



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna  
Comune di Montecchio Emilia



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



## INDICE

1.	Introduzione.....	4
1.1.	Motivazione dello studio di 3° livello.....	5
1.2.	Articolazione dello studio.....	6
2.	Indagini ed analisi.....	8
2.1.	Sondaggio a carotaggio continuo.....	9
2.2.	Prova sismica in foro di tipo Down-Hole.....	10
2.3.	Rilievo sismico HVSR mediante tromografo.....	13
2.4.	Prove sismiche di tipo MASW.....	15
3.	Analisi di risposta sismica locale.....	18
3.1.	Pericolosità sismica di base.....	20
3.2.	Segnali in input.....	20
3.3.	Modello geofisico del sottosuolo.....	21
3.3.1.	Litologia.....	21
3.3.2.	Determinazione della Vs e del bedrock sismico.....	22
3.3.3.	Curva di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza ( $G/G_0$ ) in funzione della deformazione.....	23
3.4.	Procedura di analisi RSL.....	25
3.4.1.	Metodo lineare equivalente.....	25
3.4.2.	Soluzione alla singola iterazione mediante FEM.....	26
3.4.3.	Smorzamento.....	28
3.4.4.	Procedimento iterativo.....	28
3.4.5.	Interpretazione dei risultati.....	28
3.5.	Analisi dei risultati.....	29
3.5.1.	Spettro di risposta elastico normalizzato.....	32
3.6.	Modelli e risultati della modellazione numerica.....	34
3.6.1.	RSL.1 per il sito "Parco del Noce nero".....	34
3.6.2.	RSL.2 per il sito "Croce arancione".....	38
3.6.3.	RSL.3 per il sito "Ospedale".....	41
3.6.4.	RSL.4 per il sito "Magazzini comunali".....	44
3.6.5.	RSL.5 per il sito "Via IV Novembre".....	47
3.6.6.	RSL.6 per il sito "Aiola".....	50
3.6.7.	RSL.7 per il sito "Cornocchio".....	53
3.7.	Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello.....	57
4.	Criticità del metodo.....	59
4.1.	Considerazioni sul bedrock sismico.....	59
5.	Elaborati cartografici.....	61
5.1.	Carta delle indagini.....	62
5.2.	Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica (CGT_MS).....	64
5.3.	Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	69





RELAZIONE ILLUSTRATIVA

5.4.	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).....	72
5.5.	Carta delle velocità delle onde di taglio S ( $V_s$ ) .....	73
5.6.	Carta di microzonazione sismica .....	77
5.7.	Carta dello scuotimento atteso .....	79
6.	Bibliografia .....	81
7.	Allegati .....	83



## 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 Montecchio Emilia, 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 476/2021<sup>1</sup> e integrato con DGR 564/2021<sup>2</sup> (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.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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 Montecchio Emilia è già dotato di uno studio di microzonazione sismica di secondo livello di approfondimento, certificato dalla Regione Emilia-Romagna (prot. n. 01.09.2021.0789150.E), in data 21/07/2021, redatto da ENGEO s.r.l., conforme agli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" e agli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica", secondo quanto previsto dall'OPCM 4007/2012.

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

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

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

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, ( $V_{seq}$ ), 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 **447.0 m/s**.

I reports completi sono contenuti nell'Elaborato 7.

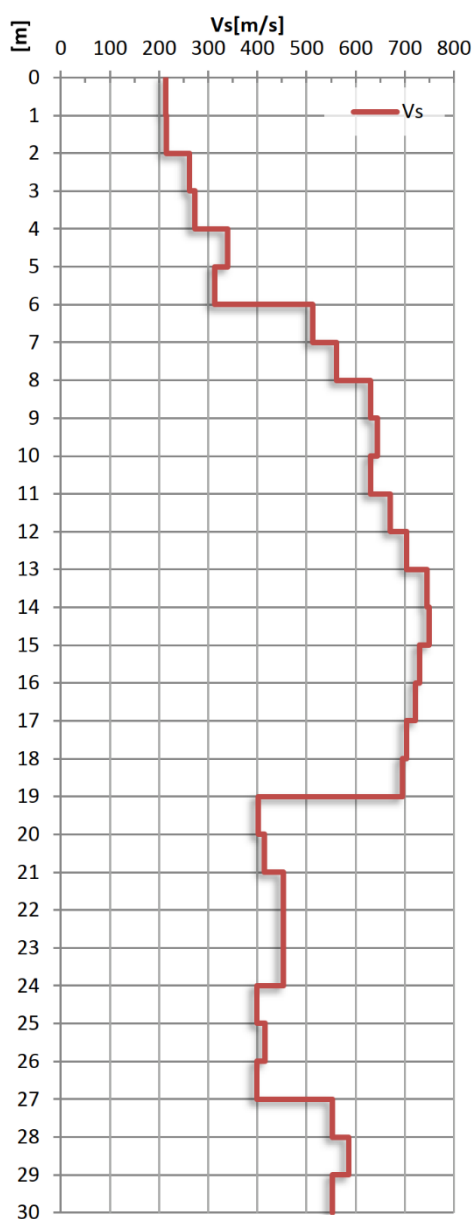


FIG. 4 – GRAFICO  $V_s$  DERIVANTE DALLA PROVA DOWN-HOLE



### 2.3. Rilievo sismico HVSR mediante tromografo

Ai fini della determinazione della frequenza caratteristica dei suoli sono state eseguite in tutto n° 6 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 DELLA STRUMENTAZIONE DURANTE L'ACQUISIZIONE DI UNA PROVA HVSR

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



frequenza per ognuna delle tre direzioni cfr., Fig. 7).

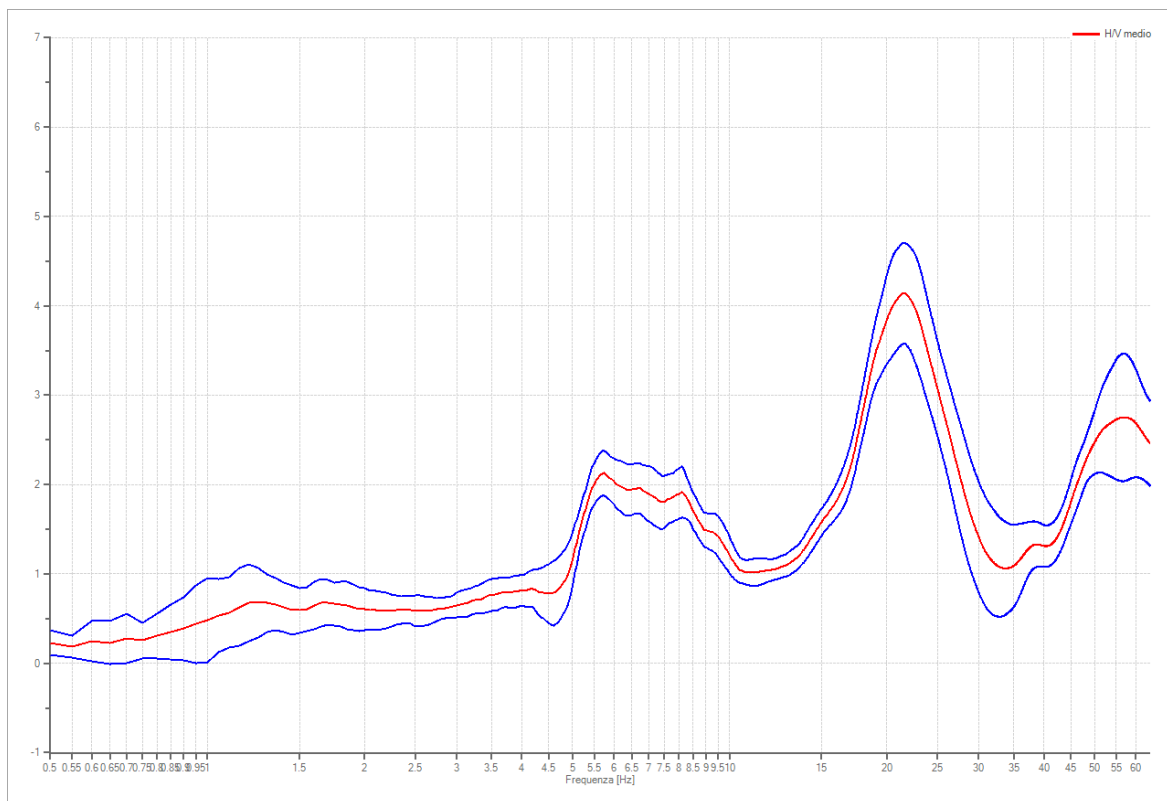


FIG. 6 - RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE DELLA PROVA 035027P201

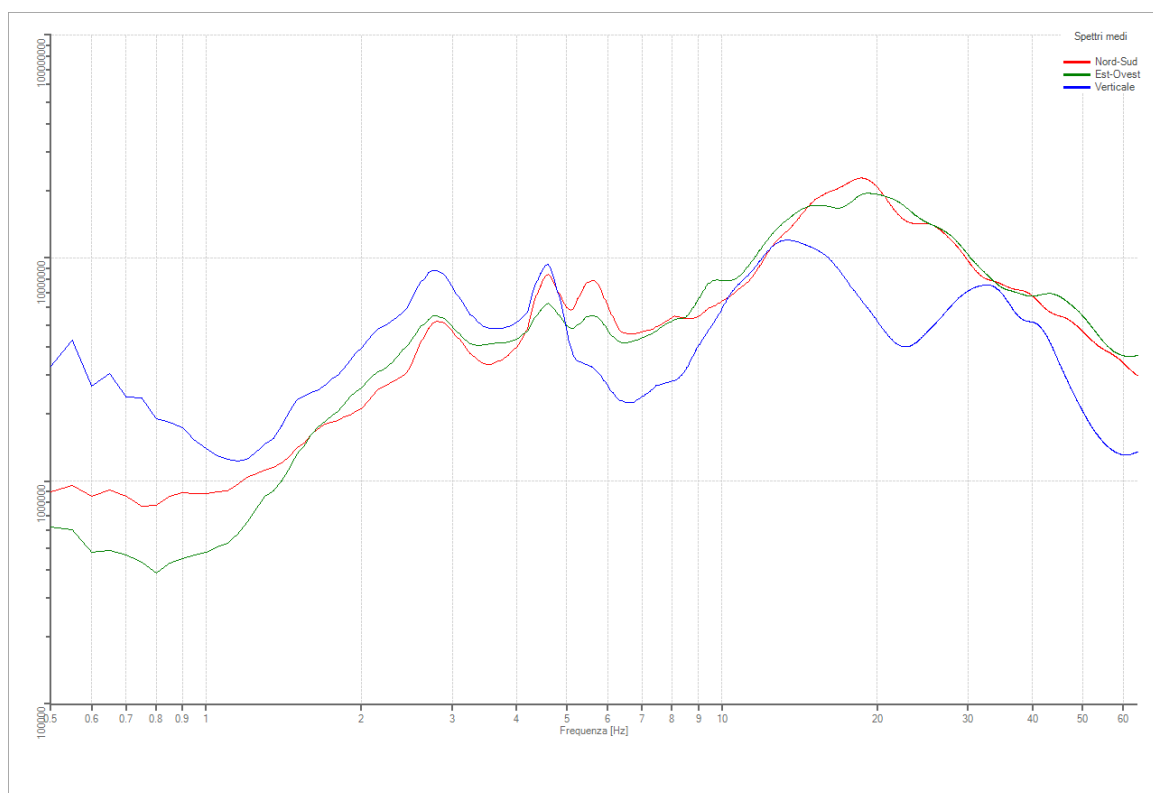


FIG. 7 – SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI DELLA PROVA 035027P201





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

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

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

Codice MS3 <sup>3</sup>	N. prova	Picco primario F	Ampiezza A	Picco secondario F1	Ampiezza A1
035027P201	HVSR1	21.60	4.05	5.60	2.10
035027P202	HVSR2	17.60	4.00	-	-
035027P203	HVSR3	39.15	3.00	1.35	0.80
035027P204	HVSR4	27.80	3.90	0.60	3.50
035027P205	HVSR5	38.15	2.90	0.95	1.05
035027P207	HVSR6	0.80	3.70	34.00	2.90

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.

<sup>3</sup> Codice da normativa regionale

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

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

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

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

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

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

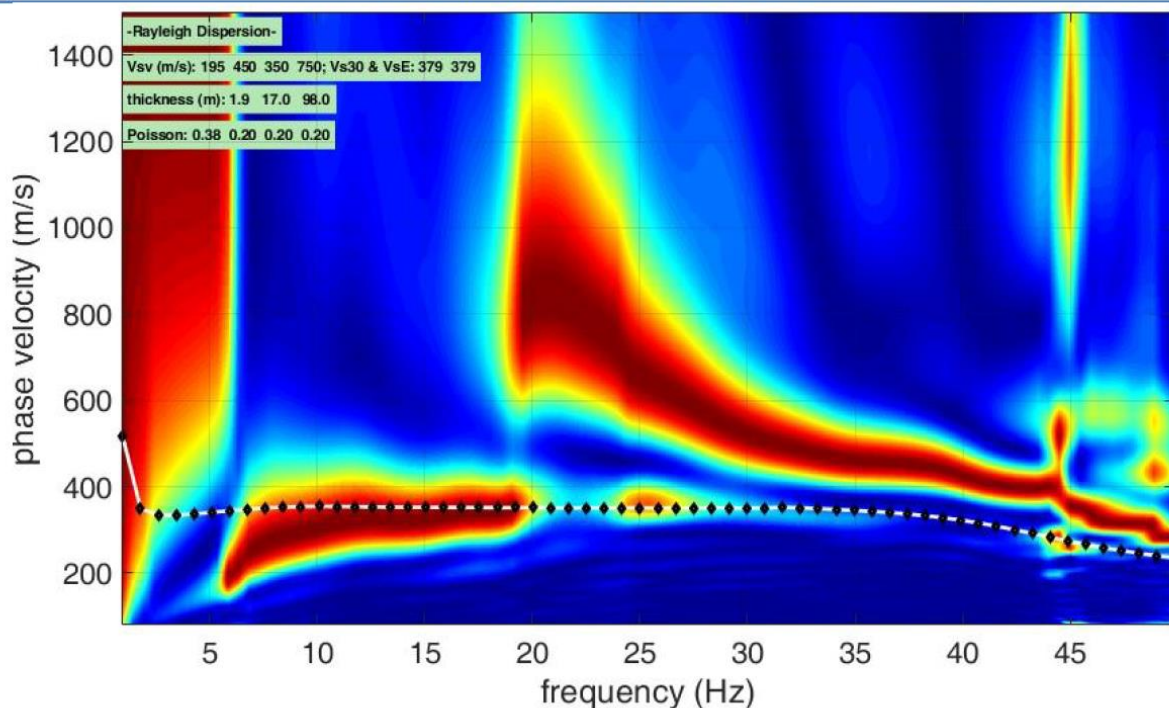
In Fig. 8 si riporta, a titolo esemplificativo, uno spettro di velocità e una curva HVSR con sovrapposta la curva del modello ottenuto.

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

Codice MS3 <sup>3</sup>	N. prova	V <sub>s30</sub> (m/s)
035027L94	MASW1	361
035027L95	MASW2	396
035027L96	MASW3	489
035027L97	MASW4	379

TAB. 2 – RIEPILOGO DEI VALORI DI V<sub>s30</sub> OTTENUTI

Modello sintetico su spettro MASW



Modello sintetico su spettro HVSR

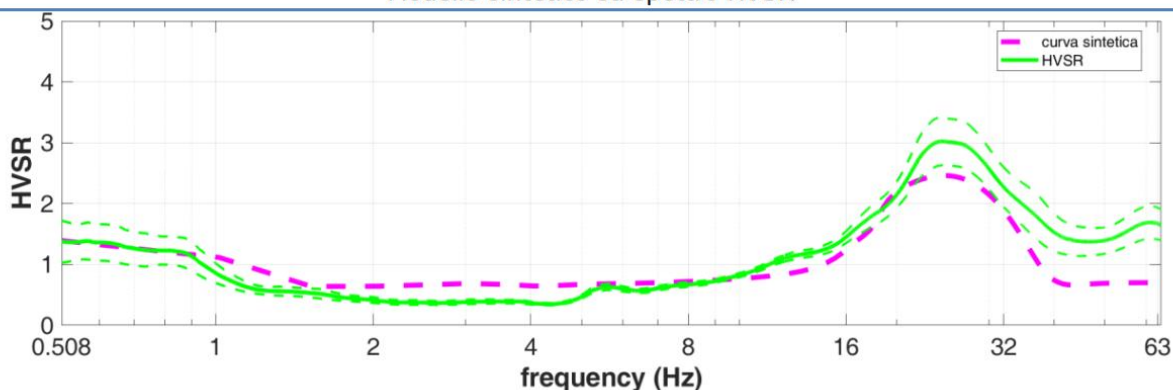


FIG. 8 – MODELLO SINTETICO SU SPETTRO MASW E SU CURVA HVSR

### 3. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'analisi di 3° livello, per il Comune di Montecchio Emilia, 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 21 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.

