



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



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 Bibbiano



Regione

Emilia–Romagna

Soggetto realizzatore



Direttori tecnici:

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.....	8
2.2.	Prova sismica in foro di tipo Down-Hole.....	9
2.3.	Rilievo sismico HVSR mediante tromografo.....	12
2.4.	Prove sismiche di tipo MASW.....	14
3.	Analisi di risposta sismica locale.....	17
3.1.	Pericolosità sismica di base.....	19
3.2.	Segnali in input.....	19
3.3.	Modello geofisico del sottosuolo.....	20
3.3.1.	Litologia.....	20
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.....	22
3.4.	Procedura di analisi RSL.....	24
3.4.1.	Metodo lineare equivalente.....	24
3.4.2.	Soluzione alla singola iterazione mediante FEM.....	25
3.4.3.	Smorzamento.....	27
3.4.4.	Procedimento iterativo.....	27
3.4.5.	Interpretazione dei risultati.....	27
3.5.	Analisi dei risultati.....	28
3.5.1.	Spettro di risposta elastico normalizzato.....	31
3.6.	Modelli e risultati della modellazione numerica.....	32
3.6.1.	RSL.1 per il sito "Palazzetto dello sport".....	32
3.6.2.	RSL.2 per il sito "Scuola elementare Secchi".....	36
3.6.3.	RSL.3 per il sito "Istituto M. Ausiliatrice".....	38
3.6.4.	RSL.4 per il sito "Sede UVEN".....	41
3.6.5.	RSL.5 per il sito "Ghiardo zona industriale".....	44
3.6.6.	RSL.6 per il sito "Barco".....	47
3.6.7.	RSL.7 per il sito "Corniano".....	50
3.7.	Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello.....	54
4.	Criticità del metodo.....	56
4.1.	Considerazioni sul bedrock sismico.....	56
5.	Elaborati cartografici.....	58
5.1.	Carta delle indagini.....	59
5.2.	Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica (CGT_MS).....	61
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	73
5.7.	Carta dello scuotimento atteso	75
6.	Bibliografia	77
7.	Allegati	79



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 Bibbiano, 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 Bibbiano 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 alla suddivisione delle aree urbanizzate e di futura urbanizzazione in 3 microzone omogenee 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;
- i risultati delle elaborazioni congiunte REMI-HVSR effettuate all'interno del presente studio hanno evidenziato una superficie di impedenza ad una profondità costante di circa 120 m da p.c. Tale superficie, tuttavia, non ha una corrispondenza "geologica": infatti, le ricostruzioni idrostratigrafiche profonde indicano che la superficie di discontinuità presente a quelle quote (base acquifero C; sotto il Supersintema del Pliocene Medio-Superiore) ha delle forti variazioni all'interno del comune di Bibbiano cui dovrebbero corrispondere differenti profondità della superficie d'impedenza;
- 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 Bibbiano sono stati assimilati per la zona 1 all'ambiente "Margine di tipo A", mentre per le zone 2 e 3 all'ambiente "Margine di tipo B" 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 Bibbiano;
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° 4 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° 5 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.

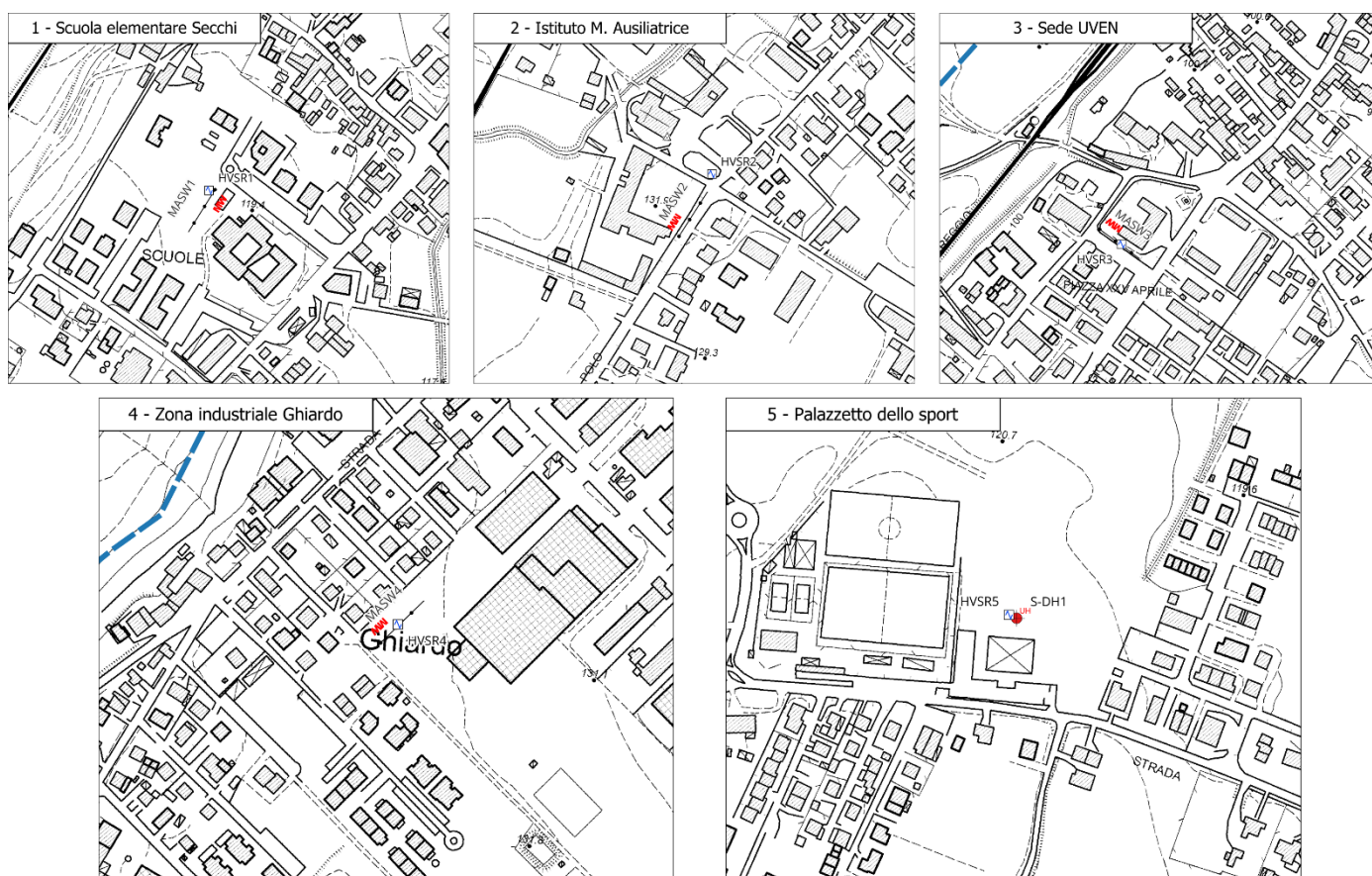


FIG. 1 – UBICAZIONE DELLE INDAGINI EFFETTUATE PER L'ANALISI DI 3° LIVELLO

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 CAROTAGGIO 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 BIBBIANO

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_{s30} , 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 **372.5 m/s**.

I reports completi sono contenuti nell'Elaborato 7.

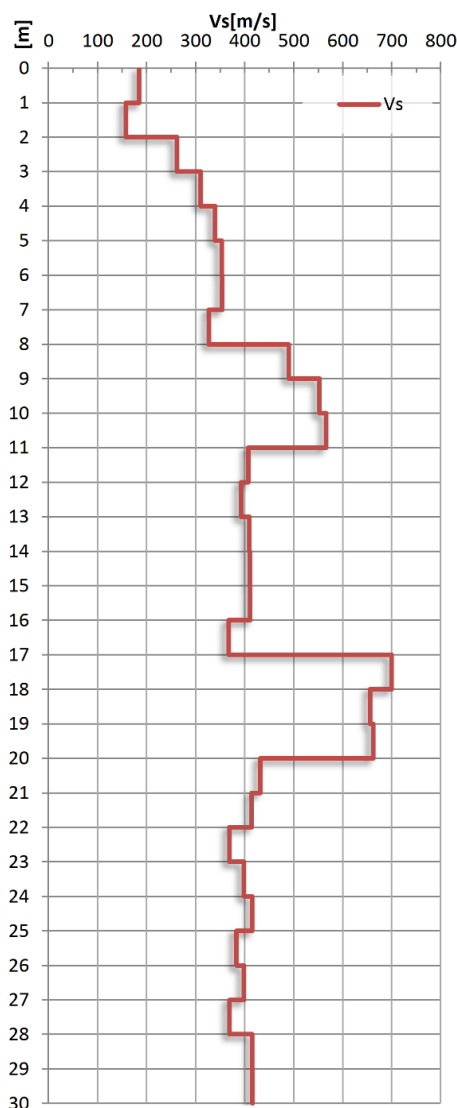


FIG. 4 – GRAFICO V_s DERIVANTE DALLA PROVA DOWN-HOLE

2.3. Rilievo sismico HVSR mediante tromografo

Ai fini della determinazione della frequenza caratteristica dei suoli sono state eseguite in tutto n° 5 prove HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) tramite tromografo digitale, di cui 4 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 DEL TROMOGRAFO 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).

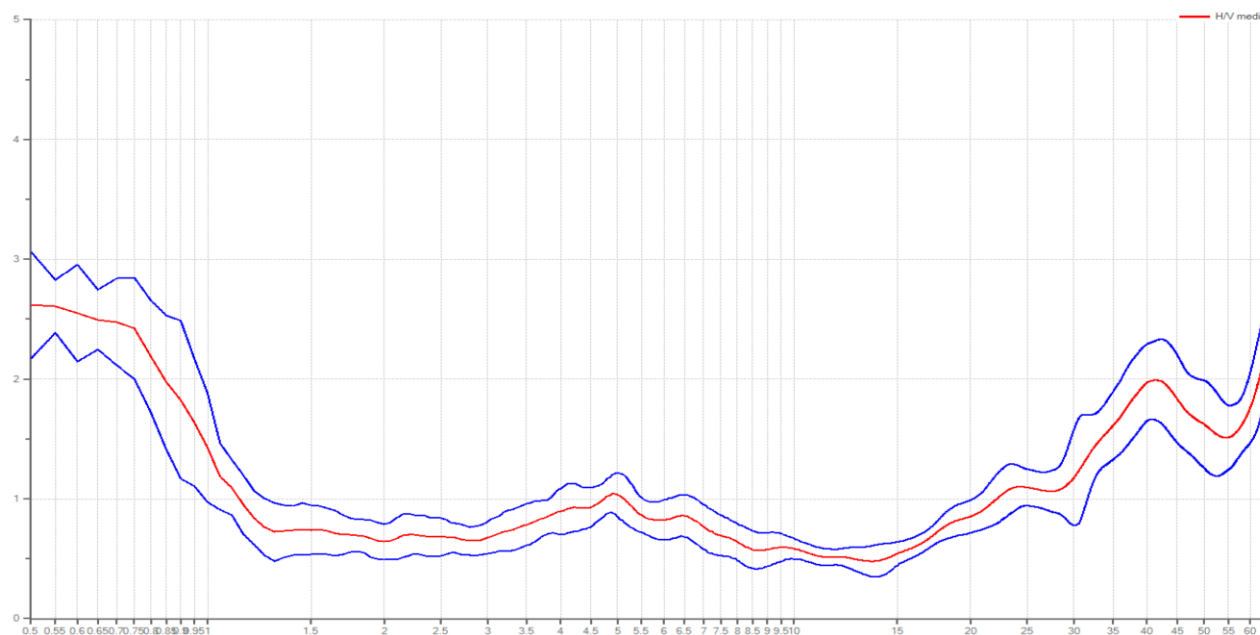


FIG. 6 - RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE DELLA PROVA 035004P249

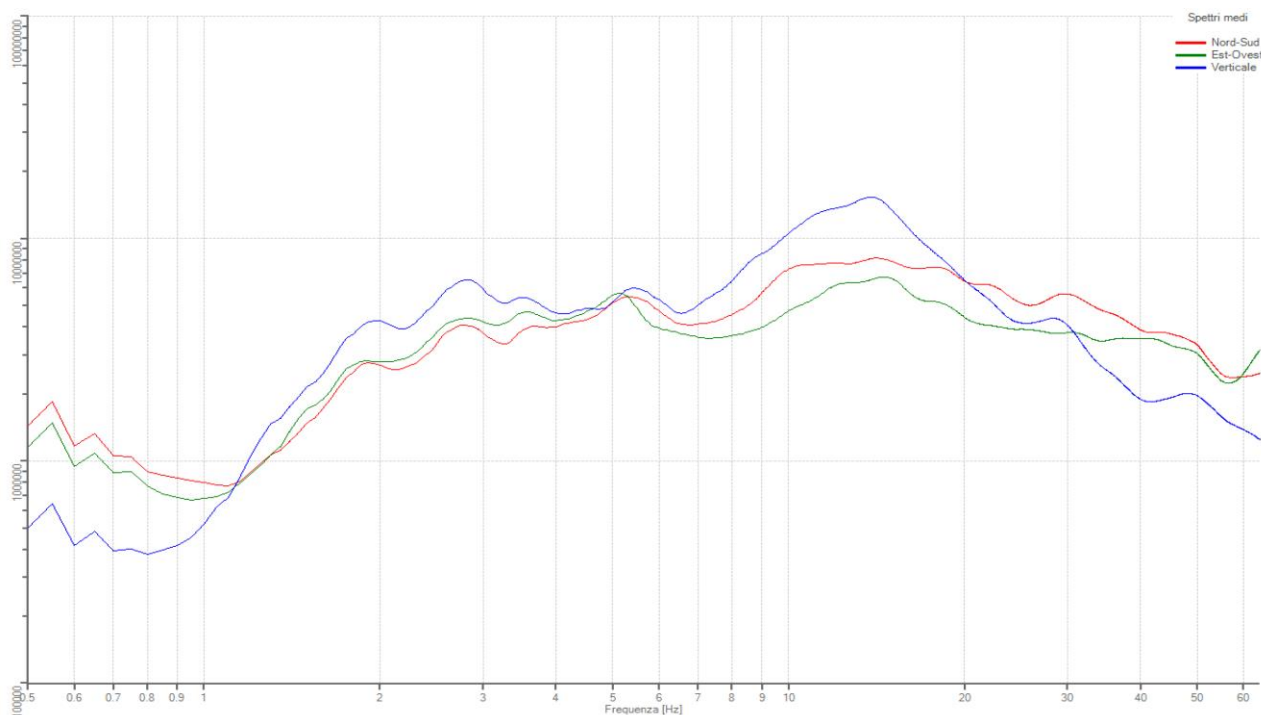


FIG. 7 – SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI DELLA PROVA 035004P249

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), di ampiezza maggiore, e secondarie (F1) corrispondenti ai picchi d'amplificazione individuati.

Codice MS3 ³	N. prova	Picco primario F	Ampiezza A	Picco secondario F1	Ampiezza A1
035004P247	HVSR1	0.55	4.50	6.80	2.45
035004P248	HVSR2	0.70	4.80	7.05	2.90
035004P249	HVSR3	0.50	2.60	5.00	1.05
035004P250	HVSR4	0.55	8.00	4.20	4.10
035004P251	HVSR5	14.15	1.60	0.55	2.60

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°4 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.

³ Codice da normativa regionale



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.

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 V_s .

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.

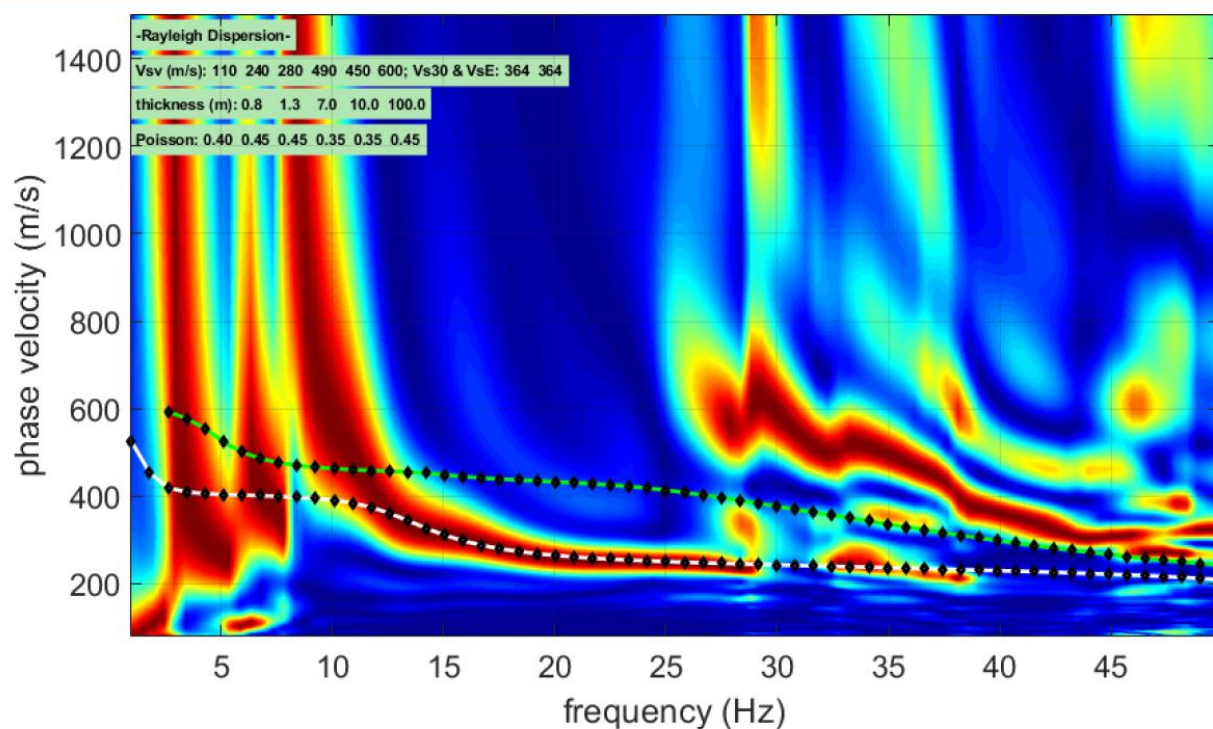
I risultati delle indagini eseguite sono riportati nell'Elaborato 7, mentre nella tabella di seguito si riportano i valori di V_{s30} ottenuti.

Codice MS3 ³	N. prova	V_{s30} (m/s)
035004L94	MASW1	364
035004L95	MASW2	416
035004L96	MASW3	333
035004L97	MASW4	357

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



Modello sintetico su spettro MASW



Modello sintetico su spettro HVSR

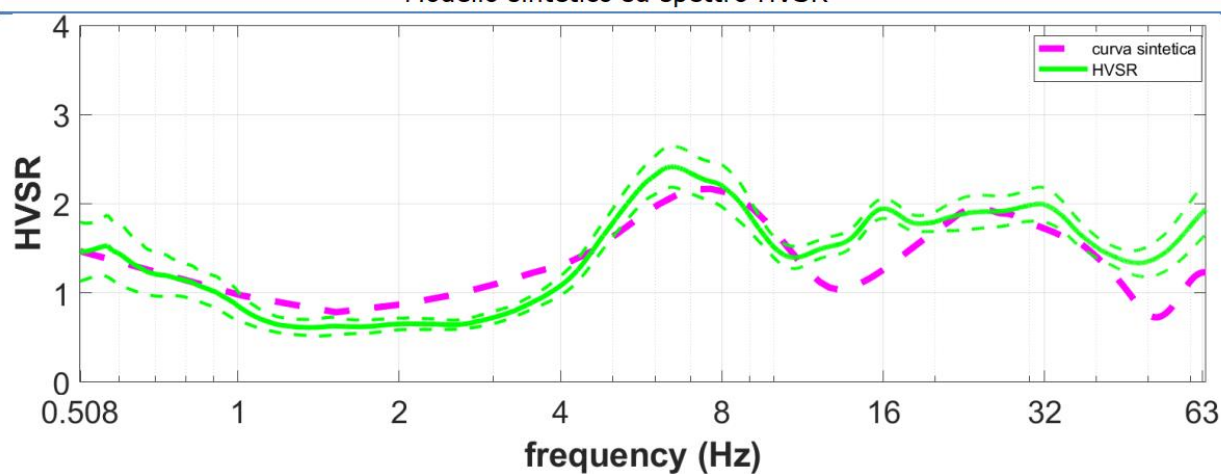


FIG. 8 – MODELLO SINTETICO SU SPETTRO MASW E SU CURVA HVSR

3. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'analisi di 3° livello, per il Comune di Bibbiano, 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 19 profili delle velocità delle onde di taglio S in funzione della profondità, di cui 4 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.

