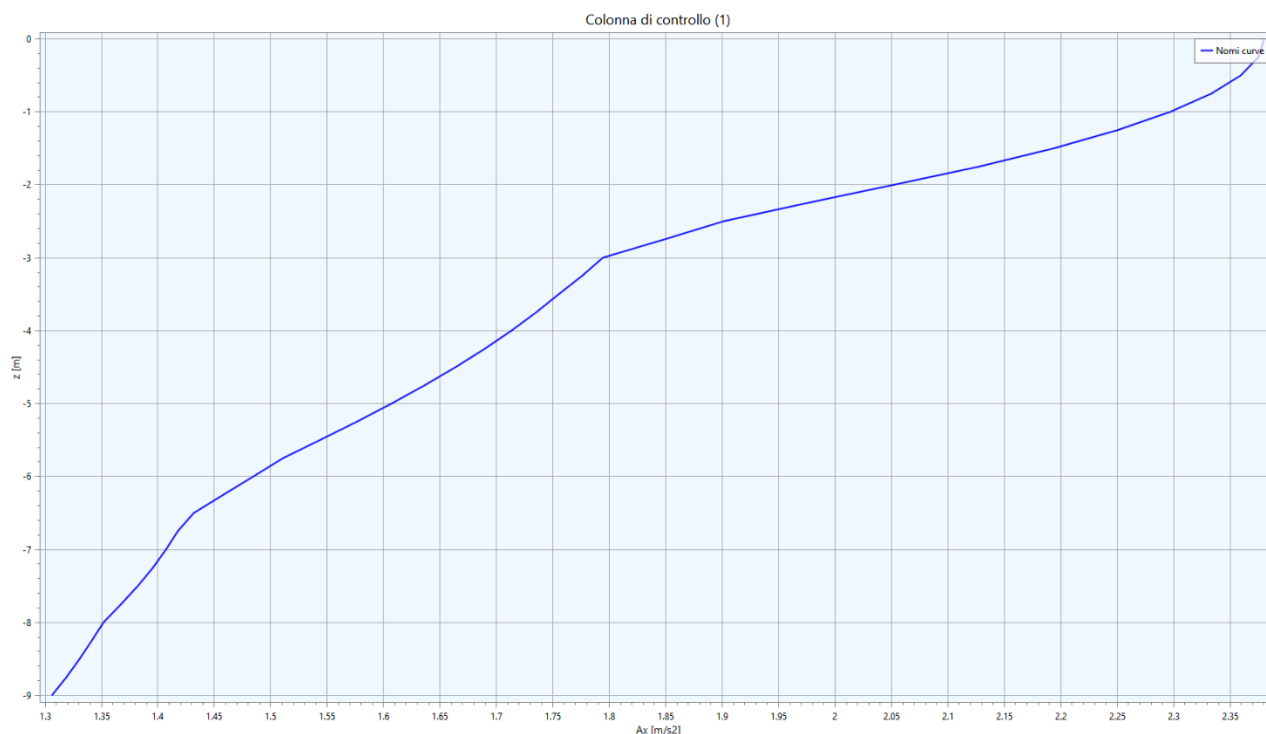


FIG. 25 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “MAGAZZINI COMUNALI”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.30	1.70	-23.53%
FA (0.4-0.8 s)	1.05	1.90	-44.74%
FA (0.7-1.1 s)	1.03	2.30	-55.22%
FA (0.5-1.5 s)	1.03	2.10	-50.95%
PGA/PGA ₀	1.55	1.60	-3.13%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.26	1.70	-25.88%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.07	2.10	-49.05%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.07	2.00	-46.50%

TAB. 12 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “MAGAZZINI COMUNALI”

3.6.3. RSL.3 per il sito “Via della Repubblica”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-2.50	2.50	18.00	140	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-2.50	-13.00	10.50	19.00	300	Sand Seed & Idriss (1970)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Bedrock	-13.00	-	-	22.00	550	-

TAB. 13 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “VIA DELLA REPUBBLICA”

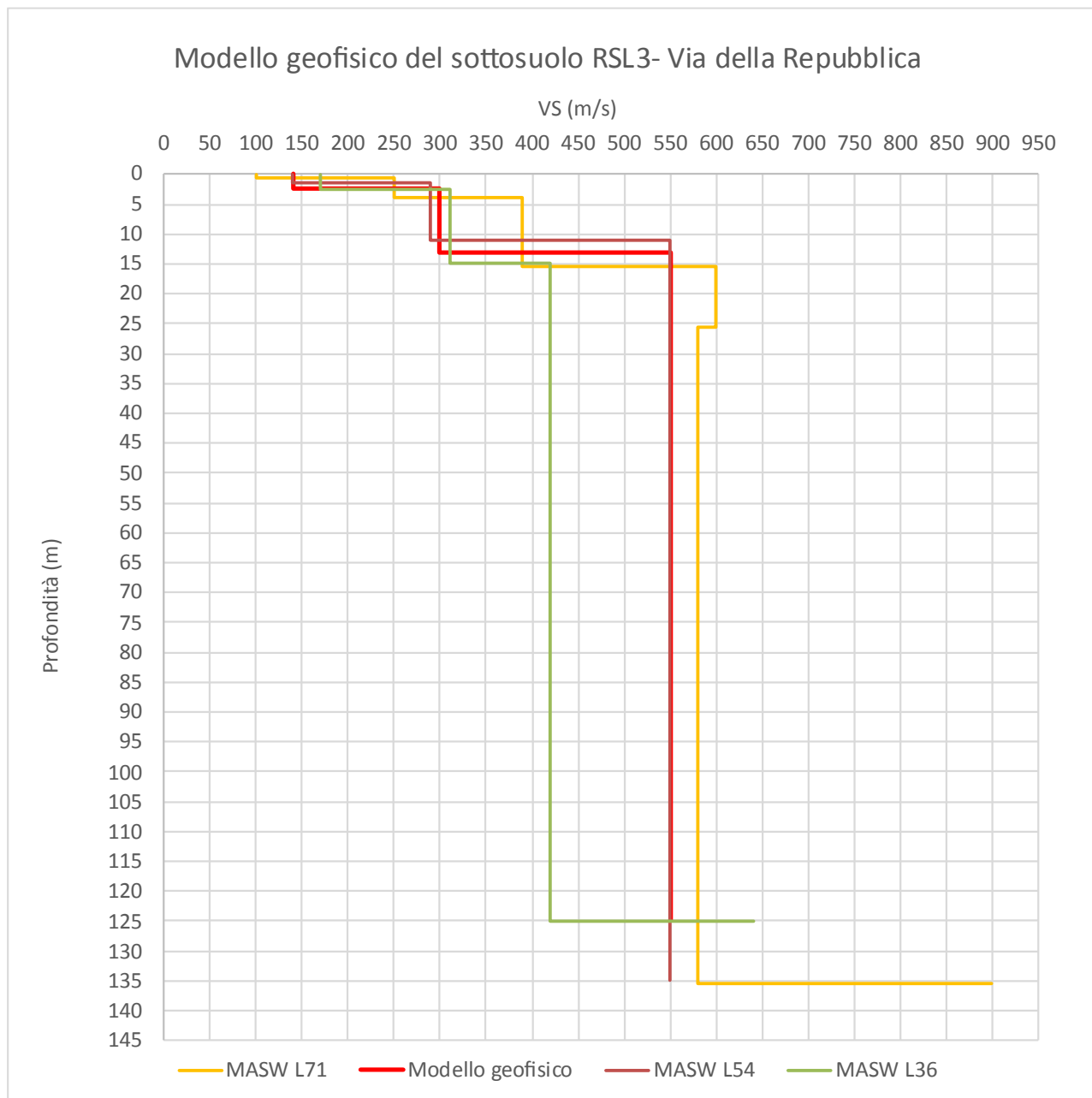


FIG. 26 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE “VIA DELLA REPUBBLICA”

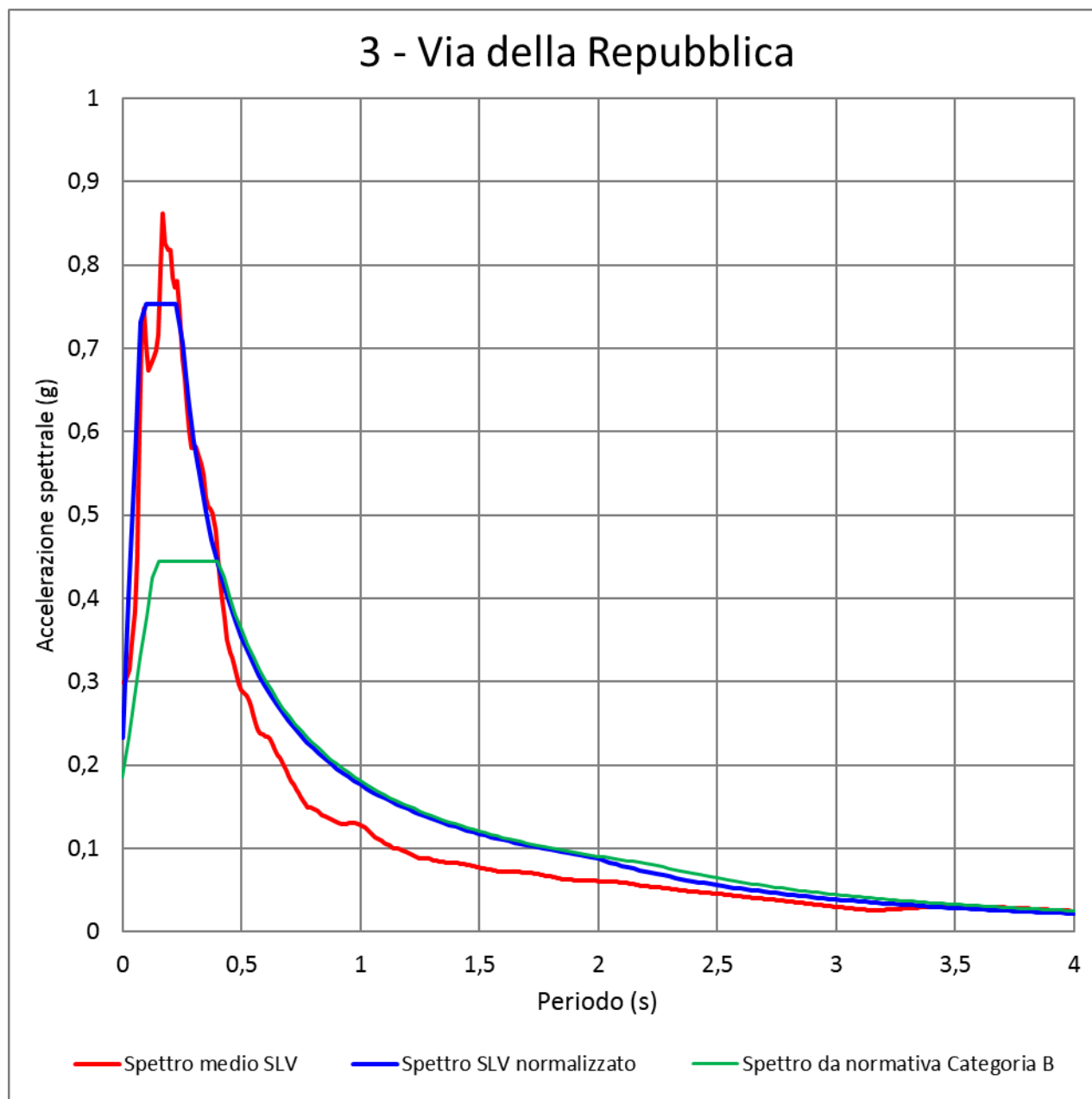


FIG. 27 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "VIA DELLA REPUBBLICA" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.232	3.244	0.165	1.000	1.000	0.078	0.234	1.982	1.420

TAB. 14 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "VIA DELLA REPUBBLICA"