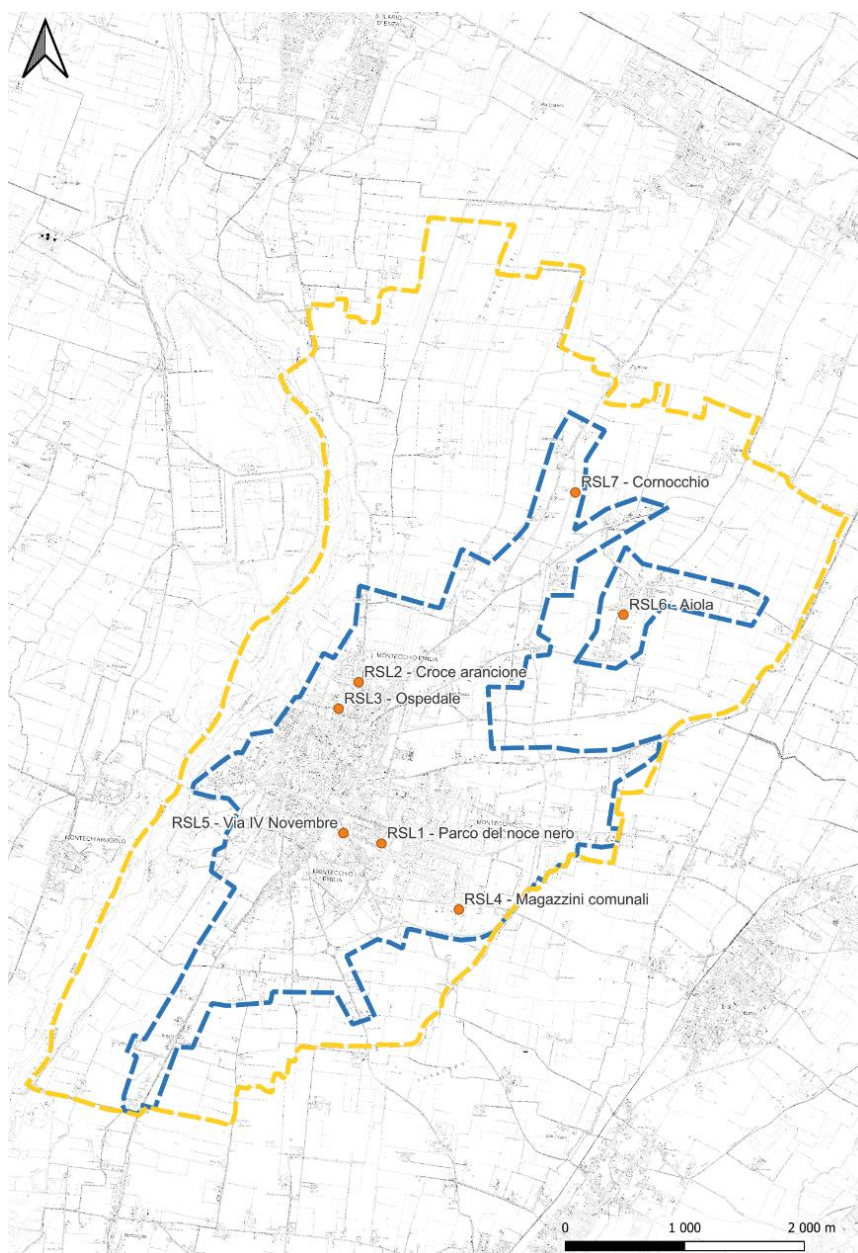


FIG. 9 – UBICAZIONE DELLE VERTICALI UTILIZZATE PER L'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE IN COMUNE DI MONTECCHIO EMILIA



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 <sup>3</sup>	Tipo prova	X <sup>4</sup>	Y <sup>4</sup>	Verticale modello sismostratigrafico	MOPS
035027L58	MASW	139875	4959212	1 – Parco del Noce nero	2001
035027L64	MASW	139872	4959432		
035027P206	DH	139884	4959216		
035027L94	MASW	139704	4960587	2 – Croce arancione	
035027L42	MASW	139548	4960596	3 - Ospedale	
035027L95	MASW	139552	4960332		
035027L77	MASW	139552	4960332		
035027L96	MASW	140535	4958703	4 – Magazzini comunal	
035027L19	MASW	140684	4958603		
035027L94	MASW	139704	4960587	5 – Via IV Novembre	
035027L34	MASW	140112	4960145		
035027L37	MASW	141823	4961315	6 - Aiola	
035027L36	MASW	141905	4961100		
035027L35	MASW	141960	4960901		
035027L38	MASW	142252	4961249		
035027L29	MASW	141508	4962156	7 - Cornocchio	
035027L30	MASW	141285	4961550		
035027L26	MASW	140741	4961362		
035027L32	MASW	140524	4960595		
035027L34	MASW	140112	4960145		
035027L40	MASW	140422	4960939		

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

<sup>4</sup> Coordinate espresse nel sistema WGS84 / UTM zona 33 N



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

### 3.1. Pericolosità sismica di base

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

In particolare, l'Allegato A4 contiene:

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

Per i punti di indagine il parametro  $a_{ref,g}$ , che varia in funzione del sito indagato, risulta compreso nel seguente intervallo (cfr. Tab. 4):

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

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

### 3.2. Segnali in input

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

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 6 – Aiola e 7 – Cornocchio, che ricadono nella porzione settentrionale del comune, stati utilizzati i sismi riferiti al nodo 15608 (cfr. Tab. 5), mentre per le restanti n° 5 verticali (1 – Parco del Noce nero, 2 – Croce arancione, 3 – Ospedale, 4 – Magazzini comunali e 5 – Via IV Novembre) sono stati utilizzati quelli riferiti al nodo 15830 (cfr. Tab. 6).

<sup>5</sup> 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	1.89 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.24 %	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.69	38.07	0.95 %	NGA RSN1091_NORTHV_VAS000.AT2
5.60	18.00	0.91 %	ESM IT.LRS..HNE.D.19980909.112800.C.ACC.ASC
6.20	78.79	2.53 %	NGA RSN2989_CHICHI.05_CHY102N.AT2
6.60	31.00	0.59 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.50	57.74	3.11 %	NGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP247.AT2

TAB. 5 – SISMI ESTRATTI RIFERITI AL NODO 15608

$M_W$	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	38.07	1.02 %	NGA RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
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 per il presente studio 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), questo non è stato individuato sia dalla prova Down-Hole in foro e sia dalle prove MASW effettuate appositamente per il presente studio. Tuttavia, l'elaborazione congiunta con i risultati delle prove HVSR effettuate ha evidenziato una superficie di impedenza ad una profondità variabile tra circa 30 e 100 m da p.c.

In considerazione del fatto che il territorio comunale di Montecchio Emilia è attraversato da un alto strutturale (cfr. Fig. 10), il contrasto di impedenza rilevato dalle prove tomografiche, in questo caso, in accordo con la letteratura (Martelli et alii<sup>6</sup> 2013, Martelli et alii<sup>7</sup>, 2014 e Martelli<sup>12</sup>, 2021), viene associato al passaggio tra il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e il Supersintema Quaternario Marino (QMC).

Alla luce di quanto sopra affermato, in tutte le verticali studiate, pertanto, il bedrock è di tipo rigido e presenta  $V_s > 800$  m/s.

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

<sup>6</sup> 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 NGTS 2013

<sup>7</sup> L. Martelli, P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tenta, 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

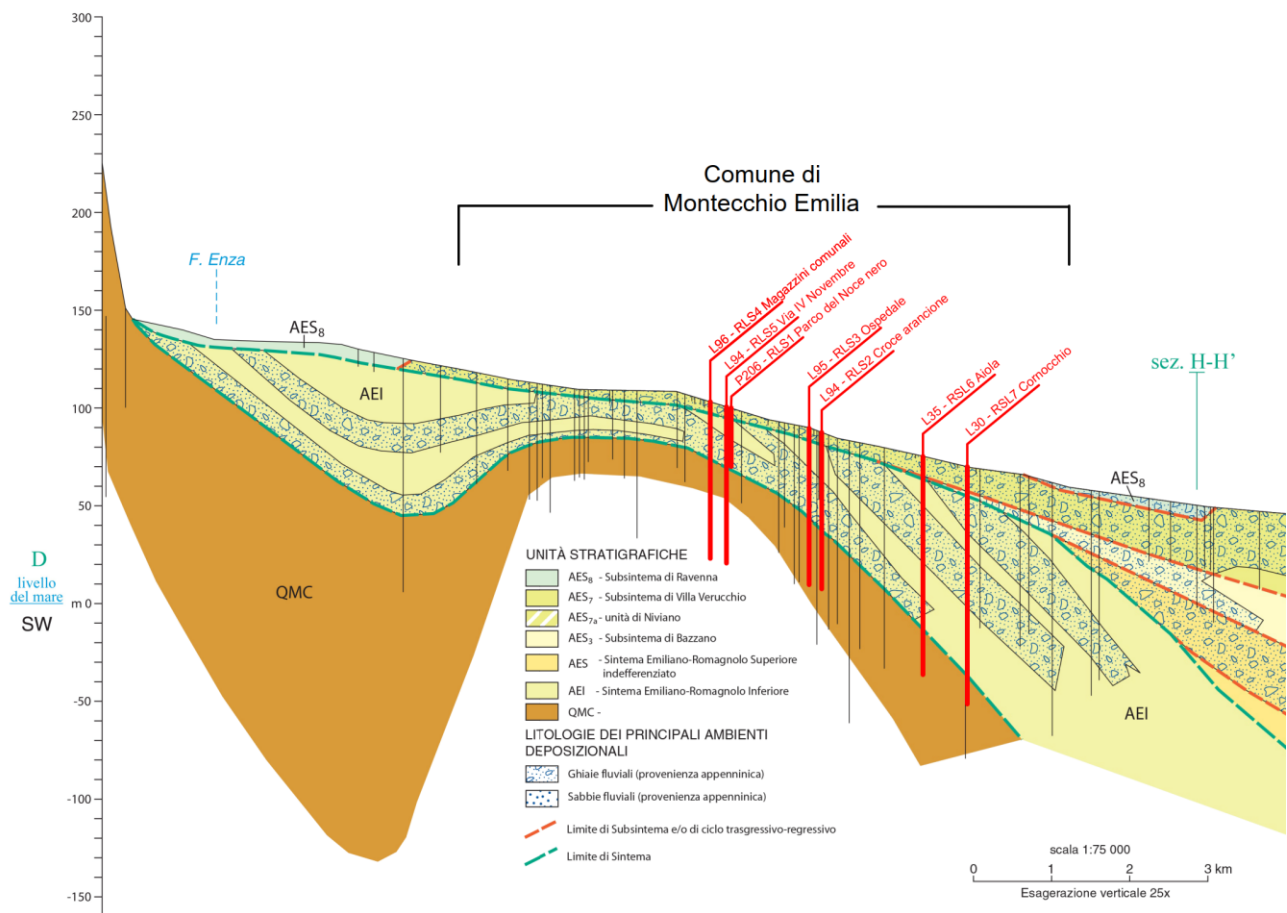


FIG. 10 - STRALCIO DELLA SEZIONE 35 TRATTA DAL SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA CON UBICAZIONE DELLE VERTICALI D'INDAGINE REALIZZATE PER IL PRESENTE STUDIO

### 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  $\gamma$ , 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)<sup>8</sup> e per i depositi sabbiosi Sand Seed & Idriss (1970)<sup>9</sup> (cfr. Tab. 7).

Tipo di curva	Litologia	$\alpha$	$\beta$	$\eta$	$\lambda$
Vucetic & Dobry $PI=30$	Argilla e limo	5.12	0.81	30.24	3.06
Sand Seed & Idriss (1970)	Sabbia	14.12	0.93	27.50	3.14

<sup>8</sup> M. Vucetic; R. Dobry – 1991 – Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, Issue 1.

<sup>9</sup> H. B. Seed; I. M. Idriss – 1970 – Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses – University of California Berkeley Structural Engineers and Mechanics.



Tipo di curva	Litologia	$\alpha$	$\beta$	$\eta$	$\lambda$
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.

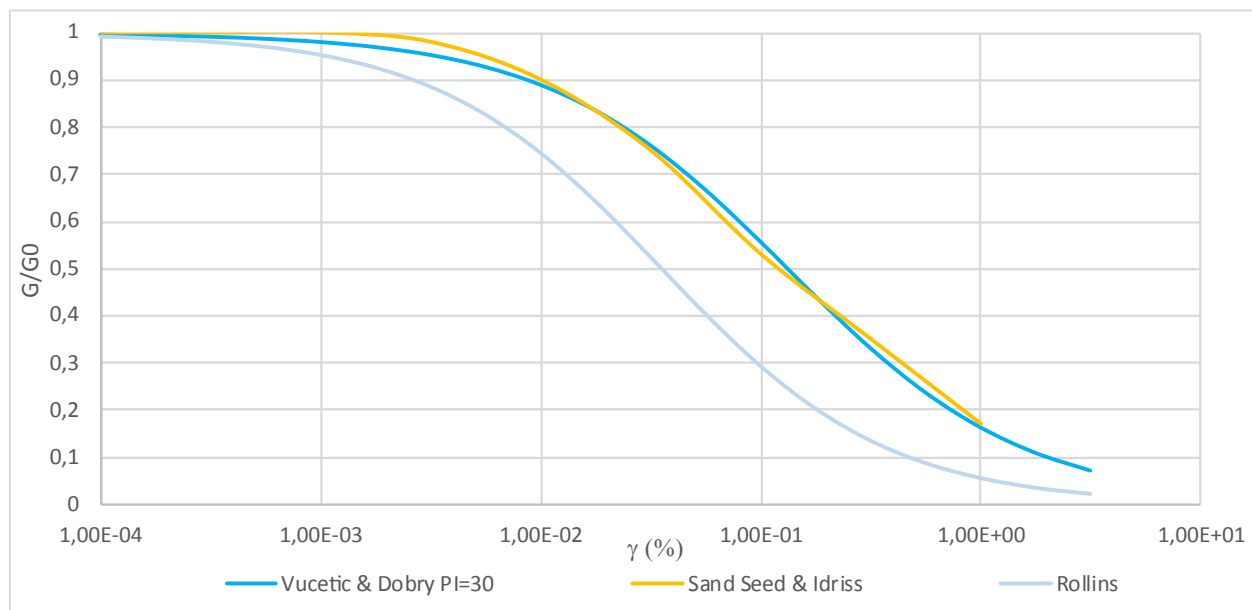


FIG. 11 – GRAFICO DELLE CURVE  $G/G_0$  IN FUNZIONE DELLA DEFORMAZIONE

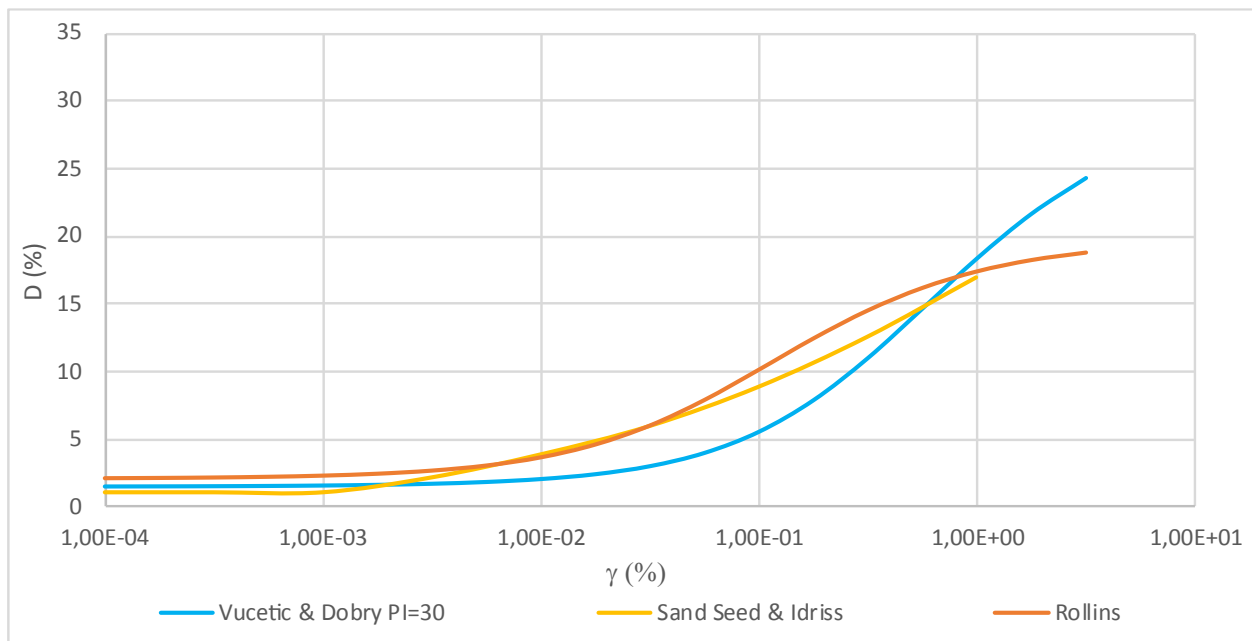


FIG. 12 - GRAFICO DELLE CURVE  $D$  IN FUNZIONE DELLA DEFORMAZIONE

### 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  $\tau$  dipende dalla deformazione  $\gamma$  e dalla sua derivata  $\dot{\gamma}$ , secondo la relazione:

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

dove:

- $G$  = Modulo di taglio;
- $\eta$  = viscosità del mezzo;

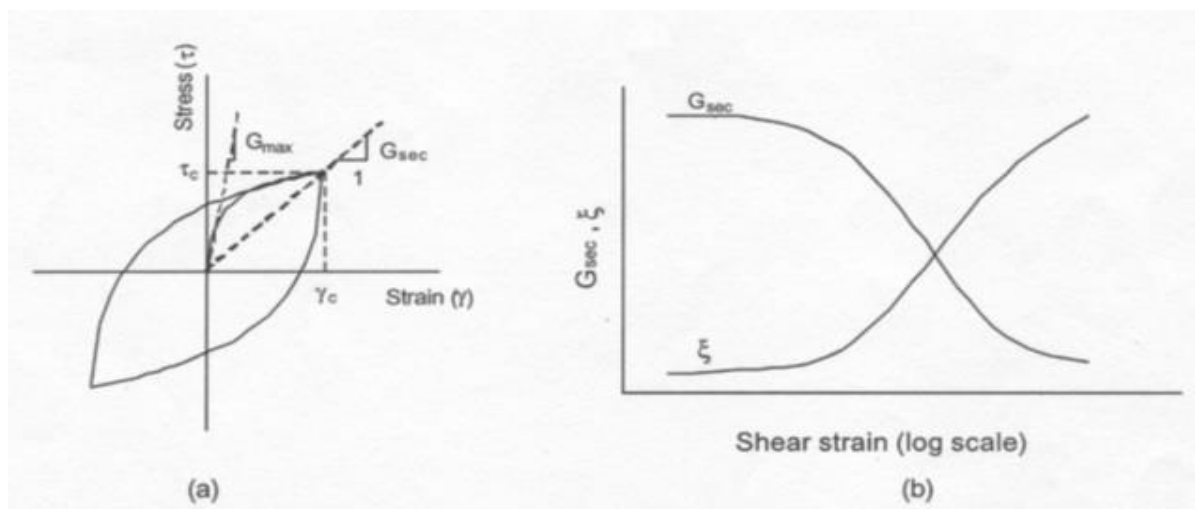


FIG. 13 – MODELLO LINEARE EQUIVALENTE A) CURVE TENSIONE – DEFORMAZIONI; B) VARIAZIONE DEL MODULO

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:

- $\Delta W^{dissp}$  = 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:

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

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

dove:

$\Delta t$  = incremento temporale tra l'istante di tempo  $tn$  e  $tn - 1$

$\beta$  = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25

$\gamma$  = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50

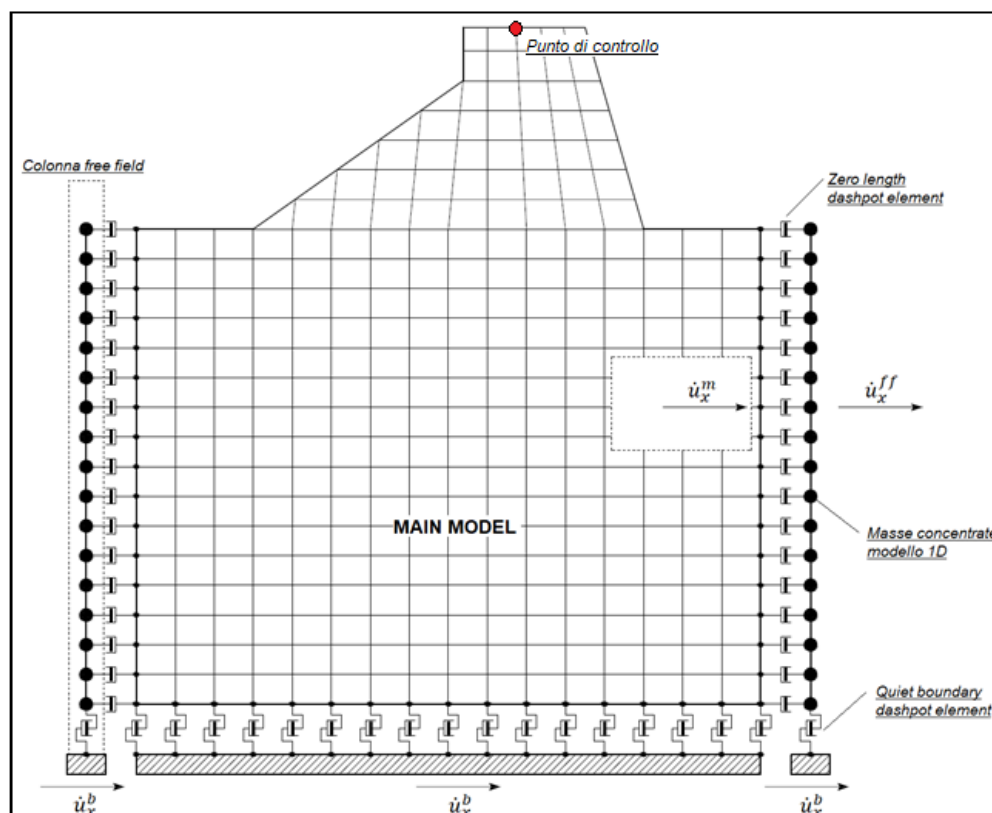


FIG. 14 – DISCRETIZZAZIONE FEM DEL TERRENO

### 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:

- $\alpha_q$  e  $\beta_q$  = 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:

- $\omega_1$  = 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  $\omega_i$  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 ( $\gamma_1$ );
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:

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

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

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

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

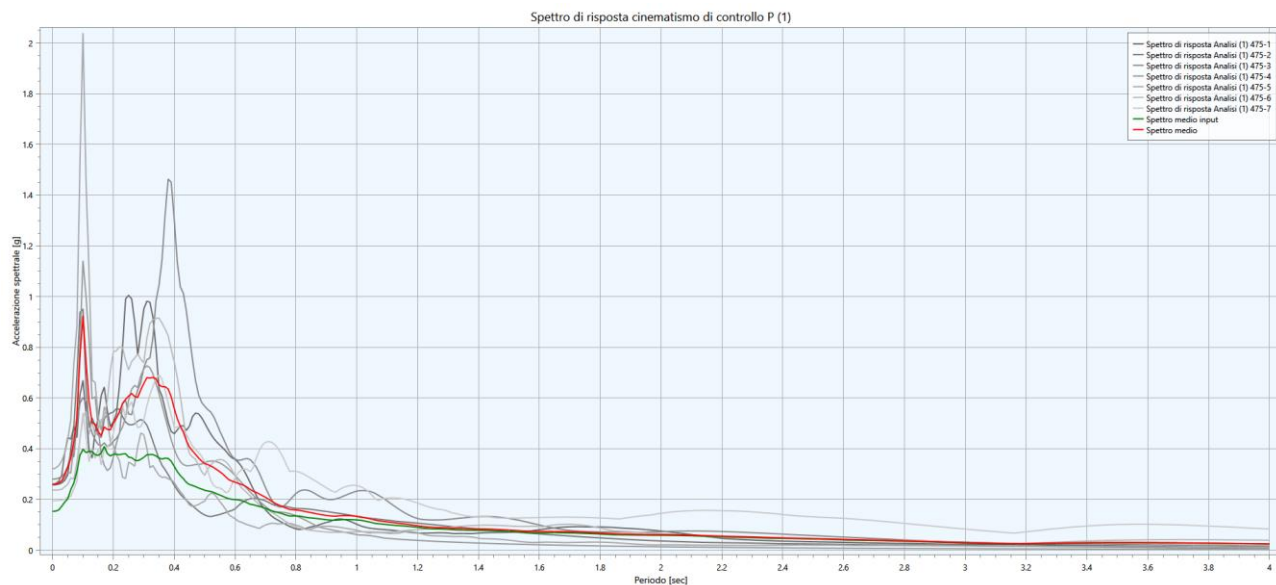


FIG. 15 – ESEMPIO DI SPETTRO ELASTICO IN ACCELERAZIONE (IN GRIGIO GLI SPETTRI DEI SINGOLI ACCELEROGRAMMI, IN VERDE LO SPETTRO MEDIO DI INPUT, IN ROSSO LO SPETTRO MEDIO DI OUTPUT)

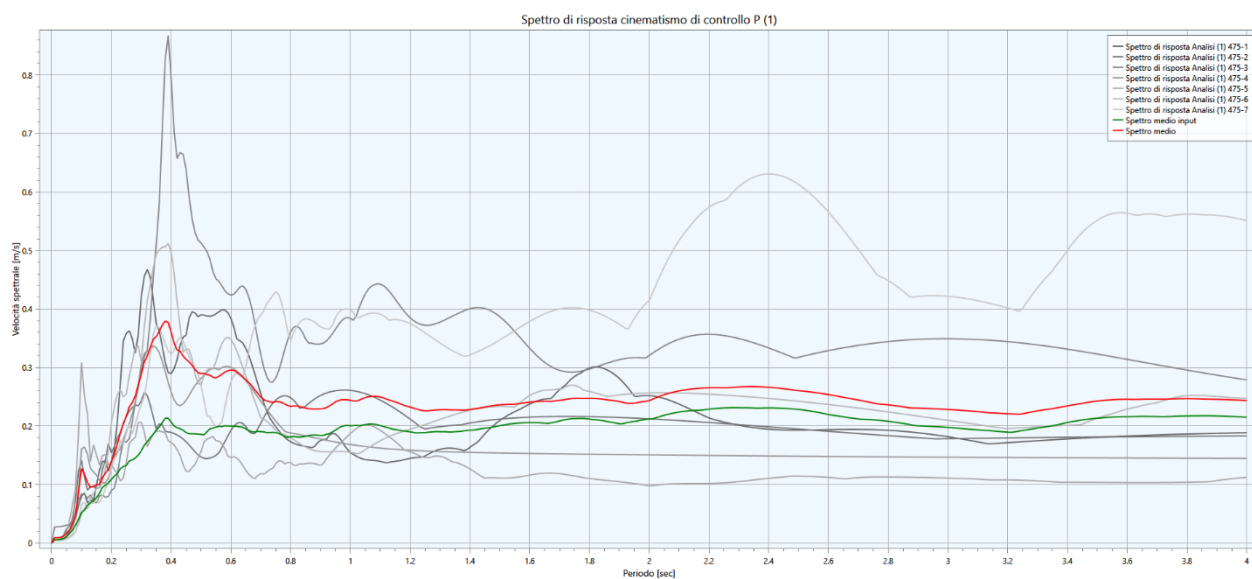


FIG. 16 - SPETTRO ELASTICO IN VELOCITÀ (IN GRIGIO GLI SPETTRI DEI SINGOLI ACCELEROGRAMMI, IN VERDE LO SPETTRO MEDIO DI INPUT, IN ROSSO LO SPETTRO MEDIO DI OUTPUT)

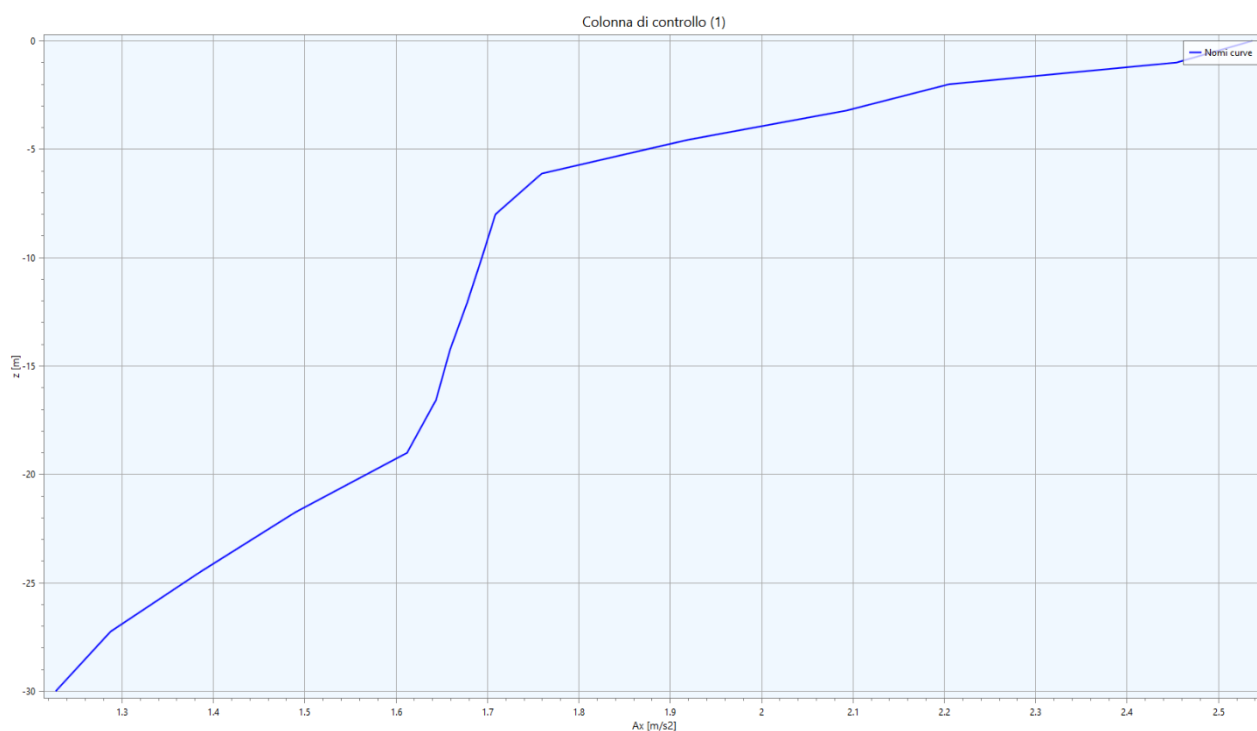


FIG. 17 - VARIAZIONE DELL'ACCELERAZIONE CON LA PROFONDITÀ

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.

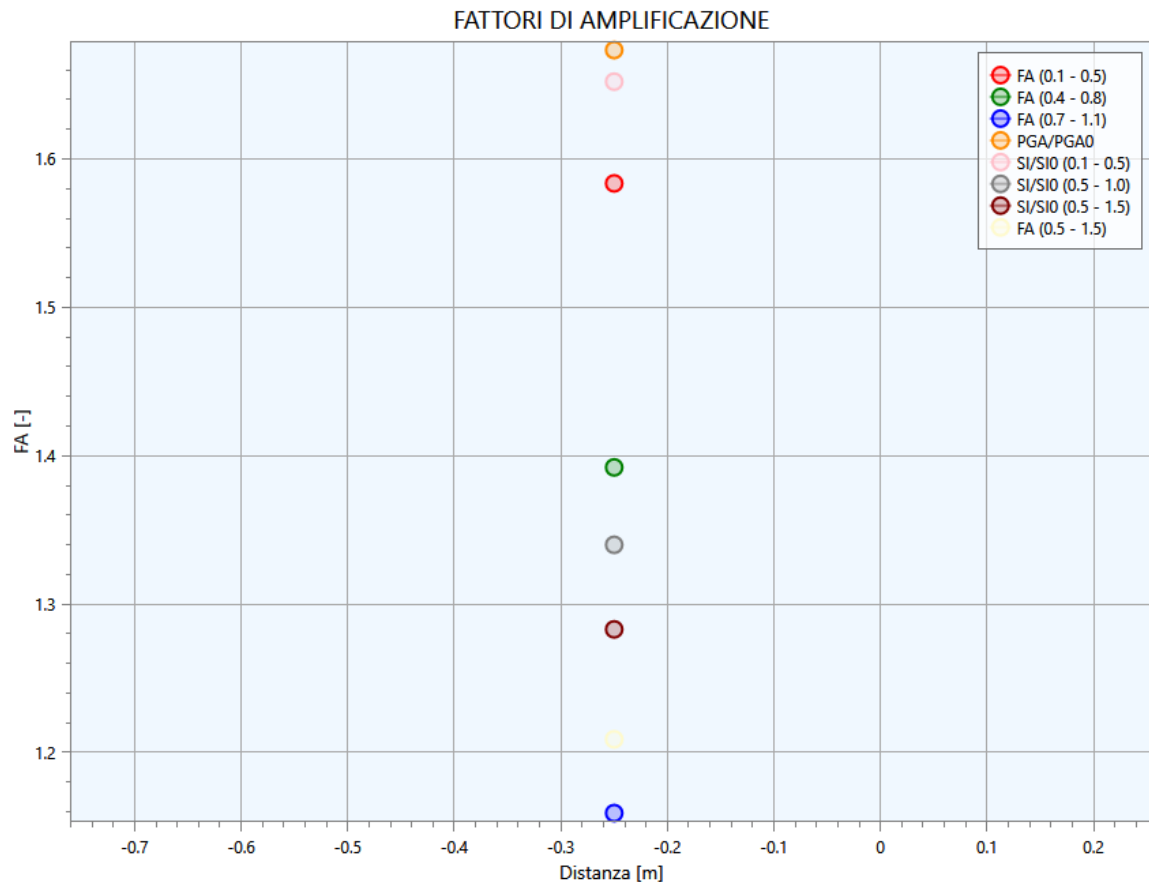


FIG. 18 – GRAFICO DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

### 3.5.1. Spettro di risposta elastico normalizzato

Le verifiche progettuali delle strutture richiedono anche i parametri espressi secondo i parametri di normativa ( $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_C^*$ ,  $T_D$ ,  $C_C$ ,  $S$ ,  $\eta$ ); 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  $T_D$ <sup>10</sup> con il metodo di *Newmak-Hall*<sup>11</sup>.

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:

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

<sup>10</sup> 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  $T_D$ .

<sup>11</sup> Newmark NM, Hall WJ, Earthquake Spectra and Design, EERI Monograph Series, 1982.



- c) 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;

- d) Si calcola il valore medio dello spettro (SV<sub>m</sub>) nell'intorno di TV tra 0.8 TV e 1.2 TV:

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

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

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

- f) Si determina lo spettro di pseudospostamento (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;

- g) Si calcola il valore medio dello spettro (SD<sub>m</sub>) nell'intorno di TD tra 0.8 TD e 1.2 TD:

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

- h) Si calcola il valore di T<sub>D</sub> con la formula:

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

- i) Si determina T<sub>B</sub> = 1/3 \* T<sub>C</sub>

- j) Si determina il valore di F<sub>0</sub> come rapporto SA<sub>m</sub>/a<sub>max</sub>, dove a<sub>max</sub> è ricavato dalla seguente equazione:

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

- k) Si applicano le seguenti equazioni riportate in NTC 2018 (Cap. 3.2.3.2.1) per la determinazione dei tratti dello spettro tra T<sub>A</sub>=0, T<sub>B</sub>, T<sub>C</sub>, T<sub>D</sub>, 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 "Parco del Noce nero"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-2.00	2.00	18.00	180	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-2.00	-8.00	6.00	19.00	330	Sand Seed & Idris (1970)
Ghiaia	-8.00	-19.00	11.00	20.50	670	Rollins
Ghiaia sabbiosa	-19.00	-30.00	11.00	20.50	425	Rollins
Bedrock	-30.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 8 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "PARCO DEL NOCE NERO"

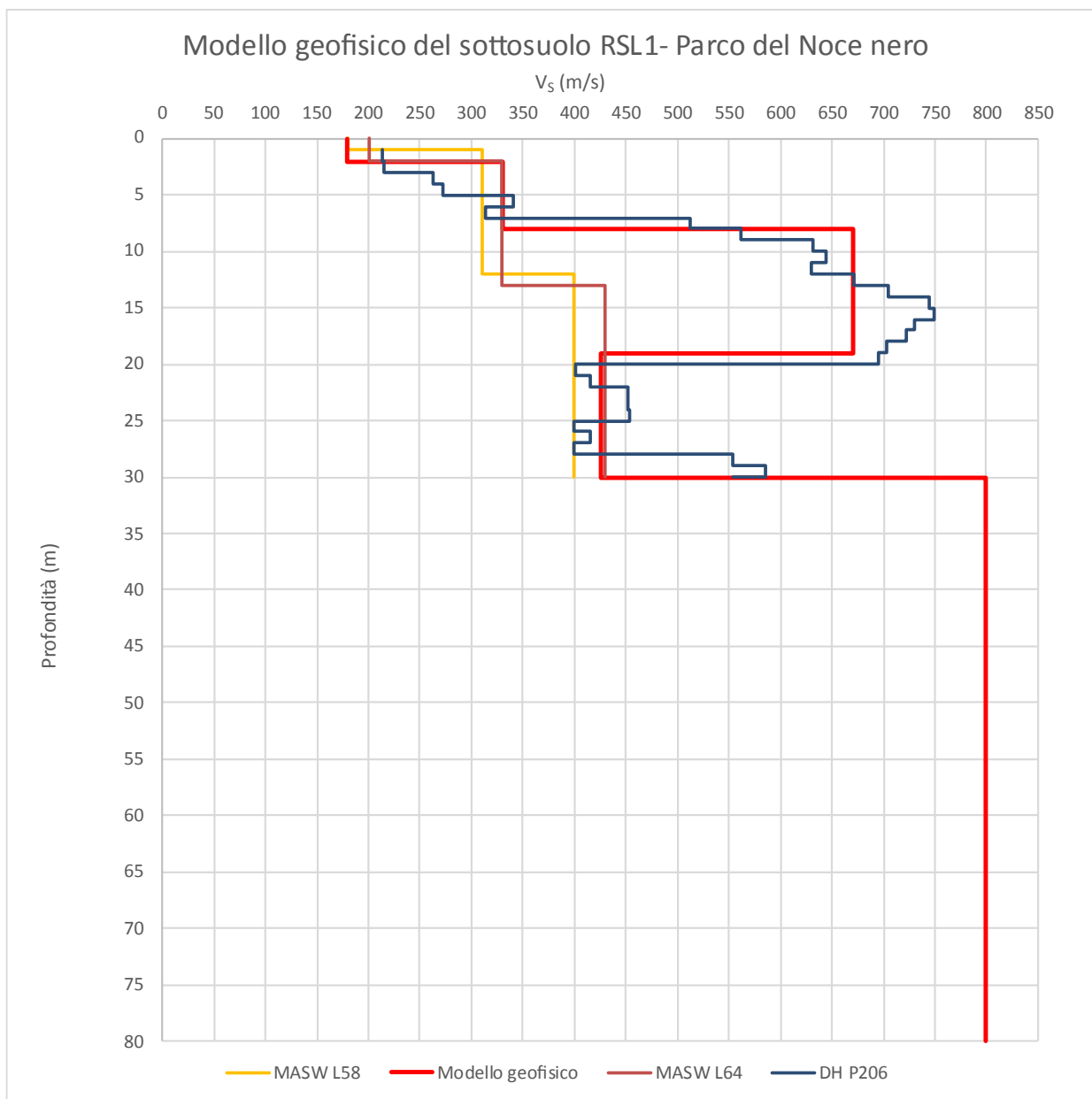


FIG. 19 – DISCRETIZZAZIONE DELLA  $V_s$  LUNGO LA VERTICALE “PARCO DEL NOCE NERO”