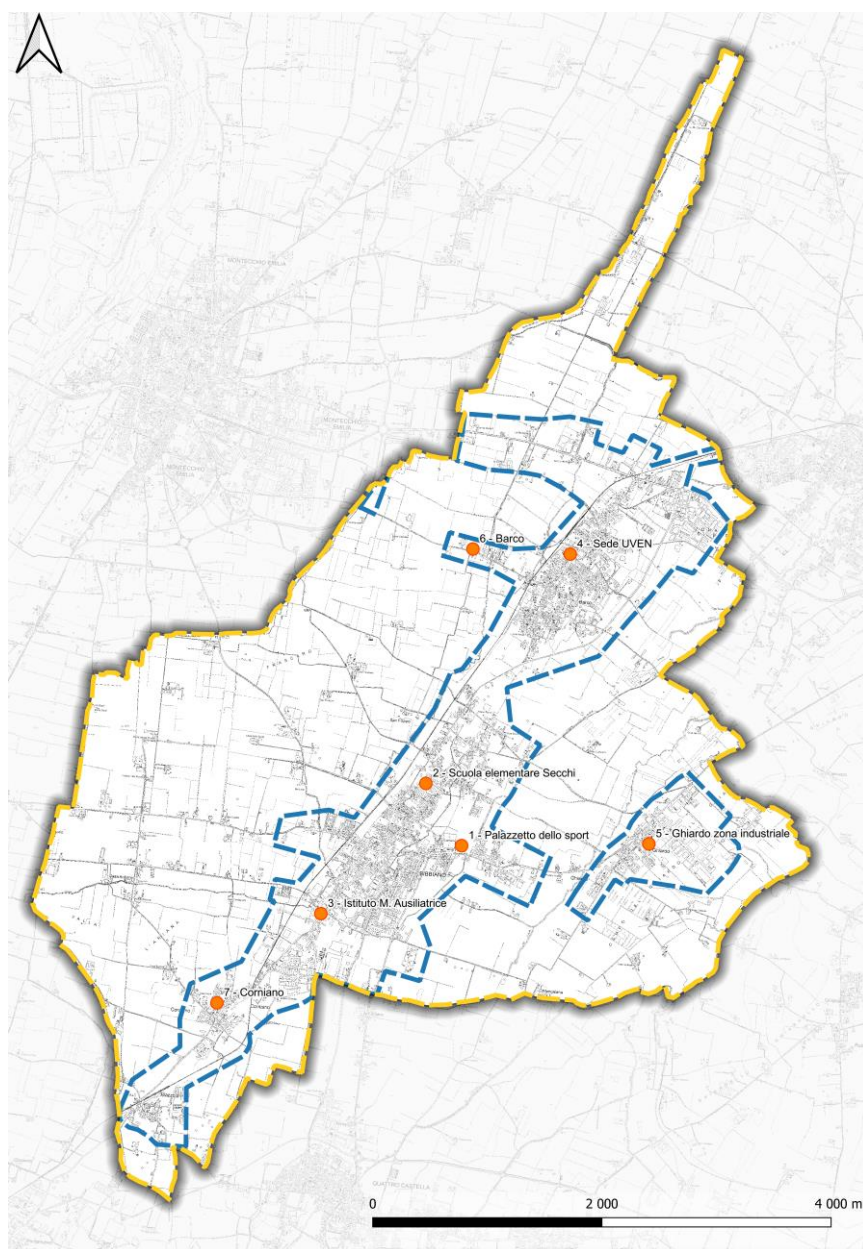


FIG. 9 – UBICAZIONE DELLE VERTICALI UTILIZZATE PER L'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE IN COMUNE DI BIBBIANO



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 4 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 2 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
035004P241	DH	143294	4955422	1 – Palazzetto dello sport	2002
035004L41	MASW	141920	4955618		
035004L87	MASW	141863	4955664		
035004P135	HVSr	141657	4955647		
035004P22	HVSr	141483	4956222	2 – Scuola elementare Secchi	2002
035004L94	MASW	141585	4956230		
035004L95	MASW	140644	4955053	3 – Istituto M. Ausiliatrice	2002
035004L45	MASW	140813	4955003		
035004L44	MASW	140956	4955201		
035004P130	HVSr	140791	4955000		
035004L96	MASW	142819	4958233	4 – Sede UVEN	2002
035004L56	MASW	143031	4958091		
035004L97	MASW	143509	4955671	5 - Ghiardo	2003
035004L80	MASW	141981	4958246	6 - Barco	2001
035004L31	MASW	142249	4958103		
035004L49	MASW	139734	4954288	7 – Corniano	2001
035004P125	HVSr	139569	4954341		
035004L30	MASW	139606	4954311		
035004P127	HVSr	139789	4954496		

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

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):

$a_{ref,g} (a_g/g)$
$0.150 < a_{ref,g} < 0.175$

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 le verticali 4 – Sede UVEN e 6 – Barco, che ricadono nella porzione settentrionale del comune, sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo 16052 (cfr. Tab. 5), mentre per le restanti n° 5 verticali (1 – Palazzetto dello sport, 2 – Scuola elementare Secchi, 3 – Istituto M. Ausiliatrice, 5 – Ghiardo zona industriale e 7 – Corniano) sono stati utilizzati quelli riferiti al nodo 15830 (cfr. Tab. 6).

⁵ R.E.R. (eucentre.it)



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

M_W	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.20	29.90	2.06 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.35 %	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
5.99	54.21	2.55 %	NGA RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
6.93	83.53	1.50 %	NGA RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
6.69	04.07	1.13 %	NGA RSN1091_NORTHV_VAS090.AT2
6.60	31.00	0.64 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
5.90	14.40	2.69 %	ESM IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

TAB. 5 – SISMI ESTRATTI RIFERITI AL NODO 16052

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	04.07	1.02 %	NGA RSN1091_NORTHV_VAS000.AT
5.60	18.00	0.97 %	ESM IT.LRS..HNE.D.19980909.112800.C.ACC.ASC
6.20	78.79	2.70 %	NGA RSN2989_CHICHI.05_CHY102N.AT2
6.60	31.00	0.62 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.50	57.74	3.32 %	NGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP247.AT2

TAB. 6 – SISMI ESTRATTI RIFERITI AL NODO 15830

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 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 quanto riguarda il *bedrock* sismico ($V_s > 800$ m/s), i risultati delle elaborazioni congiunte ReMi-HVSR effettuate all'interno dello studio di secondo livello avevano evidenziato una superficie di impedenza ad una profondità costante di oltre circa 100 m da p.c.. A tale proposito, la prova congiunta MASW-HVSR 2 (035004L95, 035004P248), realizzata per il presente approfondimento di terzo livello, ha confermato la profondità di tale contrasto d'impedenza (cfr. Fig. 10).

Sulla base delle ipotesi effettuate, in tutte le verticali studiate il *bedrock* è di tipo rigido, con $V_s > 800$ m/s, e solitamente è presente un primo spessore di materiali fini (argille e limi) soprastanti orizzonti di depositi prevalentemente grossolani di conoide alluvionale (ghiaie, ghiaie sabbiose, sabbie ghiaiose, limi sabbioso-ghiaiosi), che presentano generalmente valori di V_s molto maggiori di quelli dei terreni fini soprastanti.

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

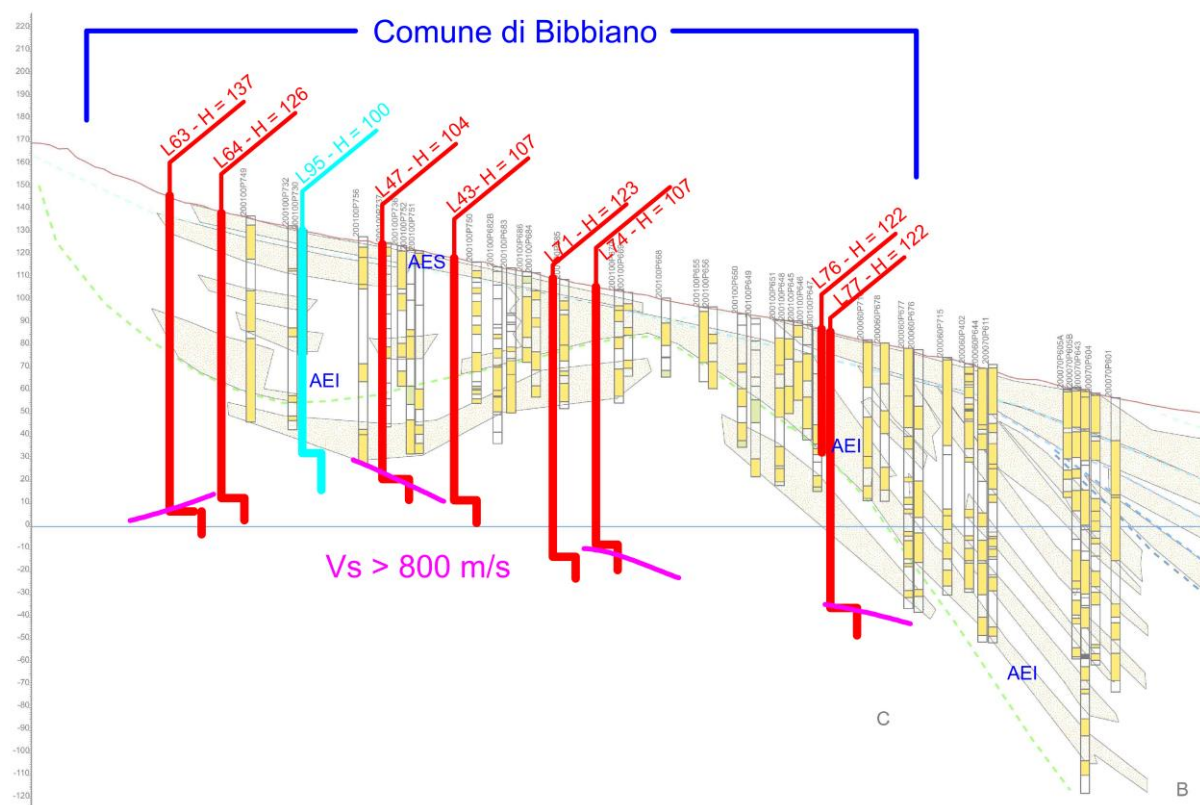


FIG. 10 – STRALCIO DELLA SEZIONE 6 TRATTA DAL SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA CON RAPPRESENTAZIONE DELLA SUPERFICIE D'IMPEDENZA DESUNTA DALLE ELABORAZIONI SISMICHE CONGIUNTE

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

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

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

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

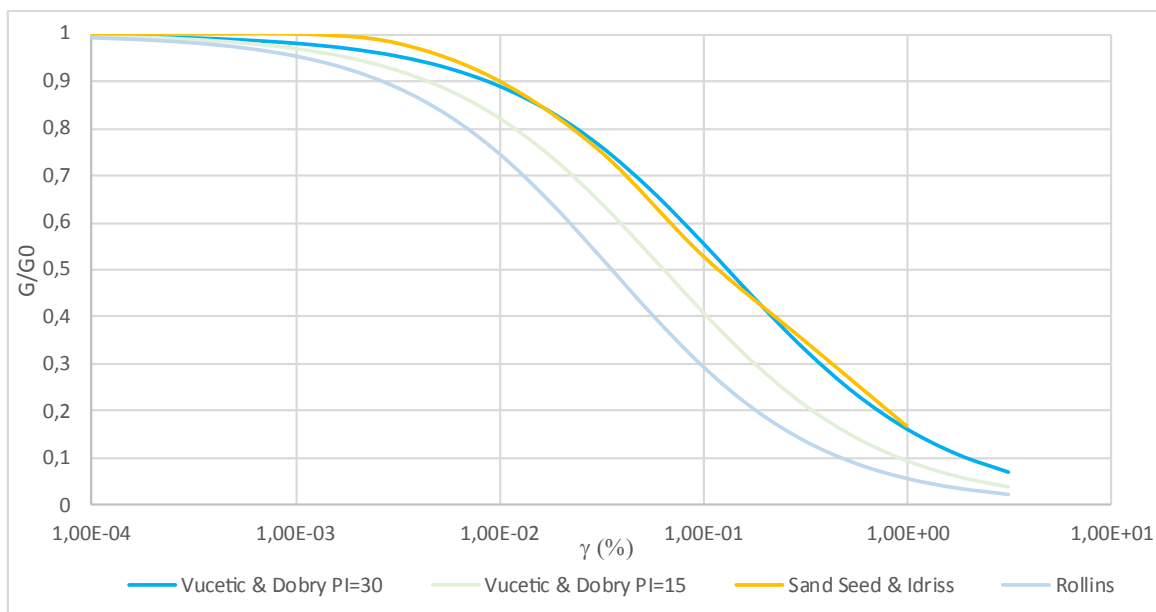
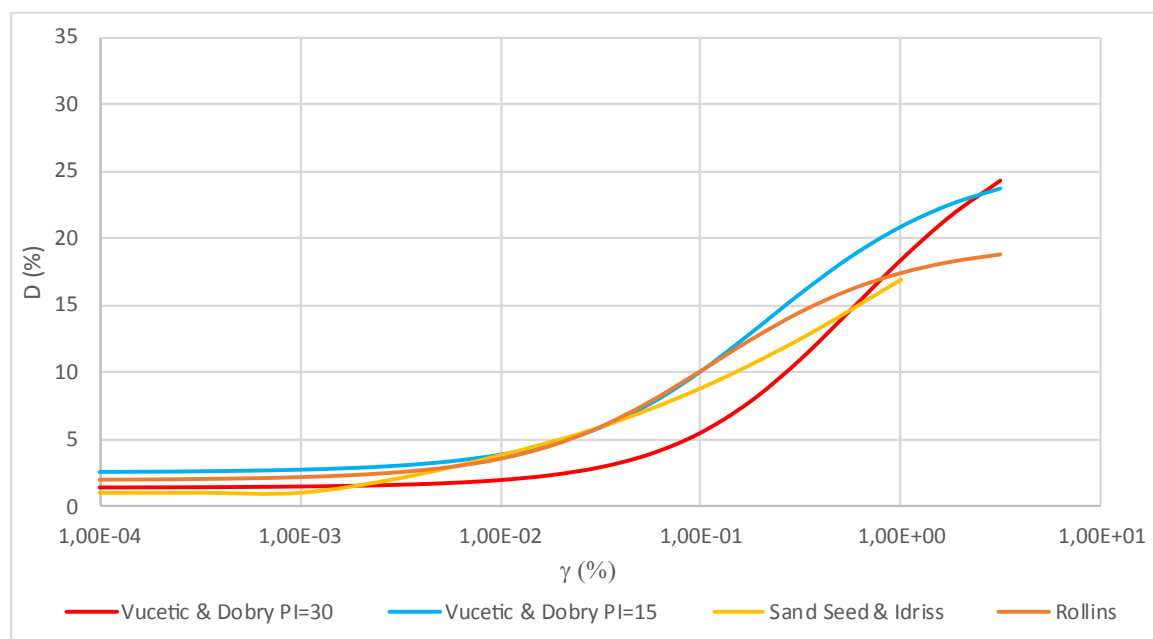
⁸ Rollins K.M., Evans M., Diehl N. and Daily W. – 1998 – Shear modulus and damping relationships for gravels. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., 124 (5), 396-405.



Tipo di curva	Litologia	α	β	η	λ
Sand Seed & Idriss (1970)	Sabbia	14.12	0.93	27.50	3.14
Rollins	Ghiaia	17.02	0.85	19.75	2.28

TAB. 7 – RIEPILOGO DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DELLE CURVE DA LETTERATURA

Nelle seguenti figure sono riportate le curve di interpolazione per i parametri G/G_0 (cfr. Fig. 11) e D (cfr. Fig. 12) provenienti da letteratura.

FIG. 11 – GRAFICO DELLE CURVE G/G_0 IN FUNZIONE DELLA DEFORMAZIONEFIG. 12 - 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. 13. 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;

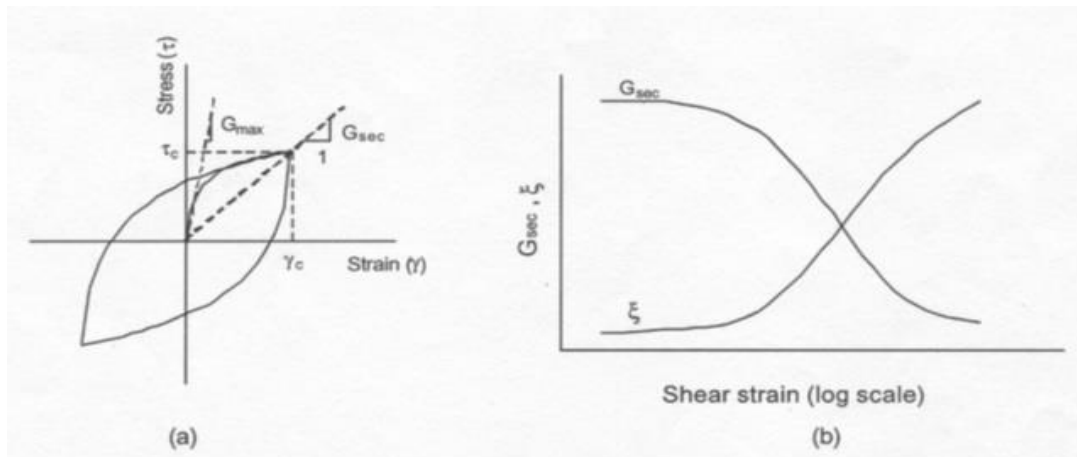


FIG. 13 – MODELLO LINEARE EQUIVALENTE A) CURVE TENSIONE – DEFORMAZIONI; B) VARIAZIONE DEL MODULO

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Fig. 13. 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. 13 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. 13) 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 rigidezza 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

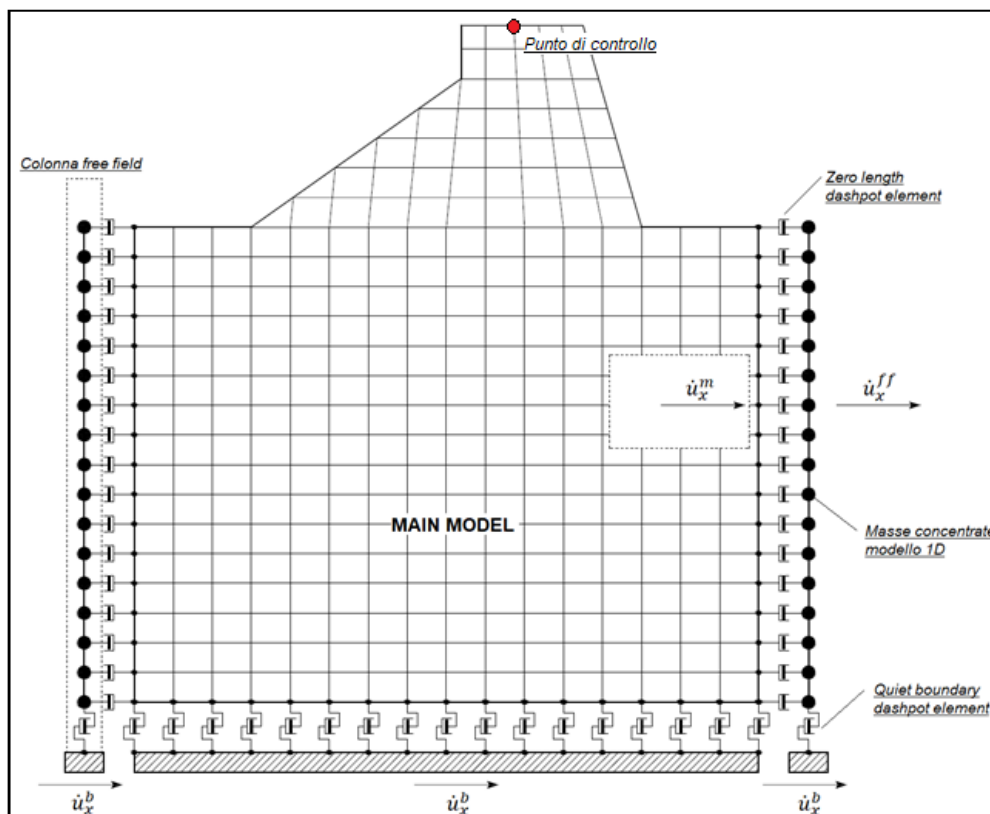


FIG. 14 – DISCRETIZZAZIONE FEM DEL TERRENO

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 Reyleigh;

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

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

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

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

dove:

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

3.4.4. 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. 15 si riporta un esempio) e lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità (PSV di cui in Fig. 16 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. 17 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:

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

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

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

- 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:

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

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

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

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

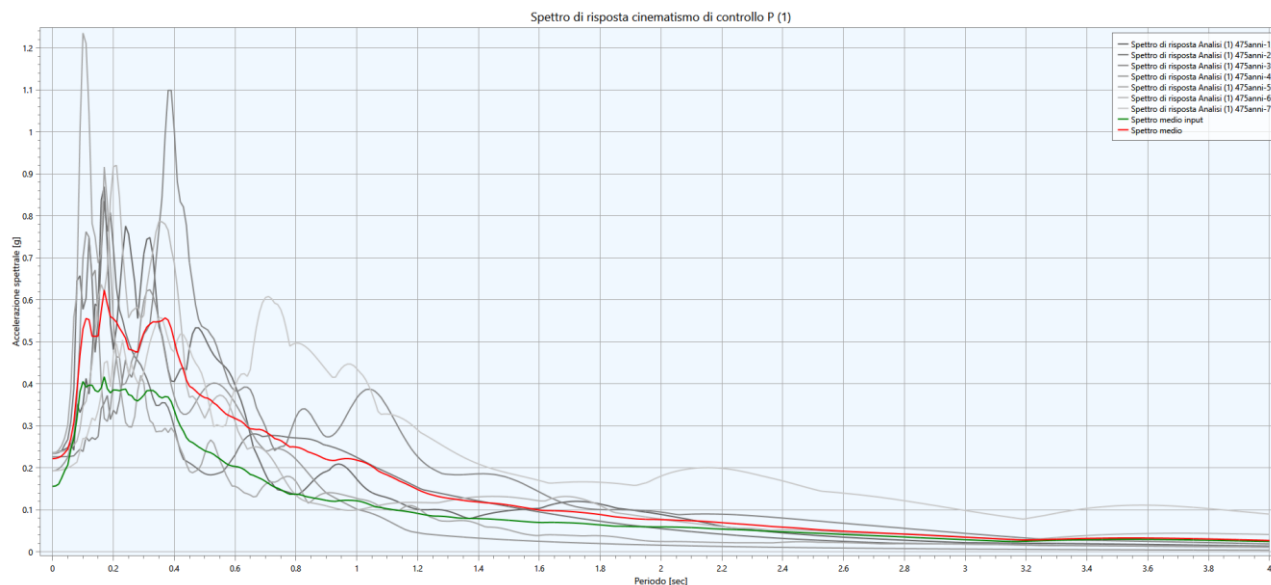


FIG. 15 – ESEMPIO DI SPETTRO ELASTICO IN ACCELERAZIONE (IN GRIGIO GLI SPETTRI DEI SINGOLI ACCELEROGRAMMI, IN VERDE LO SPETTRO MEDIO DI INPUT, IN ROSSO LO SPETTRO MEDIO DI OUTPUT)