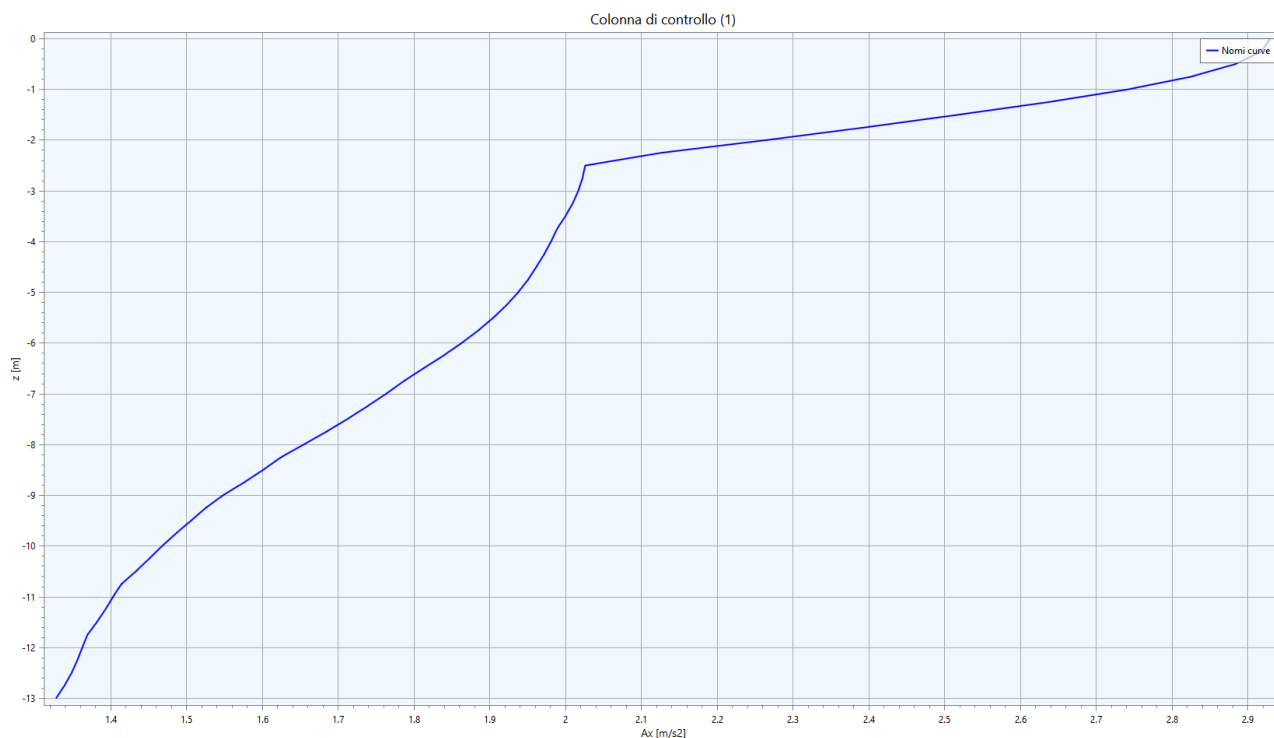


FIG. 28 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “VIA DELLA REPUBBLICA”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.66	1.70	-2.35%
FA (0.4-0.8 s)	1.20	1.90	-36.84%
FA (0.7-1.1 s)	1.09	2.30	-52.61%
FA (0.5-1.5 s)	1.10	2.10	-47.62%
PGA/PGA ₀	1.91	1.60	19.17%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.26	1.70	-25.88%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.07	2.10	-49.05%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.07	2.00	-46.50%

TAB. 15 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “VIA DELLA REPUBBLICA”

3.6.4. RSL.4 per il sito “Corte Tegge”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-2.00	2.00	18.00	120	Vucetic & Dobry, PI=30
Limo	-2.00	-8.00	6.00	18.50	210	Vucetic & Dobry, PI=15

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Sabbia	-8.00	-13.00	5.00	19.00	170	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-13.00	-	-	22.00	480	-

TAB. 16 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “CORTE TEGGE”

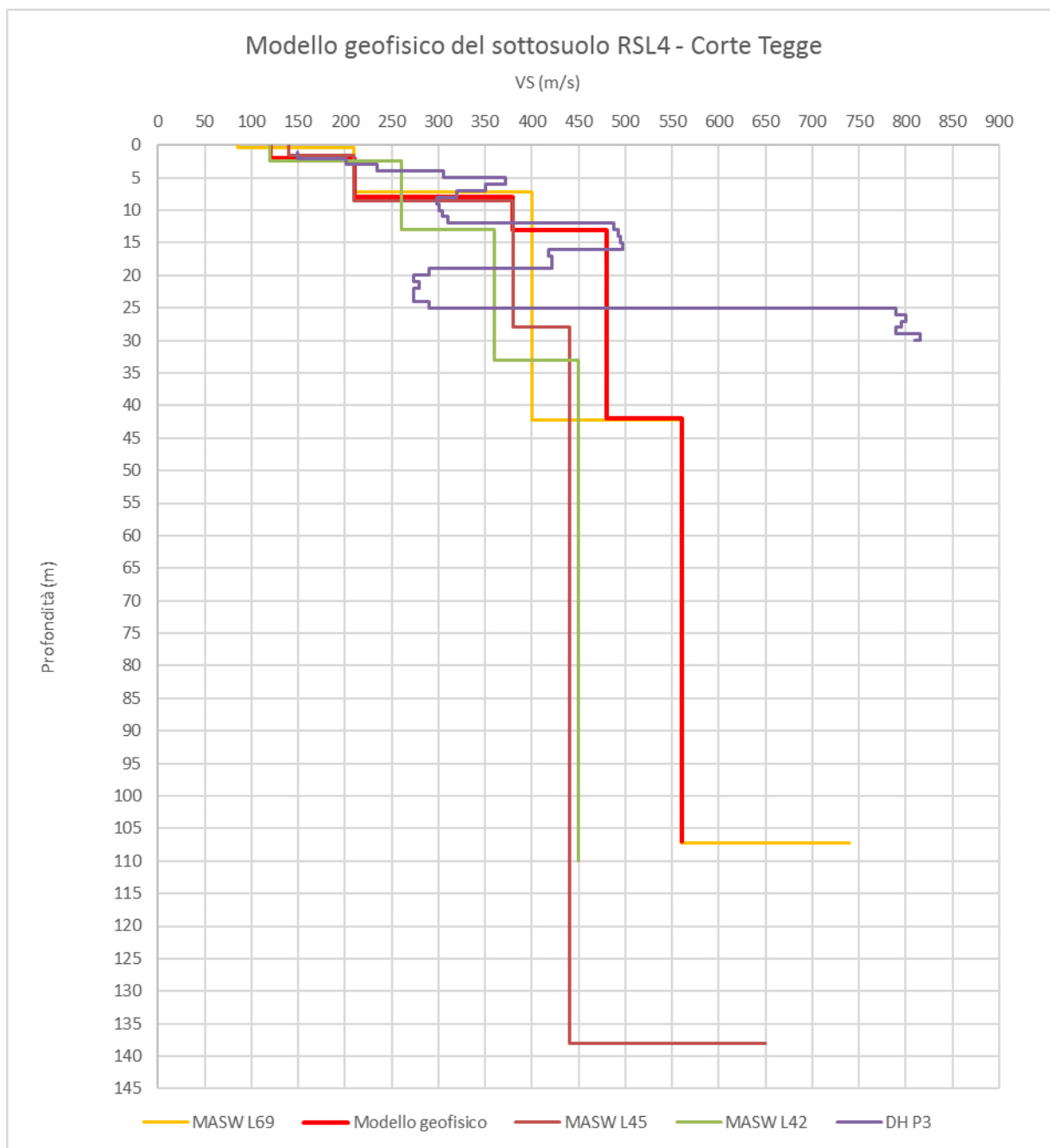


FIG. 29 – DISCRETIZZAZIONE DELLA V_s LUNGO LA VERTICALE “CORTE TEGGE”

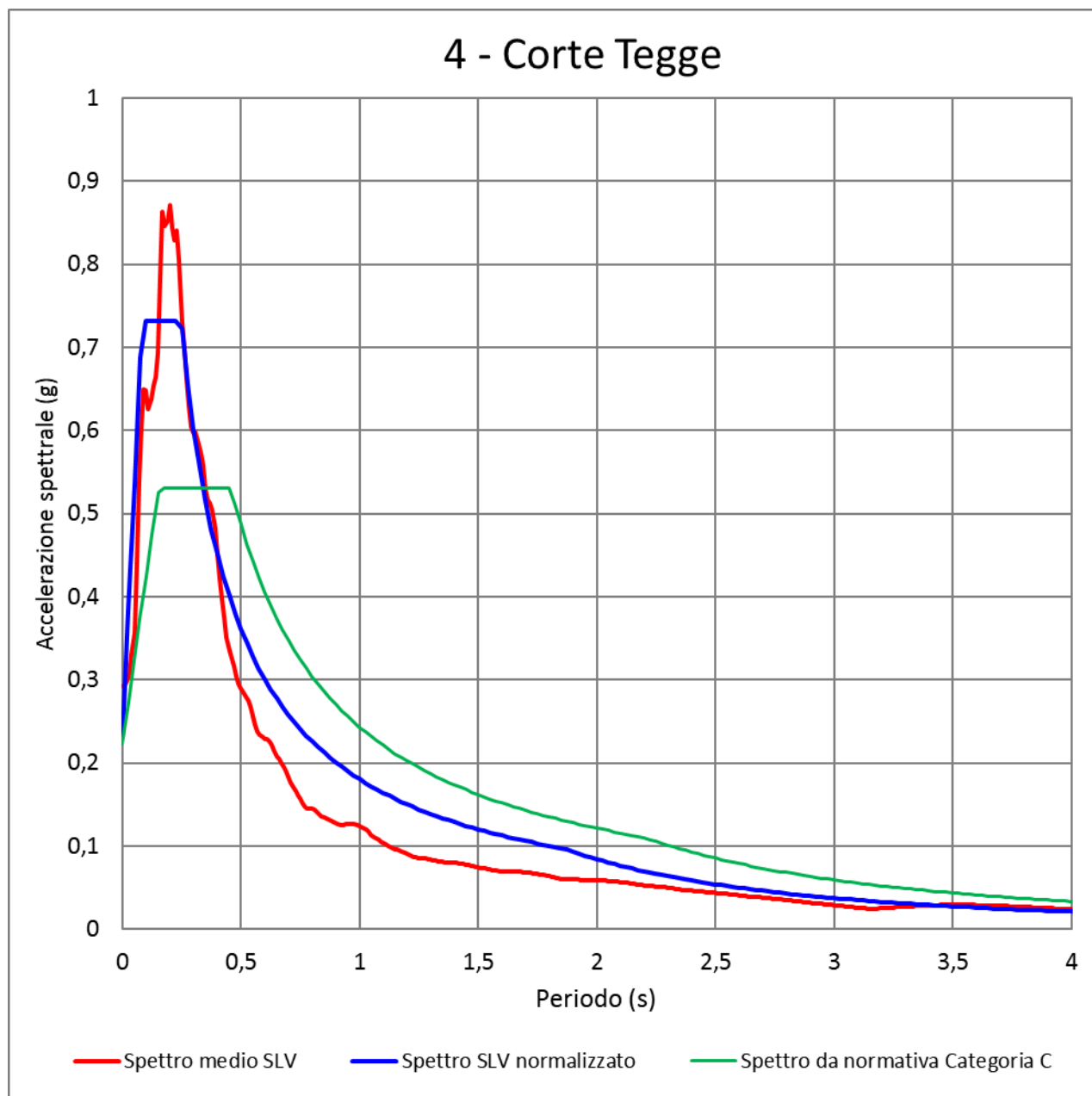


FIG. 30 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "CORTE TEGGE" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.231	3.171	0.174	1.000	1.000	0.082	0.247	1.868	1.420

TAB. 17 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "CORTE TEGGE"

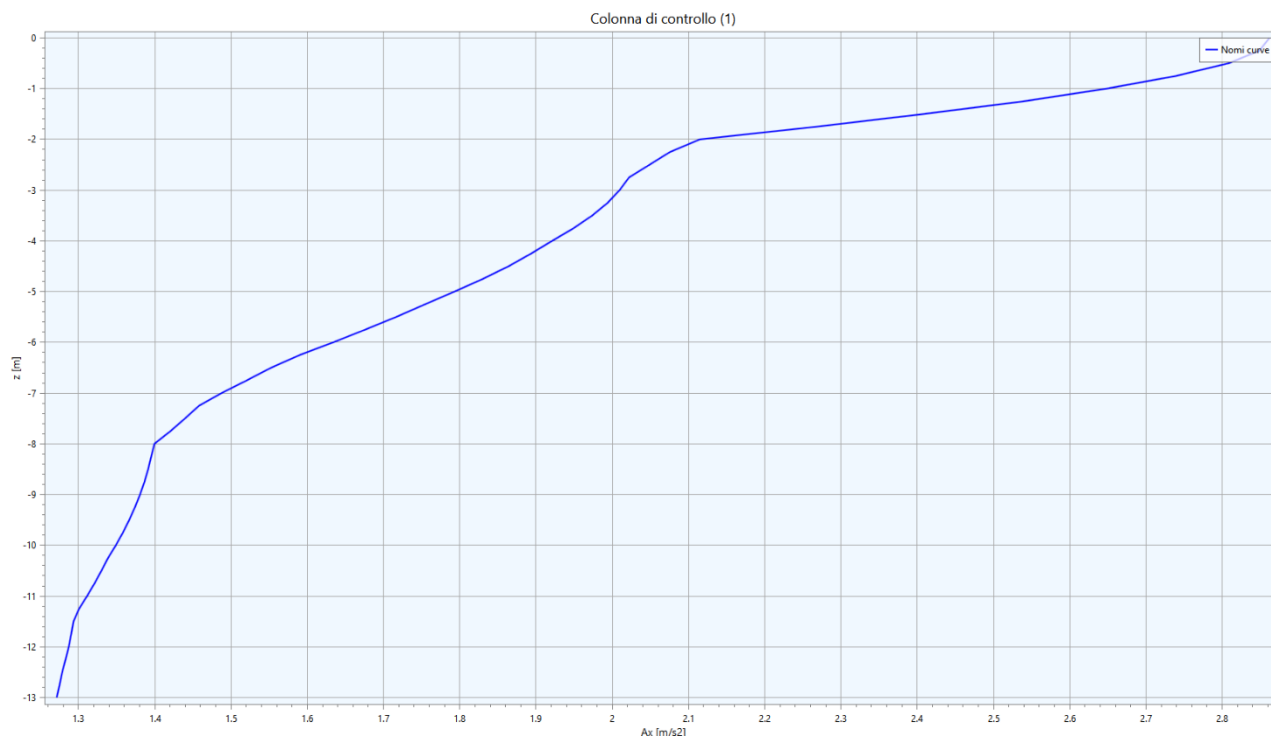


FIG. 31 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “CORTE TEGGE”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.75	1.70	2.94%
FA (0.4-0.8 s)	1.23	2.10	-35.26%
FA (0.7-1.1 s)	1.10	2.40	-52.17%
FA (0.5-1.5 s)	1.12	2.30	-46.67%
PGA/PGA ₀	1.94	1.60	21.25%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.74	1.80	2.35%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.26	2.30	-40.00%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.23	2.40	-17.50%