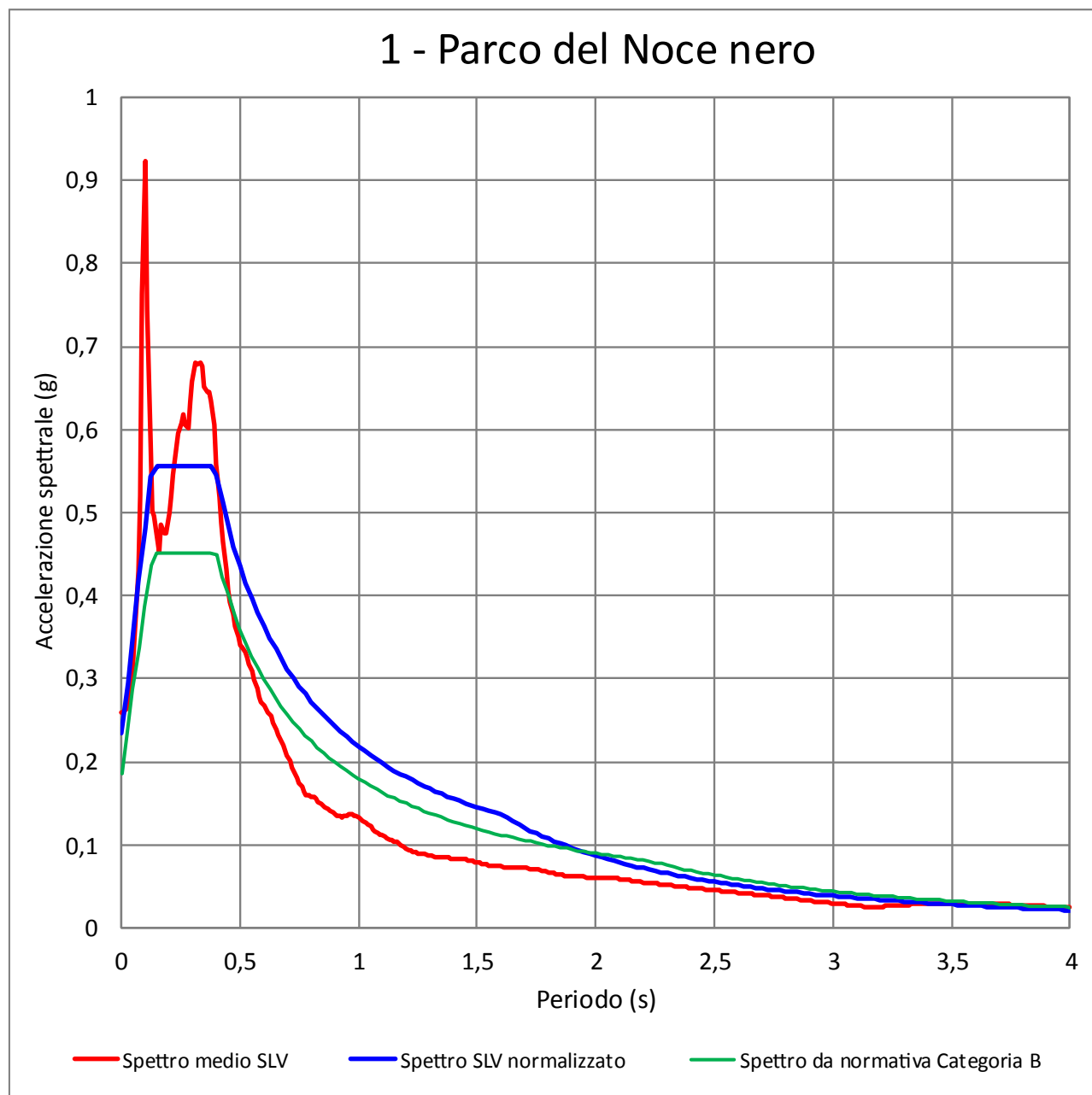


FIG. 20 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "PARCO DEL NOCE NERO" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	$F_o$	$T_c^*$	$h$	$S$	$T_b$	$T_c$	$T_d$	$C_c$
0.234	2.380	0.276	1.000	1.000	0.131	0.392	1.597	1.420

TAB. 9 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "PARCO DEL NOCE NERO"



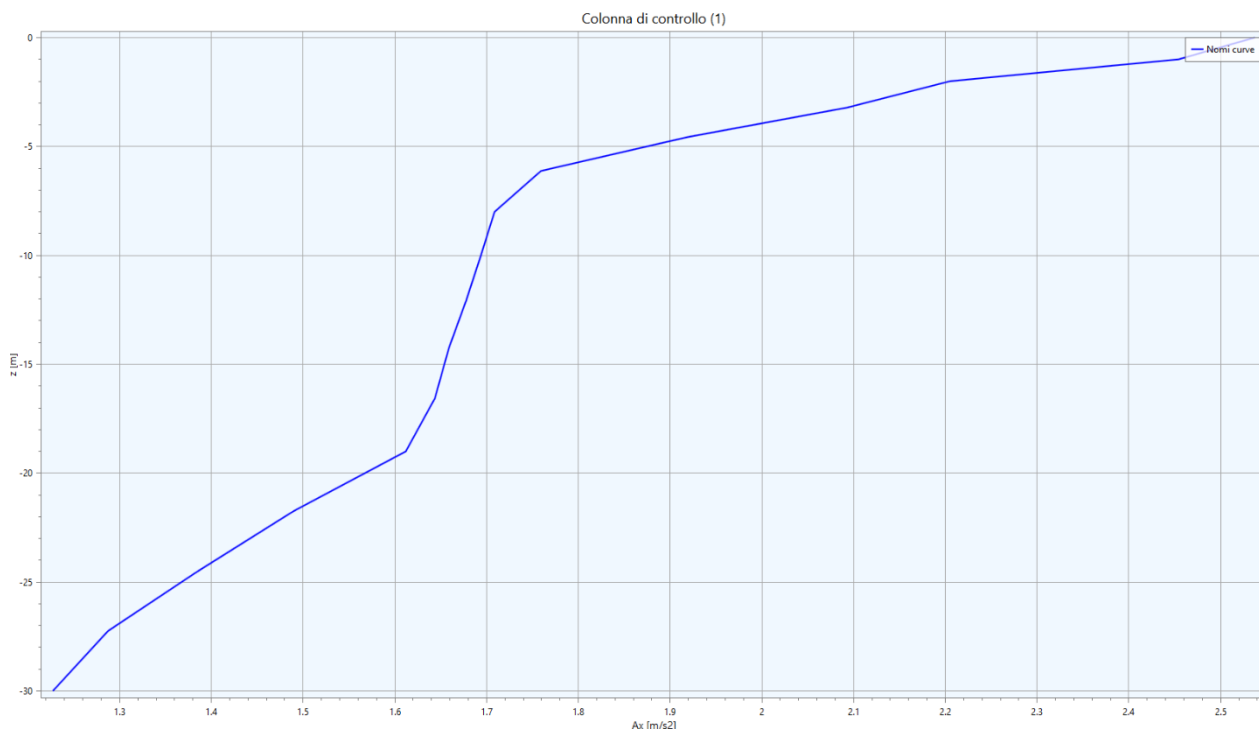


FIG. 21 - ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "PARCO DEL NOCE NERO"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1,58	1,70	-7,06%
FA (0.4-0.8 s)	1,92	2,10	-8,57%
FA (0.7-1.1 s)	1,16	2,40	-51,67%
FA (0.5-1.5 s)	1,21	2,30	-47,39%
PGA/PGA <sub>0</sub>	1,67	1,60	4,37%
SI/SI <sub>0</sub> (0.1-0.5 s)	1,65	1,80	-8,33%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.0 s)	1,34	2,30	-41,74%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.5 s)	1,28	2,40	-46,67%

TAB. 10 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "PARCO DEL NOCE NERO"



### 3.6.2. RSL.2 per il sito "Croce arancione"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-2.00	2.00	18.00	175	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-2.00	-10.00	8.00	19.00	335	Sand Seed & Idris (1970)
Ghiaia 1	-10.00	-20.00	10.00	19.50	580	Rollins
Ghiaia 2	-20.00	-25.40	5.40	20.50	700	Rollins
Ghiaia 3	-25.40	-50.00	24.60	21.00	650	Rollins
Bedrock	-50.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 11 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "CROCE ARANCIONE"

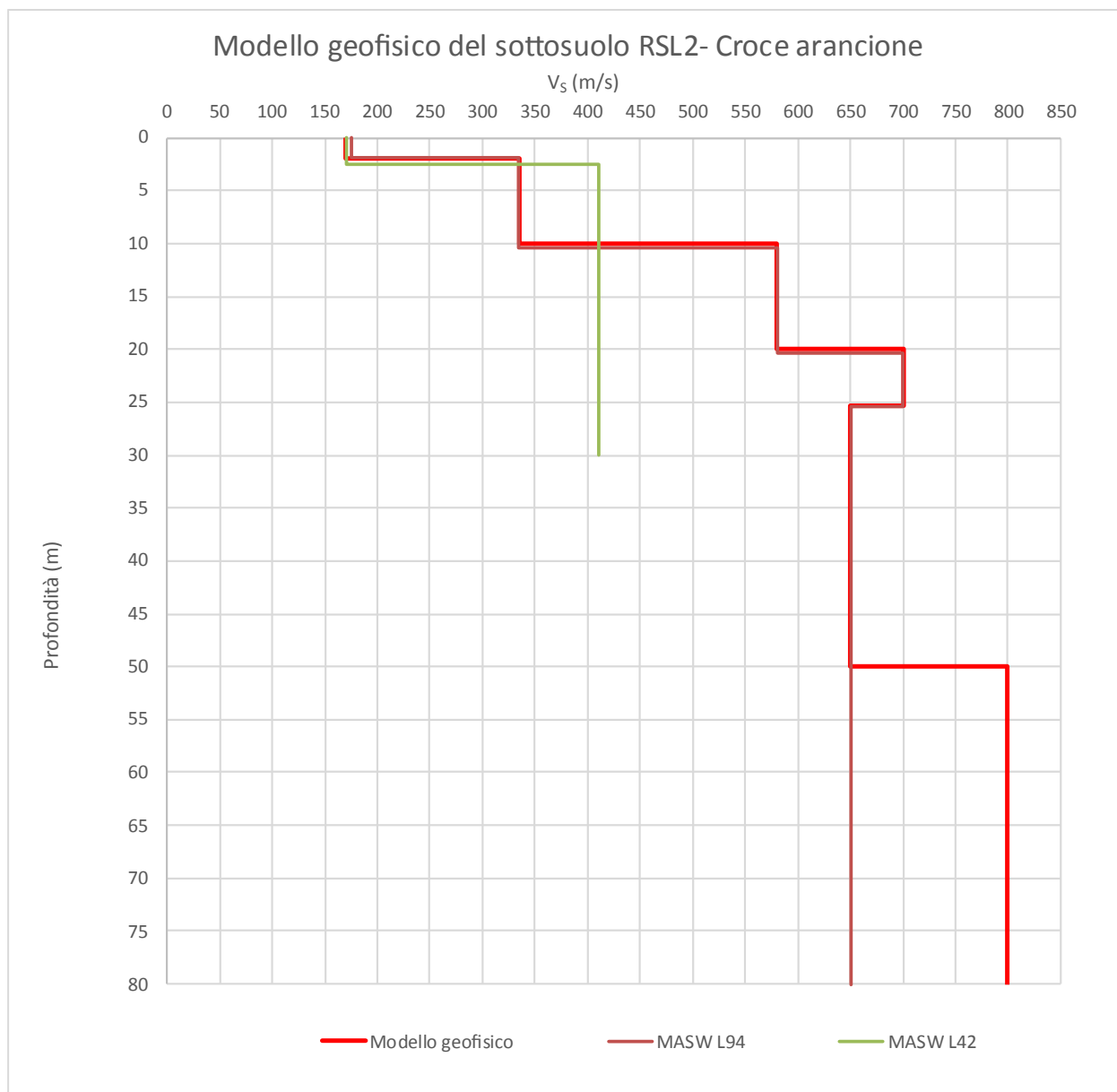


FIG. 22 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE “CROCE ARANCIONE”

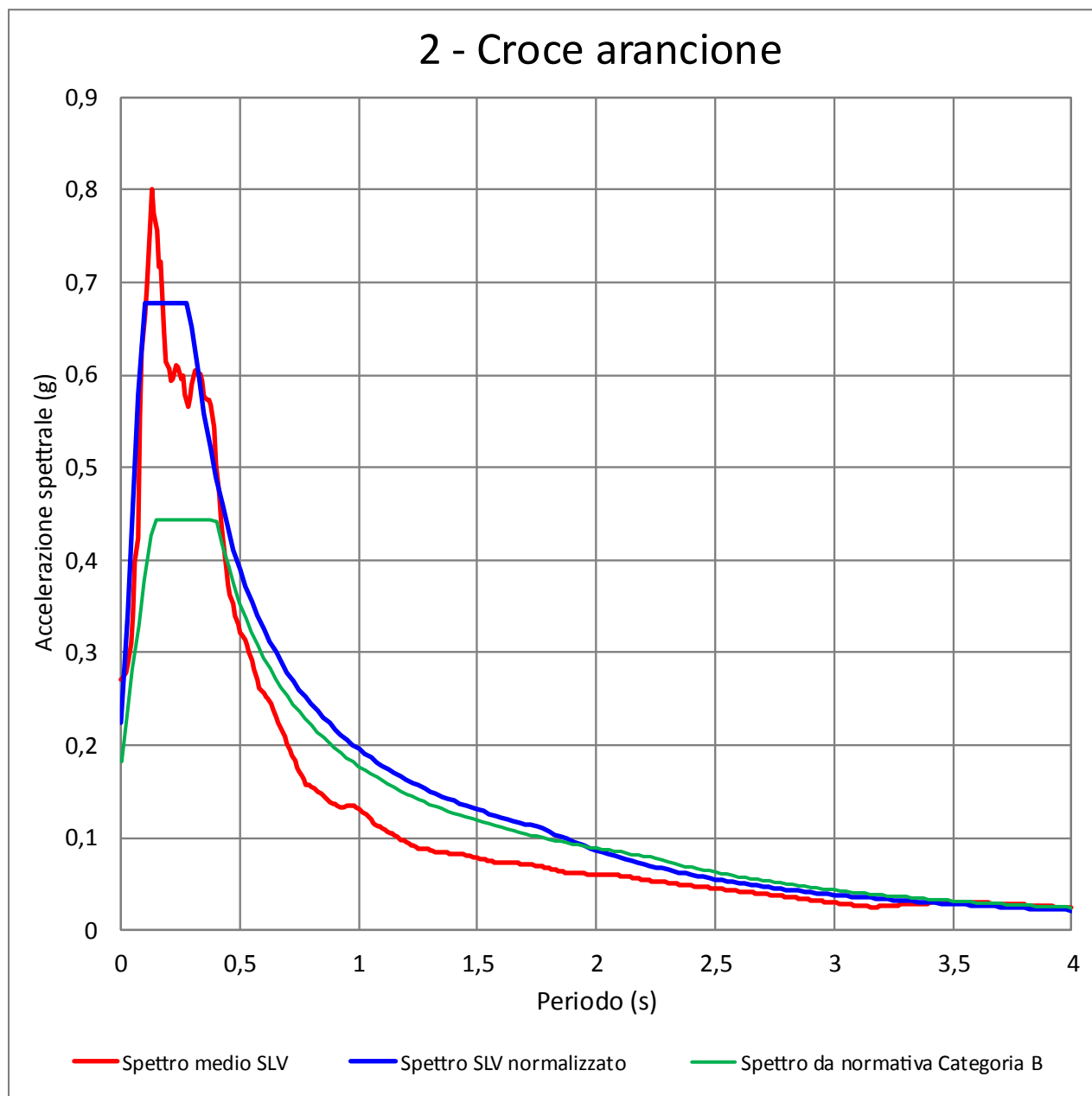
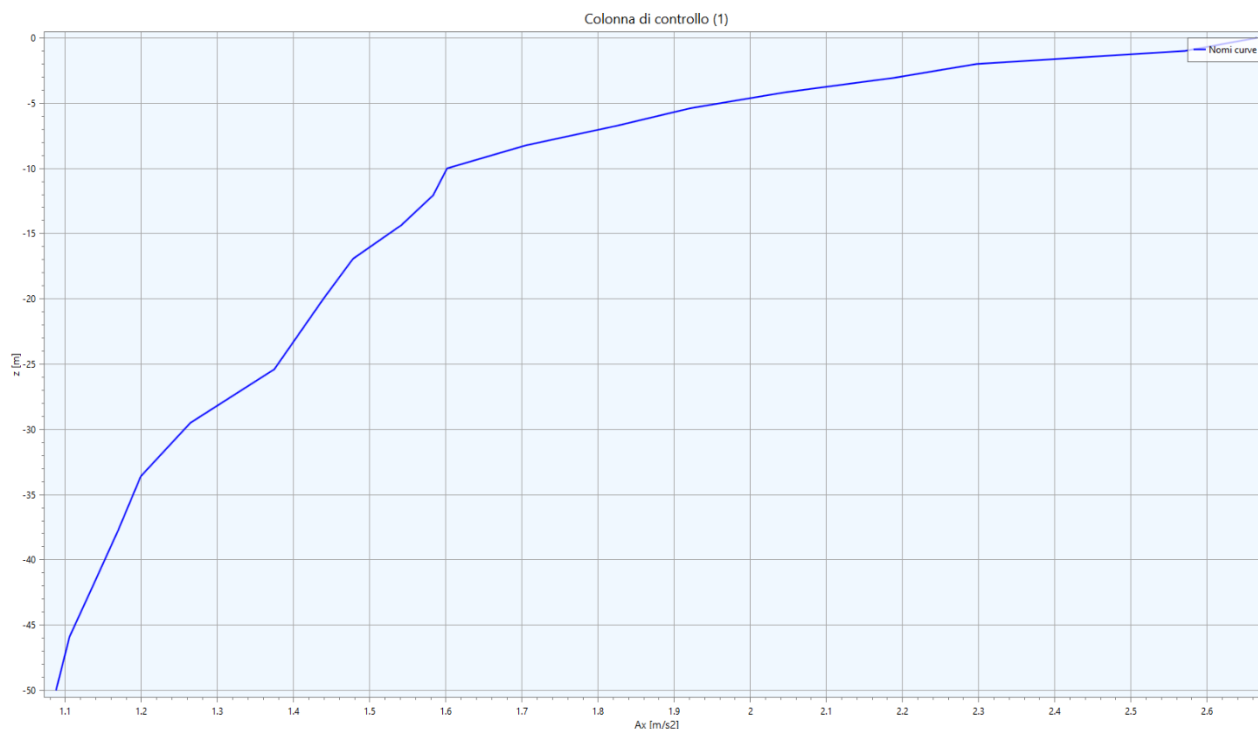