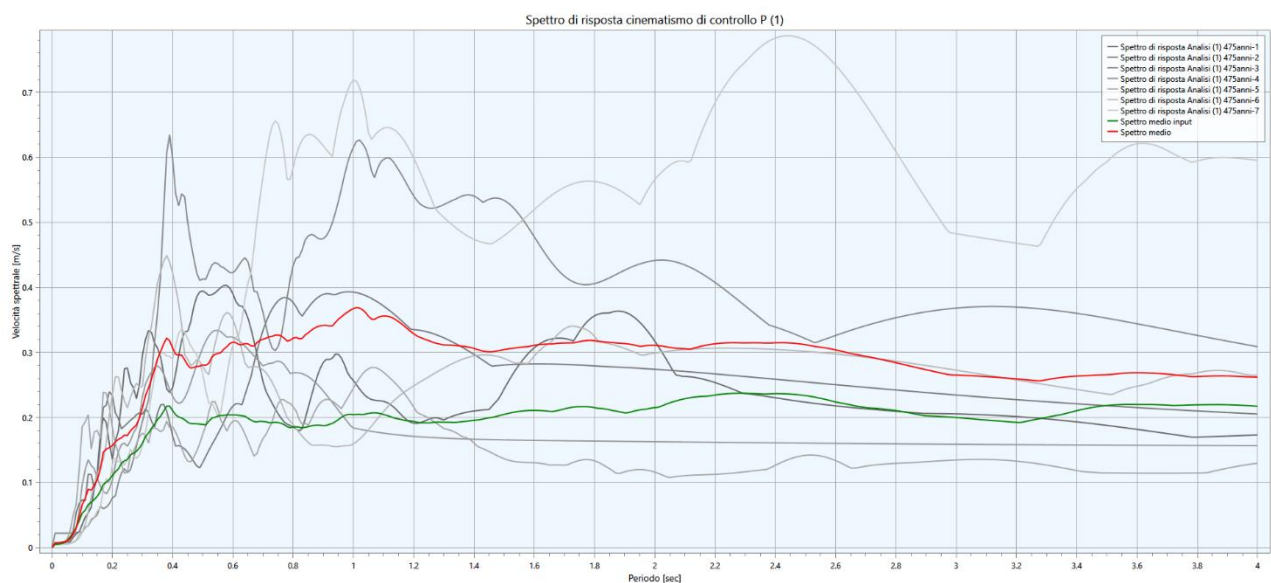


FIG. 16 - SPETTRO ELASTICO IN VELOCITÀ (IN GRIGIO GLI SPETTRI DEI SINGOLI ACCELEROGRAMMI, IN VERDE LO SPETTRO MEDIO DI INPUT, IN ROSSO LO SPETTRO MEDIO DI OUTPUT)

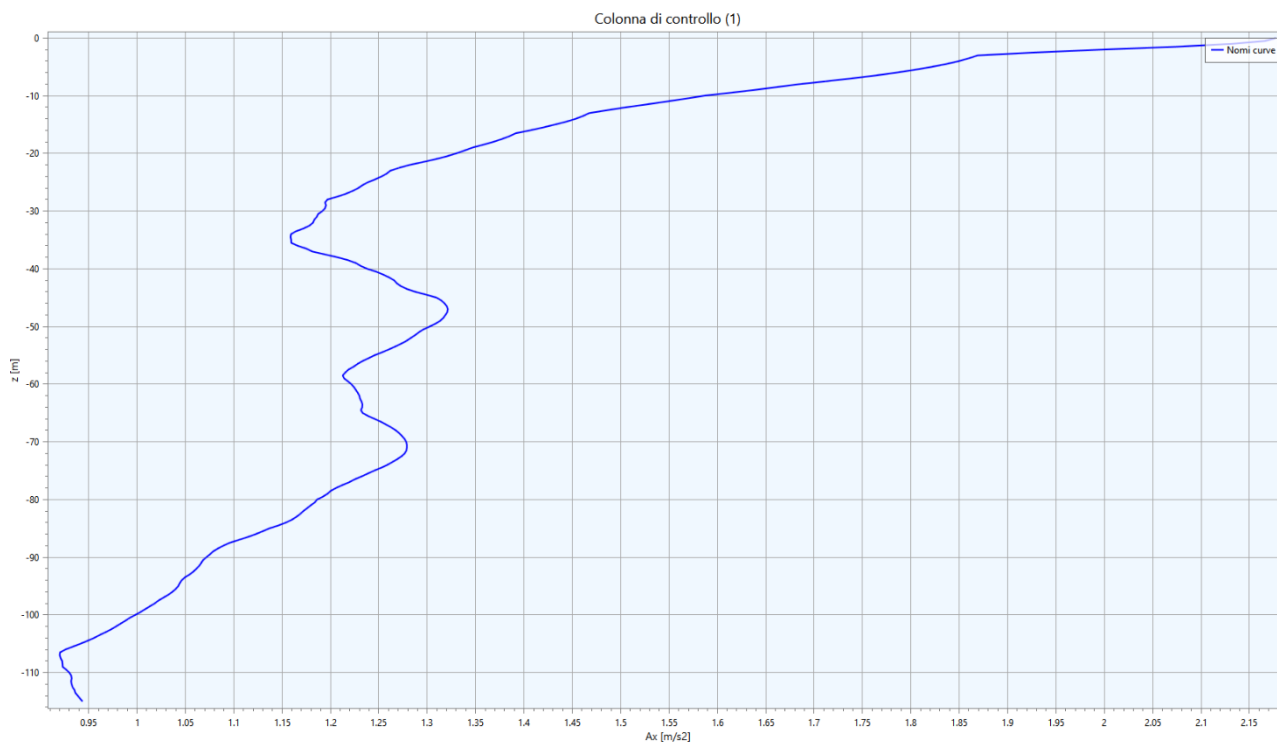


FIG. 17 - VARIAZIONE DELL'ACCELERAZIONE CON LA PROFONDITÀ

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. 18 è riportato il grafico relativo, generato da LSR2D.

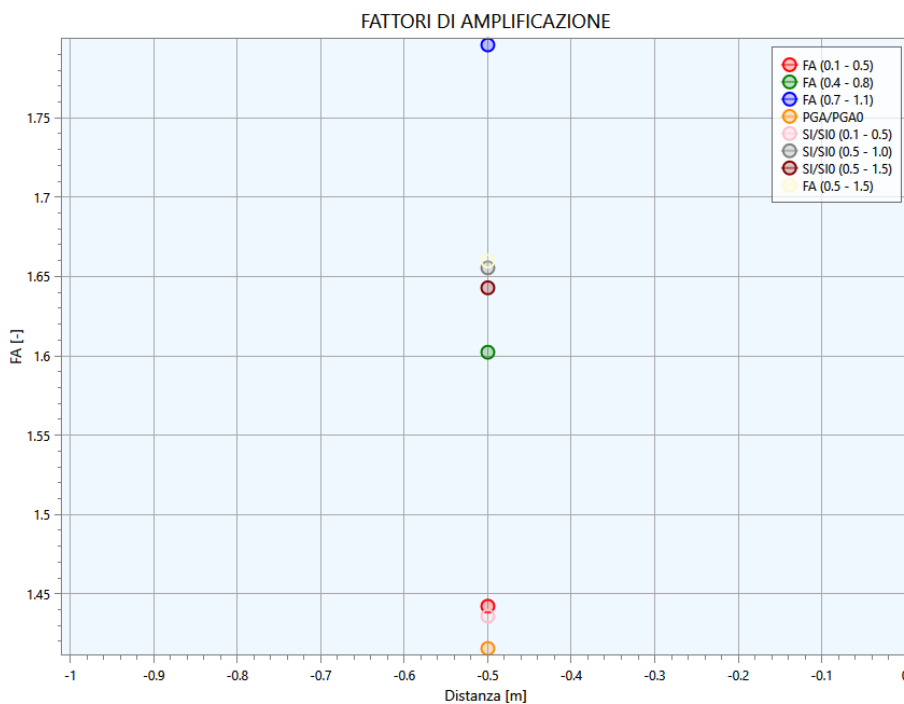


FIG. 18 – GRAFICO DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE



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 ⁹ con il metodo di Newmak-Hall¹⁰.

La normalizzazione dello spettro è avvenuta attraverso la seguente metodologia:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Si determina lo spettro di pseudospostamento (SD) a partire da quello di velocità e quindi si individua il periodo (TD) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudospostamento;
- Si calcola il valore medio dello spettro (SD_m) nell'intorno di TD tra 0.8 TD e 1.2 TD:

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

- Si calcola il valore di T_D con la formula:

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

- Si determina $T_B = 1/3 * T_C$

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

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

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



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

- 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	-10.00	7.00	19.00	340	Sand Seed & Idriss (1970)
Ghiaia 1	-13.00	-45.00	35.00	20.00	410	Rollins
Ghiaia 2	-45.00	-85.00	40.00	21.00	530	Rollins
Ghiaia 3	-85.00	-115.00	30.00	21.00	650	Rollins
Bedrock	-115.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 8 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "PALAZZETTO DELLO SPORT"

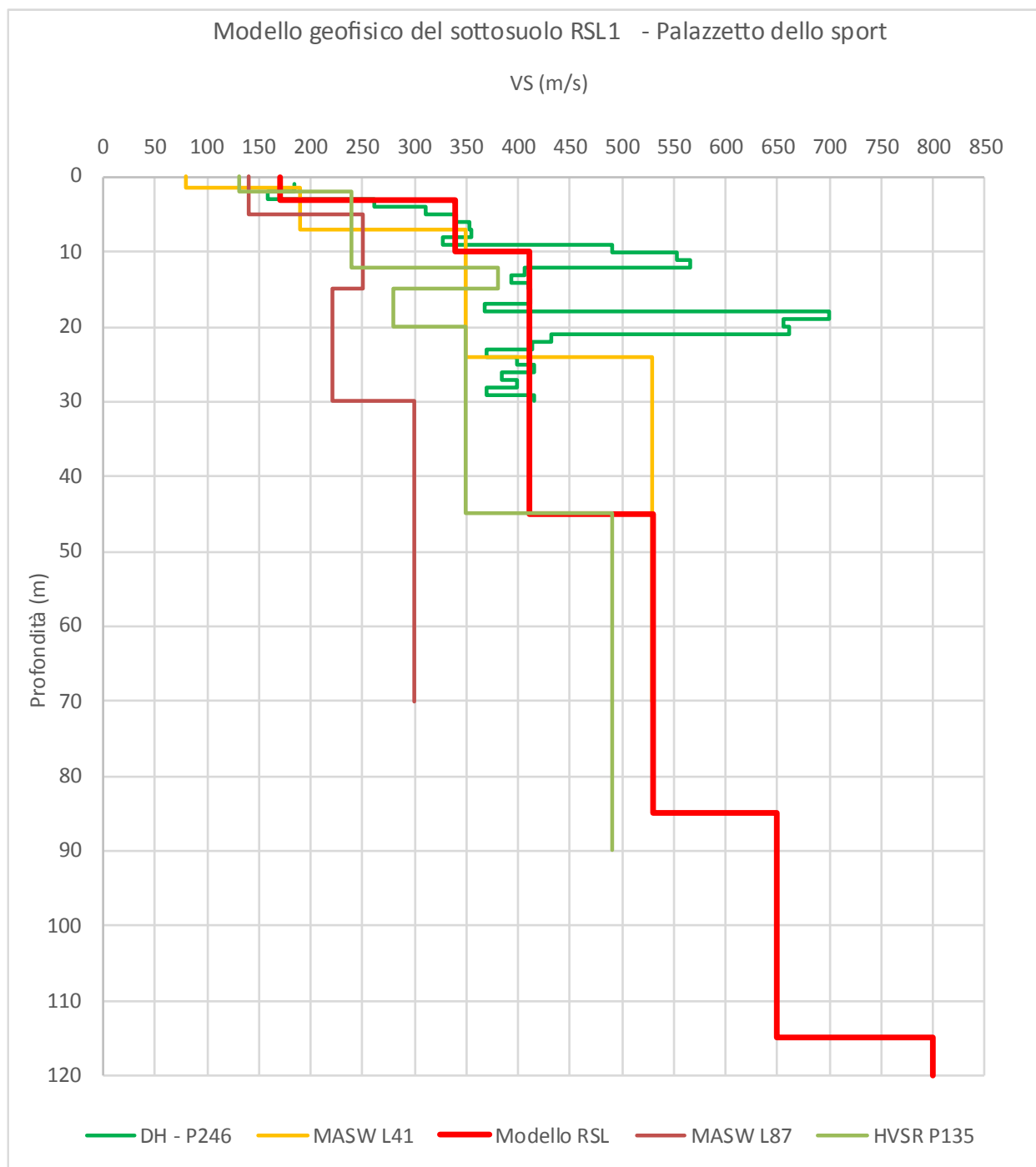


FIG. 19 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "PALAZZETTO DELLO SPORT"

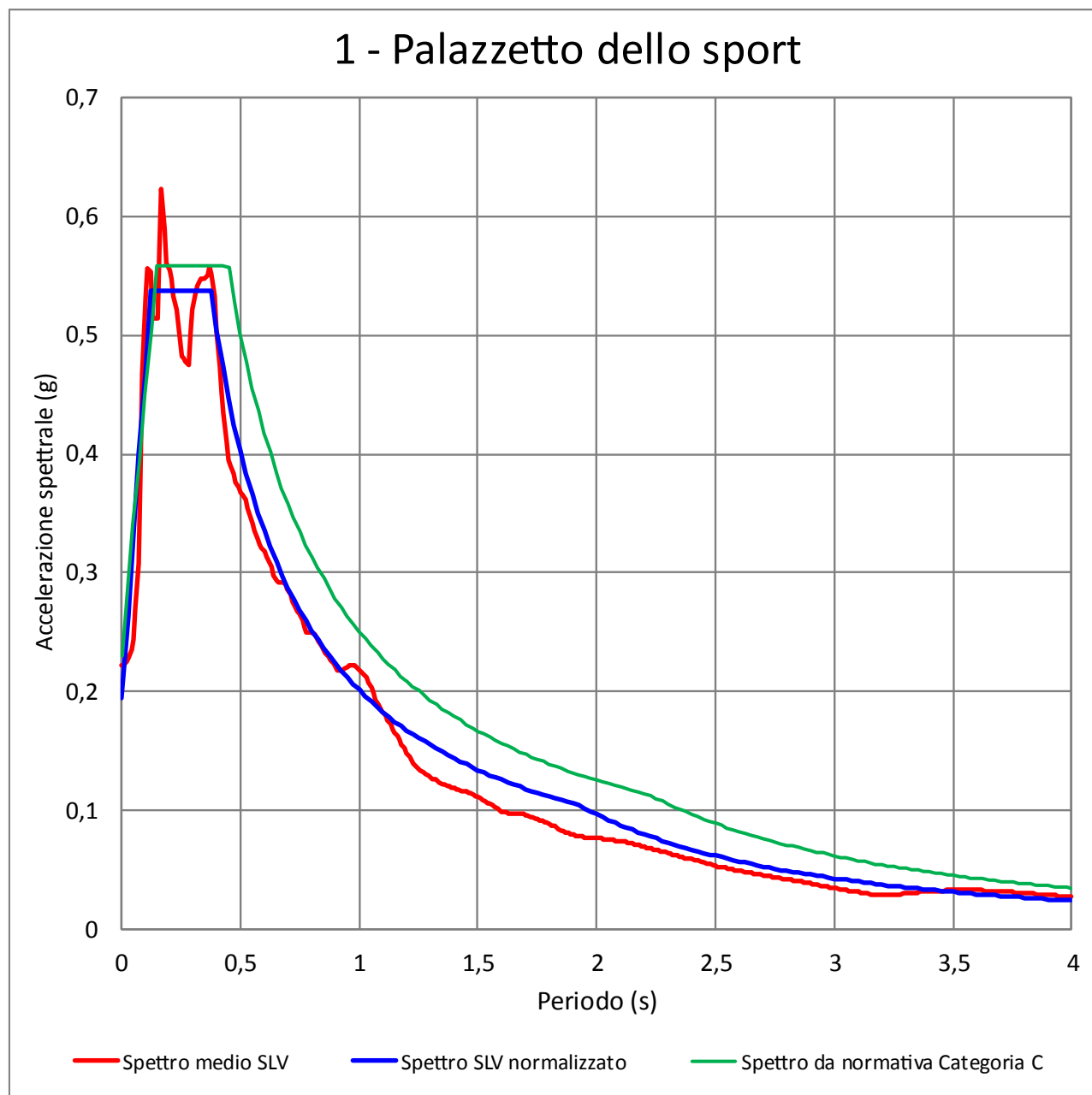


FIG. 20 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "PALAZZETTO DELLO SPORT" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.195	2.765	0.264	1.000	1.000	0.125	0.374	1.924	1.420

TAB. 9 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "PALAZZETTO DELLO SPORT"

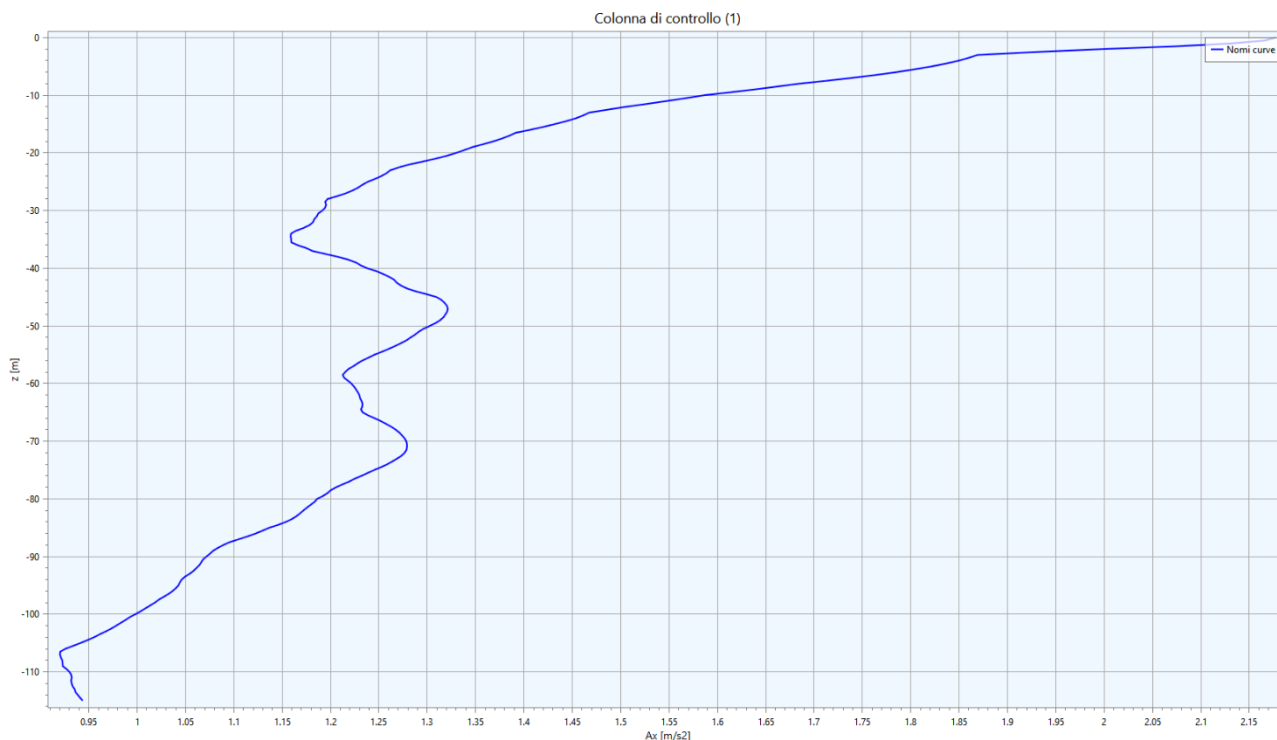


FIG. 21 - ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “PALAZZETTO DELLO SPORT”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.44	2.30	-37.39%
FA (0.4-0.8 s)	1.60	2.20	-27.27%
FA (0.7-1.1 s)	1.80	1.80	0.00%
FA (0.5-1.5 s)	1.66	-	-
PGA/PGA ₀	1.42	2.20	-35.45%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.44	2.40	-40.00%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.66	2.00	-17.00%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.64	-	-

TAB. 10 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “PALAZZETTO DELLO SPORT”



3.6.2. RSL.2 per il sito "Scuola elementare Secchi"

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	240	Vucetic & Dobry, PI=30
Limo	-3.00	-11.00	8.00	18.50	280	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbia	-11.00	-45.00	34.00	19.00	440	Sand Seed & Idriss (1970)
Ghiaia 1	-45.00	-90.00	45.00	20.00	500	Rollins
Ghiaia 2	-90.00	-120.00	30.00	21.00	650	Rollins
Bedrock	-120.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 11 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "SCUOLA ELEMENTARE SECCHI"