TAB. 18 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “CORTE TEGGE”

3.6.5. RSL.5 per il sito “Quercioli”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-1.50	1.50	18.00	150	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-1.50	-8.50	7.00	19.00	320	Sand Seed & Idriss (1970)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Bedrock	-8.50	-	-	22.00	440	-

TAB. 19 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “QUERCIOLI”

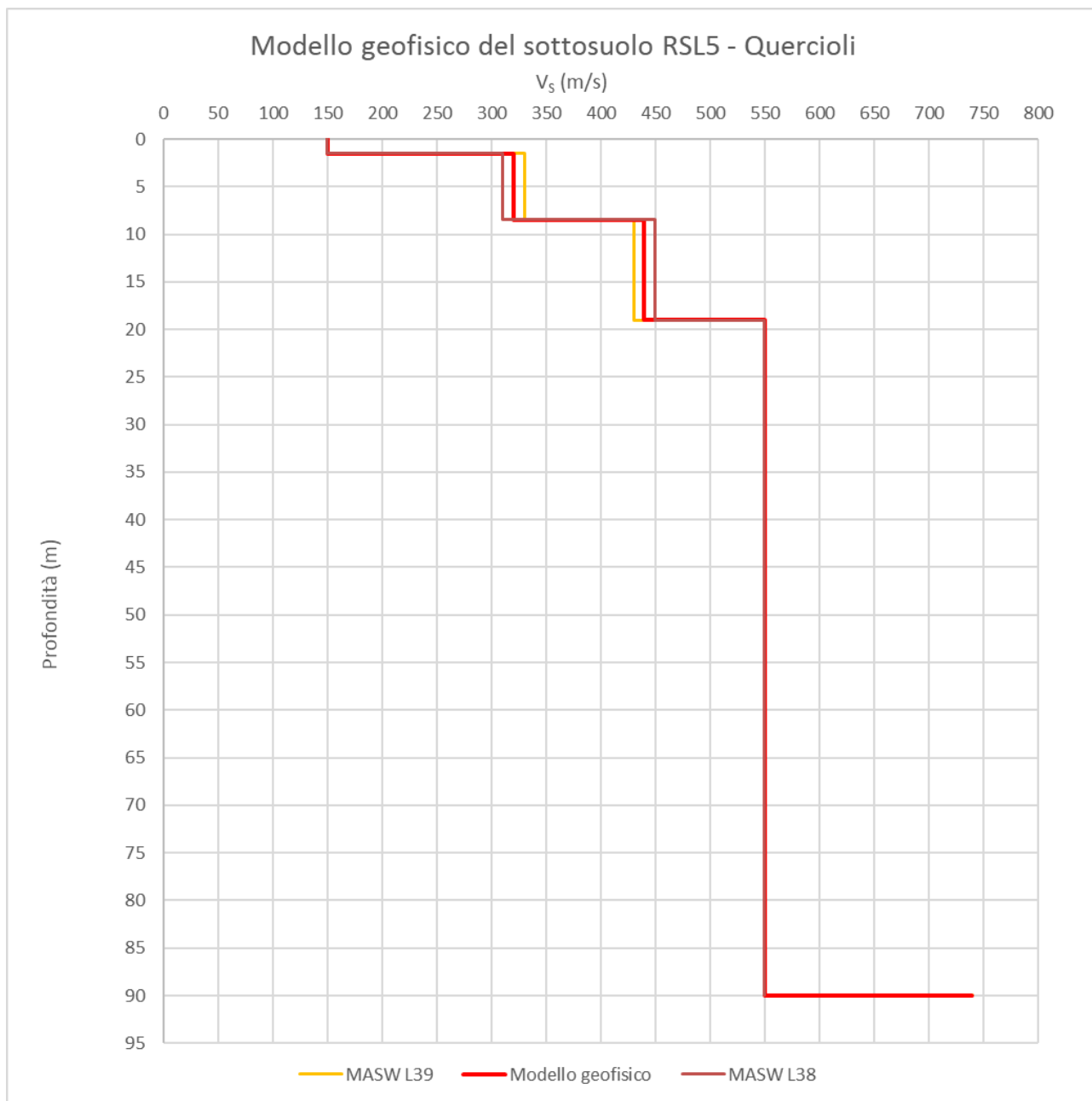


FIG. 32 – DISCRETIZZAZIONE DELLA V_s LUNGO LA VERTICALE “QUERCIOLI”

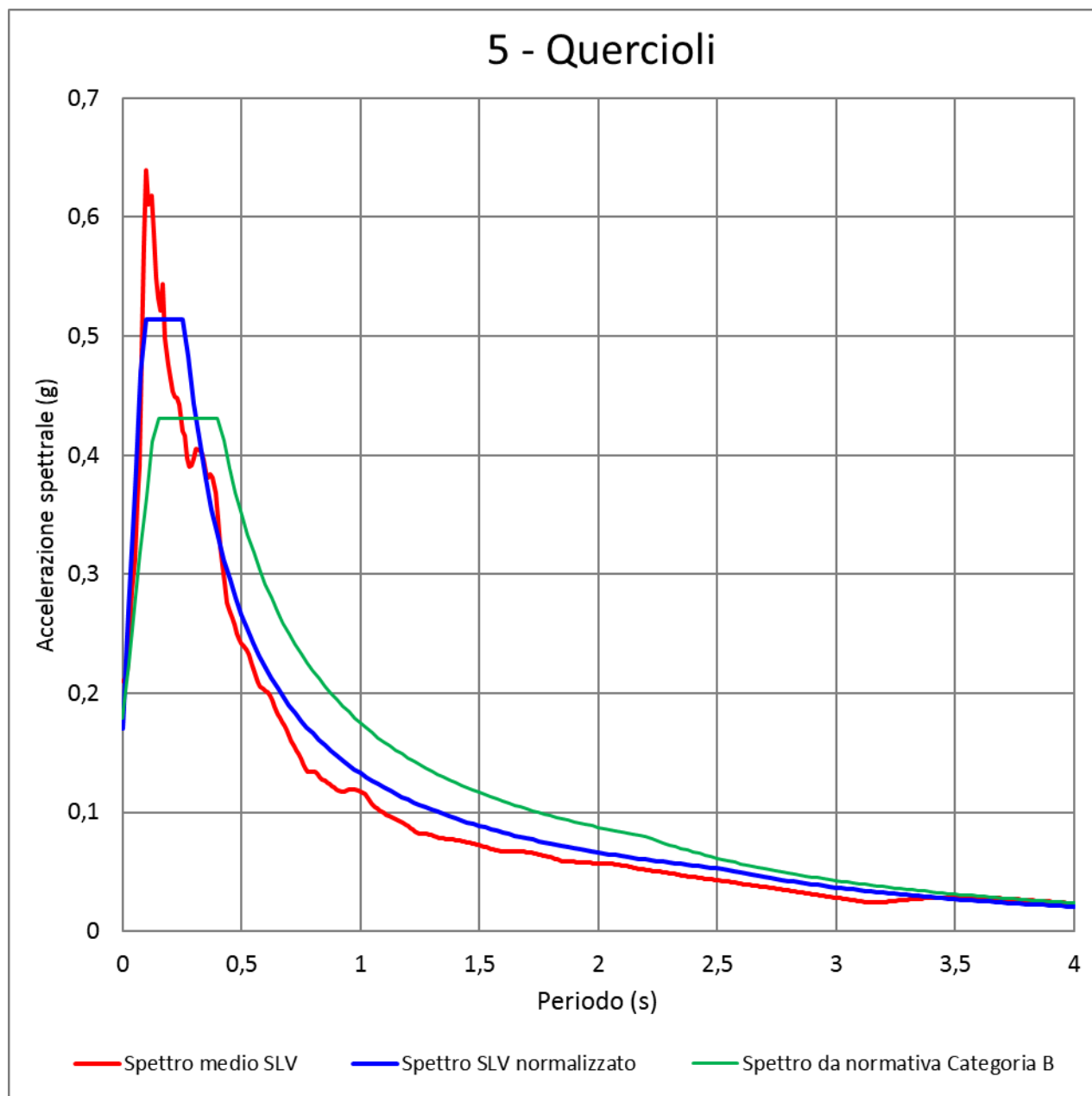


FIG. 33 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "QUERCIOLE" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.170	3.022	1.182	1.000	1.000	0.086	0.259	2.503	1.420

TAB. 20 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "QUERCIOLE"

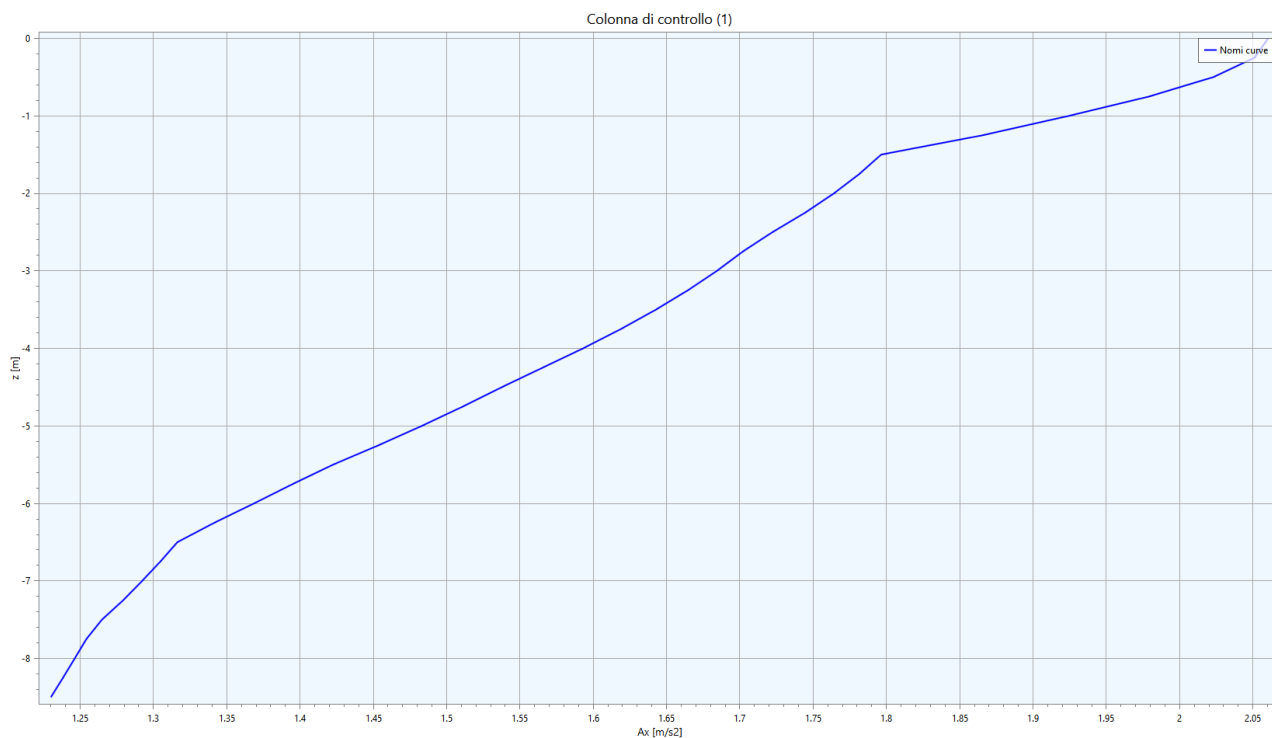


FIG. 34 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “QUERCIOLO”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.22	1.50	-18.67%
FA (0.4-0.8 s)	1.04	1.70	-17.82%
FA (0.7-1.1 s)	1.02	2.10	-51.43%
FA (0.5-1.5 s)	1.02	1.90	-46.32%
PGA/PGA ₀	1.40	1.50	-6.67%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.20	1.60	-25.00%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.06	2.00	-47.00%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.05	2.00	-47.50%

TAB. 21 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “QUERCIOLO”

3.6.6. RSL.6 per il sito “Parco dello sport”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-2.00	2.00	18.00	180	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-2.00	-7.00	5.00	19.00	370	Sand Seed & Idriss (1970)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Bedrock	-7.00	-	-	22.00	480	-

TAB. 22 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “PARCO DELLO SPORT”