FIG. 23 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "CROCE ARANCIONE" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	$F_o$	$T_c^*$	$h$	$S$	$T_b$	$T_c$	$T_d$	$C_c$
0.225	3.021	0.203	1.000	1.000	0.096	0.288	1.769	1.420

TAB. 12 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "CROCE ARANCIONE"



Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1,66	1,70	-2,35%
FA (0.4-0.8 s)	1,33	2,10	-36,67%
FA (0.7-1.1 s)	1,15	2,40	-52,08%
FA (0.5-1.5 s)	1,17	2,30	-49,13%
PGA/PGA <sub>0</sub>	1,77	1,60	10,63%
SI/SI <sub>0</sub> (0.1-0.5 s)	1,65	1,80	-8,33%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.0 s)	1,31	2,30	-43,04%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.5 s)	1,27	2,40	-47,08%

TAB. 13 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “CROCE ARANCIONE”

### 3.6.3. RSL.3 per il sito “Ospedale”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-2.80	2.00	18.00	205	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia ghiaiosa	-2.80	-7.80	5.00	19.50	480	Sand Seed & Idris (1970)



Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Ghiaia 1	-9.80	-19.80	10.00	20.00	510	Rollins
Ghiaia 2	-19.80	-29.80	10.00	20.50	450	Rollins
Ghiaia 3	-29.80	-50.00	22.20	21.00	550	Rollins
Bedrock	-50.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 14 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE “OSPEDALE”

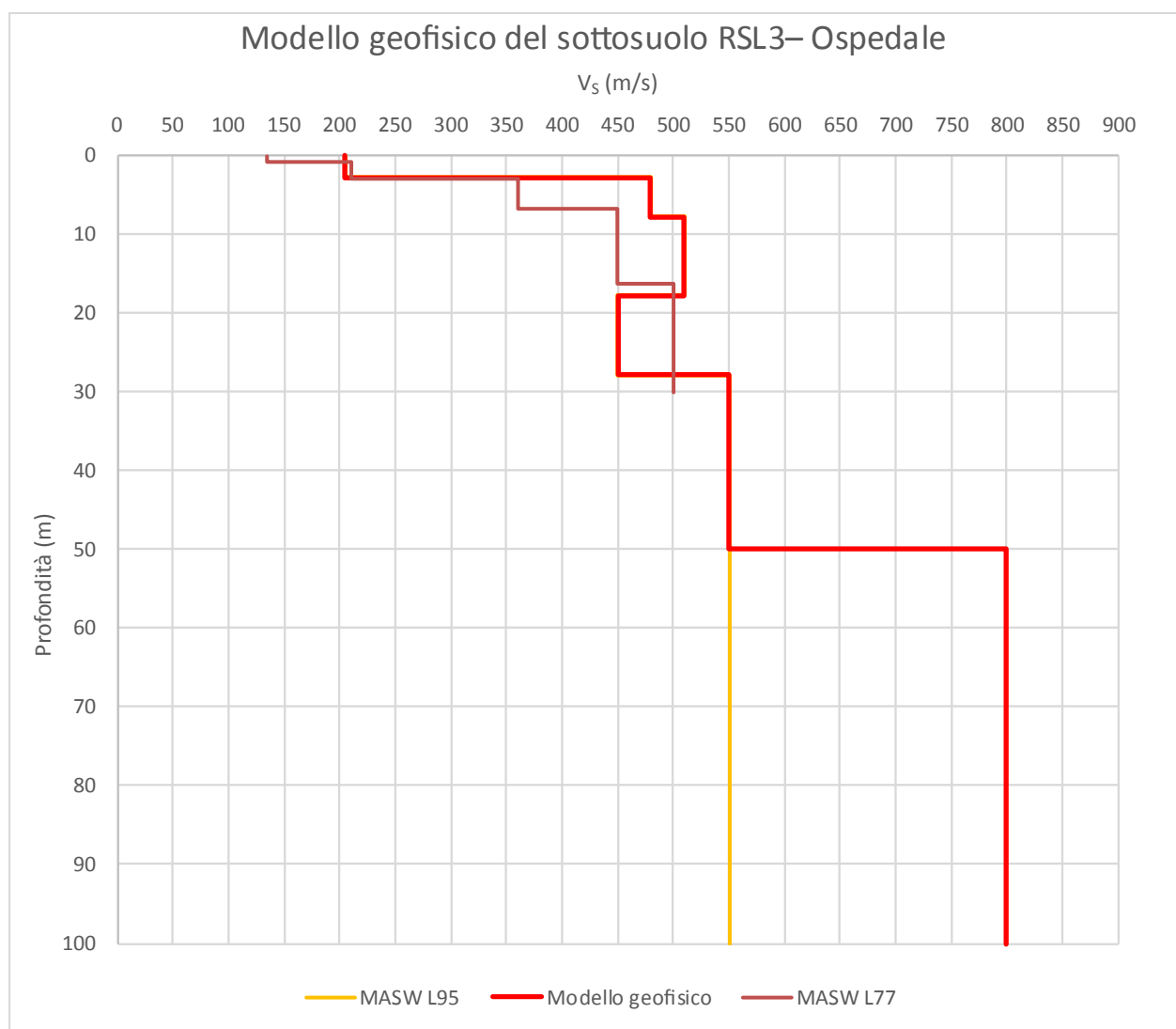


FIG. 25 – DISCRETIZZAZIONE DELLA  $V_s$  LUNGO LA VERTICALE “OSPEDALE”

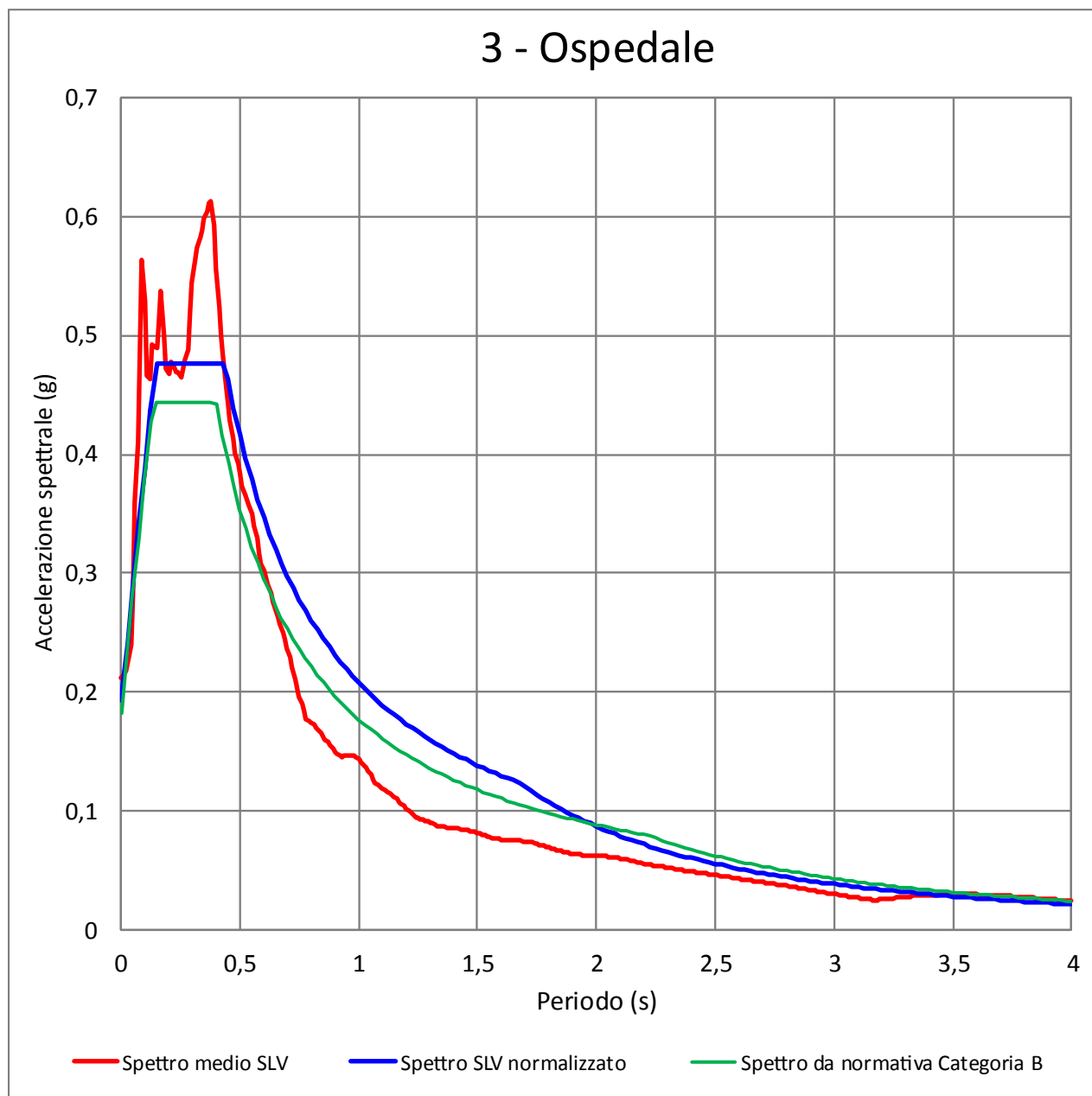


FIG. 26 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "OSPEDALE" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	$F_o$	$T_c^*$	$h$	$S$	$T_b$	$T_c$	$T_d$	$C_c$
0.193	2.466	0.308	1.000	1.000	0.146	0.437	1.677	1.420

TAB. 15 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "OSPEDALE"

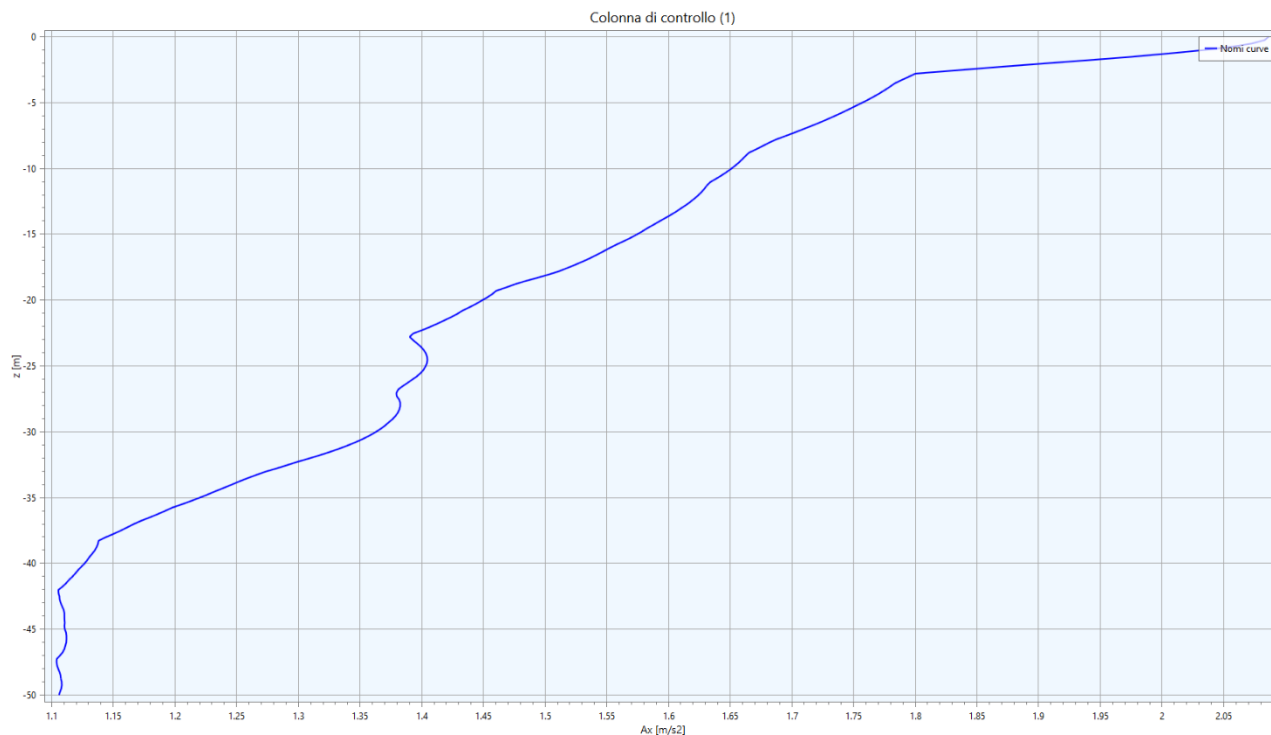


FIG. 27 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “OSPEDALE”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1,45	1,70	-14,71%
FA (0.4-0.8 s)	1,55	2,10	-26,19%
FA (0.7-1.1 s)	1,28	2,40	-46,67%
FA (0.5-1.5 s)	1,33	2,30	-42,17%
PGA/PGA <sub>0</sub>	1,39	1,60	-13,13%
SI/SI <sub>0</sub> (0.1-0.5 s)	1,5	1,80	-16,67%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.0 s)	1,46	2,30	-36,52%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.5 s)	1,37	2,40	-42,92%

TAB. 16 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “OSPEDALE”

### 3.6.4. RSL.4 per il sito “Magazzini comunali”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-1.10	1.10	18.00	185	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-1.10	-3.50	2.40	19.50	335	Sand Seed & Idris (1970)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Sabbia limosa	-3.50	-17.50	14.00	19.50	290	Sand Seed & Idris (1970)
Ghiaia	-17.50	-31.00	13.50	20.50	500	Rollins
Bedrock	-31.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 17 - MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "MAGAZZINI COMUNALI"

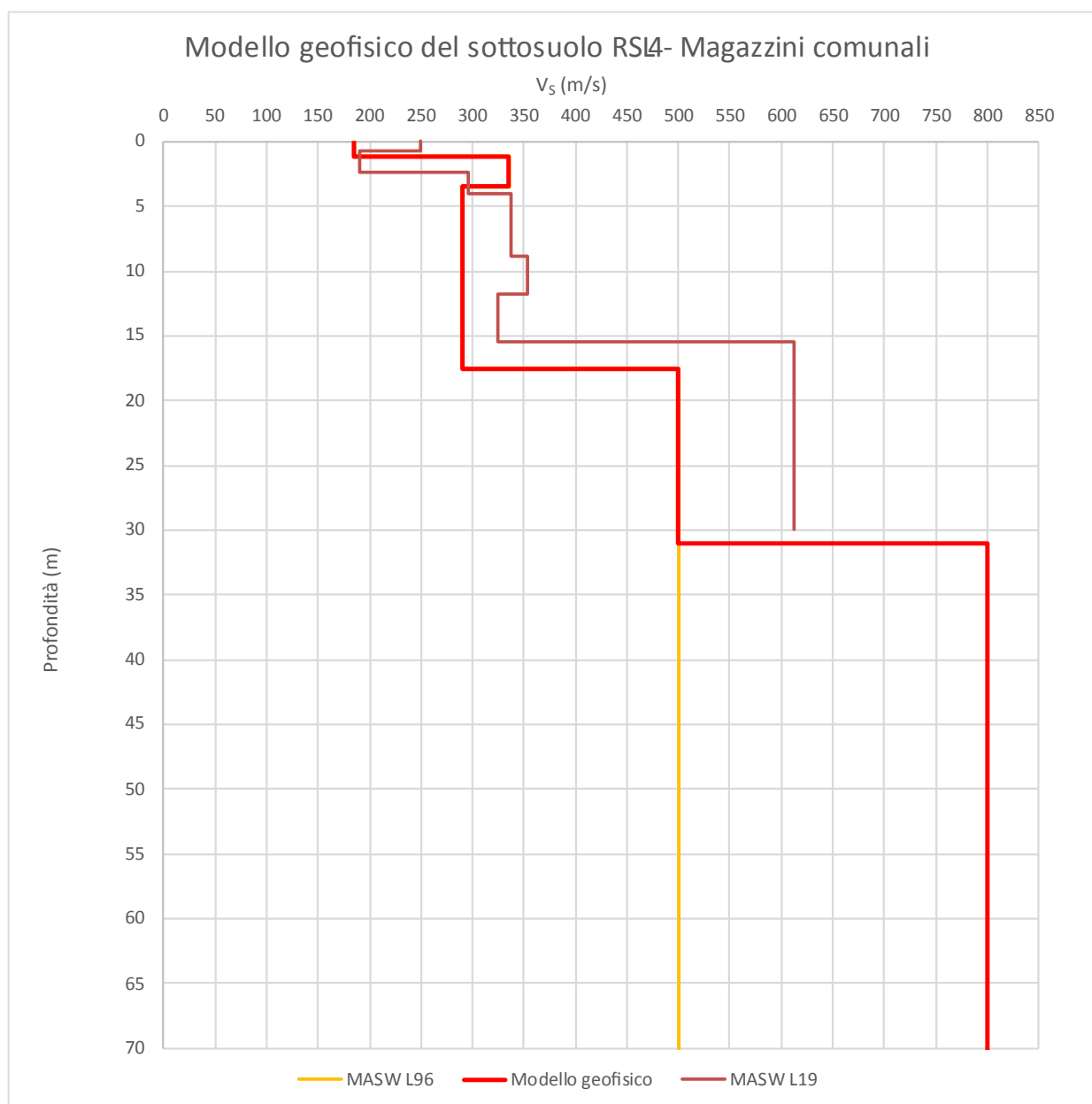


FIG. 28 – DISCRETIZZAZIONE DELLA  $V_s$  LUNGO LA VERTICALE "MAGAZZINI COMUNALI"