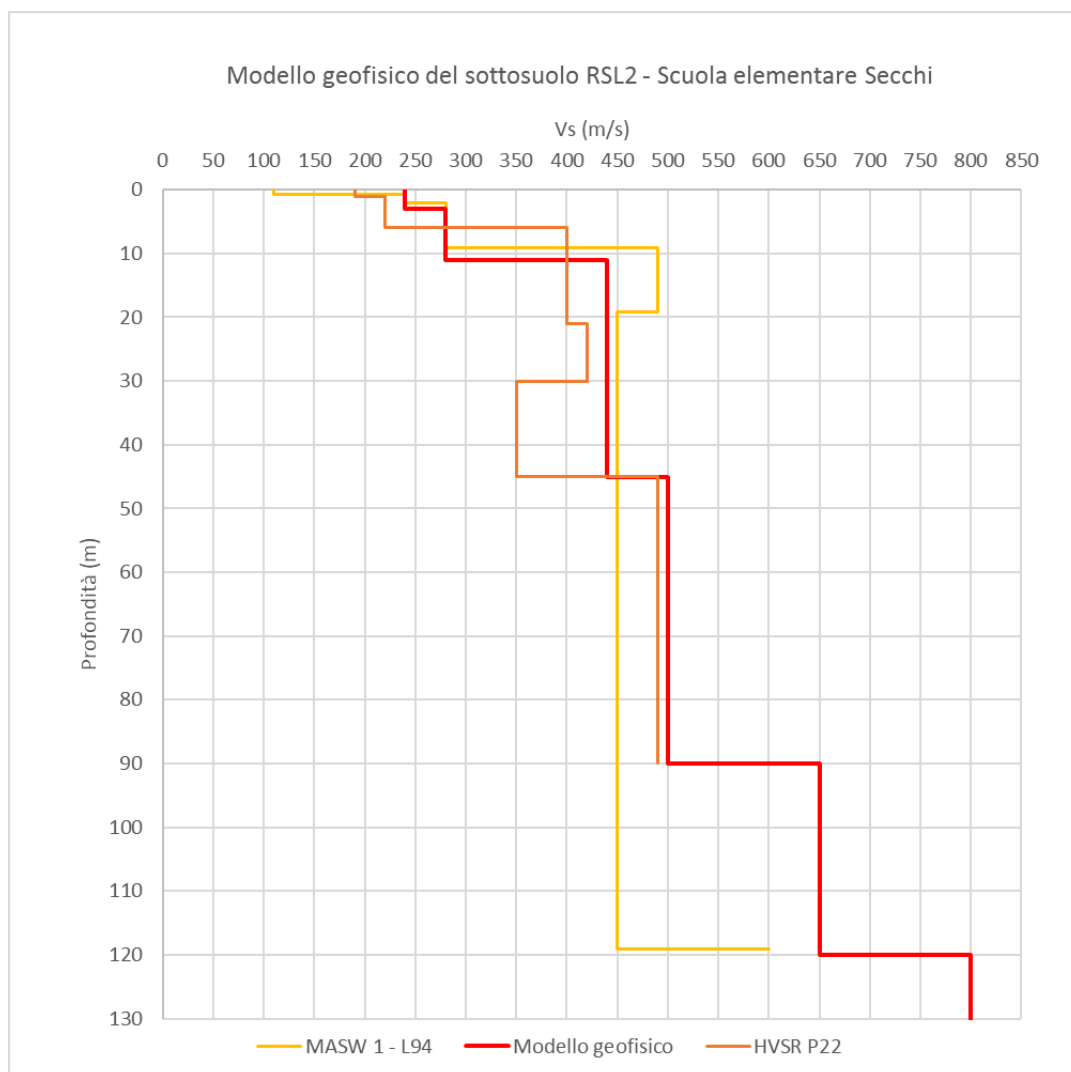


FIG. 22 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "SCUOLA ELEMENTARE SECCHI"

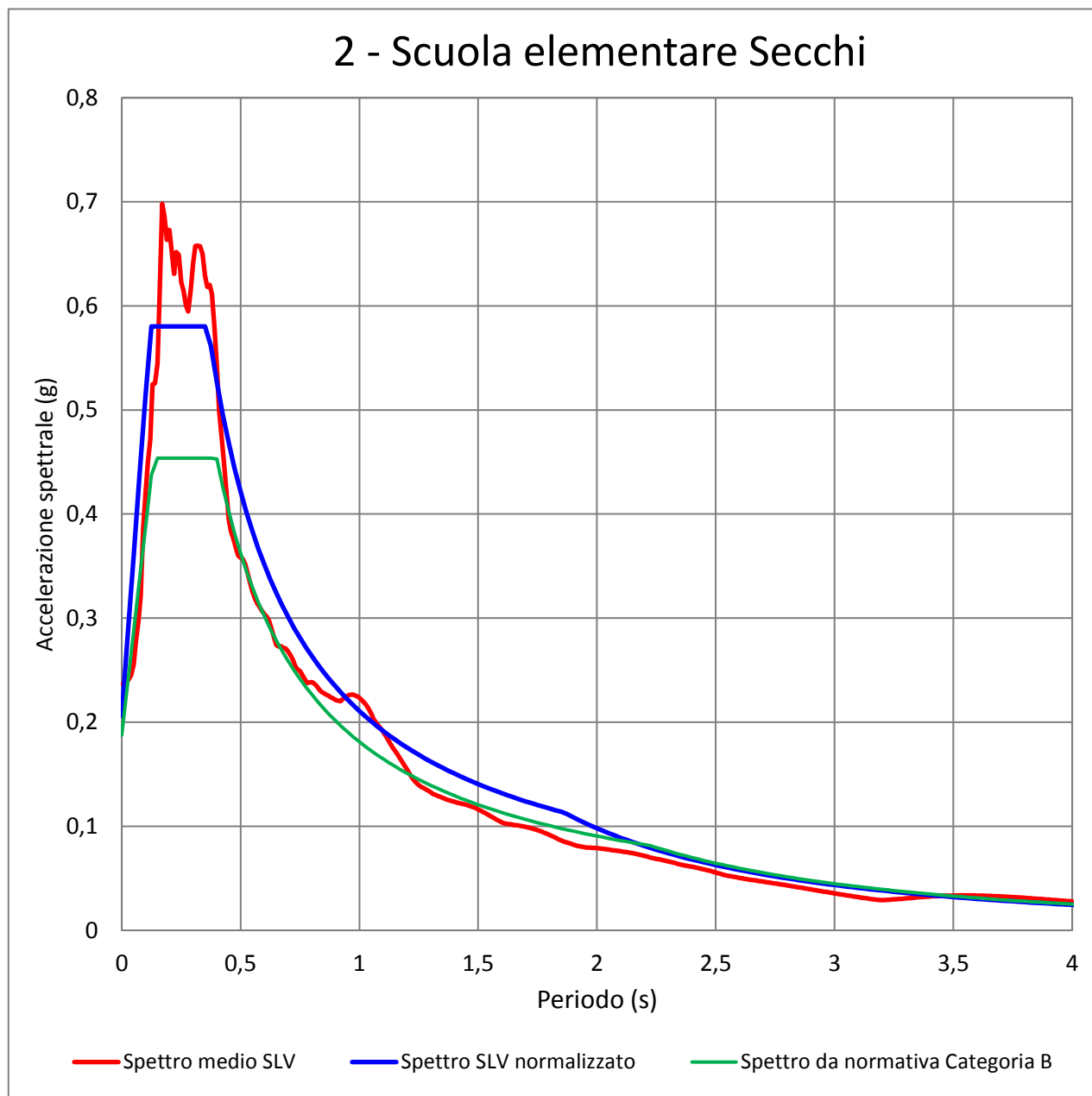


FIG. 23 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "SCUOLA ELEMENTARE SECCHI" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.206	2.820	0.256	1.000	1.000	0.121	0.363	1.860	1.420

TAB. 12 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "SCUOLA ELEMENTARE SECCHI"

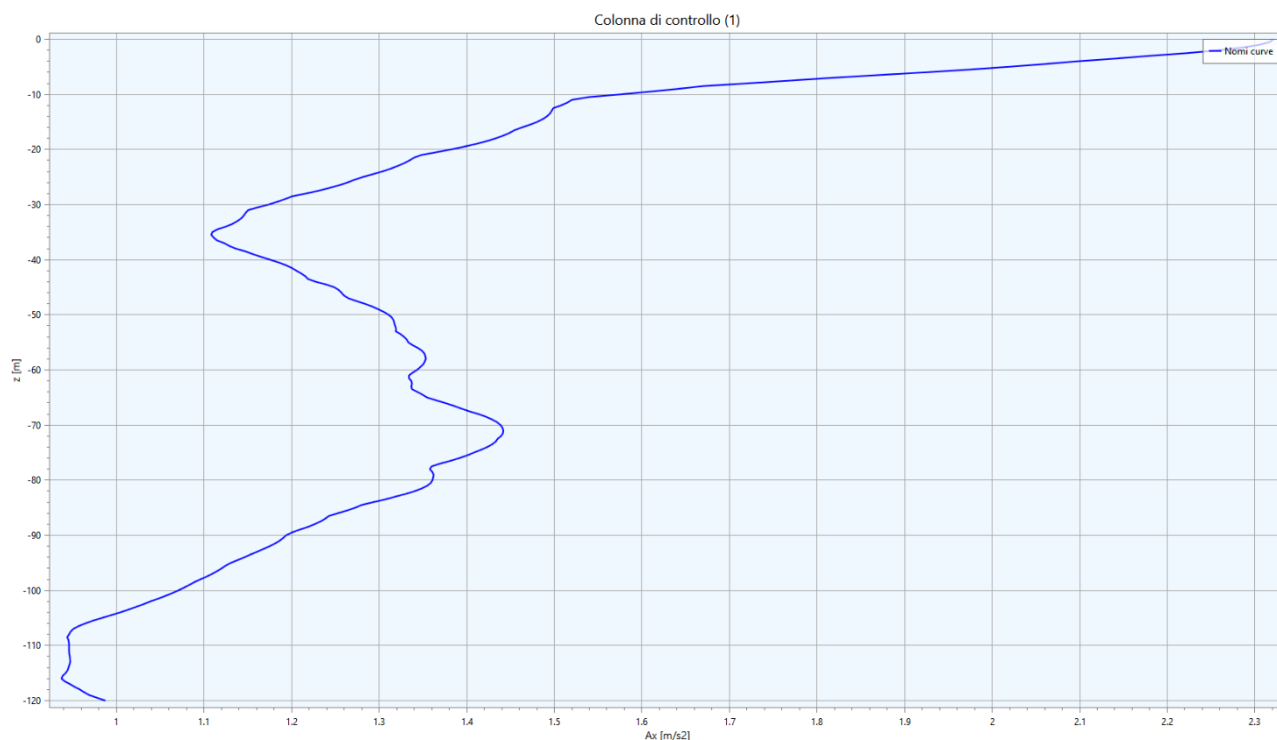


FIG. 24 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “SCUOLA ELEMENTARE SECCHI”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.60	2.30	-30.43%
FA (0.4-0.8 s)	1.55	2.20	-29.55%
FA (0.7-1.1 s)	1.77	1.80	-1.67%
FA (0.5-1.5 s)	1.64	-	-
PGA/PGA ₀	1.50	2.20	-31.82%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.61	2.40	-32.92%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.63	2.00	-18.50%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.65	-	-

TAB. 13 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “SCUOLA ELEMENTARE SECCHI”

3.6.3. RSL.3 per il sito “Istituto M. Ausiliatrice”

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
Limo	-3.00	-11.00	8.00	18.50	280	Vucetic & Dobry, PI=15



Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Ghiaia 1	-11.00	-80.00	69.00	20.00	490	Rollins
Ghiaia 2	-80.00	-100.00	20.00	21.00	550	Rollins
Bedrock	-100.00	-	-	22.00	850	-

TAB. 14 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “ISTITUTO M. AUSILIATRICE”

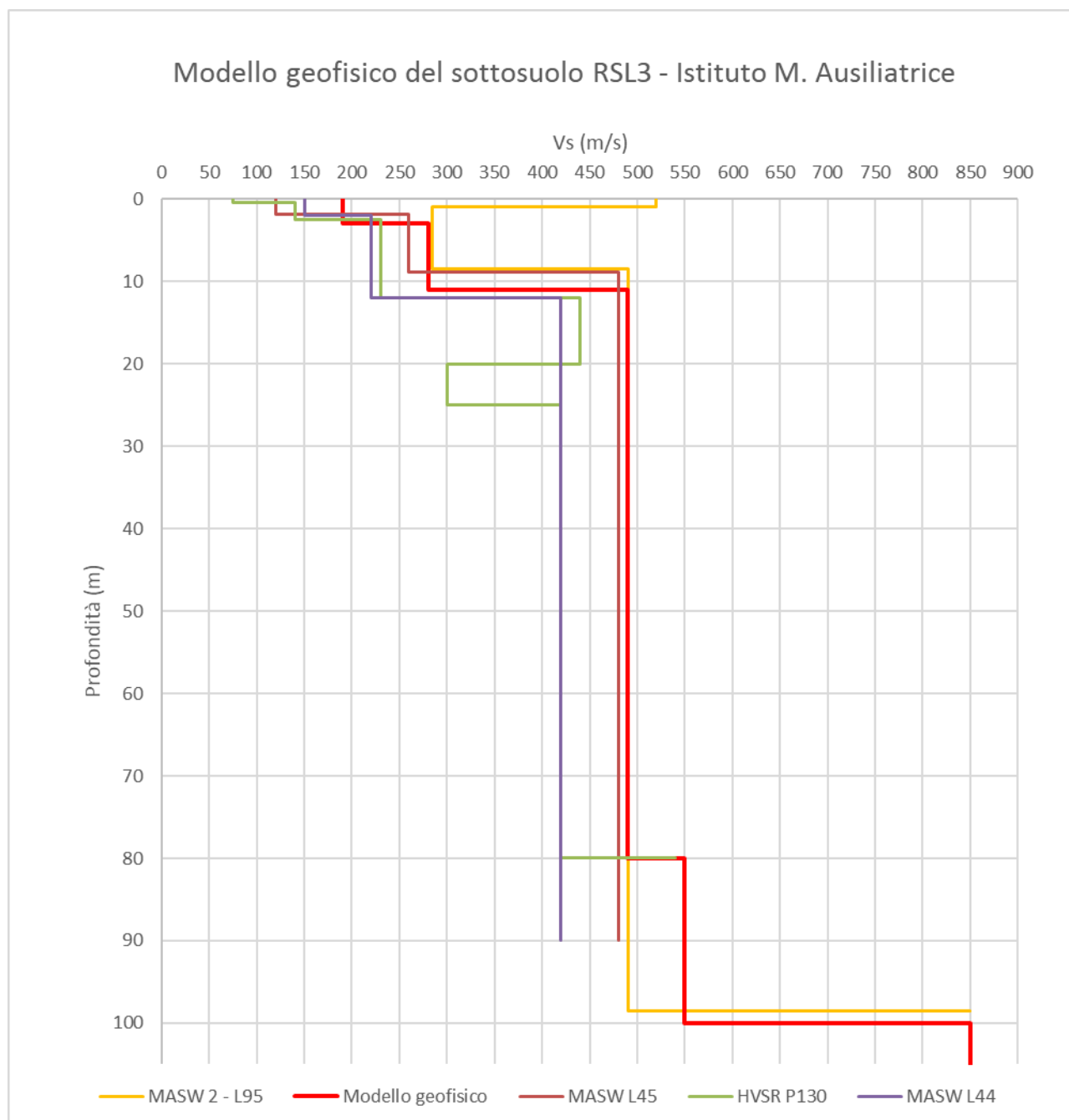


FIG. 25 – DISCRETIZZAZIONE DELLA Vs LUNGO LA VERTICALE “ISTITUTO M. AUSILIATRICE”

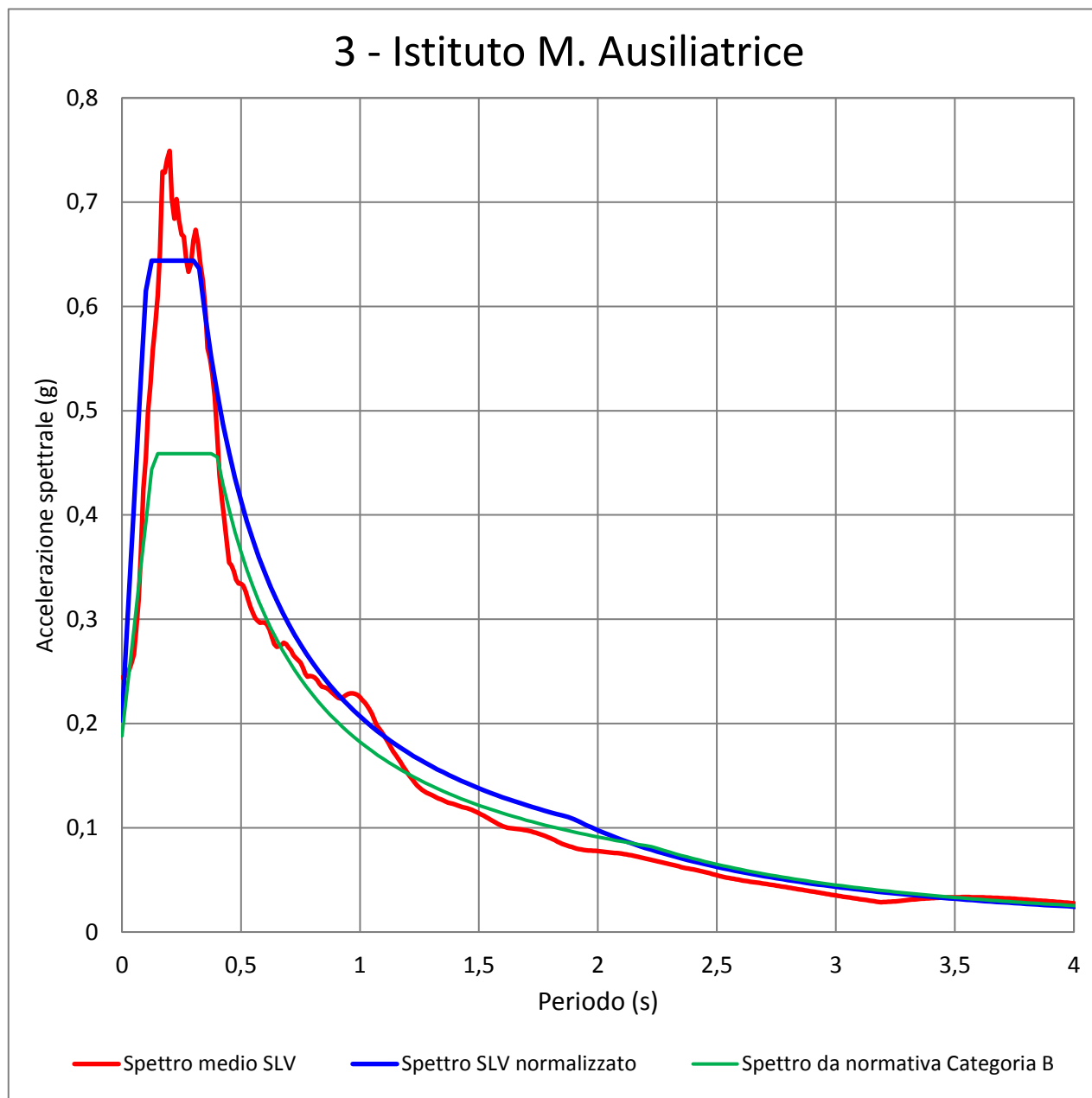


FIG. 26 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "ISTITUTO M. AUSILIATRICE" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.203	3.174	0.226	1.000	1.000	0.107	0.321	1.888	1.420

TAB. 15 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "ISTITUTO M. AUSILIATRICE"

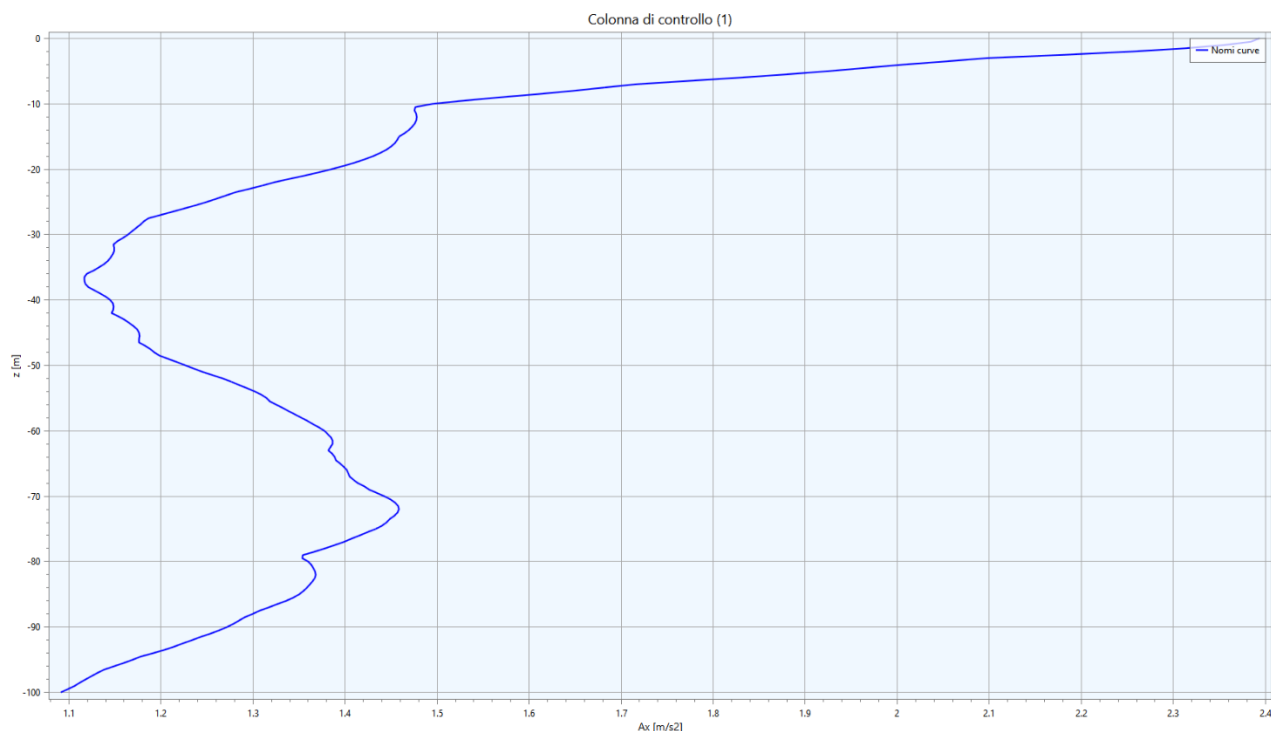


FIG. 27 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “ISTITUTO M. AUSILIATRICE”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.61	2.30	-30.00%
FA (0.4-0.8 s)	1.48	2.20	-32.73%
FA (0.7-1.1 s)	1.79	1.80	-0.56%
FA (0.5-1.5 s)	1.62	-	-
PGA/PGA ₀	1.55	2.20	-29.55%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.59	2.40	-33.75%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.62	2.00	-19.00%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.63	-	-

TAB. 16 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “ISTITUTO M. AUSILIATRICE”

3.6.4. RSL.4 per il sito “Sede UVEN”

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	210	Vucetic & Dobry, PI=30
Limo	-3.00	-10.00	7.00	18.50	290	Vucetic & Dobry, PI=15
Ghiaia 1	-10.00	-30.00	20.00	20.00	450	Rollins



Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Ghiaia 2	-30.00	-90.00	60.00	21.00	580	Rollins
Ghiaia 3	-90.00	-120.00	30.00	21.00	660	Rollins
Bedrock	-120.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 17 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “SEDE UVEN”

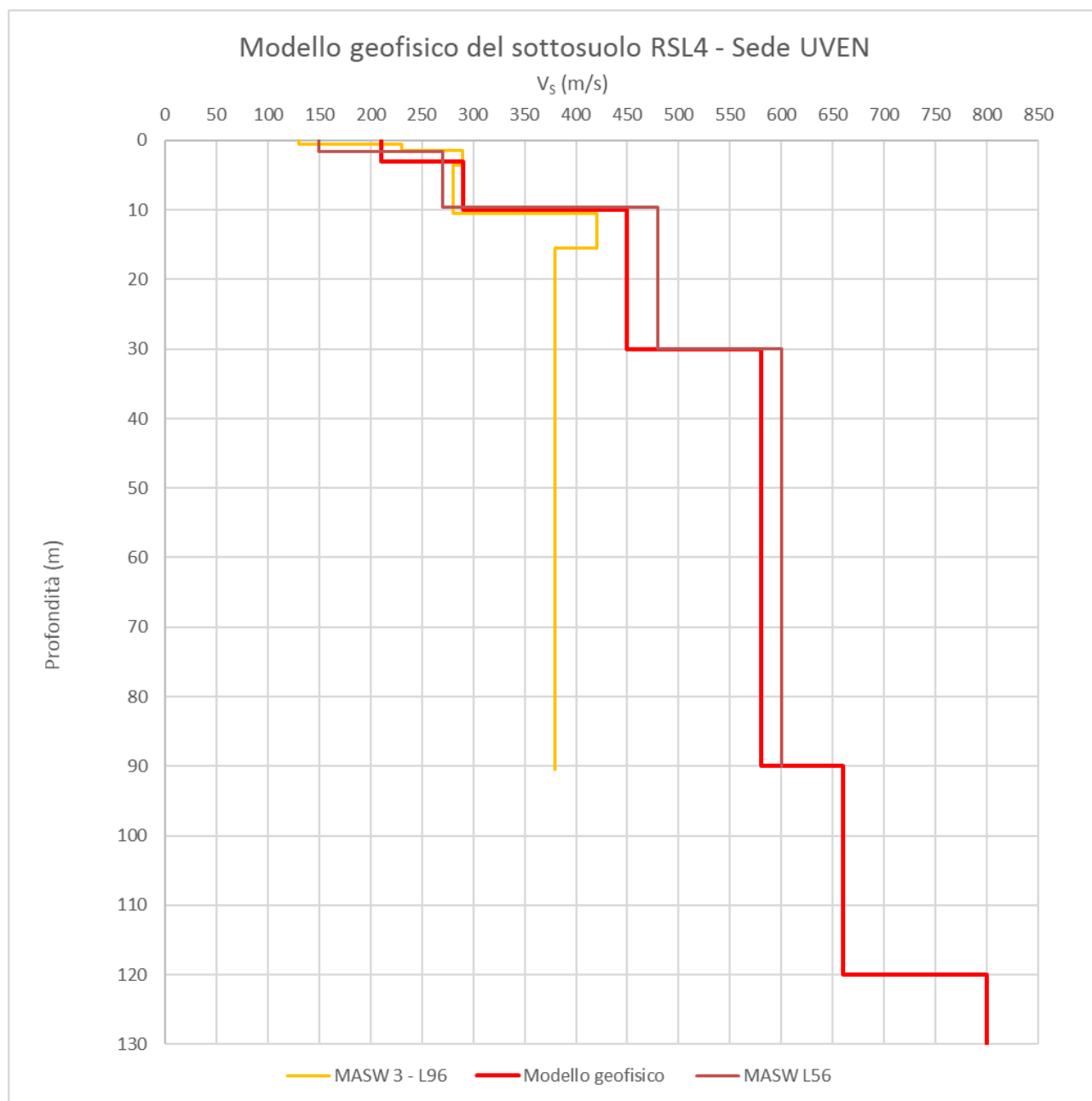


FIG. 28 – DISCRETIZZAZIONE DELLA V_s LUNGO LA VERTICALE “SEDE UVEN”

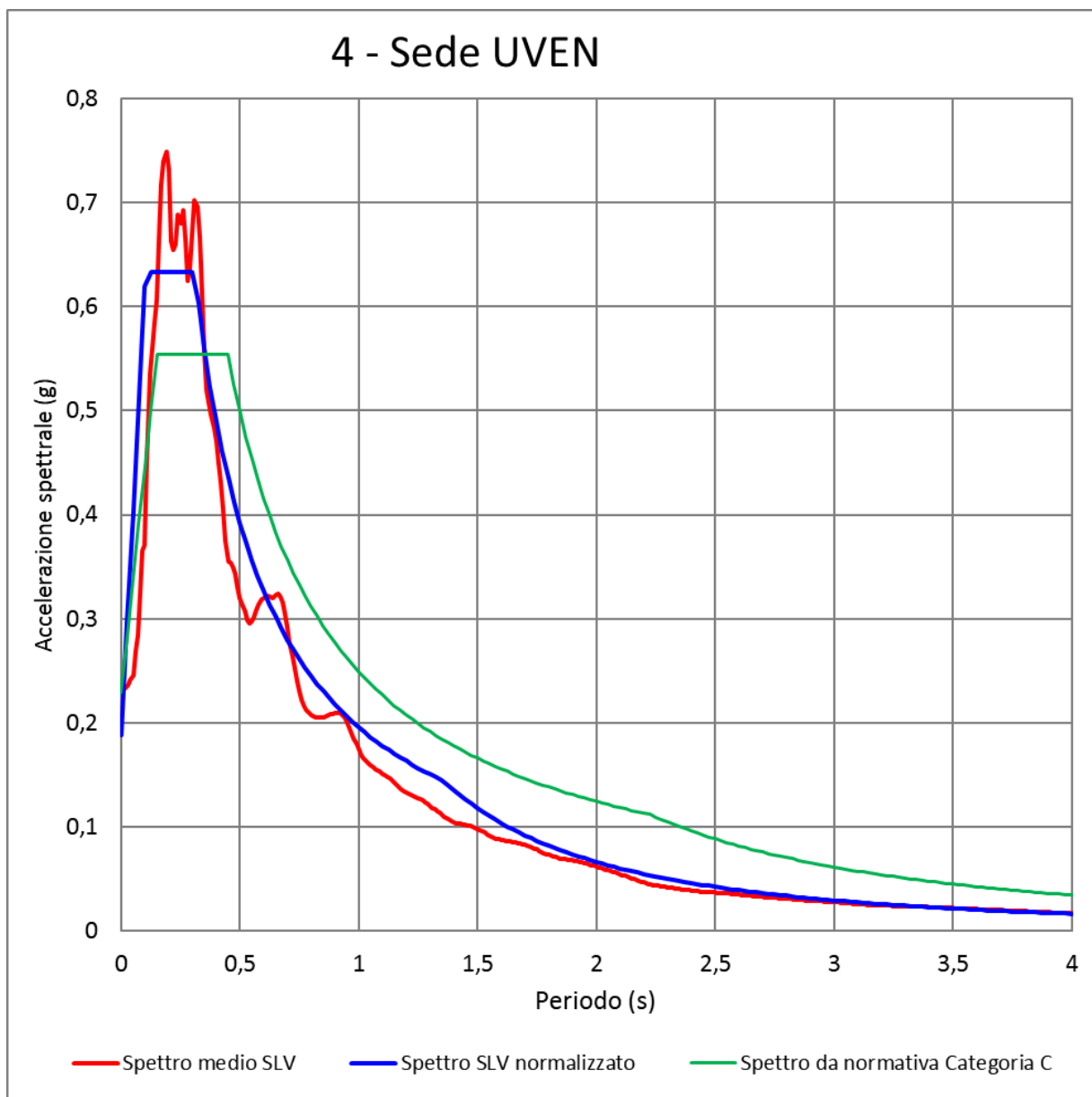


FIG. 29 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "SEDE UVEN" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.188	3.365	0.218	1.000	1.000	0.103	0.310	1.356	1.420

TAB. 18 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "SEDE UVEN"

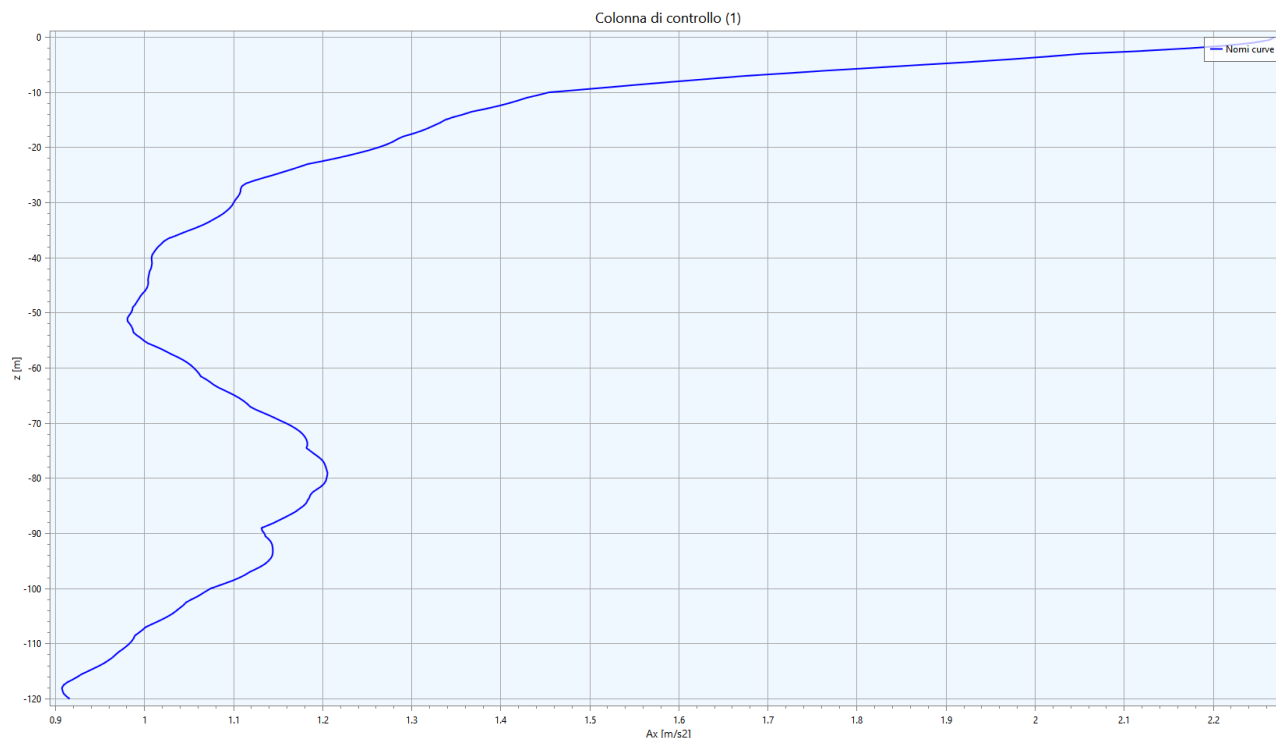


FIG. 30 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “SEDE UVEN”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.61	2.30	-42.86%
FA (0.4-0.8 s)	1.52	2.20	-44.74%
FA (0.7-1.1 s)	1.55	1.80	-16.13%
FA (0.5-1.5 s)	1.49	-	-
PGA/PGA ₀	1.47	2.20	-49.66%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.61	2.40	-49.07%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.58	2.00	-26.58%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.54	-	-

TAB. 19 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “SEDE UVEN”

3.6.5. RSL.5 per il sito “Ghiardo zona industriale”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-1.00	1.00	18.00	100	Vucetic & Dobry, PI=30
Limo	-1.00	-5.00	4.00	18.50	230	Vucetic & Dobry, PI=15



Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Sabbia	-5.00	-18.00	13.00	19.00	340	Sand Seed & Idriss (1970)
Ghiaia 1	-18.00	-55.00	37.00	20.00	600	Rollins
Ghiaia 2	-55.00	-120.00	65.00	21.00	670	Rollins
Bedrock	-120.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 20 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “GHIARDO ZONA INDUSTRIALE”

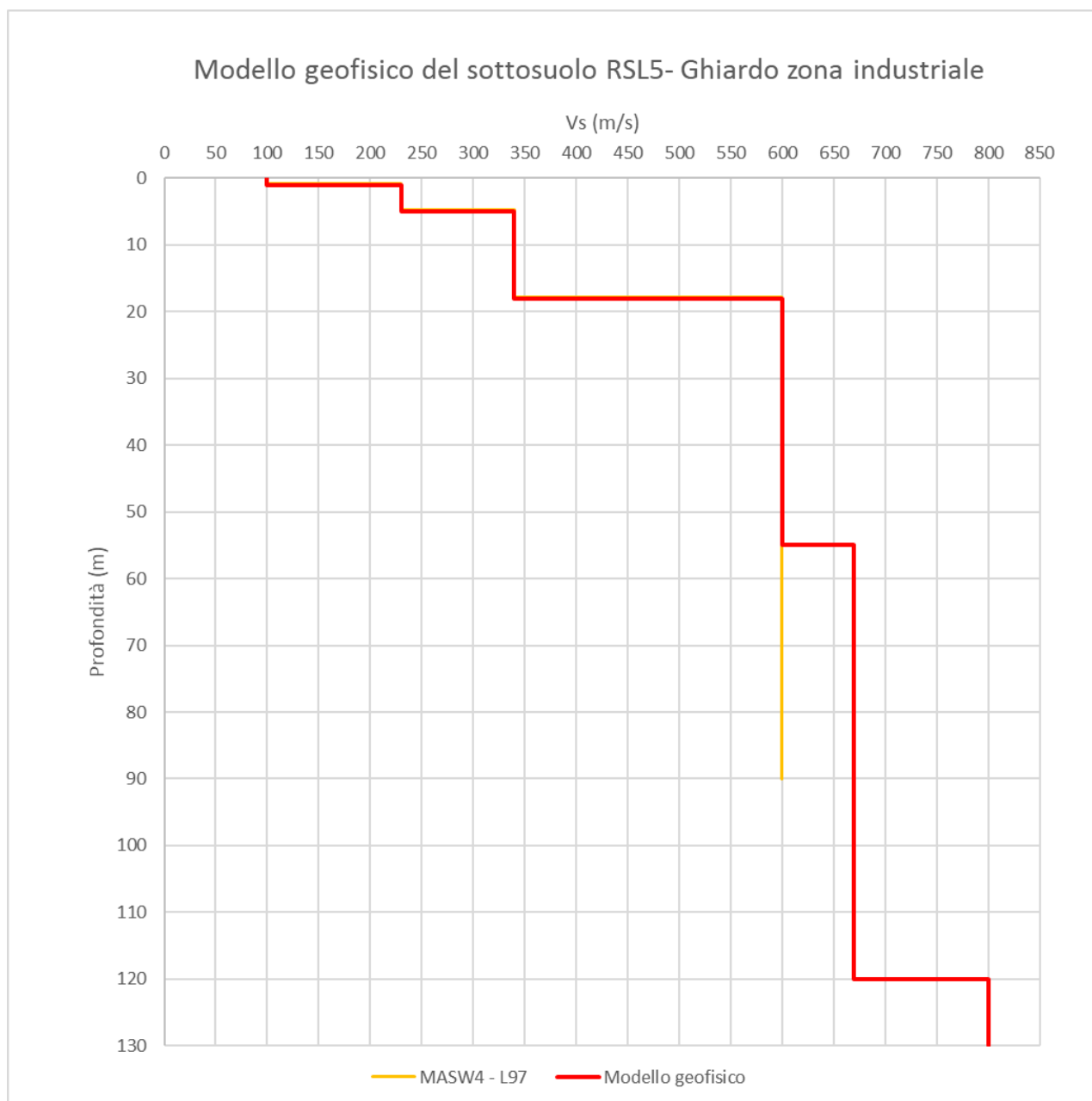


FIG. 31 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE “GHIARDO ZONA INDUSTRIALE”

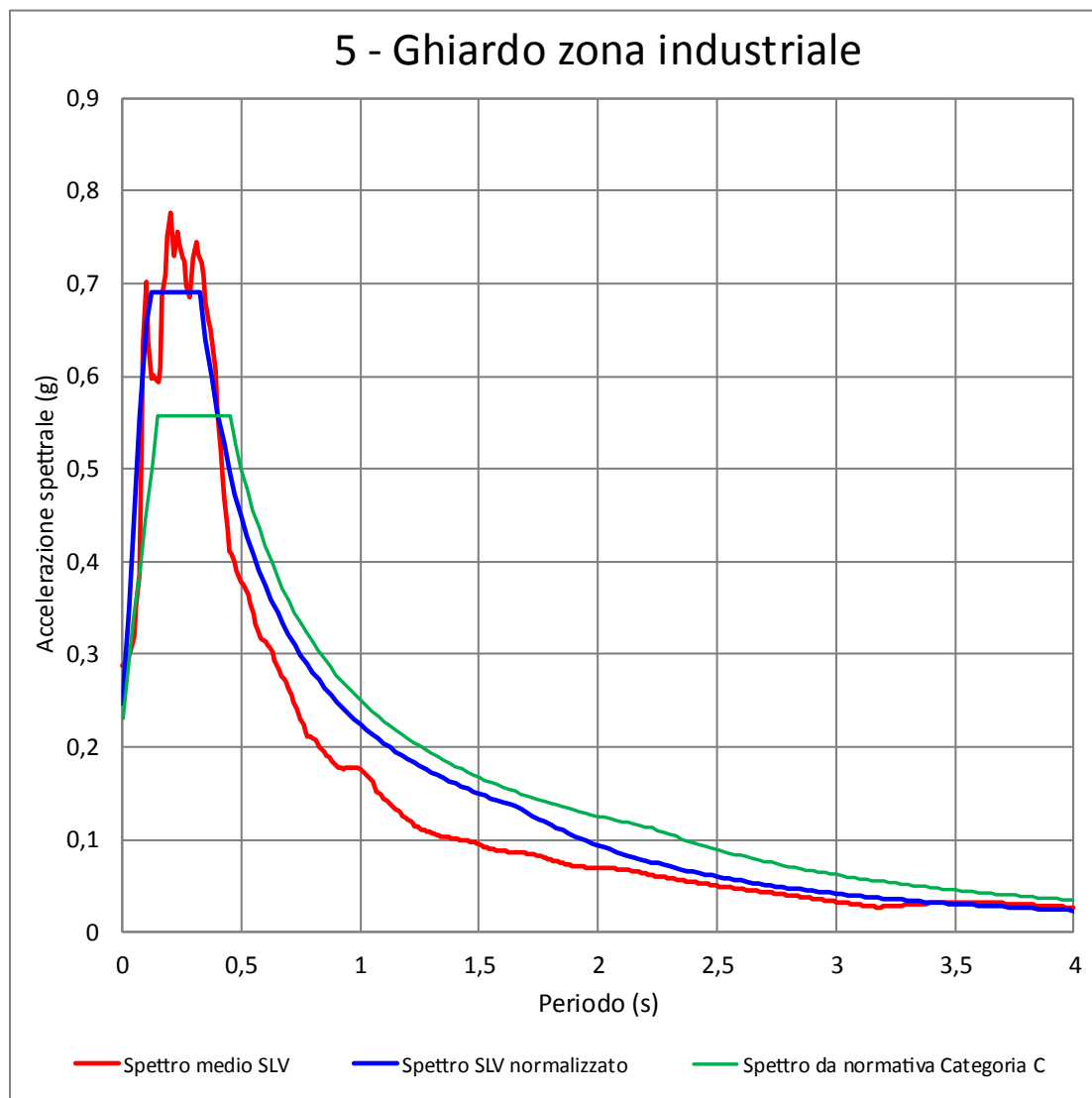


FIG. 32 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "GHIARDO ZONA INDUSTRIALE" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.247	2.802	0.229	1.000	1.000	0.108	0.325	1.671	1.420

TAB. 21 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "GHIARDO ZONA INDUSTRIALE"

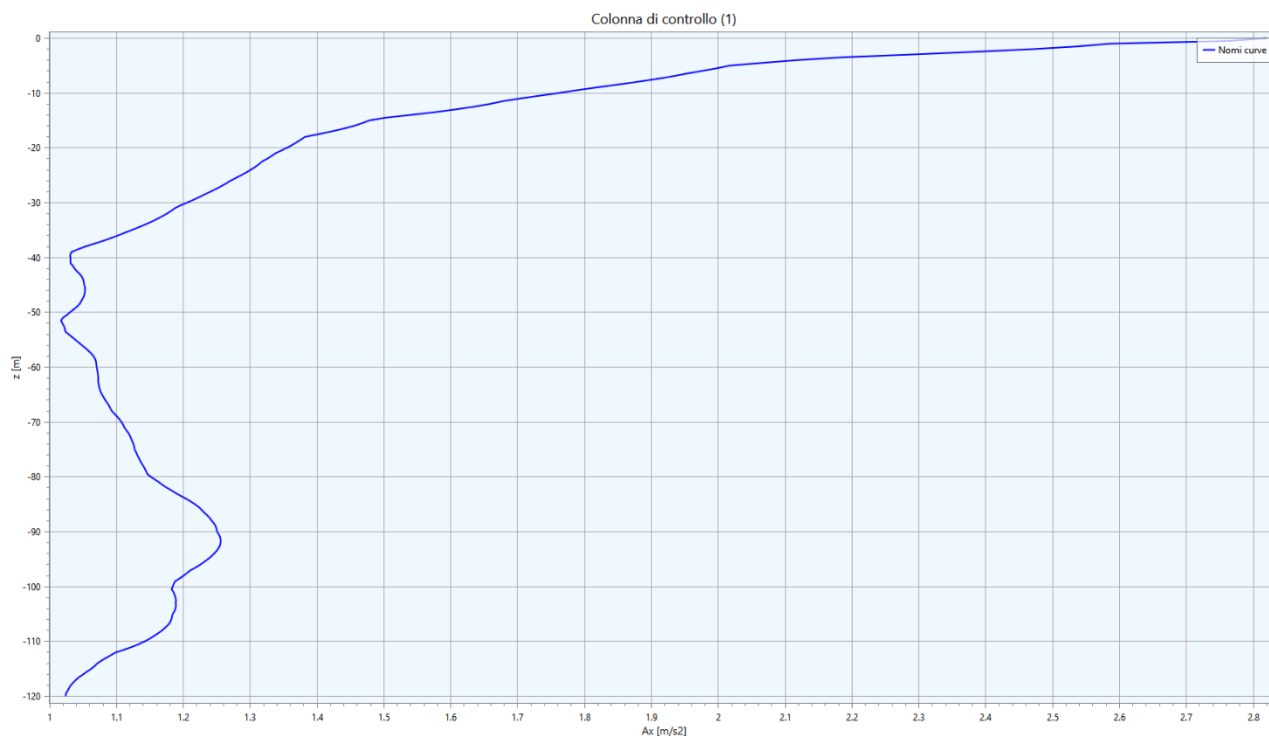


FIG. 33 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “GHIARDO ZONA INDUSTRIALE”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.78	2.10	-15.24%
FA (0.4-0.8 s)	1.57	2.30	-31.74%
FA (0.7-1.1 s)	1.48	2.00	-26.00%
FA (0.5-1.5 s)	1.46	-	-
PGA/PGA ₀	1.83	2.00	-8.50%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.81	2.20	-17.73%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.59	2.10	-24.29%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.67	-	-