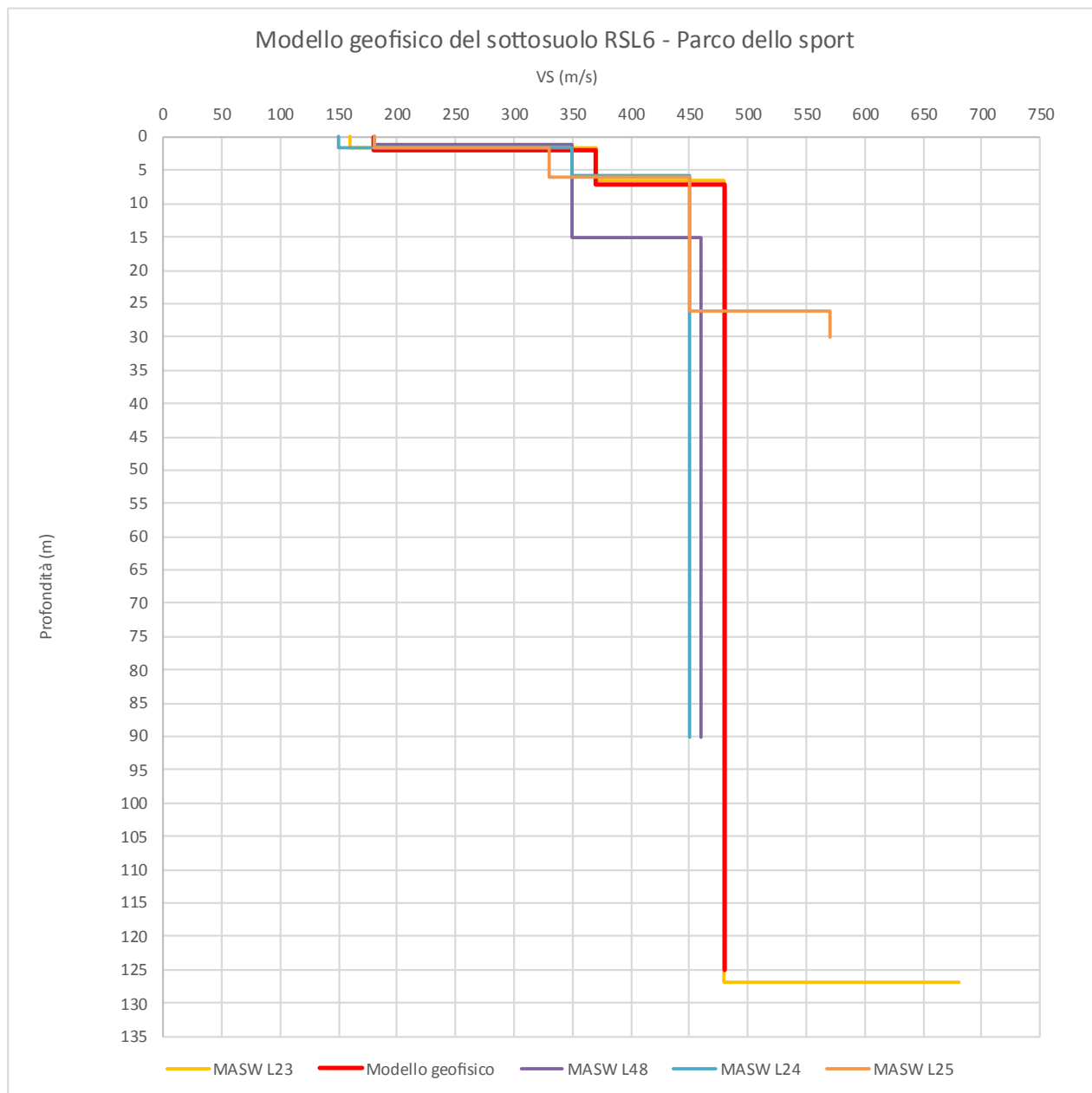


FIG. 35 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE “PARCO DELLO SPORT”

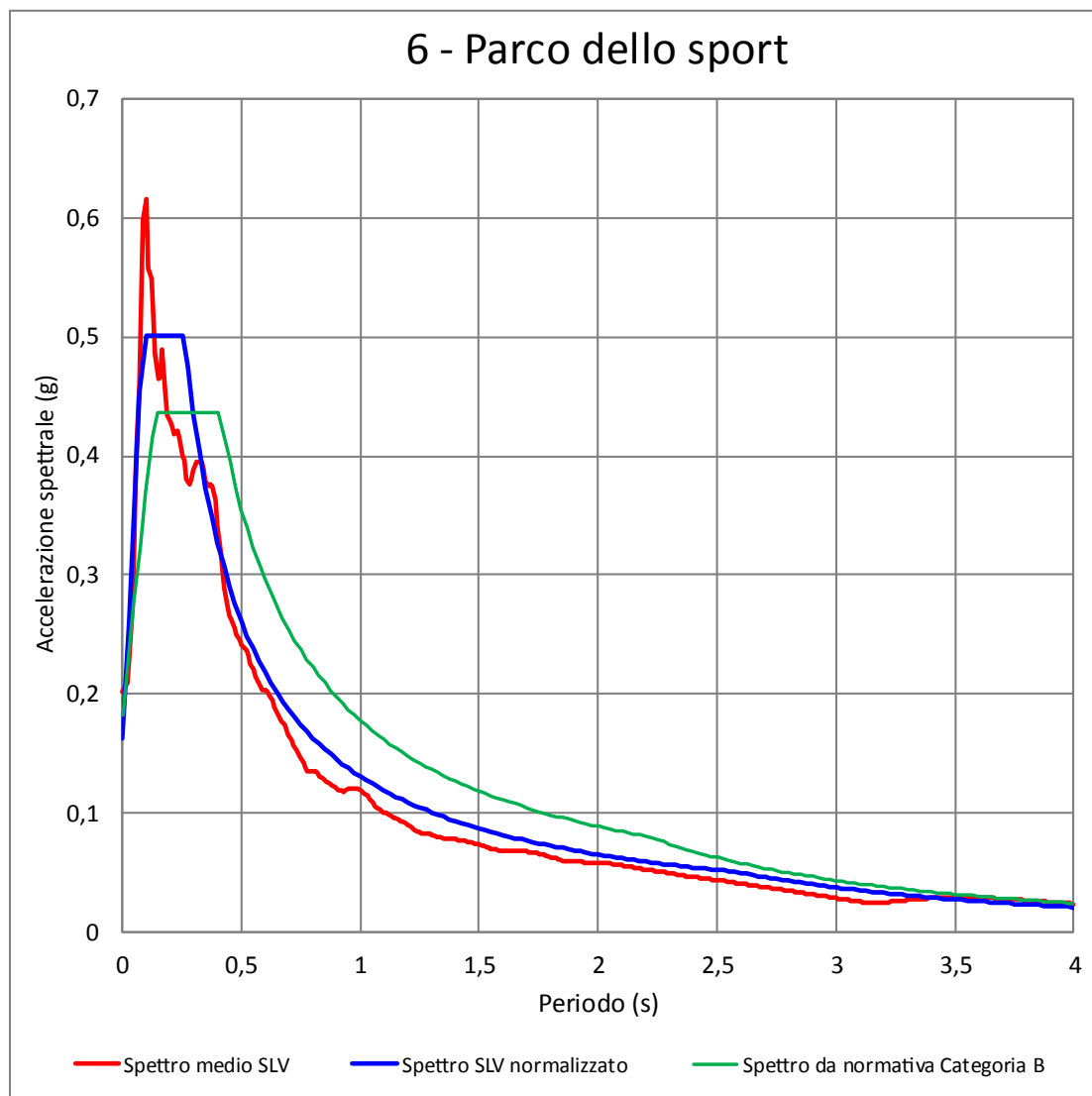


FIG. 36 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "PARCO DELLO SPORT" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.163	3.072	0.184	1.000	1.000	0.087	0.261	2.591	1.420

TAB. 23 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "PARCO DELLO SPORT"

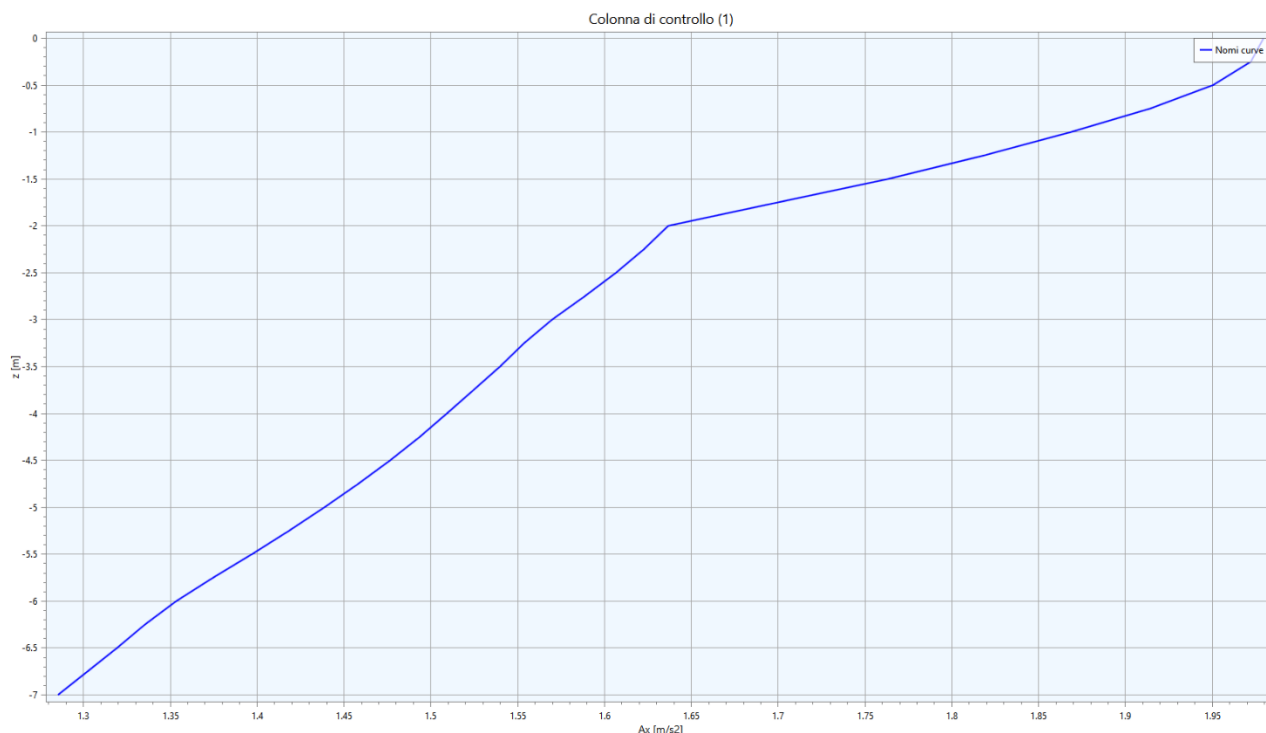


FIG. 37 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “PARCO DELLO SPORT”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.13	1.50	-24.67%
FA (0.4-0.8 s)	1.02	1.70	-40.00%
FA (0.7-1.1 s)	1.01	2.10	-51.90%
FA (0.5-1.5 s)	1.01	1.90	-46.84%
PGA/PGA ₀	1.32	1.50	-12.00%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.12	1.60	-30.00%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.04	2.00	-48.00%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.03	2.00	-48.50%

TAB. 24 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “PARCO DELLO SPORT”

3.6.7. RSL.7 per il sito “Ghiardo”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-3.00	3.00	18.00	190	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbie limose	-3.00	-13.00	10.00	19.00	290	Sand Seed & Idriss (1970)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Bedrock	-13.00	-	-	22.00	530	-

TAB. 25 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “GHIARDO”

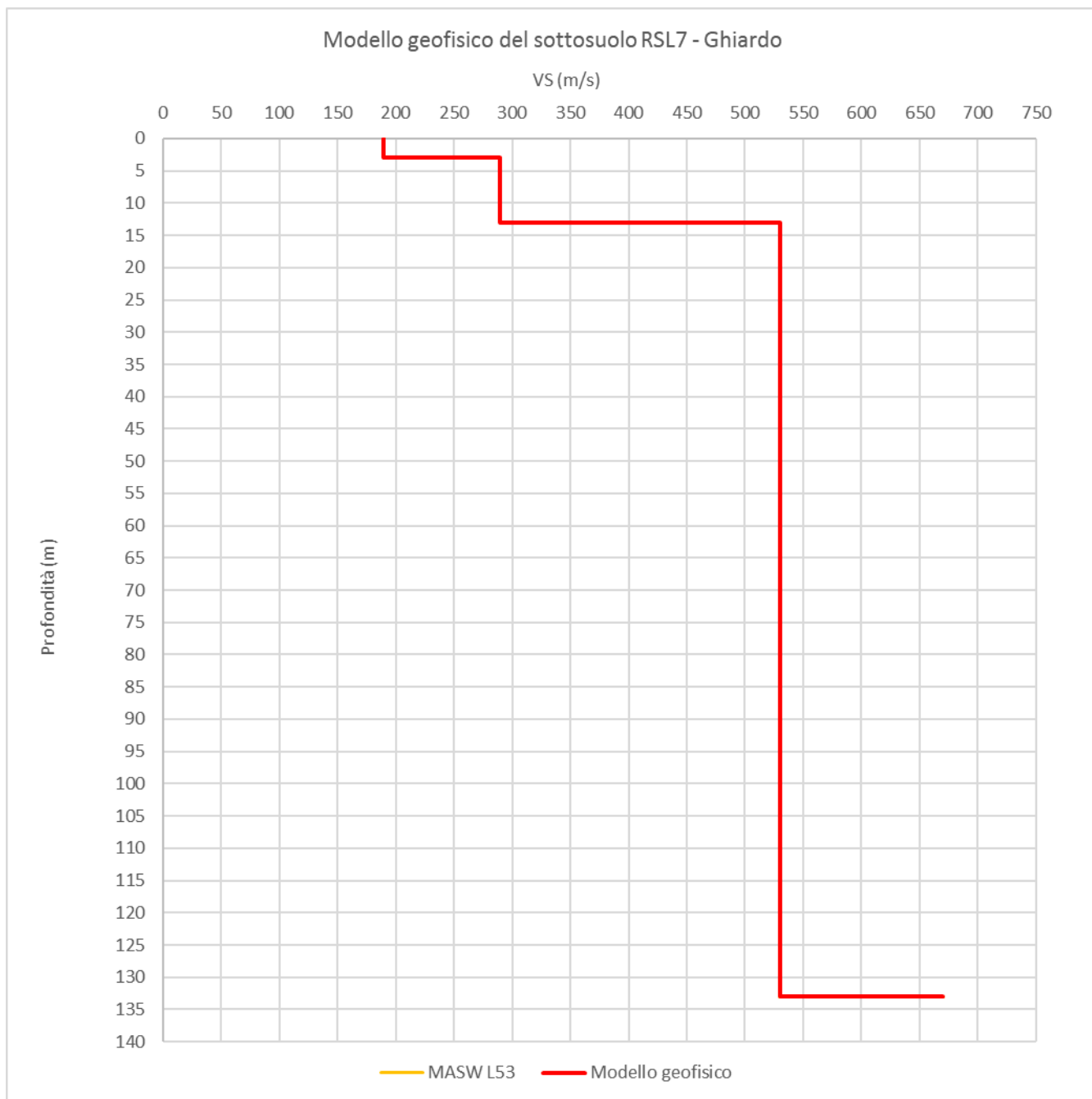


FIG. 38 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE “GHIARDO”