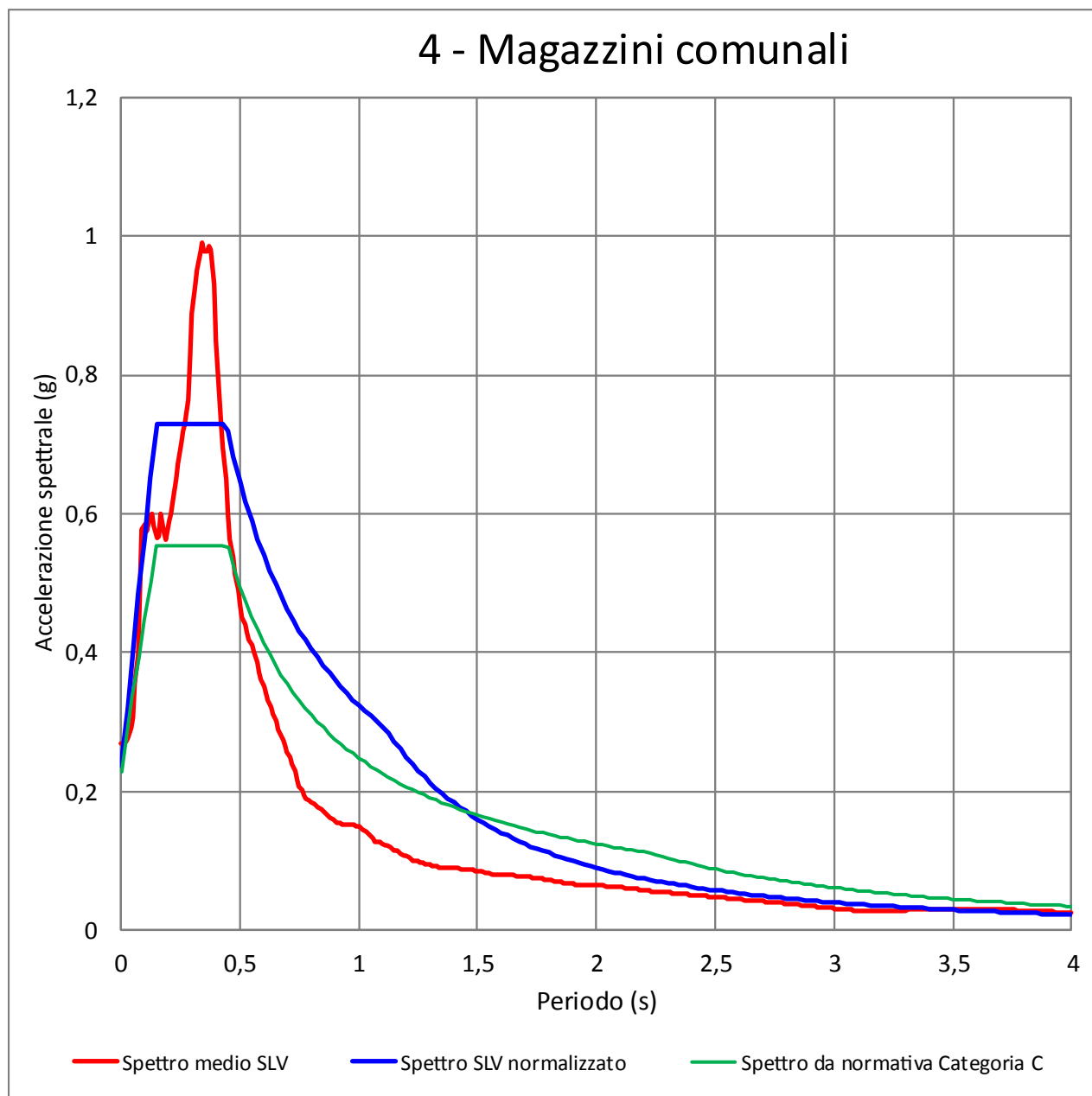


FIG. 29 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "MAGAZZINI COMUNALI" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	$F_o$	$T_c^*$	$h$	$S$	$T_b$	$T_c$	$T_d$	$C_c$
0.236	3.091	0.313	1.000	1.000	0.148	0.445	1.112	1.420

TAB. 18 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "MAGAZZINI COMUNALI"



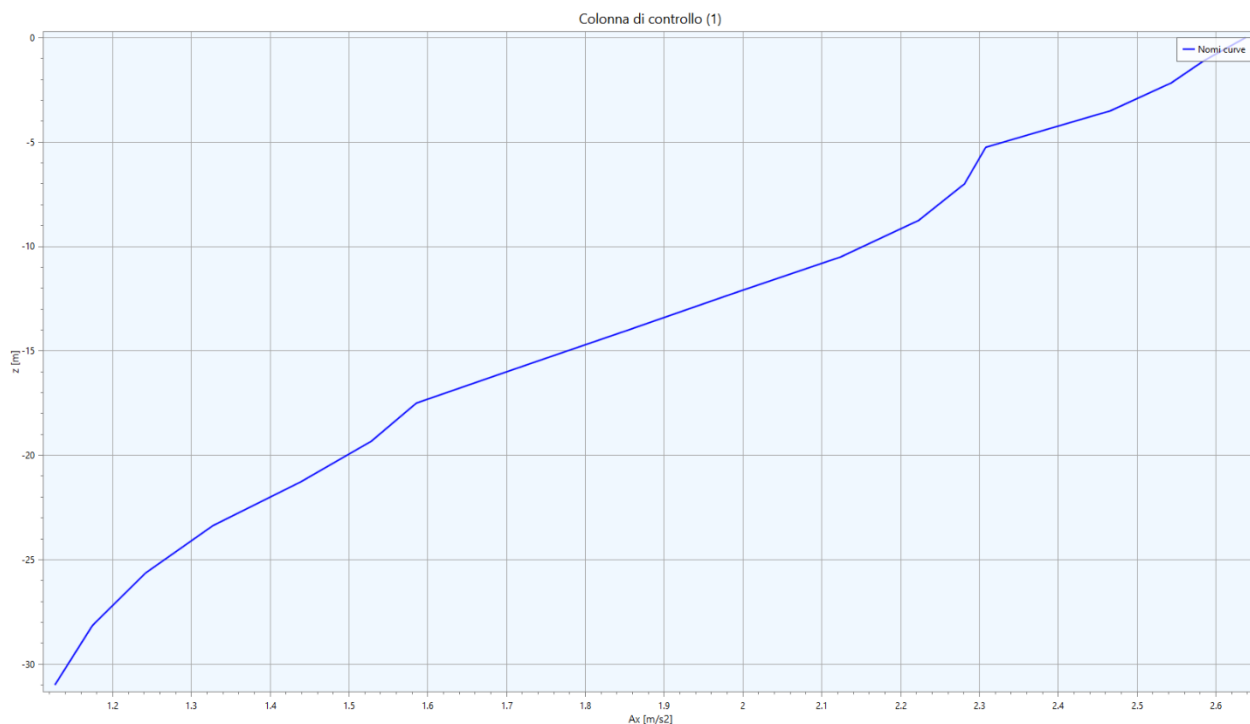


FIG. 30 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “MAGAZZINI COMUNALI”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Appennino – coperture su substrato non rigido	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	2,00	1,70	17,65%
FA (0.4-0.8 s)	1,82	1,90	-4,21%
FA (0.7-1.1 s)	1,33	2,30	-42,17%
FA (0.5-1.5 s)	1,42	2,10	-32,38%
PGA/PGA <sub>0</sub>	1,70	1,60	6,25%
SI/SI <sub>0</sub> (0.1-0.5 s)	2,13	1,70	25,29%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.0 s)	1,67	2,10	-20,48%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.5 s)	1,56	2,20	-29,09%

TAB. 19 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “MAGAZZINI COMUNALI”

### 3.6.5. RSL.5 per il sito “Via IV Novembre”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-1.50	1.50	18.00	135	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia limosa	-1.50	-7.00	5.50	19.00	270	Sand Seed & Idris (1970)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Ghiaia 1	-7.00	-20.00	13.00	20.00	440	Rollins
Ghiaia 2	-20.00	-30.00	10.00	20.50	600	Rollins
Bedrock	-30.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 20 - MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "VIA IV NOVEMBRE"

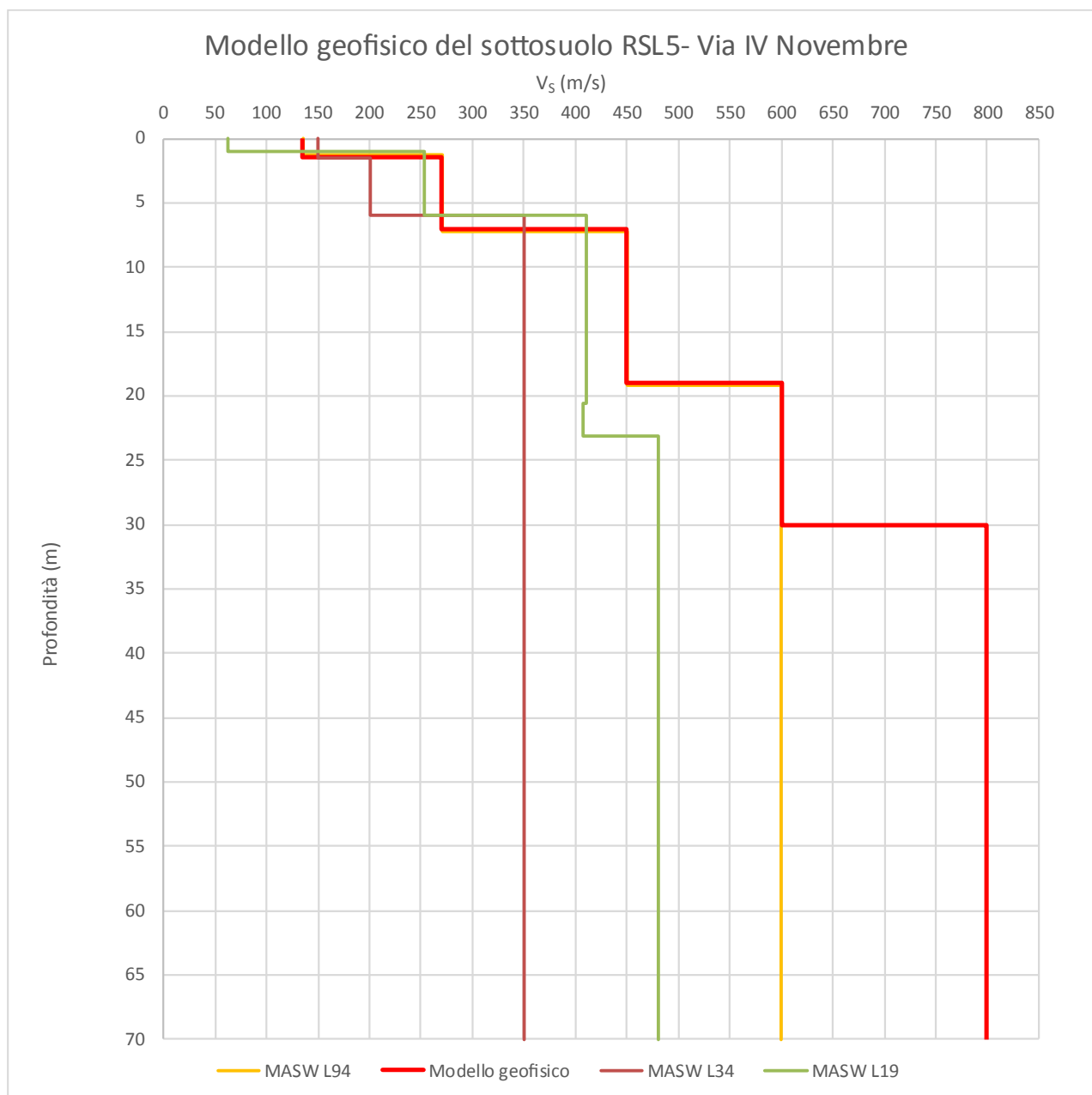


FIG. 31 – DISCRETIZZAZIONE DELLA  $V_s$  LUNGO LA VERTICALE "VIA IV NOVEMBRE"

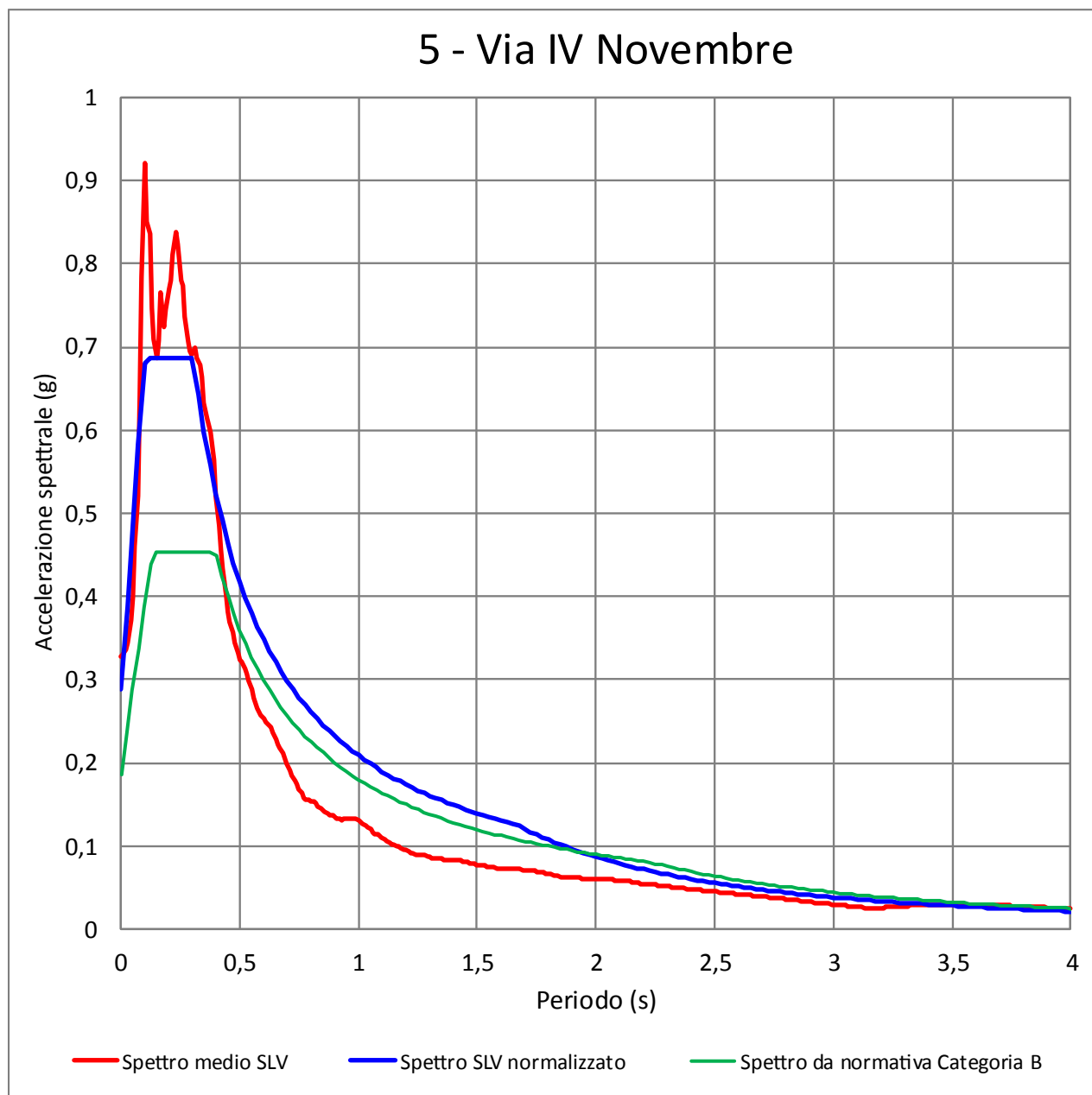


FIG. 32 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "VIA IV NOVEMBRE" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	$F_o$	$T_c^*$	$h$	$S$	$T_b$	$T_c$	$T_d$	$C_c$
0.289	2.375	0.214	1.000	1.000	0.101	0.304	1.665	1.420

TAB. 21 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "VIA IV NOVEMBRE"

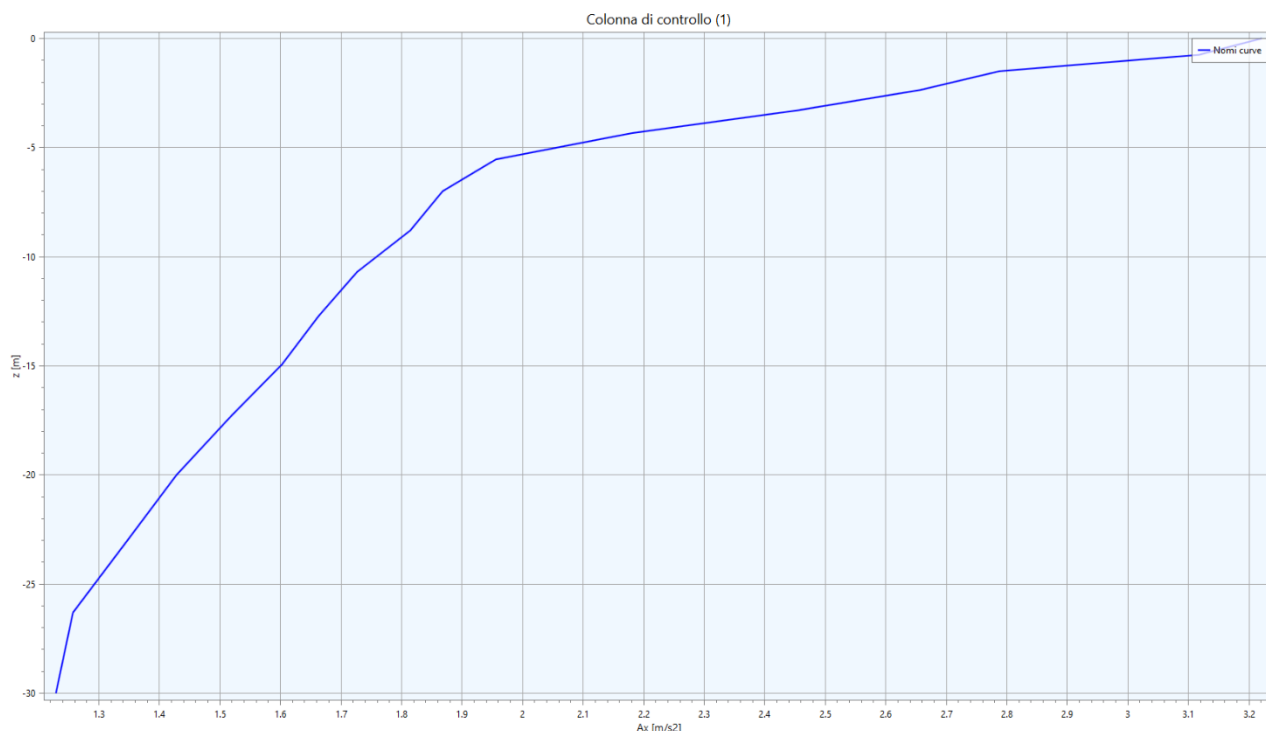


FIG. 33 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “VIA IV NOVEMBRE”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1,85	1,70	8,82%
FA (0.4-0.8 s)	1,33	2,10	-36,67%
FA (0.7-1.1 s)	1,14	2,40	-52,50%
FA (0.5-1.5 s)	1,17	2,30	-49,13%
PGA/PGA <sub>0</sub>	2,13	1,60	33,13%
SI/SI <sub>0</sub> (0.1-0.5 s)	1,86	1,80	3,33%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.0 s)	1,33	2,30	-42,17%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.5 s)	1,28	2,40	-46,67%