TAB. 22 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “GHIARDO ZONA INDUSTRIALE”

3.6.6. RSL.6 per il sito “Barco”

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	160	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-2.00	-6.00	4.00	19.00	340	Sand Seed & Idriss (1970)
Ghiaia 1	-6.00	-20.00	14.00	20.00	410	Rollins



Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Ghiaia 2	-20.00	-60.00	40.00	20.50	480	Rollins
Ghiaia 3	-60.00	-125.00	65.00	21.00	600	Rollins
Bedrock	-125.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 23 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “BARCO”

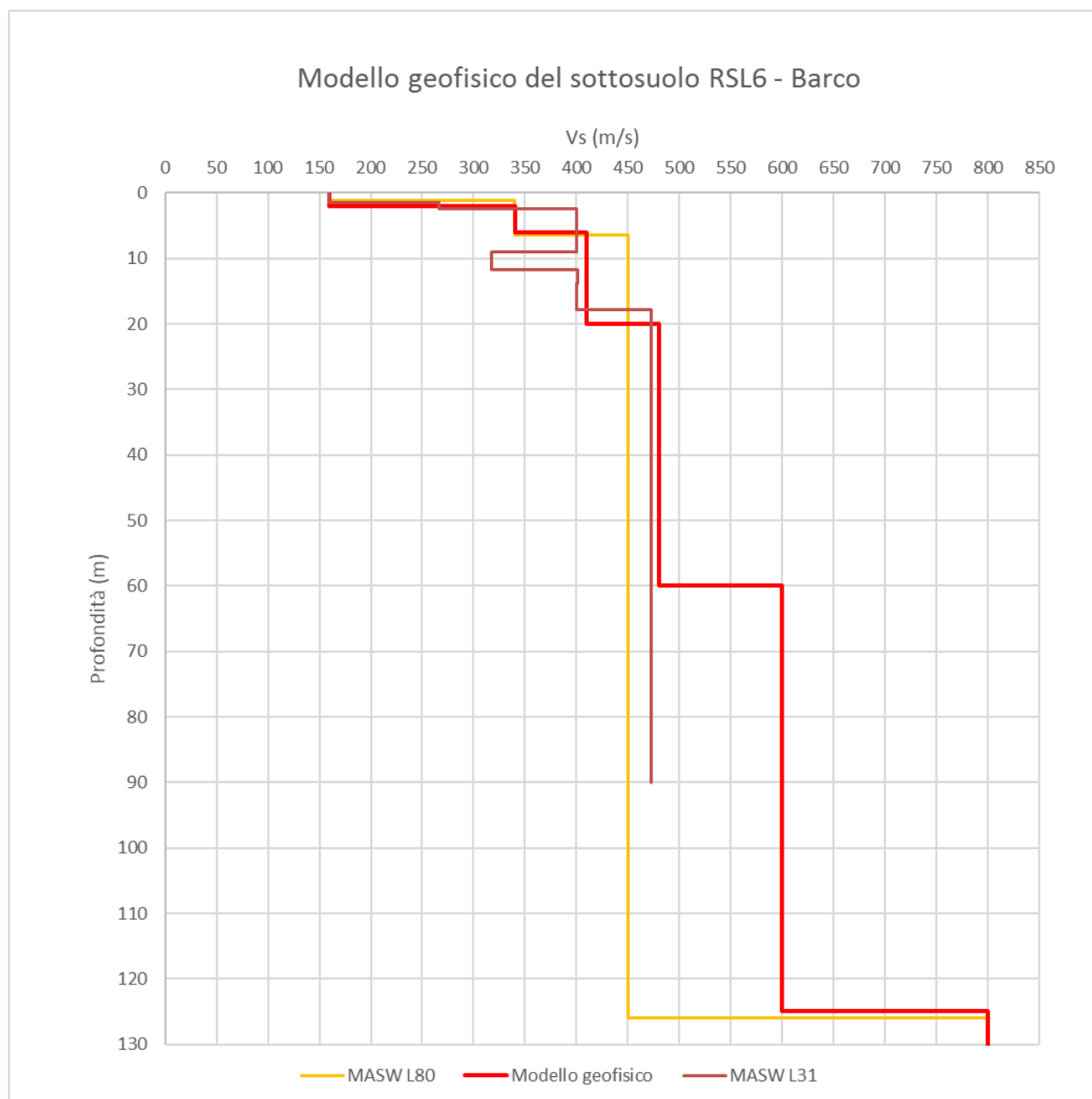


FIG. 34 – DISCRETIZZAZIONE DELLA Vs LUNGO LA VERTICALE “BARCO”

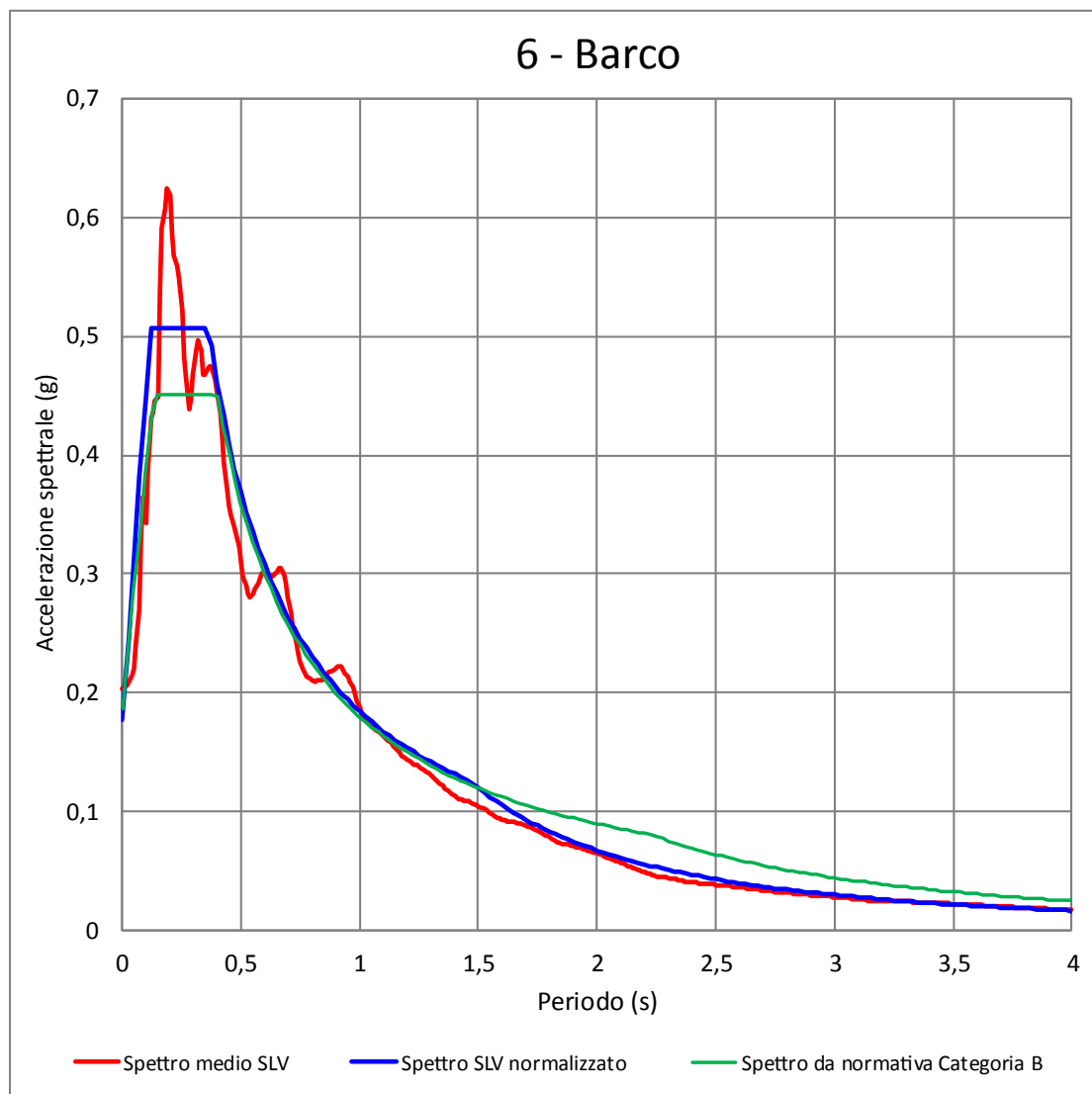


FIG. 35 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "BARCO" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.177	2.869	0.256	1.000	1.000	0.121	0.363	1.457	1.420

TAB. 24 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "BARCO"

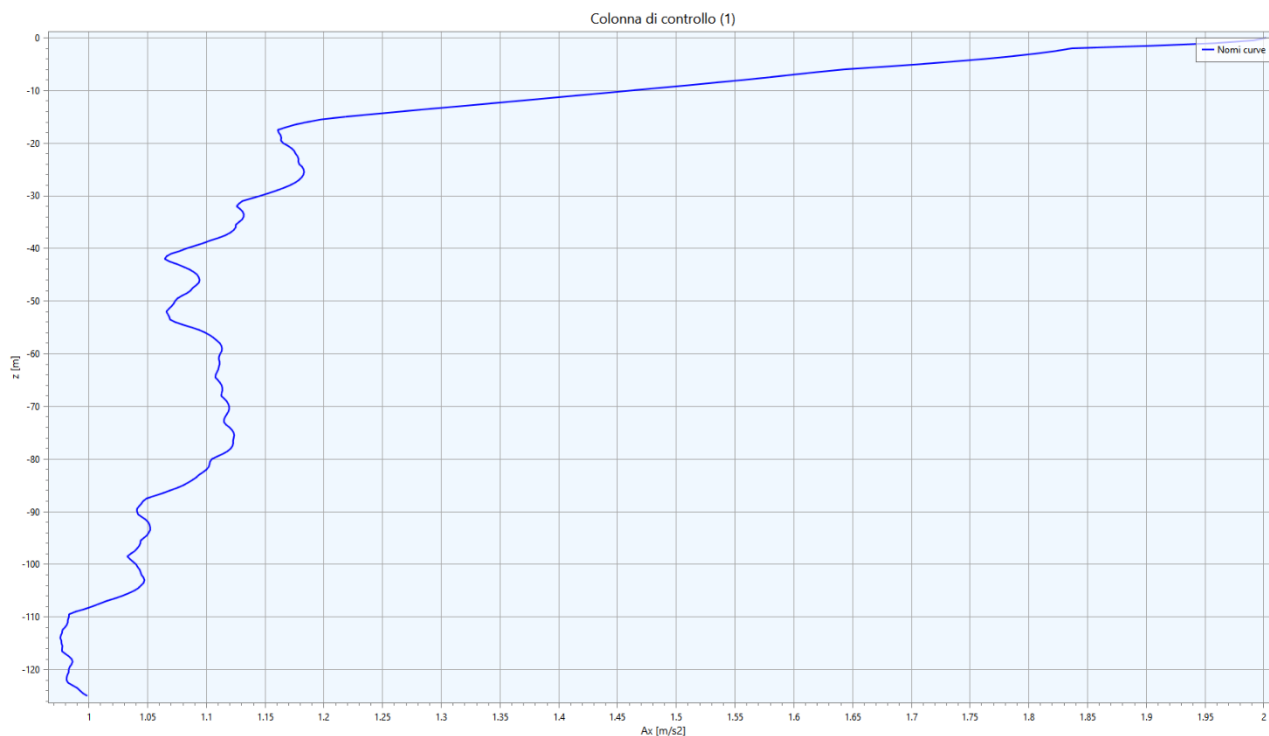


FIG. 36 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “BARCO”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.35	1.70	-20.59%
FA (0.4-0.8 s)	1.46	1.90	-23.16%
FA (0.7-1.1 s)	1.62	2.30	-29.57%
FA (0.5-1.5 s)	1.52	-	-
PGA/PGA ₀	1.31	1.60	-18.13%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.35	1.70	-20.59%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.50	2.10	-28.57%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.53	-	-

TAB. 25 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “BARCO”

3.6.7. RSL.7 per il sito “Corniano”

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	140	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-2.00	-14.00	12.00	19.00	300	Sand Seed & Idriss (1970)
Ghiaia 1	-14.00	-55.00	41.00	20.00	440	Rollins



Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Ghiaia 2	-55.00	-90.00	35.00	21.00	510	Rollins
Ghiaia 3	-90.00	-105.00	15.00	21.00	610	Rollins
Bedrock	-105.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 26 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “CORNIANO”

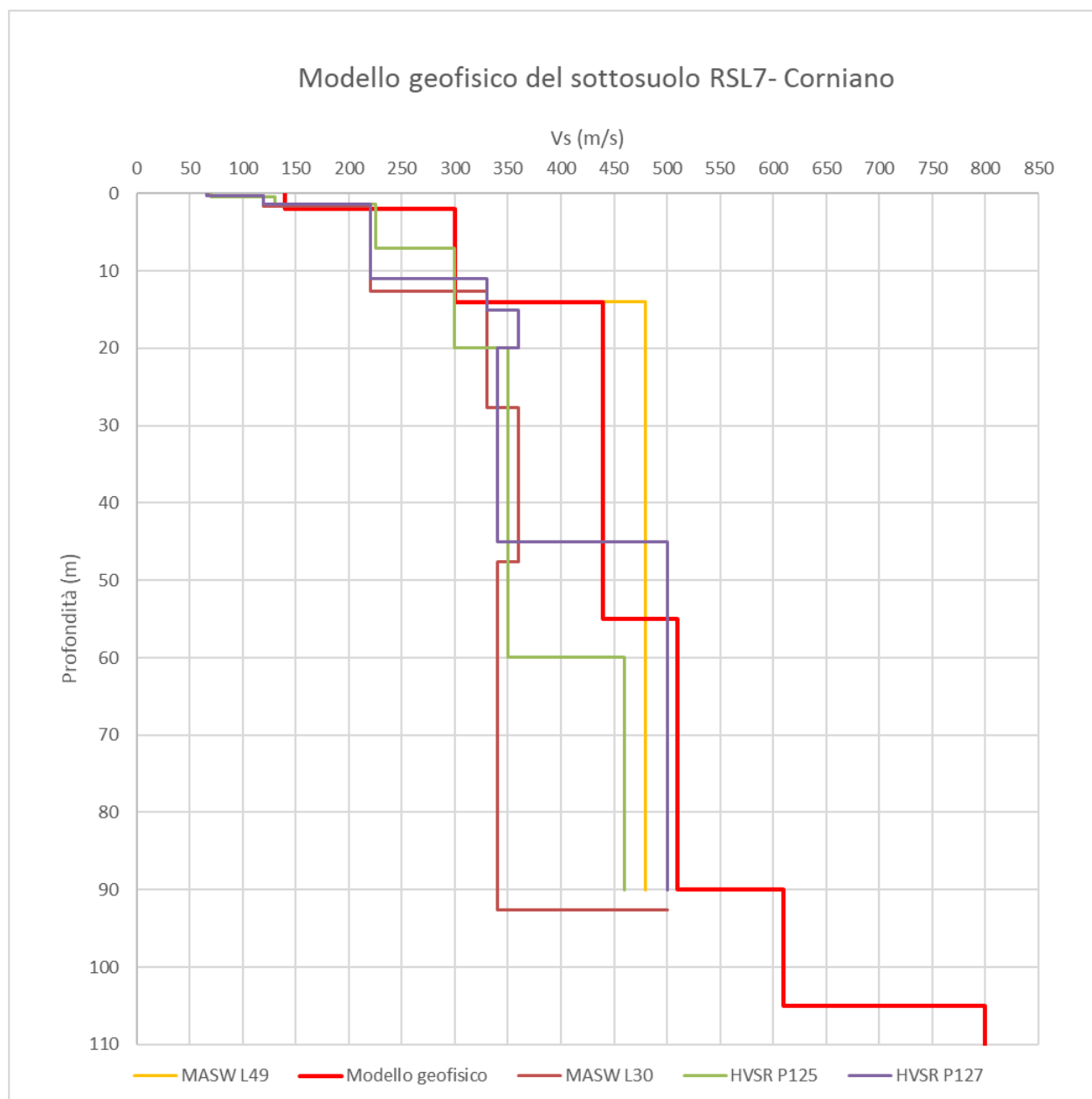


FIG. 37 – DISCRETIZZAZIONE DELLA V_s LUNGO LA VERTICALE “CORNIANO”

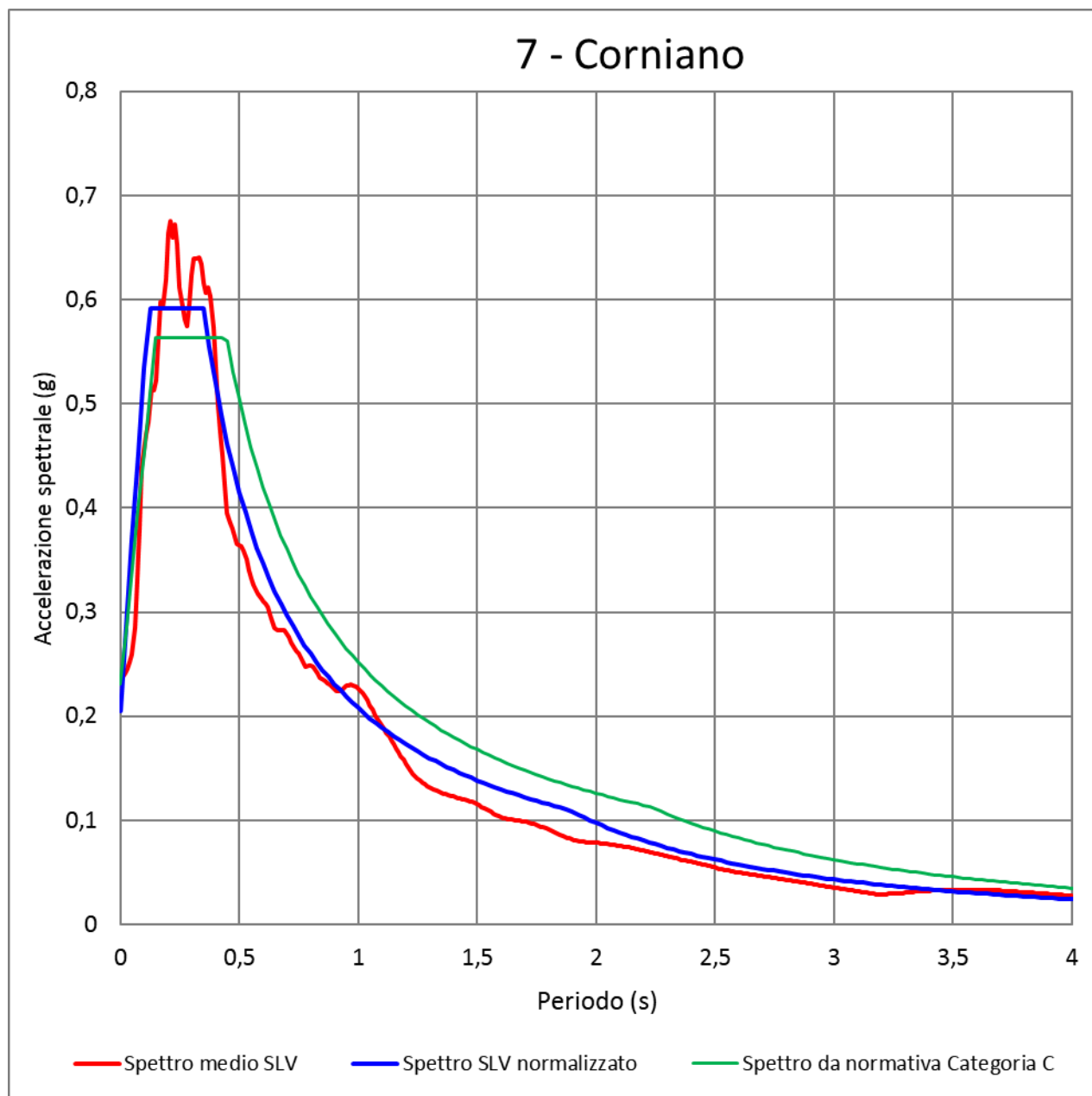


FIG. 38 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "CORNIANO" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	T_c^*	h	S	T_b	T_c	T_d	C_c
0.205	2.888	0.248	1.000	1.000	0.117	0.352	1.878	1.420

TAB. 27 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "CORNIANO"