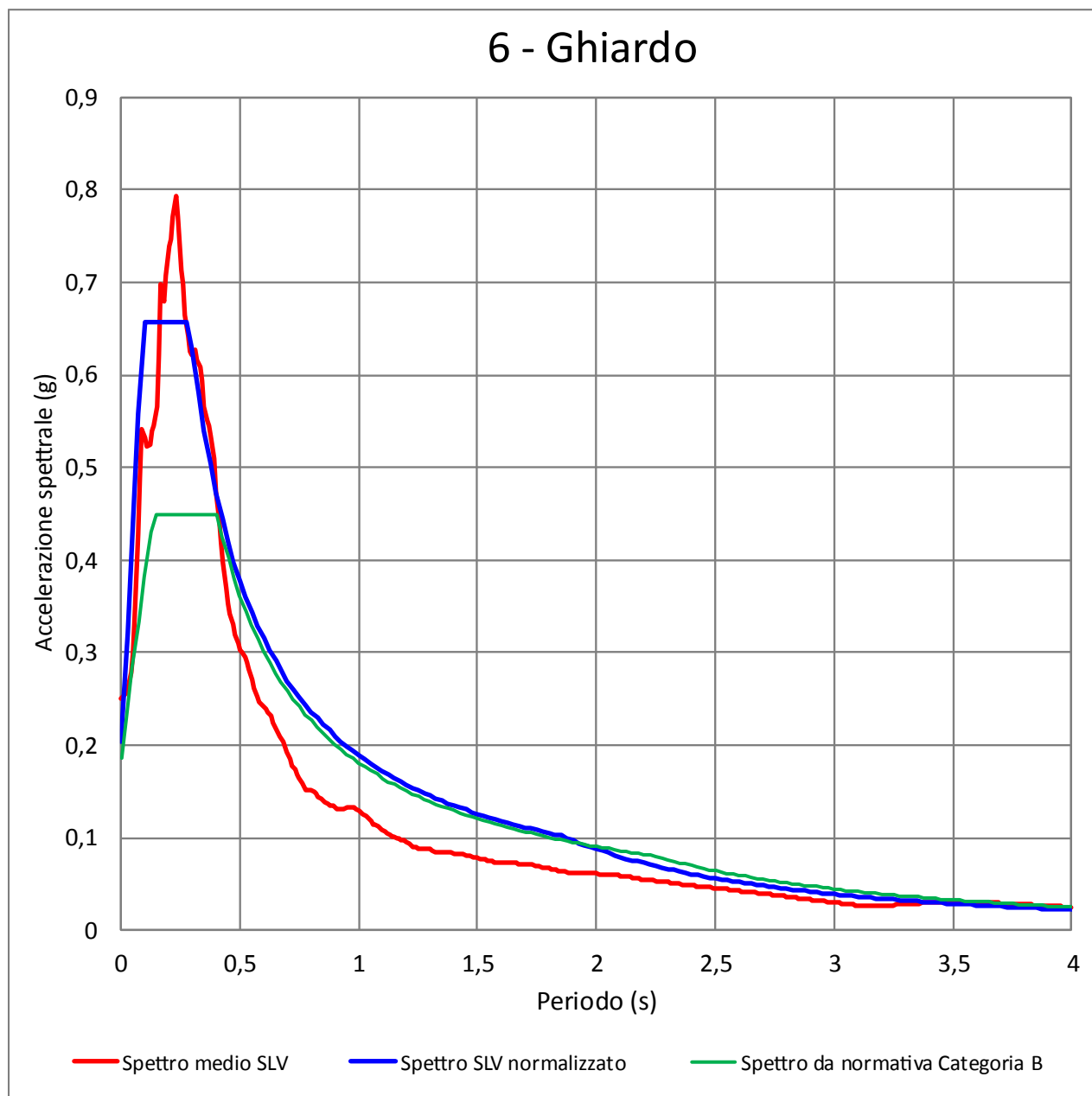


FIG. 39 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "GHIARDO" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.204	3.223	0.202	1.000	1.000	0.096	0.288	1.854	1.420

TAB. 26 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "GHIARDO"

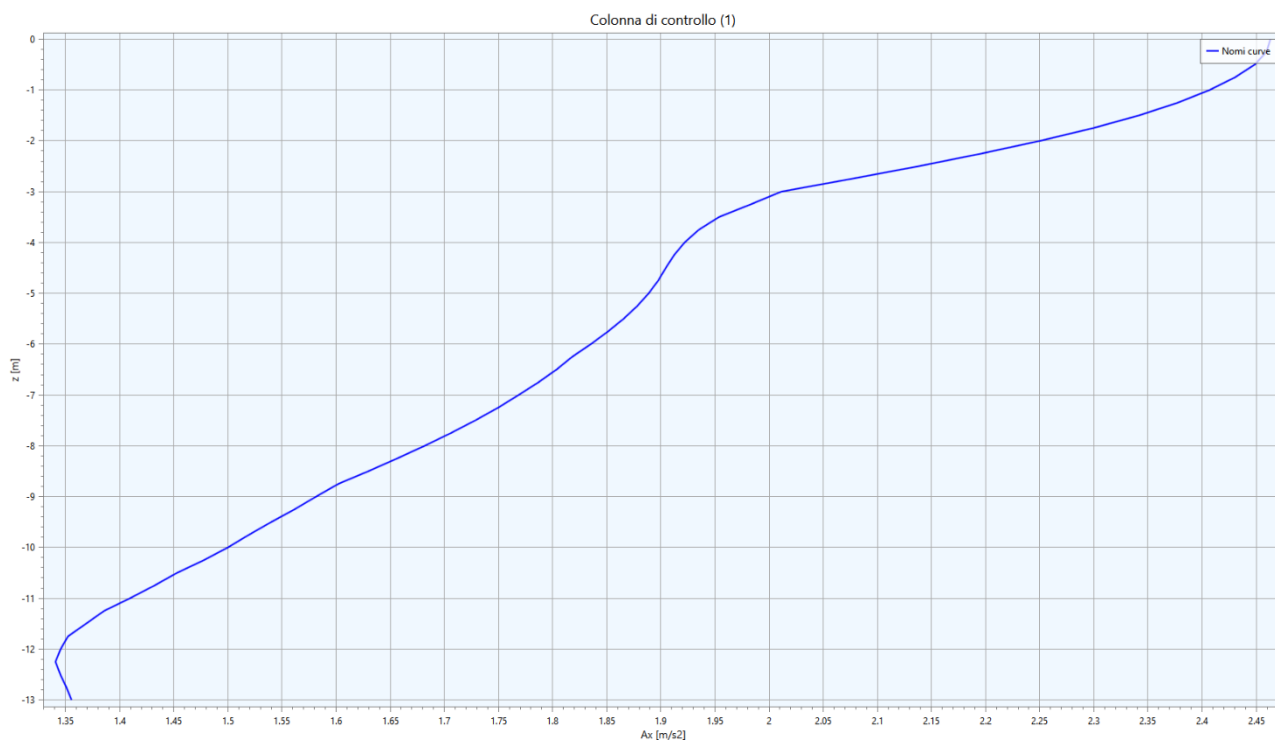


FIG. 40 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “GHIARDO”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.60	2.10	-23.81%
FA (0.4-0.8 s)	1.23	2.30	-46.52%
FA (0.7-1.1 s)	1.10	2.00	-45.00%
FA (0.5-1.5 s)	1.12	-	-
PGA/PGA ₀	1.61	2.00	-19.50%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.62	2.20	-26.36%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.25	2.10	-40.48%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.20	-	-

TAB. 27 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “GHIARDO”

3.7. 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 degli 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.

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.

	RSL1 - Palazzetto dello sport	RSL2 - Magazzini comunali	RSL3 - Via della Repubblica	RSL4 - Corte Tegge	RSL5 - Quercioli	RSL6 - Parco dello sport	RSL7 - Ghiardo
FA _{SA1} 0.1-0.5	-7,65%	-23,53%	-2,35%	2,94%	-18,67%	-24,67%	-23,81%
FA _{SA2} 0.4-0.8	-40,53%	-44,74%	-36,84%	-35,26%	-38,82%	-40,00%	-46,52%
FA _{SA3} 0.7-1.1	-53,91%	-55,22%	-52,61%	-52,17%	-51,43%	-51,90%	-45,00%
FA _{SA4} 0.5-1.5	-49,05%	-50,95%	-47,62%	-46,67%	-46,32%	-46,84%	-
FA _{PGA}	13,13%	-3,13%	19,38%	21,25%	-6,67%	-12,00%	-19,50%
FH _{SI1} 0.1-0.5	-10,59%	-25,88%	-25,88%	2,35%	-25,00%	-30,00%	-26,36%
FH _{SI2} 0.5-1.0	-44,29%	-49,05%	-49,05%	-40,00%	-47,00%	-48,00%	-40,48%
FH _{SI3} 0.5-1.5	-42,50%	-46,50%	-46,50%	-38,50%	-47,50%	-48,50%	-

TAB. 28 – RAFFRONTO TRA I RISULTATI DELLE ANALISI DI SECONDO E TERZO LIVELLO

L'analisi della Tab. 28 evidenzia che, in generale, gli abachi sovrastimano, di norma, lo scuotimento, in alcuni casi anche significativamente.

Gli unici casi in cui da analisi RSL sono risultati fattori di amplificazione superiori, solo per alcuni intervalli di periodo, a quelli da tabelle regionali sono in corrispondenza del Palazzetto dello sport (RSL1), in Via della Repubblica (RSL3) ed a Corte Tegge (RSL4); sono tutti settori in cui le coperture sono per lo più fini con valori caratteristici di Vs bassi.

Infine, va notato come gli abachi sovrastimano lo scuotimento all'aumentare del periodo, e quindi sono a favore di sicurezza. Nel complesso, quindi, gli abachi, come del resto era da attendersi, risultano maggiormente cautelativi alla RSL.

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

In Fig. 41 viene proposto il confronto tra gli spettri di risposta in pseudoaccelerazione da RSL e i due spettri semplificati per le categorie di sottosuolo B ed C da NTC 2018, per un tempo di ritorno TR uguale a 475 anni (corrispondente a una probabilità di superamento del 10% in 50 anni).

In questo caso, è evidente come l'amplificazione locale determina un picco considerevole tra 0.1 e 0.2 s circa, con valori di accelerazione spettrale molto più elevati rispetto a quelli degli spettri semplificati, mentre oltre tale periodo, in generale, gli spettri semplificati sovrastimano le accelerazioni.