TAB. 22 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE “VIA IV NOVEMBRE”

### 3.6.6. RSL.6 per il sito “Aiola”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-1.50	1.50	18.00	180	Vucetic & Dobry, PI=30
Ghiaia 1	-1.50	-18.00	16.50	19.50	455	Rollins
Ghiaia 2	-18.00	-50.00	32.00	20.50	580	Rollins
Ghiaia 3	-50.00	-90.00	40.00	21.00	690	Rollins

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Bedrock	-90.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 23 - MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "AIOLA"

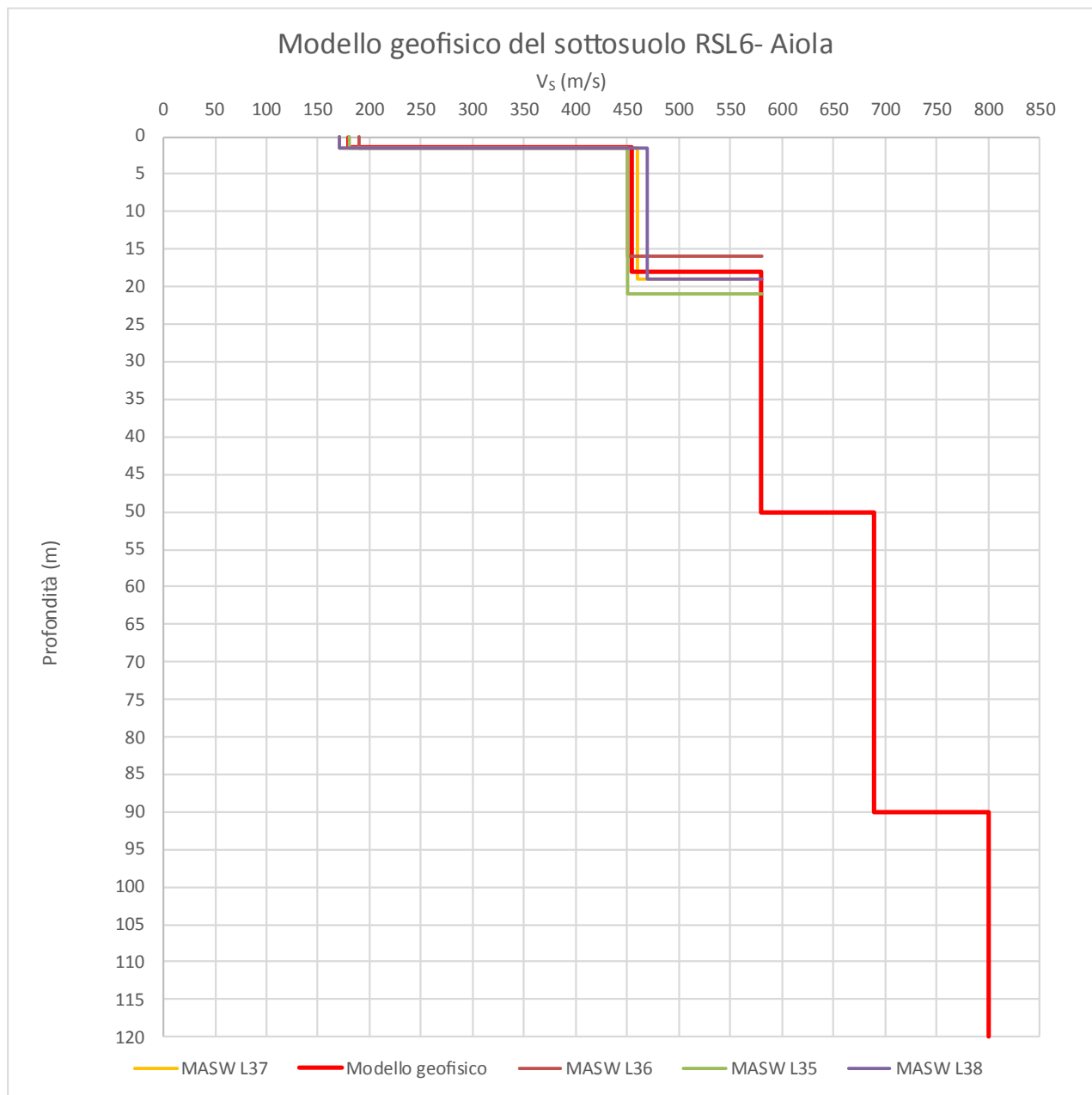


FIG. 34 – DISCRETIZZAZIONE DELLA  $V_s$  LUNGO LA VERTICALE "AIOLA"



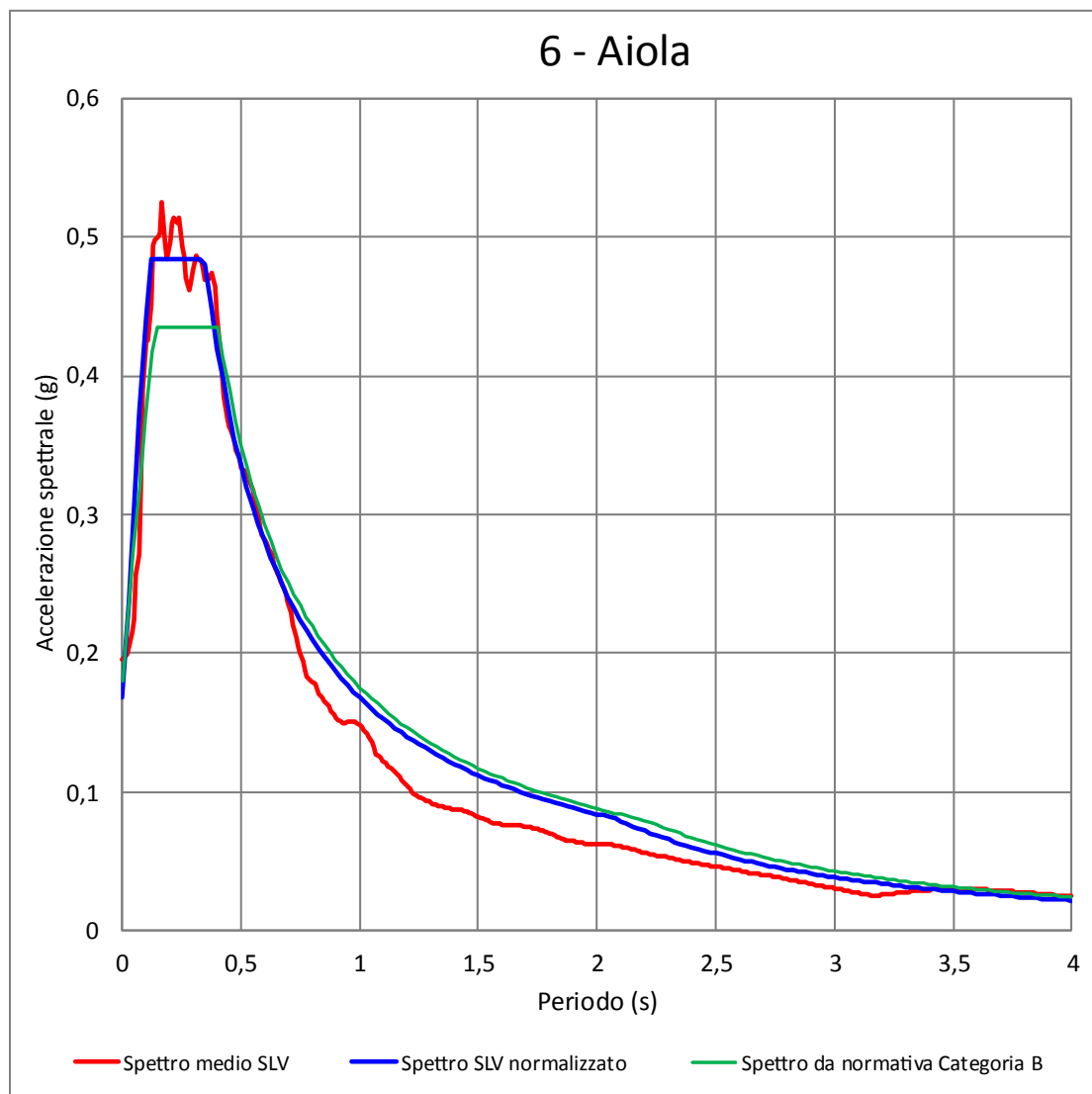


FIG. 35 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "AIOLA" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	$F_o$	$T_c^*$	$h$	$S$	$T_b$	$T_c$	$T_d$	$C_c$
0.168	2.881	0.244	1.000	1.000	0.116	0.347	2.068	1.420

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

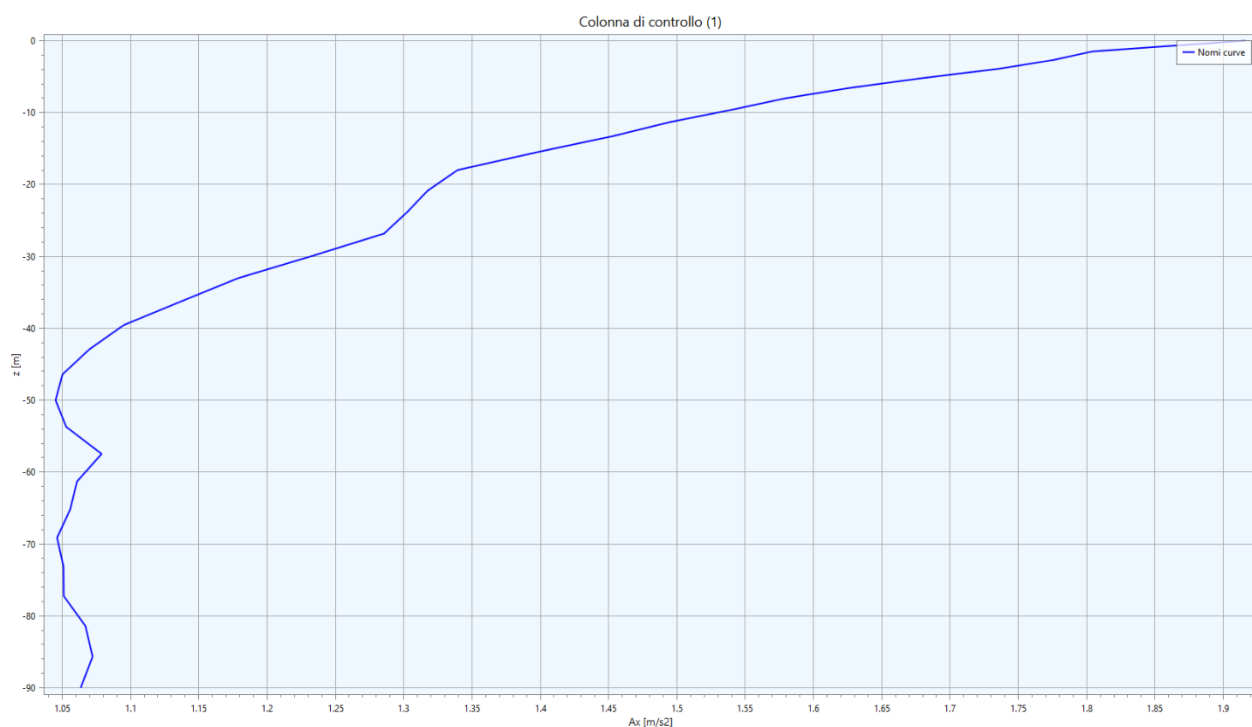


FIG. 36 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “AIOLA”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Appennino – substrato non rigido affiorante	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1,34	1,50	-10,67%
FA (0.4-0.8 s)	1,44	1,70	-15,29%
FA (0.7-1.1 s)	1,32	2,10	-37,14%
FA (0.5-1.5 s)	1,33	1,90	-30,00%
PGA/PGA <sub>0</sub>	1,30	1,50	-13,33%
SI/SI <sub>0</sub> (0.1-0.5 s)	1,35	1,60	-15,63%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.0 s)	1,41	2,00	-29,50%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.5 s)	1,34	2,00	-33,00%

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

### 3.6.7. RSL.7 per il sito “Cornocchio”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla	0.00	-2.00	2.00	18.00	160	Vucetic & Dobry, PI=30
Ghiaia 1	-2.00	-21.00	19.00	19.50	450	Rollins
Ghiaia 2	-21.00	-60.00	39.00	20.50	580	Rollins

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Ghiaia 3	-60.00	-105.00	55.00	21.00	690	Rollins
Bedrock	-105.00	-	-	22.00	800	-

TAB. 26 - MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "CORNOCCHIO"

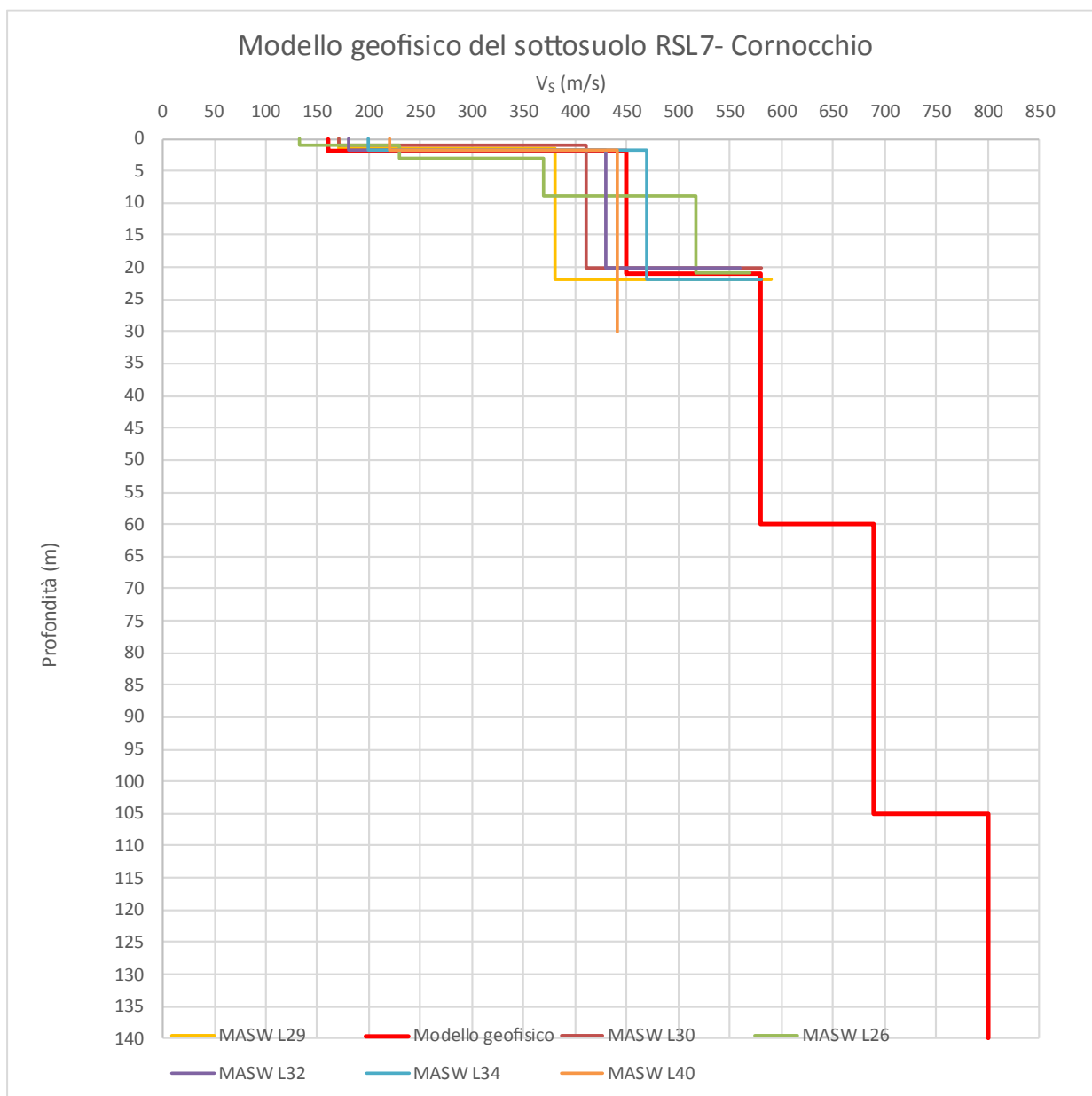


FIG. 37 – DISCRETIZZAZIONE DELLA  $V_s$  LUNGO LA VERTICALE "CORNOCCHIO"