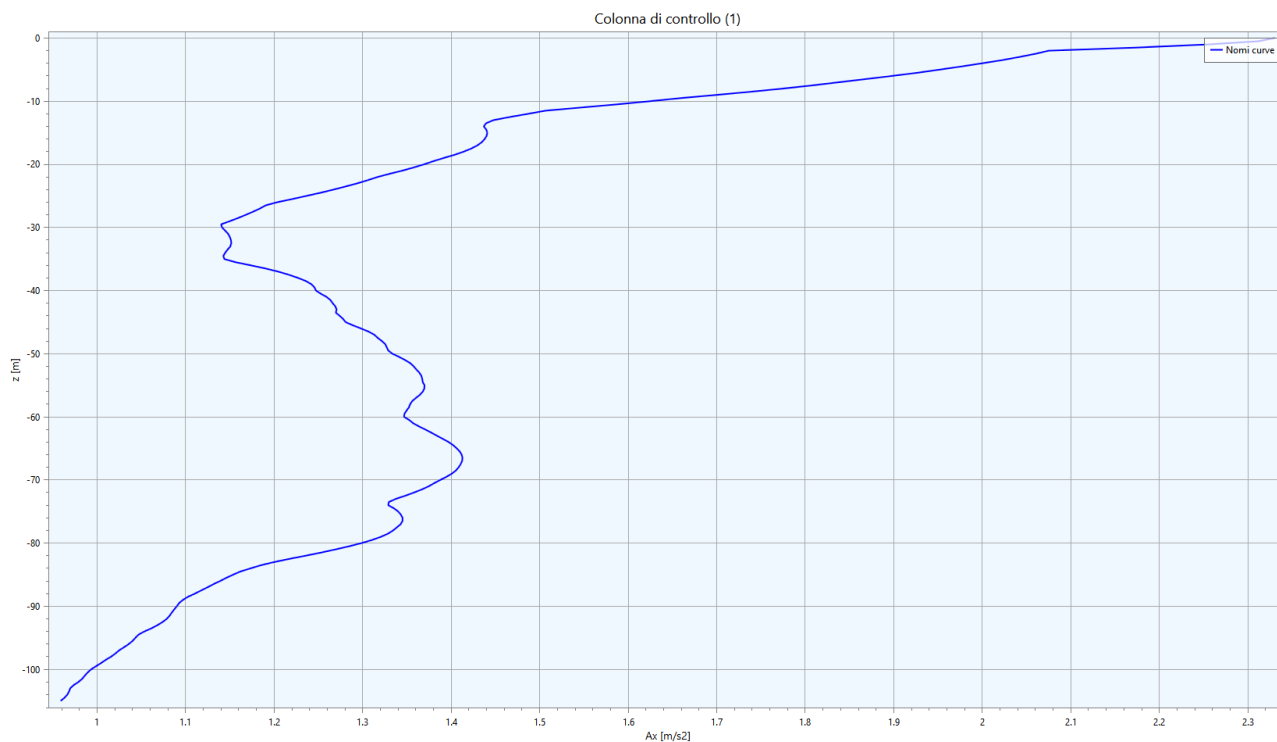


FIG. 39 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “CORNIANO”

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)	1.59	1.90	-16.32%
FA (0.7-1.1 s)	1.82	2.30	-20.87%
FA (0.5-1.5 s)	1.67	-	-
PGA/PGA ₀	1.51	1.60	-5.63%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.56	1.70	-8.24%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.67	2.10	-20.48%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.67	-	-

TAB. 28 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “CORNIANO”



3.7. Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello

Nella successiva tabella vengono presentati in sintesi i raffronti percentuali 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 - Scuola elementare Secchi	RSL3 - Istituto M. Ausiliatrice	RSL4 - Sede UVEN	RSL5 - Zona industriale Ghiardo	RSL6 - Barco	RSL7 - Corniano
FA _{SA1} 0.1-0.5	-37,39%	-30,43%	-30,00%	-30,00%	-15,24%	-20,59%	-7,65%
FA _{SA2} 0.4-0.8	-27,27%	-29,55%	-32,73%	-30,91%	-31,74%	-23,16%	-16,32%
FA _{SA3} 0.7-1.1	0,00%	-1,67%	-0,56%	-13,89%	-26,00%	-29,57%	-20,87%
FA _{SA4} 0.5-1.5	-	-	-	-	-	-	-
FA _{PGA}	-35,45%	-31,82%	-29,55%	-33,18%	-8,50%	-18,13%	-5,63%
FH _{SI1} 0.1-0.5	-40,00%	-32,92%	-33,75%	-32,92%	-17,73%	-20,59%	-8,24%
FH _{SI2} 0.5-1.0	-17,00%	-18,50%	-19,00%	-21,00%	-24,29%	-28,57%	-20,48%
FH _{SI3} 0.5-1.5	-	-	-	-	-	-	-

TAB. 29 – RAFFRONTO TRA I RISULTATI DELLE ANALISI DI SECONDO E TERZO LIVELLO

L'analisi della Tab. 29 evidenzia che, in generale, gli abachi sovrastimano, di norma, lo scuotimento, in alcuni casi anche significativamente. Si evince come in nessuno dei casi da analisi RSL sono risultati fattori di amplificazione superiori, nei diversi intervalli di periodo, rispetto a quelli desumibili con un'analisi di secondo livello.

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. 40 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 0.2 e 0.4 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, a parte modeste sovrastime a periodi differenti nei siti considerati rispetto allo spettro semplificato di sottosuolo B.

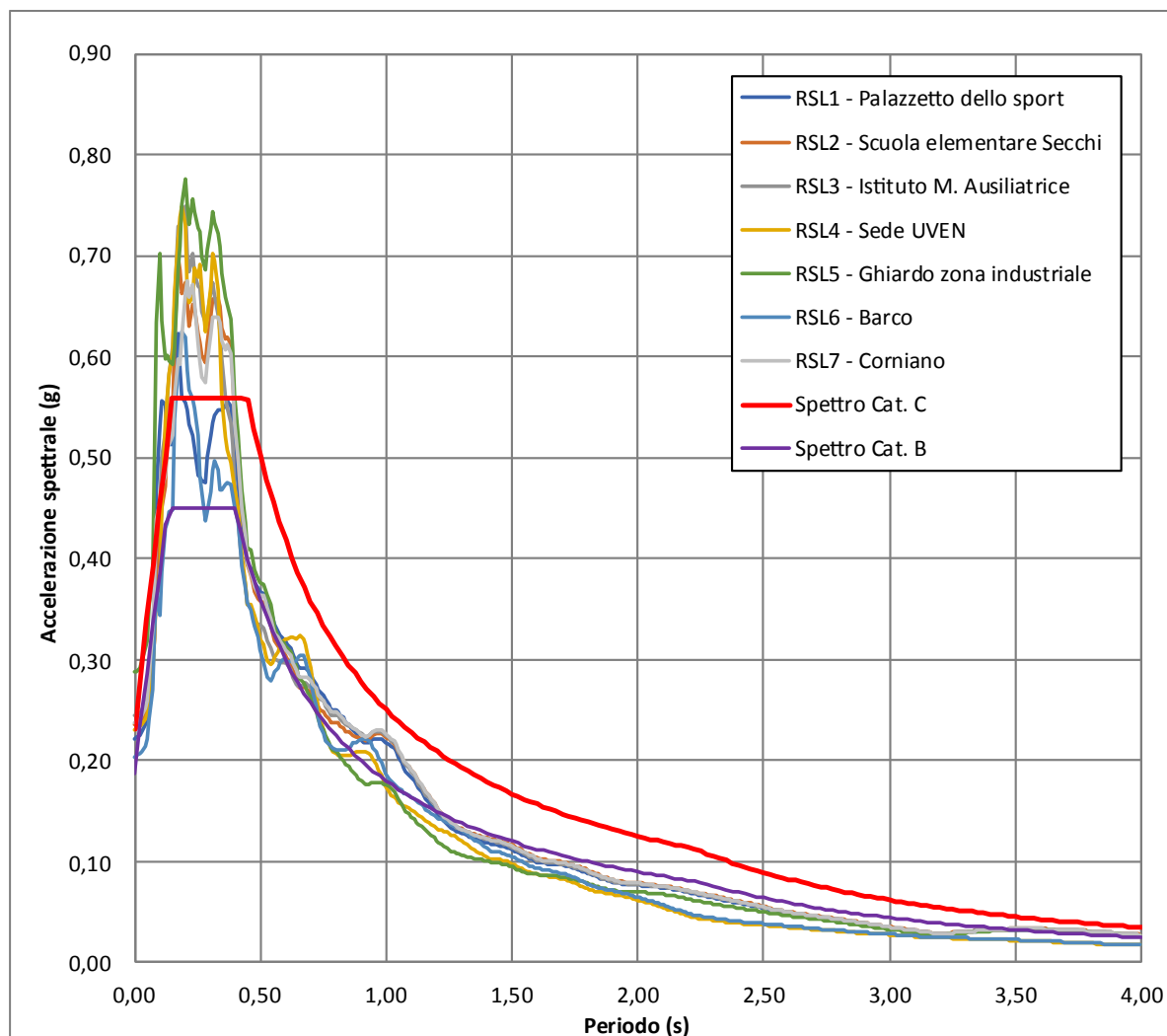


FIG. 40 – CONFRONTO TRA GLI SPETTRI DI RISPOSTA IN PSEUDOACCELERAZIONE DA RSL E GLI SPETTRI SEMPLIFICATI PER LE CATEGORIE DI SOTTOSUOLO B E C DA NTC 2018



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 Bibbiano.

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 (Martelli¹¹, 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 ($V_{Sbedrock}/V_{Scopertura} > 2$), 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, Martelli¹¹ 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.

Nel caso del territorio comunale di Bibbiano, per l'individuazione del *bedrock* sismico si è fatto affidamento ai risultati 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, i risultati delle elaborazioni congiunte ReMi-HVSr effettuate all'interno dello studio di secondo livello hanno evidenziato una superficie di impedenza ad una profondità costante di oltre circa 100 m da p.c. (cfr. par. 3.3.2, Fig. 10). Tale profondità è stata confermata da quattro delle sette verticali ove è stata effettuata l'analisi di RSL, le quali hanno evidenziato un contrasto d'impedenza ad una profondità compresa tra i 100 e 125 metri. Il salto di velocità, nel caso della verticale 3 "Istituto M. Ausiliatrice", si attesta a circa 100 m dove è stata riscontrata una velocità delle onde di taglio pari a 800 m/s.

Per le restanti verticali ("Palazzetto dello Sport", "Sede UVEN" e "Ghiardo zona industriale"), situate nel tratto centrale e settentrionale del territorio comunale, il contrasto d'impedenza viene rilevato a profondità minore tra i 30 e 55 metri, dove le velocità delle onde di taglio raggiungono circa i 600 m/s. Il picco in questo caso, in accordo

¹¹ Luca Martelli, 2021. Assessment of Seismic Bedrock in Deep Alluvial. Case Studies from the Emilia-Romagna Plain - Geosciences



con la letteratura (Martelli et alii¹², 2013 e Martelli et alii¹³, 2014) e lo studio di microzonazione sismica di terzo livello eseguito per il comune limitrofo di Cavriago, viene associato al passaggio tra il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e il Supersintema Quaternario Marino (QMC).

La mancata ricezione di un contrasto d'impedenza più profondo nelle altre verticali analizzate, è probabilmente legata alla presenza di corpi ghiaiosi e sabbiosi superficiali, di notevole spessore, in grado di mascherare il segnale sottostante.

Alla luce di queste considerazioni, si è pertanto deciso di estendere la presenza di un substrato rigido ($V_s \geq 800$ m/s) a profondità di oltre 100 m da p.c. anche alle altre verticali di risposta sismica locale analizzate.

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

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

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. 41.

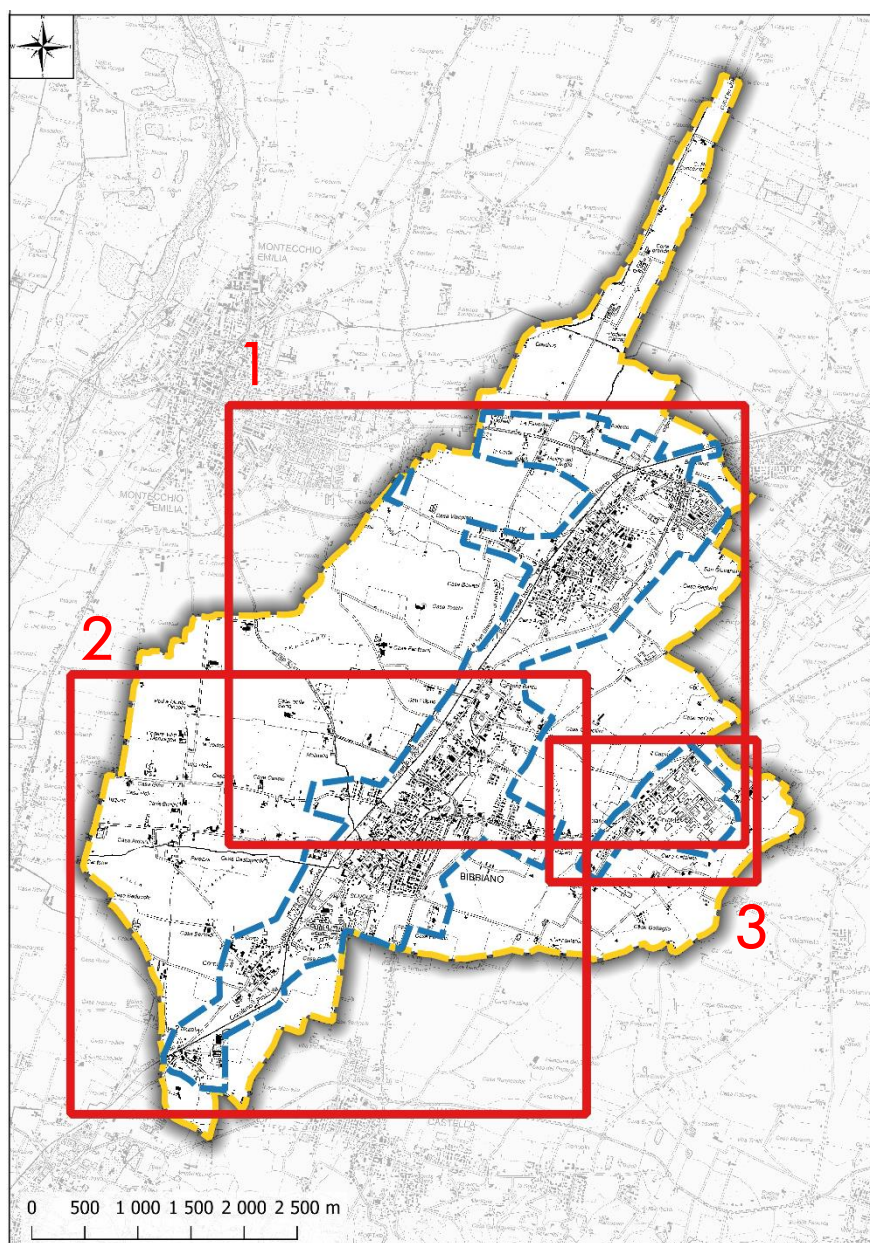


FIG. 41 – QUADRO D'UNIONE DEI TAGLI CARTOGRAFICI ADOTTATI



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 pesante (DP)
- prova penetrometrica dinamica media (DM)
- pozzo per acqua
- prova sismica in foro tipo Downhole
- stazione microtremore a stazione singola (HVSR)
- MASW
- prova REfractionMicrotremors
- profilo sismico a rifrazione
- tomografia elettrica

come raffigurato nella legenda riportata in stralcio nella seguente Fig. 42.



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 pesante



Prova penetrometrica dinamica media



Pozzo per acqua



Prova sismica in foro tipo Downhole



Stazione microtremore a stazione singola

MW

MASW

RM

Prova REfractionMicrotremors

SR

Profilo sismico a rifrazione

ERT

Tomografia elettrica

FIG. 42 – LEGENDA DELLA CARTA DELLE INDAGINI

In Tab. 30 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	-	1	21
Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)	91	-	91
Prova penetrometrica dinamica super pesante	26	-	26
Prova penetrometrica dinamica pesante	1	-	1
Prova penetrometrica dinamica media	4	-	4
Pozzo per acqua	21	-	21
Prova simica in foro tipo Downhole	-	1	1
Stazione microtremore a stazione singola	91	5	96
Prova MASW	35	4	39



TIPO PROVA	provenienti da studio di 2° livello MS e/o archivio comunale	effettuate per il 3° livello MS	TOTALE
Prova REfractionMlcrotremors	40	-	40
Profilo sismico a rifrazione	13	-	13
Tomografia elettrica	5	-	5

TAB. 30 – 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 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;
- relativamente ai depositi più profondi risulta interessante esaminare le sezioni raffigurate in Fig. 44 e Fig. 45, rispettivamente stralcio della sezione idrostratigrafica 135 e della sezione geologica 36 entrambe tratte dal sito web del Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna (cfr. le tracce riportate in Fig. 43, oltre che nella Carta Geologico-tecnica denominate rispettivamente "A" e "B"):
 - nella sezione 135, che attraversa il settore centrale del Comune, con andamento SSW-NNE, si osserva che, l'importante superficie di discontinuità, rappresentata dal tetto dei depositi marini (coincidente con la base del gruppo acquifero B), presenta altimetrie molto variabili all'interno del territorio di Bibbiano, con valori di soggiacenza che superano gli 80 m da p.c., nel settore meridionale, fino a una ventina di metri dalla superficie topografica, in corrispondenza dell'asse anticlinalico e rapido approfondimento verso nord fino a raggiungere all'incirca 100 m da p.c. sul confine con Cavriago;
 - la sezione 36, che con andamento SW-NE attraversa il settore orientale del Comune, in corrispondenza del terrazzo del Ghiardo, mostra anch'essa un andamento anticlinalico 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. 43 – TRACCIA DELLE SEZIONI 135 E 36 (DA SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA) IN COMUNE DI BIBBIANO

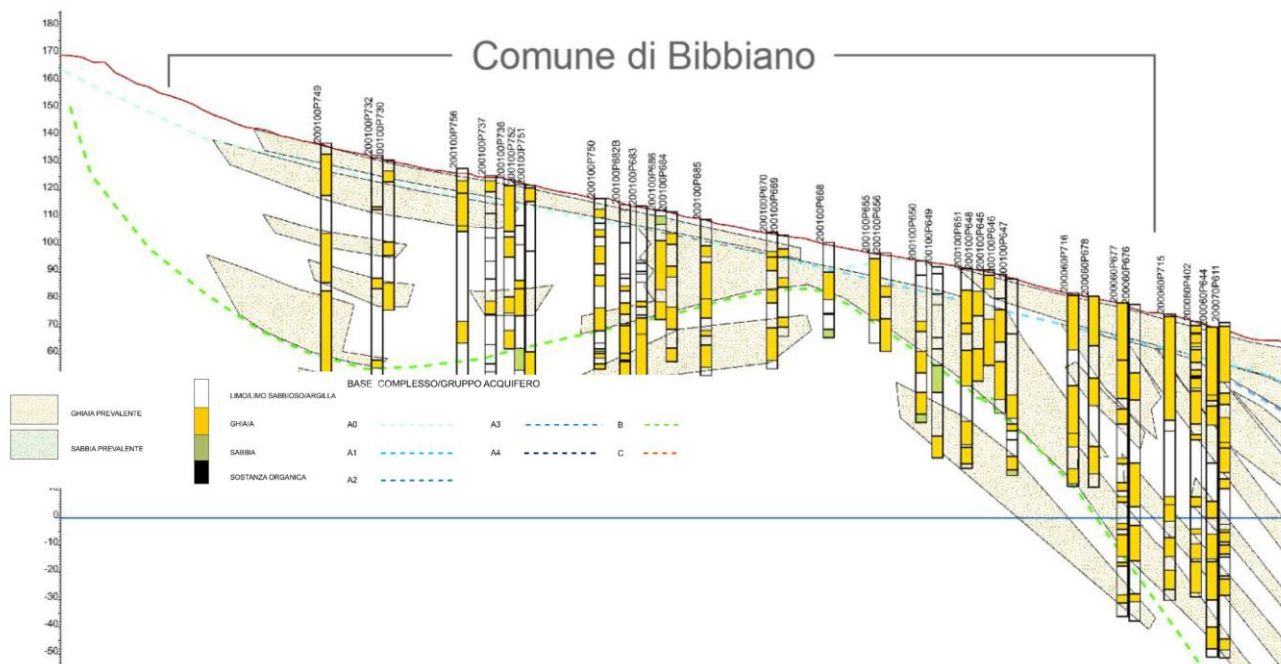


FIG. 44 – STRALCIO DELLA SEZIONE 135 TRATTA DAL SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

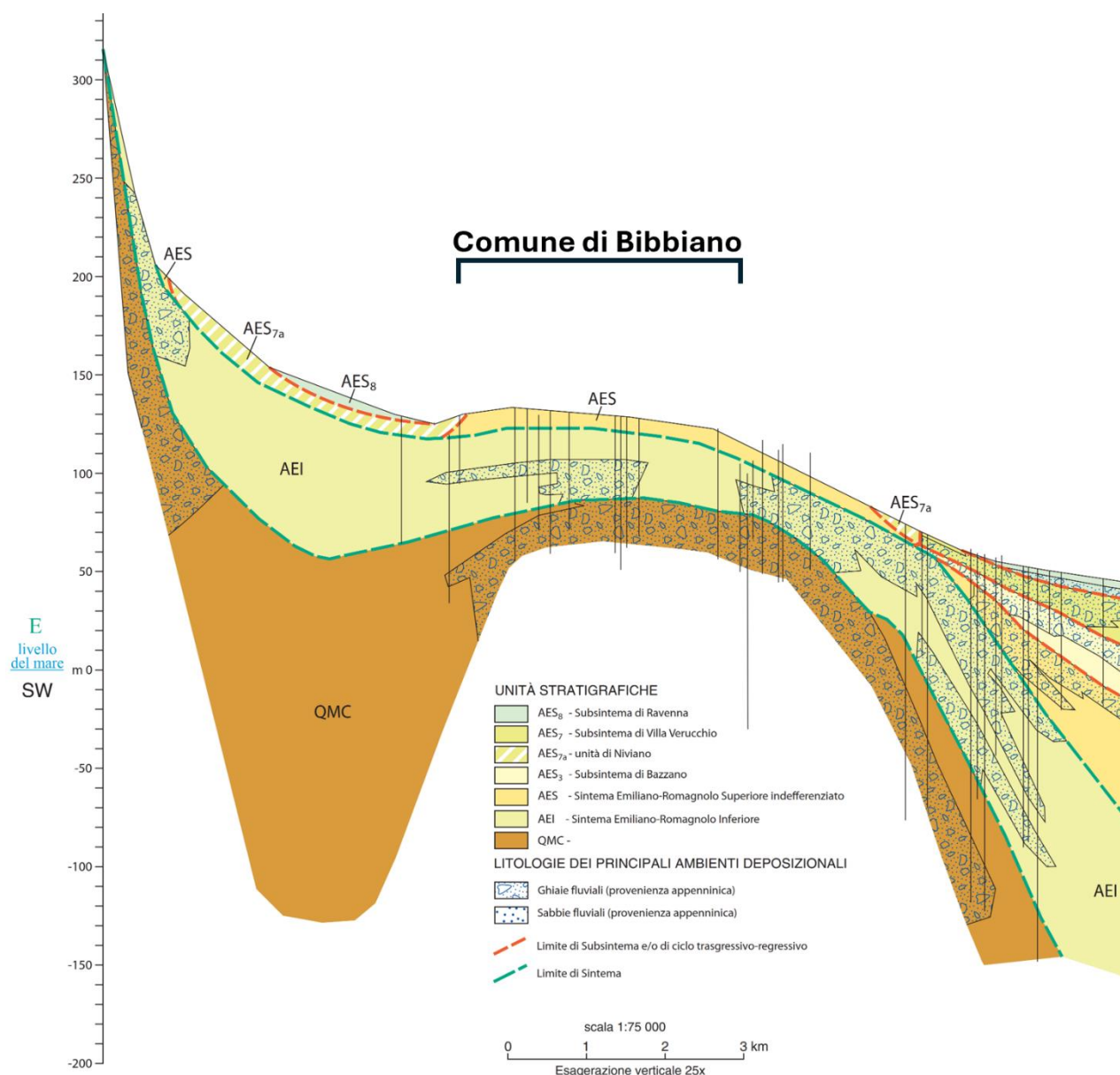


FIG. 45 - STRALCIO DELLA SEZIONE 36 TRATTA DAL SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

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 occidentale;
- **ML** – *Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità*: interessano l'area centrale e orientale 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 quali due faglie incerte, potenzialmente attive e capaci (FAC), e un'asse di anticlinale sepolta.