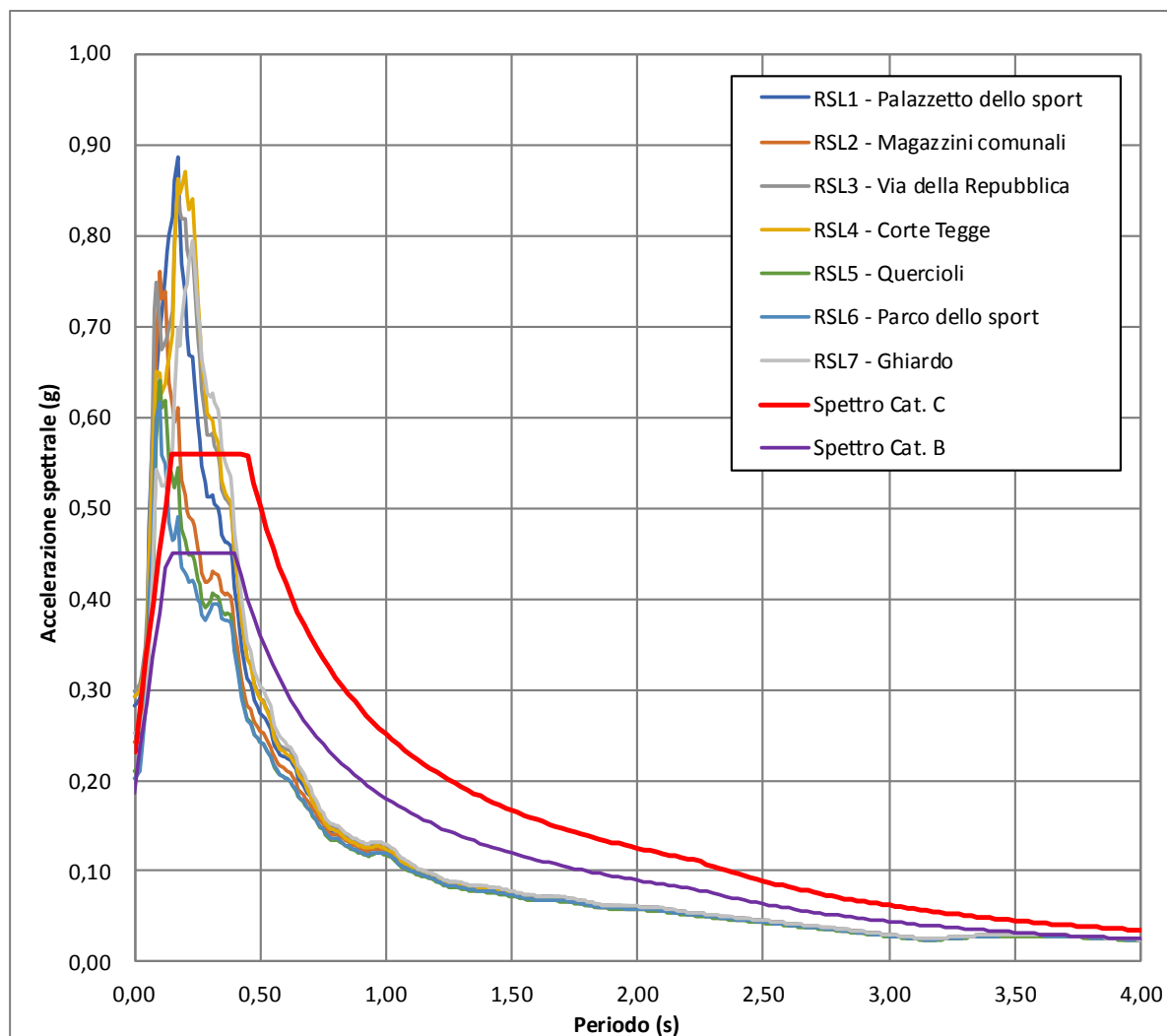


FIG. 41 – CONFRONTO TRA GLI SPETTRI DI RISPOSTA IN PSEUDOACCELERAZIONE DA RSL E GLI SPETTRI SEMPLIFICATI PER LE CATEGORIE DI SOTTOSUOLO B E C DA NTC 2018

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. 3.6, cioè a modelli che tengono conto della sola sismostratigrafia riscontrata nelle 7 aree 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 litostratigrafici e geofisici del territorio comunale di Cavriago.

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.

In letteratura (Martelli¹⁰, 2021), il substrato geologico corrisponde alle unità litostratigrafiche consolidate poste alla base delle coperture recenti, mentre il *bedrock* sismico è definito come l'orizzonte a comportamento rigido, caratterizzato da un marcato contrasto d'impedenza ($V_{s\text{bedrock}}/V_{s\text{copertura}} > 2$), che può trovarsi anche all'interno della successione alluvionale e non necessariamente nel substrato geologico. Nelle norme tecniche, il *bedrock* sismico è definito come roccia o formazione geologica caratterizzata da $V_s \geq 800$ m/s, indicata anche come "*bedrock* ingegneristico".

Nelle aree di margine appenninico-padano, Martelli¹⁰ evidenzia come il *bedrock* sismico non coincide con il substrato geologico, ma con orizzonti ghiaiosi pleistocenici profondi, molto rigidi, caratterizzati da V_s spesso $\geq 600 \div 800$ m/s; questi livelli rappresentano il principale contrasto di impedenza.

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 Cavriago, per l'individuazione del *bedrock* sismico si è fatto affidamento ai risultati della prova Down-Hole e delle prove MASW e HVSr eseguite appositamente per questo studio, adeguatamente correlate con le conoscenze geologiche e stratigrafiche disponibili. Inoltre, si è fatto riferimento anche alle indagini sismiche realizzate durante lo studio di Microzonazione Sismica di 2° livello.

In particolare, la gran parte delle prove HVSr effettuate ha evidenziato picchi di ampiezza significativa associabili al contrasto di impedenza dovuto al passaggio tra la copertura coesiva e i sottostanti depositi granulari. E dal momento che questo passaggio si verifica quasi sempre nei primi metri di profondità, detti picchi sono caratterizzati da frequenze elevate.

Dalle misure MASW+HVSr, realizzate ex-novo, ubicate in corrispondenza delle verticali ove è stata effettuata l'analisi di RSL, si è visto come il primo orizzonte di depositi granulari costituisce un riflettore sismico relativamente rigido, in grado di generare amplificazione per risonanza nei terreni fini sovrastanti a frequenze comprese tra 3 e 20 Hz.

¹⁰ Luca Martelli, 2021. Assessment of Seismic Bedrock in Deep Alluvial. Case Studies from the Emilia-Romagna Plain - Geosciences



Alla luce di quanto sopra affermato e come già evidenziato nel precedente studio di 2° livello, al quale si rimanda per i dettagli, si è assimilato al *bedrock* sismico il primo orizzonte di depositi prevalentemente grossolani di conoide alluvionale (ghiaie, ghiaie sabbiose, sabbie ghiaiose, limi sabbioso-ghiaiosi), generalmente di spessore $H > 5\text{m}$, in virtù del fatto che presentano generalmente valori di V_s molto maggiori di quelli dei terreni fini soprastanti.

Nella zona meridionale e centrale del comune, tra circa 3 e 17 m di profondità, compaiono le ghiaie riferibili al Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), con spessori generalmente in diminuzione verso settentrione da oltre 15 a meno di 10 m, mentre alle quote inferiori, nella porzione settentrionale del territorio, in corrispondenza della zona industriale di Corte Tegge, il primo orizzonte di depositi grossolani è riferibile al Subsintema di Ravenna (AES8).

Le velocità delle onde di taglio del primo orizzonte di depositi grossolani generalmente non superano valori di 560 m/s. Fa eccezione la misura della prova sismica Down-Hole (035017P128), realizzata appositamente per il presente studio, la quale ha individuato, a profondità compresa tra 12 e 19 m dal p.c., un orizzonte ghiaioso che ha raggiunto valori di V_s pari a circa 750 m/s.

Alla luce di queste considerazioni, si è pertanto deciso di attribuire alle verticali di analisi di RSL, la presenza di un *bedrock* sismico non rigido ($V_s < 800\text{ m/s}$) a profondità compresa tra 10 e 17 m da p.c.

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, quali la Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione sismica e 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 indagini, 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. 42.

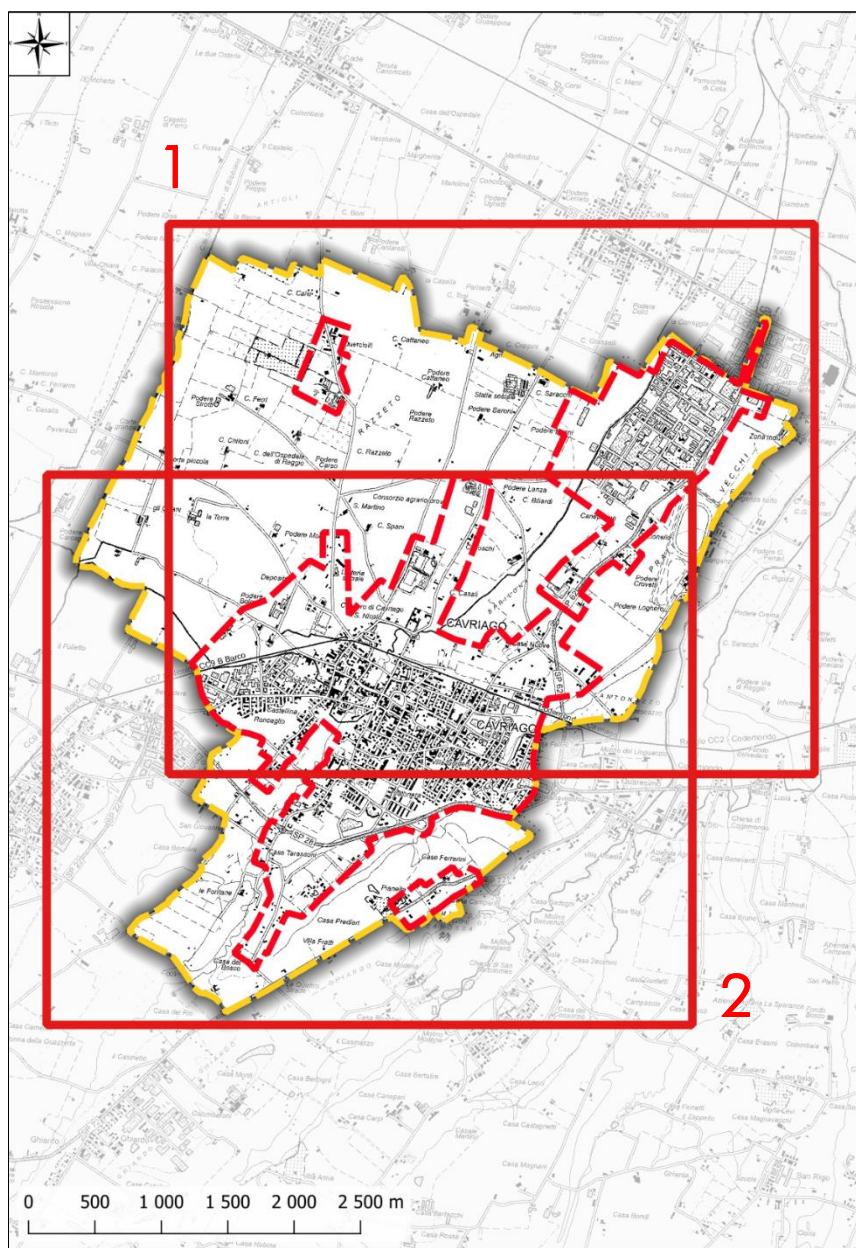


FIG. 42 – QUADRO D'UNIONE DEI TAGLI CARTOGRAFICI ADOTTATI



5.1. Carta delle indagini

Nella Carta delle indagini sono riportate le ubicazioni delle prove eseguite nell'ambito del presente lavoro (per i cui report si faccia riferimento all'Elaborato 7) e dei dati pregressi relativi a indagini geognostiche e/o sismiche raccolte presso l'Archivio comunale e 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 in:

- sondaggio a carotaggio continuo
- prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- prova penetrometrica dinamica super pesante (DS)
- prova penetrometrica dinamica media (DN)
- prova sismica in foro tipo Down-hole
- stazione microtremore a stazione singola (HVSr)
- MASW
- prova REfractionMicrotremors
- tomografia elettrica

come raffigurato nella legenda riportata in stralcio nella seguente Fig. 43.

Legenda













-  Confine comunale
-  Aree oggetto di Microzonazione Sismica
-  Stratigrafia zona MS (teorica)
-  Sondaggio a carotaggio continuo
-  Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
-  Prova penetrometrica dinamica super pesante
-  Prova penetrometrica dinamica media
-  Prova sismica in foro tipo Downhole
-  Stazione microtremore a stazione singola
-  MASW
-  Prova REfractionMicrotremors
-  Tomografia elettrica

FIG. 43 – LEGENDA DELLA CARTA DELLE INDAGINI

In Tab. 29 vengono riportati il numero e la tipologia di indagini presenti sul territorio studiato, acquisite dal precedente studio di MS o realizzate *ad hoc* per il terzo livello.

TIPO PROVA	provenienti da studio di 2° livello MS e/o archivio comunale	effettuate per il 3° livello MS	TOTALE
Sondaggio a carotaggio continuo	6	1	7
Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)	47	-	47

TIPO PROVA	provenienti da studio di 2° livello MS e/o archivio comunale	effettuate per il 3° livello MS	TOTALE
Prova penetrometrica dinamica super pesante	12	-	12
Prova penetrometrica dinamica media	2	-	2
Prova simica in foro tipo Downhole	1	1	2
Stazione microtremore a stazione singola	57	4	61
Prova MASW	24	3	27
Prova REfractionMlcrotremors	41	-	41
Tomografia elettrica	3	-	3

TAB. 29 – RIEPILOGO DELLE INDAGINI PRESENTI SUL TERRITORIO COMUNALE

5.2. Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica (CGT_MS)

Nella Carta Geologico-tecnica, redatta per l'intero territorio comunale, 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 facendo riferimento a quanto indicato nell'Allegato A1 della DGR 630/2019.

Nel presente studio, tale cartografia rappresenta un aggiornamento di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello. In particolare, alla luce delle nuove indagini effettuate non è stato necessario modificare le caratteristiche tessiturali e degli ambienti genetico-deposizionali, mentre sono stati integrati gli elementi geologici e idrogeologici di nuova acquisizione.

Dalle informazioni raccolte, si osserva che il territorio indagato, in estrema sintesi, presenta le seguenti caratteristiche:

- il primo sottosuolo è caratterizzato, dalla presenza di una copertura di depositi prevalentemente fini (limi e argille), molto esigua nel settore più occidentale, dove affiorano il Subsistema di Ravenna e l'Unità di Vignola; mentre si inspessisce verso sud-est, in particolare, in corrispondenza del terrazzo del Ghiardo;
- al disotto della coltre suddetta sono presenti depositi prevalentemente grossolani di conoide alluvionale (ghiaie, ghiaie sabbiose, sabbie ghiaiose, limi sabbioso-ghiaiosi), generalmente di spessore $H > 5$ m, assimilabili al bedrock sismico in virtù del fatto che presentano valori di Vs molto maggiori di quelli dei terreni fini soprastanti;
- relativamente ai livelli più profondi risulta interessante esaminare la sezione geologica raffigurata in Fig. 45, stralcio della sezione 36 tratta dal sito web del Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna; in tale sezione, che attraversa il settore orientale del comune, con andamento SW-NE (cfr. la traccia riportata in Fig. 44, oltre che nella Carta Geologico-tecnica indicata con "A-A'"), si osserva un andamento anticlinale e una generale diminuzione verso settentrione degli spessori, sia del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), variabili da oltre 15 a meno di 10 m, che di quello Inferiore (AEI), compresi all'incirca tra 80 e 40 m.