In particolare, le due strutture FAC indicate in cartografia risultano incerte, poiché finora rappresentate solo in carte a scala regionale e segnalate 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 sono state prese in esame nel presente studio.

Inoltre, tra gli elementi geologici e idrogeologici sono stati rappresentati alcuni pozzi, indicando i valori di soggiacenza della falda freatica, e il sondaggio a carotaggio continuo realizzato ex-novo per il presente studio, che non ha raggiunto il substrato.

Infine, sono state indicate le tracce delle sezioni geologico-tecniche significative e rappresentative del modello del sottosuolo, riprese da RER e utilizzate per l'individuazione del *bedrock* sismico (cfr. par. 3.3.2).

Legenda



Confine comunale

Aree oggetto di Microzonazione Sismica

Terreni di copertura



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



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

Elementi tettonico strutturali



Anticlinale



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



Faglia diretta potenzialmente attiva e capace (incerta)

Elementi geologici e idrogeologici



Pozzo o sondaggio che non ha raggiunto il substrato geologico (profondità in m)



Profondità (m) della falda in aree con sabbie e/o ghiaie

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. 91), di cui n. 85 ritenuti significativi, con associati i risultati delle singole prove, mentre solo n. 6 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.

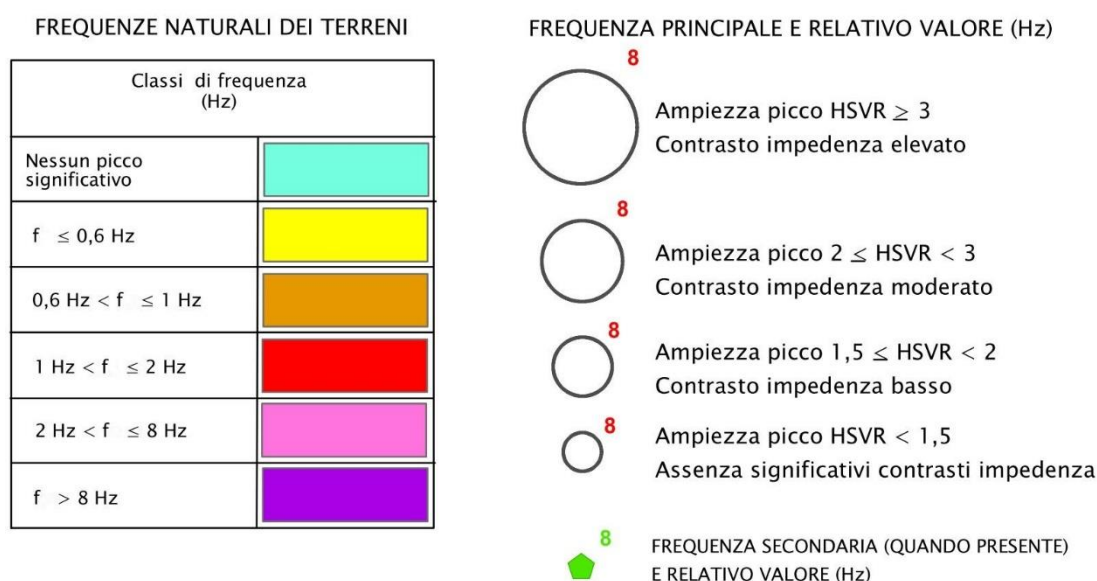


FIG. 47 – LEGENDA DELLA CARTA DELLE FREQUENZE

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 Bibbiano, sono di gran lunga dominanti le prove con picchi 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, in alcuni casi, mascherano altre eventuali superfici riflettenti sottostanti.

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

PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F0	A0	F1	A1
035004P123	5,94	6,39	17,00	2,15
035004P124	12,50	2,78	4,20	1,82
035004P125	3,80	2,43		
035004P126	10,25	3,10	6,00	1,70
035004P127	14,20	2,20	18,13	2,76
035004P128	10,25	3,10	4,00	1,90
035004P129	7,41	3,00	6,10	2,80
035004P130	5,92	3,70	4,70	3,40
035004P131	9,69	3,50	18,00	2,00
035004P132	7,50	2,00	13,00	2,30
035004P133	4,80	3,20	8,59	6,00
035004P134	10,50	3,40	13,31	3,60
035004P135	16,25	1,70	4,30	1,50
035004P136	11,78	3,30		
035004P137	10,63	3,80	0,58	1,40
035004P138	5,00	1,70	16,00	1,80
035004P139	5,00	3,50		
035004P140	7,66	4,30	0,33	1,60
035004P141	0,44	1,90		
035004P142	0			
035004P143	0,32	1,80	13,00	1,70
035004P144	12,81	2,00	0,38	1,60
035004P145	5,66	3,30		
035004P146	0,93	1,30		
035004P147	3,80	1,30	0,28	1,60
035004P148	5,78	3,30	0,61	1,40
035004P149	19,38	4,00	0,20	1,80
035004P150	8,38	2,30	4,30	1,90
035004P151	7,47	3,20	4,50	3,10
035004P152	10,63	3,10		
035004P153	12,19	2,80	4,80	2,40
035004P154	10,19	4,89	4,10	1,70
035004P155	18,13	2,59	3,55	1,58
035004P156	6,97	3,50	3,80	2,60
035004P157	0,28	1,80		



PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F0	A0	F1	A1
035004P158	11,97	2,00	0,31	1,90
035004P159	5,41	2,20	0,38	1,80
035004P160	0,17	1,90	19,97	1,90
035004P161	0,38	1,60	16,00	1,55
035004P162	0,30	1,70		
035004P163	0,32	1,80		
035004P164	0,36	1,80		
035004P165	8,97	1,80	0,28	1,50
035004P166	10,13	1,80	0,53	1,50
035004P167	6,56	5,58	18,00	2,10
035004P168	6,10	2,22	15,63	2,71
035004P169	14,97	4,32	4,20	1,76
035004P170	16,22	3,40	4,20	1,70
035004P171	9,06	3,96	3,23	1,70
035004P172	19,97	1,80	0,61	1,30
035004P173	9,00	2,20	12,09	2,60
035004P174	8,00	4,10	3,80	1,50
035004P175	5,41	3,90	7,80	2,80
035004P176	4,94	3,90	14,00	2,30
035004P177	15,50	4,90	0,25	1,50
035004P178	5,25	1,92		
035004P179	5,84	4,50		
035004P180	8,13	2,30		
035004P181	5,28	1,96		
035004P182	8,60	1,90	19,97	2,80
035004P183	0			
035004P184	0,50	1,70		
035004P185	0,50	1,80		
035004P186	0,44	1,60		
035004P196	0,40	1,90		
035004P206	10,00	1,40		
035004P208	0,32	1,20		
035004P21	9,20	1,60	4,20	1,35
035004P212	4,79	3,49		
035004P215	9,32	2,52	0,90	2,00
035004P217	0,48	1,90		
035004P219	7,30	2,60	4,10	1,60
035004P22	7,00	1,80		
035004P220	8,20	3,26		
035004P222	9,20	3,00		
035004P224	5,80	1,90		
035004P229	0,70	2,00		



PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F0	A0	F1	A1
035004P231	0			
035004P235	6,34	4,50	0,70	1,50
035004P236	7,30	1,70		
035004P238	16,03	3,00	5,00	2,20
035004P24	7,50	4,00	0,55	2,50
035004P242	5,00	4,00	10,00	2,00
035004P244	5,00	4,00	10,50	2,50
035004P245	15,00	1,30		
035004P247	0,55	4,50		
035004P248	0			
035004P249	0			
035004P250	4,20	4,10	0,55	8,00
035004P251	14,15	1,60		
035004P3	0			

TAB. 31 – RIEPILOGO DEI RISULTATI DELLE PROVE TROMOGRAFICHE IN COMUNE DI BIBBIANO

5.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), rappresenta il documento fondamentale del primo livello di approfondimento. Nel presente studio viene proposta una revisione di tale cartografia che tiene conto sia delle nuove indagini che delle verifiche effettuate 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 Bibbiano, non sono mai presenti le categorie 1 - zone stabili e 3 - zone di attenzione per instabilità. Invece, sono state individuate le seguenti 3 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (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 rinvengono, con spessori pluridecametrici, dei depositi di origine alluvionale, prevalentemente ghiaiosi, stratificati. Il substrato rigido ($V_s \geq 800$ m/s) è stimato ad oltre 100 m di profondità. Presente diffusamente in tutto il settore occidentale del Comune, oltre che nella valle del rio Costa.

- Zona 2 – Successione stratigrafica costituita da una copertura, di spessore generalmente compreso tra 3 e 10 m, di depositi di origine alluvionale, fini, a tessitura prevalentemente argilloso-limosa sotto la quale si rinvengono, con spessori pluridecametrici, dei depositi di origine alluvionale, prevalentemente ghiaiosi, stratificati. Il substrato rigido ($V_s \geq 800$ m/s) è stimato ad oltre 100 m di profondità, cartografata nella porzione centrale di territorio comunale, compresa tra il settore occidentale sopraccitato e il terrazzo del Ghiardo.
- Zona 3 – Successione stratigrafica costituita da una copertura, di spessore generalmente superiore a 10 m, di depositi di origine alluvionale, fini, a tessitura prevalentemente argilloso-limosa sotto la quale si rinvengono, con spessori pluridecametrici, dei depositi di origine alluvionale, prevalentemente ghiaiosi, stratificati. Il substrato rigido ($V_s \geq 800$ m/s) è stimato ad oltre 100 m di profondità. Si rileva solo nell'area orientale del comune in corrispondenza del terrazzo del Ghiardo.

MOPS BIBBIANO

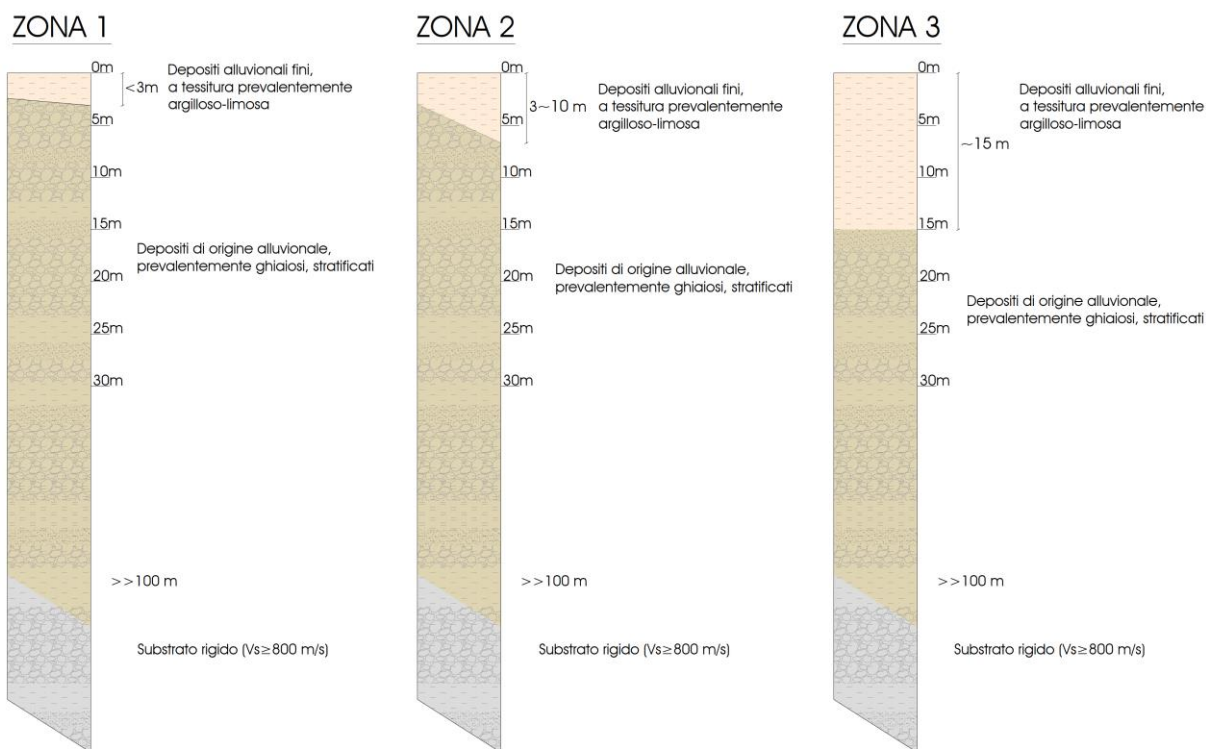


FIG. 48 – COLONNE LITOSTRATIGRAFICHE SINTETICHE, RAPPRESENTATIVE DELLE MICROZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

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

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

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

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

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

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

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

A riguardo, va chiarito che, come già effettuato nel precedente studio di 2° livello, si è indicato la V_{S30} per le indagini effettuate all'interno della zona 1, mentre, per le altre 2 zone definite nel paragrafo 5.4, è stata riportata la V_{SH} e la relativa profondità H . Dati riepilogati nella seguente Tab. 32.

PROVA	MOPS	V_{S30}	H	V_{SH}
035004L3	2001	255.00		
035004L4	2002		3.80	123.90
035004L5	2001	302.00		
035004L6	2002		7.10	158.60
035004L7	2002		6.26	171.00
035004L8	2002		4.60	160.10
035004L9	2002		14.30	202.60
035004L10	2002		7.90	167.40
035004L11	2002		4.18	146.10
035004L12	2002		4.55	181.90
035004L13	2002		7.10	154.10
035004L14	2002		6.75	149.70
035004L15	2002		14.00	214.10
035004L29	2003		13.10	207.50
035004L30	2002		12.65	193.60
035004L31	2001	379.70		
035004L32	2002		8.80	232.70
035004L33	2002		3.00	217.00
035004L34	2002		2.60	158.30



PROVA	MOPS	V _{s30}	H	V _{SH}
035004L35	2002		2.67	243.60
035004L37	2001	231.70		
035004L39	2002		5.60	196.90
035004L40	2002		7.35	195.00
035004L41	2002		7.00	230.60
035004L42	2002		2.30	140.00
035004L43	2001	373.00		
035004L44	2002		12.00	204.10
035004L45	2002		8.90	208.20
035004L46	2002		3.60	150.00
035004L47	2001	288.80		
035004L48	2002		6.00	160.00
035004L49	2001	342.40		
035004L50	2002		5.00	160.00
035004L52	2002		4.00	140.00
035004L53	2001	268.30		
035004L54	2001	422.90		
035004L55	2002		8.00	229.60
035004L56	2002		9.60	204.20
035004L57	2002		1.60	140.00
035004L58	2002		8.90	246.00
035004L59	2002		13.00	263.10
035004L60	2002		10.00	267.90
035004L61	2002		9.60	173.20
035004L62	2001	320.90		
035004L63	2001	321.80		
035004L64	2001	329.60		
035004L65	2002		5.00	170.00
035004L66	2001	358.90		
035004L67	2002		6.60	227.80
035004L68	2003		12.00	294.70
035004L69	2003		9.10	232.50
035004L70	2003		15.00	227.50
035004L71	2001	369.20		
035004L72	2002		5.00	200.00
035004L73	2002		10.00	213.20
035004L74	2002		7.30	209.40
035004L75	2002		1.20	170.00
035004L76	2001	369.80		
035004L77	2001	372.80		
035004L78	2001	371.00		
035004L79	2001	391.20		



PROVA	MOPS	V _{s30}	H	V _{SH}
035004L80	2001	420.40		
035004L86	2002		7.1	287.10
035004L87	2002		9.2	214.20
035004L88	2002		7.9	149.00
035004L89	2001	472.00		
035004L90	2002		5.4	153.00
035004L91	2002		5.2	168.65
035004L93	2002		5.5	271.50
035004L94	2002		2.9	181.00
035004L95	2002		9.5	299.20
035004L96	2002		5.5	245.00
035004L97	2003		5.6	194.00
035004P34	2002		5.60	196.89
035004P21	2002		8.00	214.29
035004P22	2002		6.00	214.36
035004P24	2003		12.40	205.83
035004P123	2002		9.00	172.20
035004P124	2001	256.00		
035004P125	2001	255.00		
035004P126	2002		3.80	123.91
035004P127	2001	255.00		
035004P128	2001	302.00		
035004P129	2002		7.10	158.60
035004P130	2002		14.95	196.63
035004P131	2002		6.26	171.04
035004P132	2002		4.60	160.08
035004P133	2003		7.90	193.64
035004P135	2002		14.00	214.12
035004P136	2001	262.00		
035004P137	2002		4.35	142.82
035004P104	2002		14.30	202.65
035004P139	2002		3.75	112.29
035004P140	2002		7.90	167.41
035004P143	2002		4.35	148.32
035004P144	2001	240.00		
035004P145	2002	257.00	6.75	149.72
035004P146	2001	182.00	1.10	107.44
035004P3	2002		5.6	196.90
035004P246	2002	373.00		
035004P245	2003		9.0	267.00
035004P244	2003		13.0	218.00
035004P242	2003		13.0	218.00



PROVA	MOPS	V _{s30}	H	V _{sH}
035004P24	2003		12.4	205.80
035004P204	2003		5.2	169.00
035004P236	2001	350.00		
035004P235	2002		10.0	223.00
035004P231	2001	357.00		
035004P229	2001	048.00		
035004P224	2001	348.00		
035004P222	2001	369.00		
035004P220	2002		14.3	210.00
035004P22	2002		6.0	214.40
035004P219	2002		6.0	176.50
035004P215	2001	290.00		
035004P212	2002		5.0	218.00
035004P21	2002		8.0	214.30
035004P208	2002		10.0	167.00
035004P204	2002		11.0	280.00
035004P199	2001	370.00		
035004P196	2001	436.00		

TAB. 32 – RISULTATI DELLE MISURE DI VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S IN COMUNE DI BIBBIANO

In carta si osserva come sia stata utilizzata la V_{s30} in corrispondenza della zona 2001 della Carta delle MOPS, caratterizzata da depositi grossolani di conoide alluvionale subaffioranti che presentano valori di V_s molto maggiori di quelli dei terreni fini soprastanti (con spessore medio della copertura inferiore a 2,5 m), mentre nel resto del territorio si è fatto riferimento alla V_{sH} .

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 :
 - SI_1 per $0.1s \leq T \leq 0.5s$,
 - SI_2 per $0.5s \leq T \leq 1.0s$,
 - SI_3 per $0.5s \leq T \leq 1.5s$.

Nella seguente Tab. 33 sono indicate le analisi di Risposta Sismica Locale utilizzate per calcolare i sopraindicati parametri, riportando a che microzona e sito sono riferite e in che paragrafo della presente relazione sono descritte.

MOPS	Analisi di Risposta Sismica Locale	Tipo di zona	Sito RSL	Paragrafo
2002	RSL.1	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Palazzetto dello Sport	3.6.1
	RSL.2	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Scuola elementare Secchi	3.6.2
	RSL.3	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Istituto M. Ausiliatrice	3.6.3
	RSL.4	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Sede UVEN	3.6.4
2003	RSL.5	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Ghiardo zona industriale	3.6.5
2001	RSL.6	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Barco	3.6.6
	RSL.7	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Corniano	3.6.7

TAB. 33 – 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 INGV¹⁴ nell'ambito degli studi per la redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274.

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

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

$H_{SM} \leq 0,21g$ $H_{0408} \leq 0,14g$ $H_{0711} \leq 0,09g$	204, 204, 204	$0,71g \leq H_{SM} \leq 0,85g$ $0,46g \leq H_{0408} \leq 0,55g$ $0,30g \leq H_{0711} \leq 0,35g$	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}

¹⁴ 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>



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) . BDMI11, 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., Bramerini 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.
- Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily W.D. (1998) – Shear modulus and damping relationships for gravel. JGGE, 124, 396-405
- 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



Elaborato		scala
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
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.