FIG. 44 – TRACCIA DELLA SEZIONE 36 (A-A') (DA SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA) IN COMUNE DI CAVRIAGO

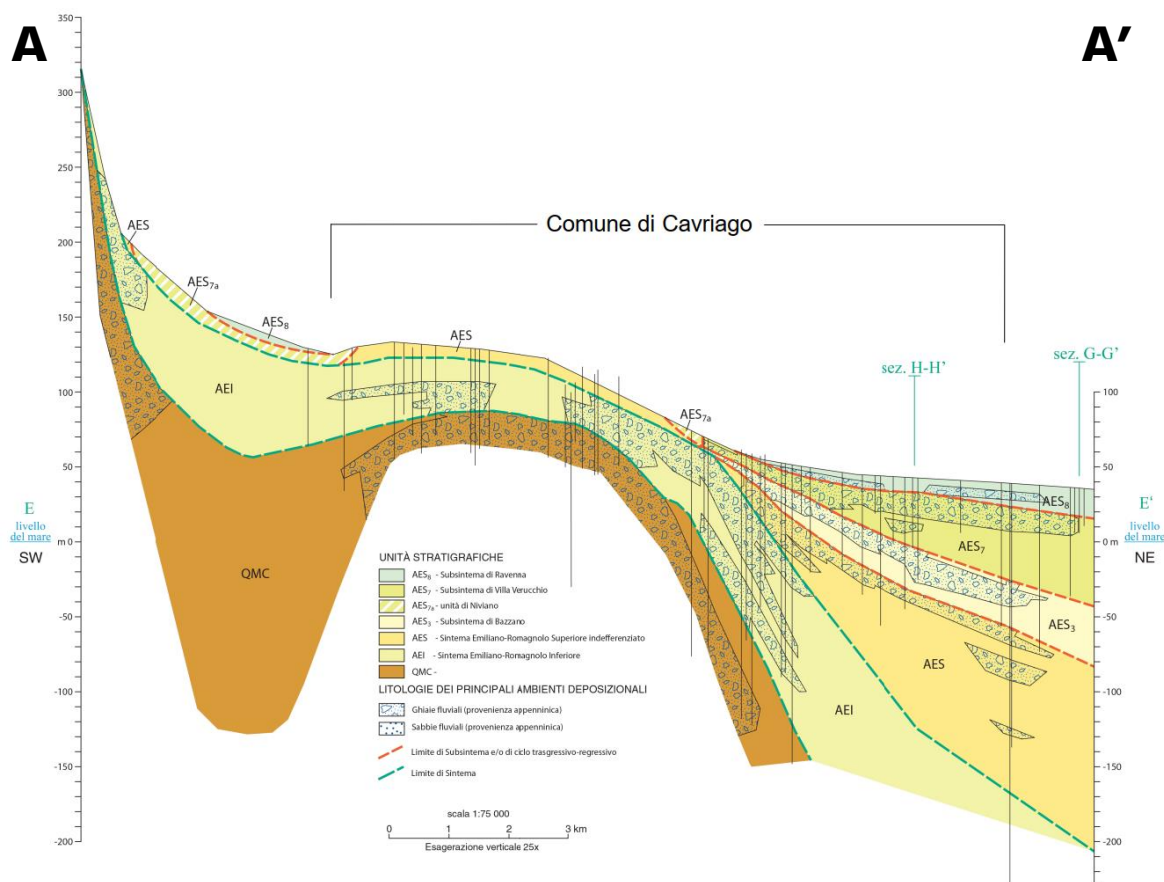


FIG. 45 - STRALCIO DELLA SEZIONE 36 (A-A') TRATTA DAL SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Nella Carta Geologico-tecnica, come si osserva in Fig. 46, dovendo attenersi agli standard di rappresentazione degli SRAI, sono state distinte le seguenti tipologie di terreni di copertura:

- **GM** – *Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo*: sono dovute alla deposizione, in ambiente di piana pedemontana e sono state individuate su buona parte del territorio comunale, per lo più nel settore settentrionale;
- **ML** – *Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità*: interessano l'area centrale e meridionale del territorio comunale, all'interno della quale ricade, quasi completamente, l'area urbanizzata e urbanizzabile. Sono il risultato di una deposizione in ambiente di terrazzo fluviale.

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

- **tf** – terrazzo fluviale;
- **pd** – piana pedemontana.

Nella Carta Geologico-tecnica sono stati raffigurati anche gli elementi tettonico strutturali di superficie ovvero una faglia incerta, potenzialmente attiva e capace (FAC).

In particolare, la struttura FAC indicata in cartografia risulta incerta, poiché finora rappresentata solo in carte a scala regionale e segnalata in alcuni studi (sempre a scala regionale Castiglioni et al., Ponza et al., 2010), che considerano questo settore in sollevamento attivo, con faglie subaffioranti/affioranti.

Si evidenzia che le tecniche proposte dagli ICMS 2008 e le relative Linee Guida 2015 non sono applicabili per lo studio delle FAC in aree urbane e di pianura; pertanto, non è stata presa in esame nel presente studio.

Inoltre, tra gli elementi geologici e idrogeologici sono stati rappresentati alcuni pozzi, indicando il valore di soggiacenza della falda freatica.

Infine, è stata indicata la traccia ("A") della sezione geologico-tecnica significativa e rappresentative del modello del sottosuolo, ripresa da RER (cfr. par. 3.3.2).

Legenda



Confine comunale



Aree oggetto di Microzonazione Sismica

Terreni di copertura



GMpd

Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo di Piana pedemontana



MLtf

Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità di Terrazzo fluviale

Elementi tettonico strutturali



Faglia diretta potenzialmente attiva e capace (incerta)

Elementi geologici e idrogeologici



Presenza della falda in aree con sabbie e/o ghiaie (con indicazione della profondità (m) del tetto della falda)



Traccia della sezione geologica rappresentativa del modello del sottosuolo (v. Relazione Illustrativa)

FIG. 46 – STRALCIO DA LEGENDA DELLA CARTA GEOLOGICO-TECNICA

5.3. Carta delle frequenze naturali dei terreni

Sulla base di tutti i dati tomografici disponibili, sia acquisiti da archivio comunale e/o già inserite nel precedente studio di MS e sia di nuova acquisizione, è stata redatta la Carta delle frequenze naturali dei terreni.

In questa carta sono stati riportati tutti i punti di misura (n. 59), di cui n. 52 ritenuti significativi, con associati i risultati delle singole prove, mentre solo n. 7 misure risultano "piatte", ovvero prive di picco significativo.

In particolare, sono stati indicati il valore F del picco significativo, corrispondente alla frequenza di maggiore ampiezza 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, definendo le seguenti classi:

- $F \leq 0.6$
- $0.6 \text{ Hz} < F \leq 1 \text{ Hz}$
- $F \leq 1 \text{ Hz}$
- $1 \text{ Hz} < F < 2 \text{ Hz}$
- $2 \text{ Hz} < F \leq 8 \text{ Hz}$
- $F > 8 \text{ Hz}$

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. 47.



FIG. 47 – LEGENDA DELLA CARTA DELLE FREQUENZE

L'elaborato cartografico, in particolare, schematizza e supporta le valutazioni relative al modello geofisico adottato, illustrate in dettaglio nel paragrafo 5.4.

Si osserva infatti che in Comune di Cavriago, sono di gran lunga dominanti le prove con picchi principali a frequenze superiori a 2 Hz (spesso maggiori di 8 Hz), associabili, come anticipato nel capitolo 4, a contrasti di impedenza dovuti al primo passaggio tra depositi coesivi e depositi granulari che mascherano altre eventuali superfici riflettenti sottostanti.

Di seguito, viene proposta una tabella riepilogativa dei risultati delle prove tomografiche eseguite in Comune di Cavriago, specificando, per ciascuna di esse, frequenza e ampiezza dei picchi principali e secondari.



PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A0	F1	A1
035017P101	4,75	2,10		
035017P104	5,00	2,00		
035017P107	7,16	2,00		
035017P108	9,10	3,00		
035017P111	5,50	1,50		
035017P114	5,00	1,00		
035017P116	3,50	2,50		
035017P123	0,78	1,70		
035017P127	9,20	2,00		
035017P129	6,51	1,90		
035017P130	0			
035017P131	6,60	2,70	0,95	1,00
035017P132	8,00	4,80		
035017P14	0			
035017P16	0			
035017P21	12,05	1,78		
035017P27	8,70	2,55		
035017P35	0,16	2,00		
035017P36	17,41	2,30		
035017P37	0,38	1,90		
035017P38	13,13	2,90		
035017P39	0,16	2,10		
035017P40	0,16	1,98		
035017P41	0,16	1,85		
035017P42	4,16	1,65		
035017P43	0			
035017P44	0			
035017P45	12,69	2,00		
035017P46	0			
035017P47	0,22	1,50		
035017P48	0,31	1,85	5,20	1,70
035017P49	4,16	2,30	0,32	1,90
035017P50	8,35	2,85	6,20	2,18
035017P51	10,44	1,98		
035017P52	13,69	1,90	0,28	1,85
035017P53	8,20	3,94		
035017P54	15,31	5,80	0,71	2,52
035017P55	19,70	4,80		
035017P56	0,19	1,90		
035017P57	5,20	1,85		
035017P58	5,78	1,90		
035017P59	0			

PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A0	F1	A1
035017P60	5,84	1,98		
035017P61	16,50	3,10		
035017P62	12,81	3,50	2,88	1,90
035017P63	18,69	3,00		
035017P64	8,30	1,70		
035017P65	5,90	2,29		
035017P66	16,84	2,80		
035017P67	0,38	1,27	4,35	1,40
035017P68	18,13	1,85		
035017P69	5,22	1,30	0,31	1,28
035017P7	14,00	5,30		
035017P70	9,60	1,70		
035017P71	18,44	2,88		
035017P72	5,00	2,00		
035017P73	5,13	3,60		
035017P74	6,19	3,10		
035017P81	3,10	1,40		

TAB. 30 – RIEPILOGO DEI RISULTATI DELLE PROVE TROMOGRAFICHE IN COMUNE DI CAVRIAGO

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 dei nuovi punti di misura di rumore ambientale (con indicazione del valore di F) acquisiti sia da archivio comunale che dalla campagna indagini per il terzo livello di approfondimento.

In questa cartografia, alla scala 1:10'000, l'intero territorio comunale viene distinto a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti 3 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 Comune di Cavriago, è presente solo la categoria 2 – Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.

Più precisamente è stata individuata una sola zona di seguito descritta (cfr. Fig. 48):

- Zona 1 – Successione stratigrafica costituita da una copertura, di spessore generalmente inferiore a 3 m, di depositi di origine alluvionale, fini, a tessitura prevalentemente argilloso-limosa sotto la quale si rinvencono, con spessori pluridecametrici, dei depositi di origine alluvionale, prevalentemente ghiaiosi, assimilabili al *bedrock* sismico.

ZONA 1

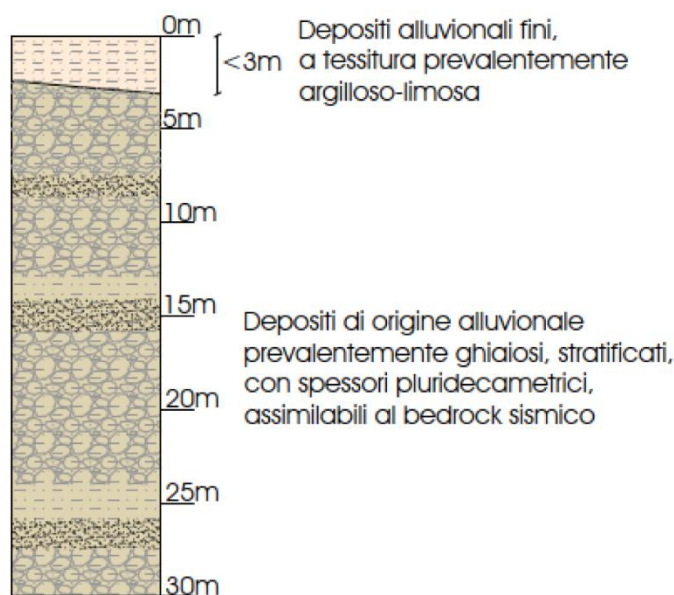


FIG. 48 – COLONNA LITOSTRATIGRAFICA SINTETICA, RAPPRESENTATIVA DELLA MICROZONA STABILE SUSCETTIBILE DI AMPLIFICAZIONE LOCALE

5.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)

In ottemperanza ai riferimenti tecnici citati nelle premesse, è stata redatta una Carta delle velocità delle onde di taglio S (VS) riferita a tutte le aree oggetto di studio, alla scala 1:5'000.

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

In tali elaborati sono ubicati tutti i punti di misura, distinguendoli a seconda della tipologia di prova effettuata (prova tromografica, Down-Hole e MASW, indicate come tali anche quando accoppiate con le ReMi) e indicando il corrispondente valore di V_{SH} o V_{S30} (sempre in m/s), dove:

$$V_{SH} = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

H = spessore totale (in metri) dei terreni di copertura o profondità del *bedrock*

h_i = spessore (in metri) dello strato *i*-esimo (fino al *bedrock*)

V_{Si} = velocità (in m/s) dello strato *i*-esimo (fino al *bedrock*);

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{Vs_i}}$$

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

Vs_i = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m).

A riguardo, va chiarito che, come già effettuato nel precedente studio di 2° livello, si è indicato la Vs_{30} per tutte le indagini effettuate, ad eccezione dello stendimento 035017L53, rappresentativo del settore ricadente sul terrazzo del Ghiardo, dove, essendosi registrato un significativo contrasto di impedenza a 13 m da p.c., è stata considerata la Vs_H .

Dati riepilogati nella seguente Tab. 31.

PROVA	MOPS	Vs_{30}	H	Vs_H
035017L7	2001	391		
035017L65	2001	364		
035017L6	2001	431		
035017L5	2001	457		
035017L4	2001	394		
035017L3	2001	323		
035017L14	2001	296		
035017L13	2001	448		
035017L12	2001	410		
035017L11	2001	350		
035017L10	2001	450		
035017L68	2001	456		
035017L67	2001	485		
035017L66	2001	375		
035017L64	2001	448		
035017L63	2001	299		
035017L62	2001	177		
035017L61	2001	236		
035017L60	2001	358		
035017L59	2001	441		
035017L58	2001	370		
035017L57	2001	370		
035017L54	2001	175		
035017L53	2001	377	277	13
035017L52	2001	360		
035017L51	2001	173		
035017L50	2001	175		
035017L49	2001	360		
035017L48	2001	171		



PROVA	MOPS	Vs ₃₀	H	Vs _H
035017L47	2001	347		
035017L46	2001	340		
035017L45	2001	312		
035017L44	2001	176		
035017L43	2001	296		
035017L42	2001	278		
035017L41	2001	337		
035017L40	2001	340		
035017L39	2001	404		
035017L17	2001	432		
035017L37	2001	441		
035017L36	2001	365		
035017L35	2001	364		
035017L34	2001	318		
035017L33	2001	288		
035017L32	2001	180		
035017L31	2001	402		
035017L30	2001	171		
035017L29	2001	336		
035017L28	2001	374		
035017L27	2001	375		
035017L26	2001	338		
035017L25	2001	406		
035017L24	2001	391		
035017L23	2001	442		
035017L22	2001	379		
035017L21	2001	366		
035017L20	2001	372		
035017L19	2001	347		
035017L18	2001	179		
035017L17	2001	374		
035017L16	2001	347		
035017L15	2001	354		
035017P100	2001	170		
035017P101	2001	306		
035017P104	2001	378		
035017P108	2001	347		
035017P111	2001	277		
035017P114	2001	336		
035017P116	2001	244		
035017P119	2001	335		
035017P123	2001	343		

PROVA	MOPS	Vs ₃₀	H	Vs _H
035017P127	2001	317		
035017P128	2001	404		
035017P16	2001	396		
035017P21	2001	517		
035017P3	2001	371		

TAB. 31 – RISULTATI DELLE MISURE DI VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S IN COMUNE DI CAVRIAGO

5.6. Carta 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 $0.5s \leq T \leq 1.5s$,
- $FH_{SI} = SI/SI_0$, 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 $0.5s \leq T \leq 1.5s$.

Nella seguente Tab. 32 sono indicate le analisi di Risposta Sismica Locale utilizzate per calcolare i sopraindicati parametri della microzona individuata (2001), riportando a che sito sono riferite e in che paragrafo della presente relazione sono descritte.

MOPS	Analisi di Risposta Sismica Locale	Tipo di zona	Sito RSL	Paragrafo
2001	RSL.1	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Palazzetto dello Sport	3.6.1
	RSL.2	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Magazzini comunali	3.6.2

MOPS	Analisi di Risposta Sismica Locale	Tipo di zona	Sito RSL	Paragrafo
	RSL.3	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Via della Repubblica	3.6.3
	RSL.4	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Corte Tegge	3.6.4
	RSL.5	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Quercioli	3.6.5
	RSL.6	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Parco dello sport	3.6.6
	RSL.7	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Ghiardo	3.6.7

TAB. 32 – 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. 49 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.









Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (classe del parametro di amplificazione). ¹⁴	
	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. 49 – LEGENDA ADOTTATA PER L'ACCORPAMENTO DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE NELLE ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

5.7. Carta dello scuotimento atteso

Quali ultimi elaborati grafici, come prescritto dalla DGR 630/2019, sono state redatte delle carte della distribuzione sul territorio dei valori di H_{SM} , parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in g).

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 TR 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 TR=475 anni, dallo spettro su suolo A utilizzando i dati di accelerazione spettrale ($Se(T)$) forniti da INGV¹¹ 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.

¹¹ 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>



$H_{SM} \leq 0,21g$ $H_{0408} \leq 0,14g$ $H_{0711} \leq 0,09g$	204, 204, 204	$0,71g \leq H_{SM} \leq 0,85g$ $0,46g \leq H_{0408} \leq 0,55g$ $0,30g \leq H_{0711} \leq 0,35g$	255, 170, 0
$0,22g \leq H_{SM} \leq 0,38g$ $0,15g \leq H_{0408} \leq 0,25g$ $0,10g \leq H_{0711} \leq 0,16g$	0, 255, 255	$0,86g \leq H_{SM} \leq 0,99g$ $0,56g \leq H_{0408} \leq 0,65g$ $0,36g \leq H_{0711} \leq 0,45g$	252, 0, 0
$0,39g \leq H_{SM} \leq 0,54g$ $0,26g \leq H_{0408} \leq 0,34g$ $0,17g \leq H_{0711} \leq 0,22g$	85, 255, 0	$H_{SM} \geq 1g$ $H_{0408} \geq 0,66g$ $H_{0711} \geq 0,46g$	204, 0, 204
$0,55g \leq H_{SM} \leq 0,70g$ $0,35g \leq H_{0408} \leq 0,45g$ $0,23g \leq H_{0711} \leq 0,29g$	255, 255, 0	N.B.: H_{0515} come H_{0711}	

FIG. 50 – LEGENDA ADOTTATA PER L'ACCORPAMENTO DEI VALORI DI H_{SM}

6. BIBLIOGRAFIA

- Albarelo 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
- Baldi M., Baldini U., Bevivino R., Castagnetti S., Daminelli R., Gianferrari C., Marcellini A., Martelli L. e Tento A., 2010: UNIONE TERRE DI CASTELLI: VALIDAZIONE DELLA MICROZONAZIONE SISMICA DI II LIVELLO (2010) - 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale Geofisica della Terra Solida, Prato.
- Basili R., G. Valensise, P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008), THE DATABASE OF INDIVIDUAL SEISMOGENIC SOURCES (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014
- Bisch P., Carvalho E., Degee H., Fajfar P., Fardis M., Franchin P., Kreslin M., Pecker A., Pinto P., Plumier A., Somja H., Tsionis G. (2012): EUROCODE 8: SEISMIC DESIGN OF BUILDINGS. WORKED EXAMPLES. European Commission, Joint Research Centre. 515 pp. Scientific and Technical Research series, ISSN 1831-9424, ISBN 978-92-79-23068-4, doi:10.2788/91658
- 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. http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833
- Locati M., Camassi, R. e Stucchi M. (a cura di) (2011) . DBMI11, LA VERSIONE 2011 DEL DATABASE MICROSISMICO ITALIANO. Milano,Bologna, <http://Emidius.mi.ingv.it/DBMI11>
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, THE 2015 VERSION OF THE ITALIAN MACROSEISMIC DATABASE. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L., Poggi V. (2019): MAPPING THE SEISMIC BEDROCK IN THE PO-PLAIN (ITALY) THROUGH AMBIENT VIBRATION MONITORING. Bull. Seism. Soc. Am., 109(1), 164-177. doi: 10.1785/0120180193
- Marcellini A., Martelli L, Tento A., Daminelli R. - L'AMPLIFICAZIONE SISMICA NEGLI "INDIRIZZI PER GLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA IN EMILIA-ROMAGNA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA" (2009)
- Martelli L. (coord.), Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F. C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F. (2017a): CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA E AREE LIMITROFE. Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. Con note illustrative e CD. DREAM Italia. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/pubblicazioni/cartografia-geo-tematica/carta-sismotettonica-della-regione-emilia-romagna-e-aree-limitrofe-edizione-2016>
- Martelli L., Santulin M., Sani F., Tamaro A., Bonini M., Rebez A., Corti G., Slejko D. (2017b): SEISMIC HAZARD OF THE NORTHERN APENNINES BASED ON 3D SEISMIC SOURCES. Journal of Seismology. DOI 10.1007/s10950-017-9665-1. Versione estesa in italiano "Analisi 3D della pericolosità sismica dell'Appennino settentrionale" in <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/convegni-seminari-corsi/2017-nuovi-studi-sulla-pericolosita-sismica-regionale>
- Meletti C. e Valensise G., (2004). ZONAZIONE SISMOGENETICA 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.

- Naso G., Martelli L., Baglione M., Brammerini F., Castenetto S., D'Intinosante V., Ercolessi G. (2019): MAPS FOR LAND MANAGEMENT: FROM GEOLOGY TO SEISMIC HAZARD. Boll. Geof. Teor. Appl., Vol. 60, DOI 10.4430/bgta0263
- Pieri M. e Groppi G. (1981). SUBSURFACE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE PO PLAIN. Pubbl.414, PF Geodinamica. C.N.R. pp. 23.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P. (2019): CATALOGO PARAMETRICO DEI TERREMOTI ITALIANI (CPTI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.2>
- RER & ENI-Agip (1998): RISERVE IDRICHE SOTTERRANEE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione & Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120
- CARTA GEOLOGICA DI PIANURA DELL'EMILIA-ROMAGNA, alla scala 1:250'000, realizzata dalla Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli Regione della Emilia-Romagna
- DGR 630/2019: DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 29 aprile 2019, n. 630 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)". B.U.R.E.R. n. 143 del 6 maggio 2019, parte seconda
- GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION - SESAME European research project, dicembre 2004
- 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
- NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA – FOGLIO 200 "Reggio nell'Emilia" - APAT – REGIONE EMILIA-ROMAGNA
- NTC 2018: AGGIORNAMENTO DELLE "NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI". Decreto 17/01/2018 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Suppl. Ord. G.U. n. 42 del 20/02/2018.
- OPCM 3519/2006: ORDINANZA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI N. 3519 DEL 28/04/2006 "CRITERI GENERALI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE ZONE SISMICHE E PER LA FORMAZIONE E L'AGGIORNAMENTO DEGLI ELENCHI DELLE MEDESIME ZONE". G.U. n. 108 del 11/05/2006.
- Seed H. B., Idriss I. M. – 1970 – Soil modul and damping factors for dynamic response analyses – University of California Berkeley Structural Engineers and Mechanics
- Sesame (2004): Guidiline For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique On Ambient Vibrations Measurements, Processing And Interpretation – European research project.
- Vucetic M., Dobry R. – 1991 – Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, Issue 1



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 1/2	Carta delle indagini	scala 1:5.000
1 2/2	Carta delle indagini	scala 1:5.000
2	Carta geologico-tecnica	scala 1:10.000
3	Carta delle frequenze naturali dei terreni	
3 1/2	Carta delle frequenze naturali dei terreni	scala 1:5.000
3 2/2	Carta delle frequenze naturali dei terreni	scala 1:5.000
4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)	scala 1:10.000
5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	
5 1/2	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	scala 1:5.000
5 2/2	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	scala 1:5.000
6.a	Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}	
6.a 1/2	Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}	scala 1:5.000
6.a 2/2	Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}	scala 1:5.000
6.b.1	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1-0,5\ s}$	
6.b.1 1/2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1-0,5\ s}$	scala 1:5.000
6.b.1 2/2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1-0,5\ s}$	scala 1:5.000
6.b.2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$	
6.b.2 1/2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$	scala 1:5.000
6.b.2 2/2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$	scala 1:5.000
6.b.3	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	
6.b.3 1/2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	scala 1:5.000
6.b.3 2/2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	scala 1:5.000
6.b.4	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	
6.b.4 1/2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	scala 1:5.000
6.b.4 2/2	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	scala 1:5.000
6.c.1	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	
6.c.1 1/2	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	scala 1:5.000
6.c.1 2/2	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	scala 1:5.000
6.c.2	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	
6.c.2 1/2	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	scala 1:5.000
6.c.2 2/2	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	scala 1:5.000
6.c.3	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	
6.c.3 1/2	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	scala 1:5.000
6.c.3 2/2	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	scala 1:5.000
6.d	Carta di microzonazione sismica - H_{SM}	
6.d 1/2	Carta di microzonazione sismica - H_{SM}	scala 1:5.000
6.d 2/2	Carta di microzonazione sismica - H_{SM}	scala 1:5.000
6.e.1	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4-0,8\ s}$	
6.e.1 1/2	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4-0,8\ s}$	scala 1:5.000



Elaborato		scala
6.e.1 2/2	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4-0,8\ s}$	scala 1:5.000
6.e.2	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7-1,1\ s}$	
6.e.2 1/2	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7-1,1\ s}$	scala 1:5.000
6.e.2 2/2	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7-1,1\ s}$	scala 1:5.000
6.e.3	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5-1,5\ s}$	
6.e.3 1/2	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5-1,5\ s}$	scala 1:5.000
6.e.3 2/2	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5-1,5\ s}$	scala 1:5.000

Inoltre, alla presente Relazione, è stato allegato l'Elaborato 7 – Nuove indagini contenente le indagini di nuova esecuzione.