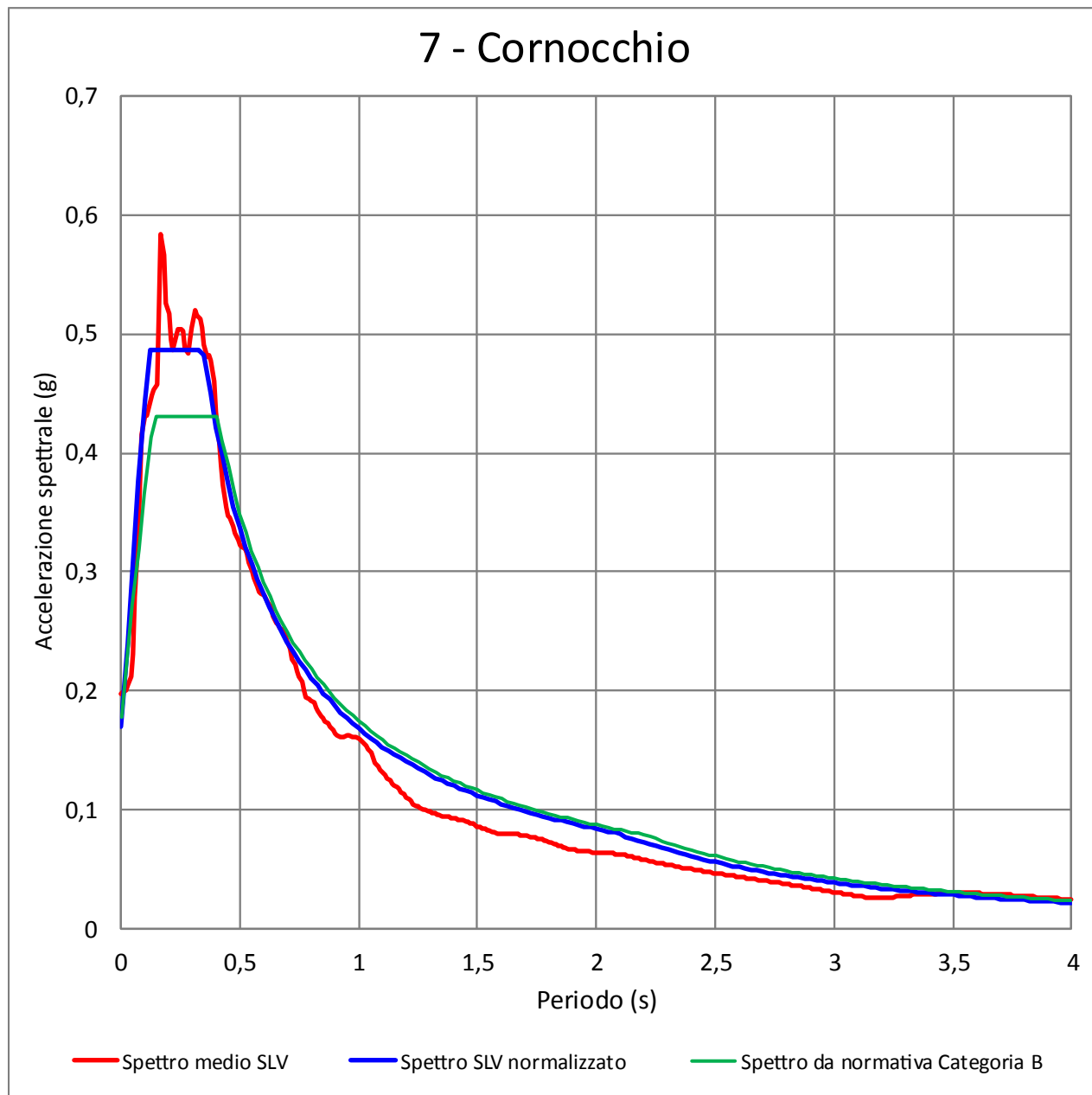


FIG. 38 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "CORNOCCHIO" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO B

$a_{max}(T=0)$	$F_o$	$T_c^*$	$h$	$S$	$T_b$	$T_c$	$T_d$	$C_c$
0.171	2.852	0.244	1.000	1.000	0.115	0.346	2.082	1.420

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

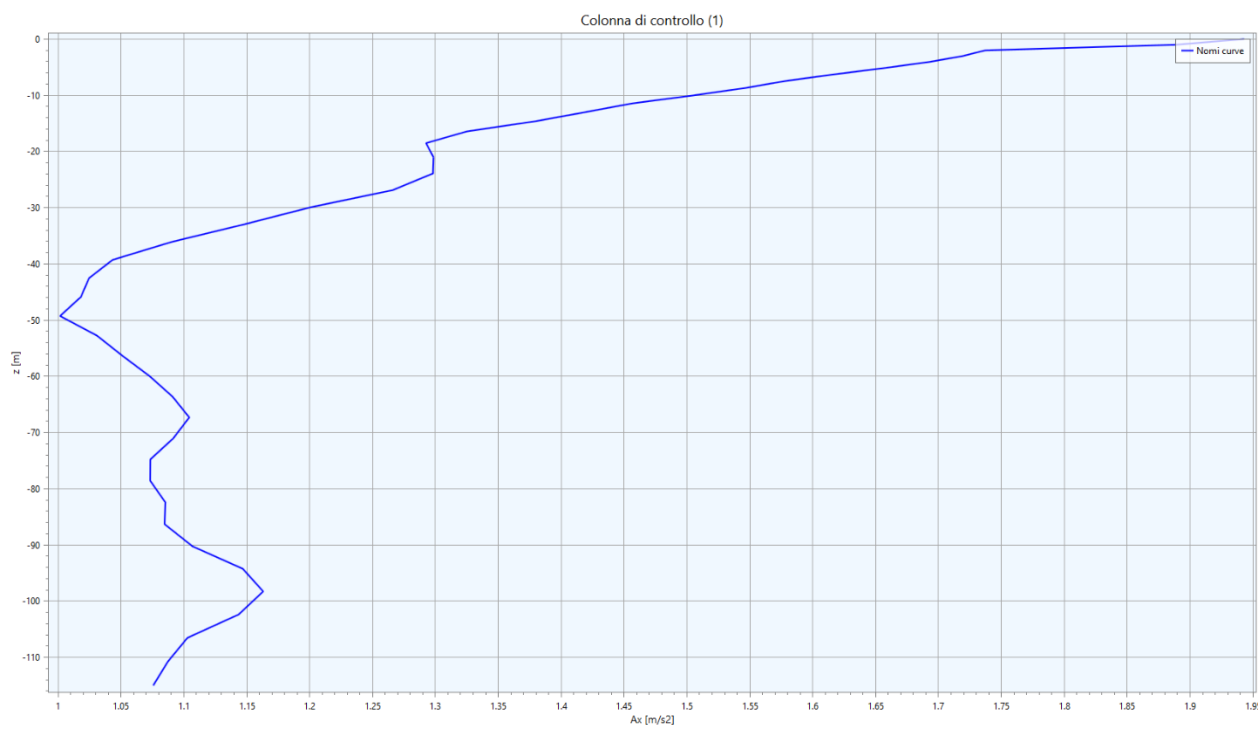


FIG. 39 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE “CORNOCCHIO”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1,37	1,50	-8,67%
FA (0.4-0.8 s)	1,44	1,70	-15,29%
FA (0.7-1.1 s)	1,42	2,10	-32,38%
FA (0.5-1.5 s)	1,39	1,90	-26,84%
PGA/PGA <sub>0</sub>	1,32	1,50	-12,00%
SI/SI <sub>0</sub> (0.1-0.5 s)	1,38	1,60	-13,75%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.0 s)	1,45	2,00	-27,50%
SI/SI <sub>0</sub> (0.5-1.5 s)	1,39	2,00	-30,50%

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

### 3.7. Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello

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

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

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

	RSL1 - Parco del Noce nero	RSL2 - Croce arancione	RSL3 - Ospedale	RSL4 - Magazzini comunali	RSL5 - Via IV Novembre	RSL6 - Aiola	RSL7 - Cornocchio
<b>FA<sub>SA1</sub> 0.1-0.5</b>	-7,06%	-2,35%	-14,71%	17,65%	8,82%	-10,67%	-8,67%
<b>FA<sub>SA2</sub> 0.4-0.8</b>	-8,57%	-36,67%	-26,19%	-4,21%	-36,67%	-15,29%	-15,29%
<b>FA<sub>SA3</sub> 0.7-1.1</b>	-51,67%	-52,08%	-46,67%	-42,17%	-52,50%	-37,14%	-32,38%
<b>FA<sub>SA4</sub> 0.5-1.5</b>	-47,39%	-49,13%	-42,17%	-32,38%	-49,13%	-30,00%	-26,84%
<b>FA<sub>PGA</sub></b>	4,37%	10,63%	-13,13%	6,25%	33,13%	-13,33%	-12,00%
<b>FH<sub>SI1</sub> 0.1-0.5</b>	-8,33%	-8,33%	-16,67%	25,29%	3,33%	-15,63%	-13,75%
<b>FH<sub>SI2</sub> 0.5-1.0</b>	-41,74%	-43,04%	-36,52%	-20,48%	-42,17%	-29,50%	-27,50%
<b>FH<sub>SI3</sub> 0.5-1.5</b>	-46,67%	-47,08%	-42,92%	-29,09%	-46,67%	-33,00%	-30,50%

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.

Gli unici casi in cui da analisi RSL sono risultati fattori di amplificazione superiori, solo per alcuni intervalli di periodo, a quelli da tabelle regionali sono in corrispondenza del Parco del Noce nero (RSL1), della sede della Croce arancione (RSL2), dei Magazzini comunali (RSL4) e di Via IV Novembre (RSL5); sono tutti settori in cui le coperture per lo più fini, con valori caratteristici di Vs bassi, registrano maggiori contrasti di velocità con i depositi grossolani sottostanti.

Nel complesso, quindi, gli abachi, come del resto era da attendersi, risultano maggiormente cautelativi rispetto 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 0.10 e 0.35 s circa, con valori di accelerazione spettrale molto più elevati rispetto a quelli degli spettri semplificati, mentre oltre 0.70 s, in generale, gli spettri semplificati sovrastimano le accelerazioni.



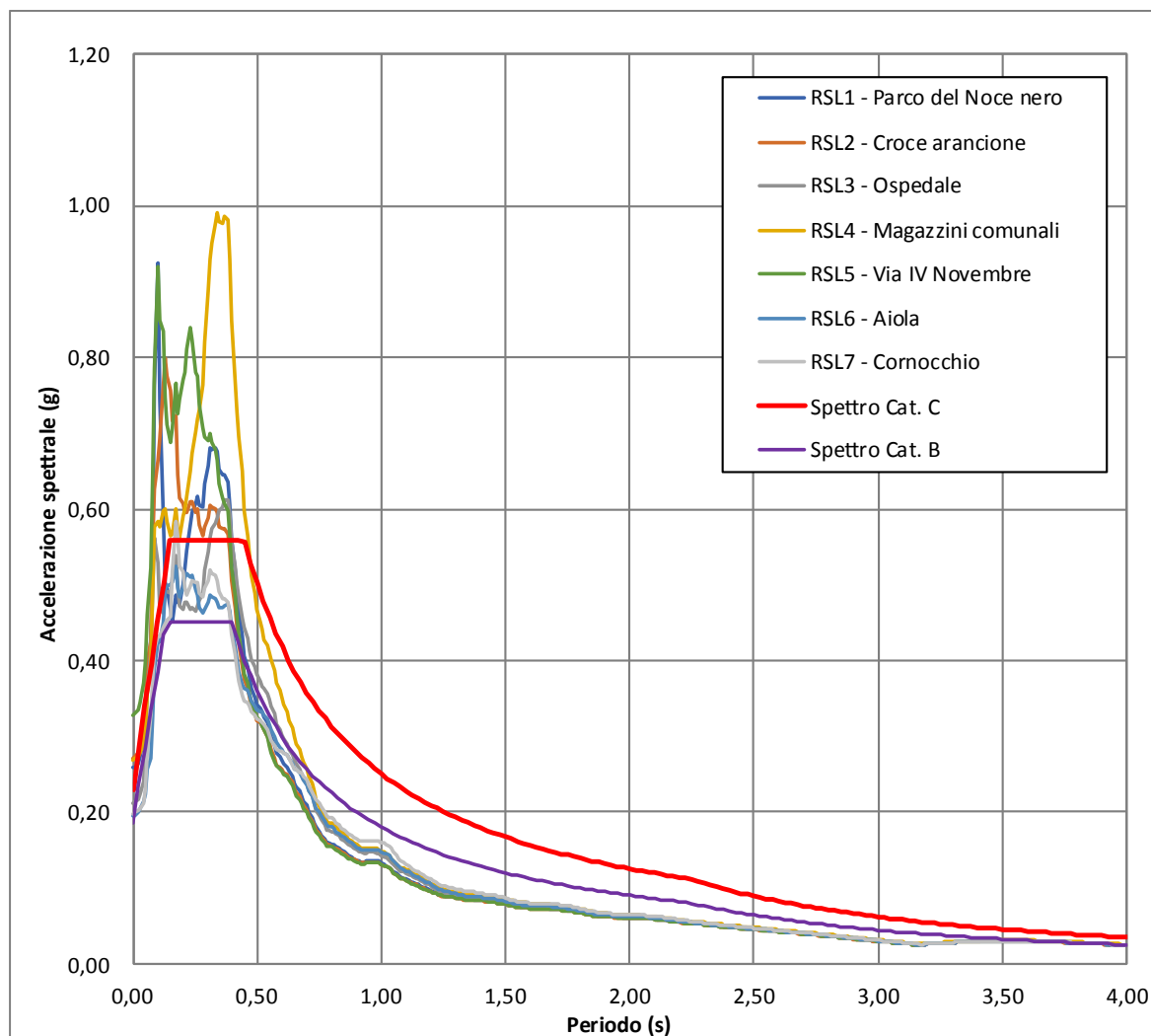


FIG. 40 – CONFRONTO TRA GLI SPETTRI DI RISPOSTA IN PSEUDOACCELERAZIONE DA RSL E GLI SPETTRI SEMPLIFICATI PER LE CATEGORIE DI SOTTOSUOLO B E C DA NTC 2018

## 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 Montecchio Emilia

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 (Martelli<sup>12</sup>, 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, Martelli<sup>12</sup> 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.

A riguardo, nel territorio comunale di Montecchio Emilia, 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 HVSr hanno evidenziato picchi caratterizzati da frequenze elevate ( $F_0 > 8$  Hz), nei primi metri di profondità, associabili al contrasto di impedenza dovuto al passaggio tra la copertura coesiva e i sottostanti depositi granulari, e un picco caratterizzato da frequenze basse ( $< 1,5$  Hz) associabile, invece, ad una superficie di impedenza più profonda (cfr. Fig. 41).

Tale contrasto d'impedenza più profondo, in questo caso, in accordo con la letteratura (Martelli<sup>12</sup>), viene associato al passaggio tra il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e il Supersintema Quaternario Marino (QMC) che, in Comune di Montecchio Emilia, attraversato da un alto strutturale, si verifica ad una profondità compresa tra circa 30 e 100 m da p.c. (cfr. par. 3.3.2, Fig. 10).

Dai risultati delle prove realizzate appositamente per il presente studio di 3° livello, si è visto che le velocità delle onde di taglio S del primo orizzonte di depositi grossolani, nei primi 20 m da p.c., generalmente raggiunge valori elevati ( $V_s > 700$  m/s), mentre oltre tale profondità, tendenzialmente, si registra una inversione di velocità dovuta a depositi grossolani più lenti.

<sup>12</sup> Luca Martelli, 2021. Assessment of Seismic Bedrock in Deep Alluvial. Case Studies from the Emilia-Romagna Plain - Geosciences

Alla luce delle considerazioni sopra esposte, in tutte le verticali studiate, si è assunto un *bedrock* di tipo rigido con  $V_s > 800$  m/s.

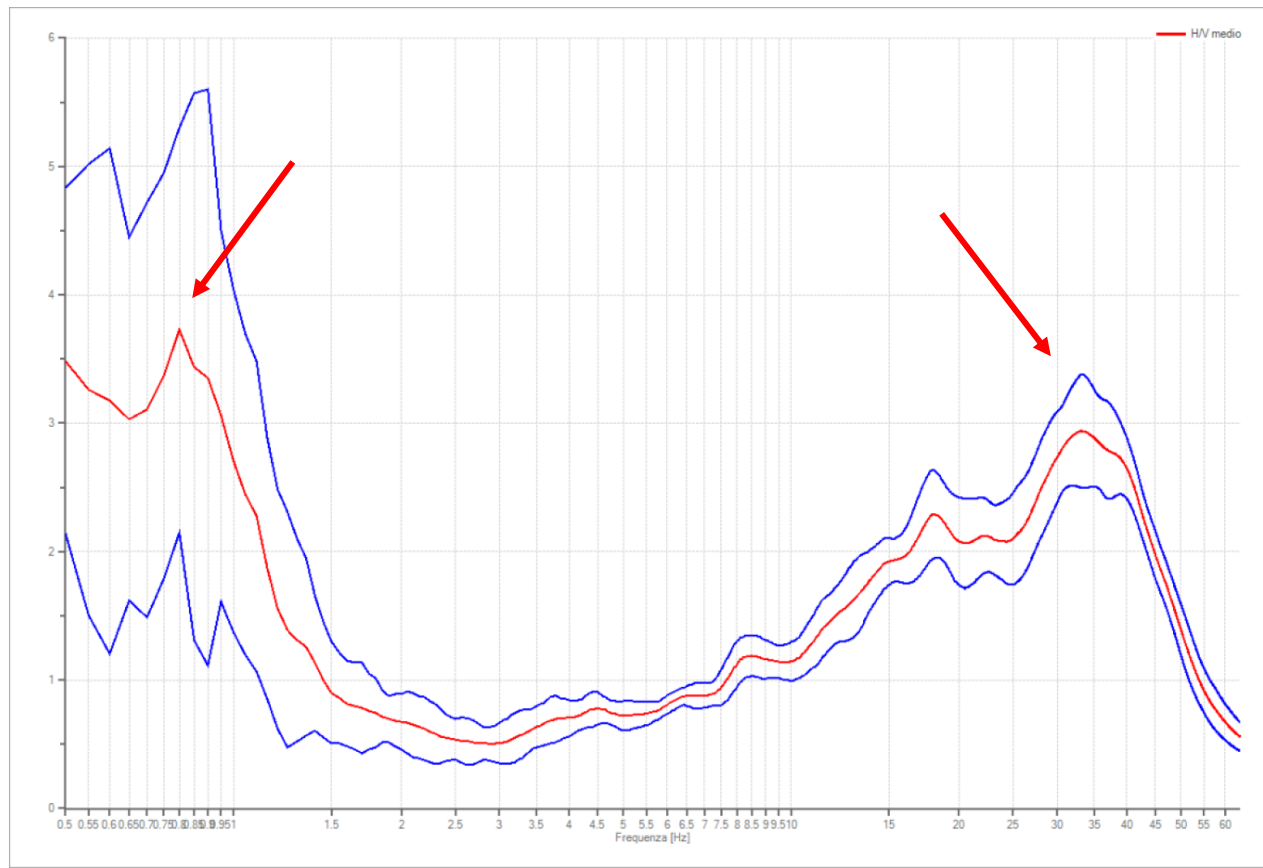


FIG. 41 - RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE DELLA PROVA 035027P207

## 5. ELABORATI CARTOGRAFICI

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

La disposizione delle aree urbanizzate e dei relativi tagli cartografici all'interno del quadro d'unione viene illustrata in Fig. 42.

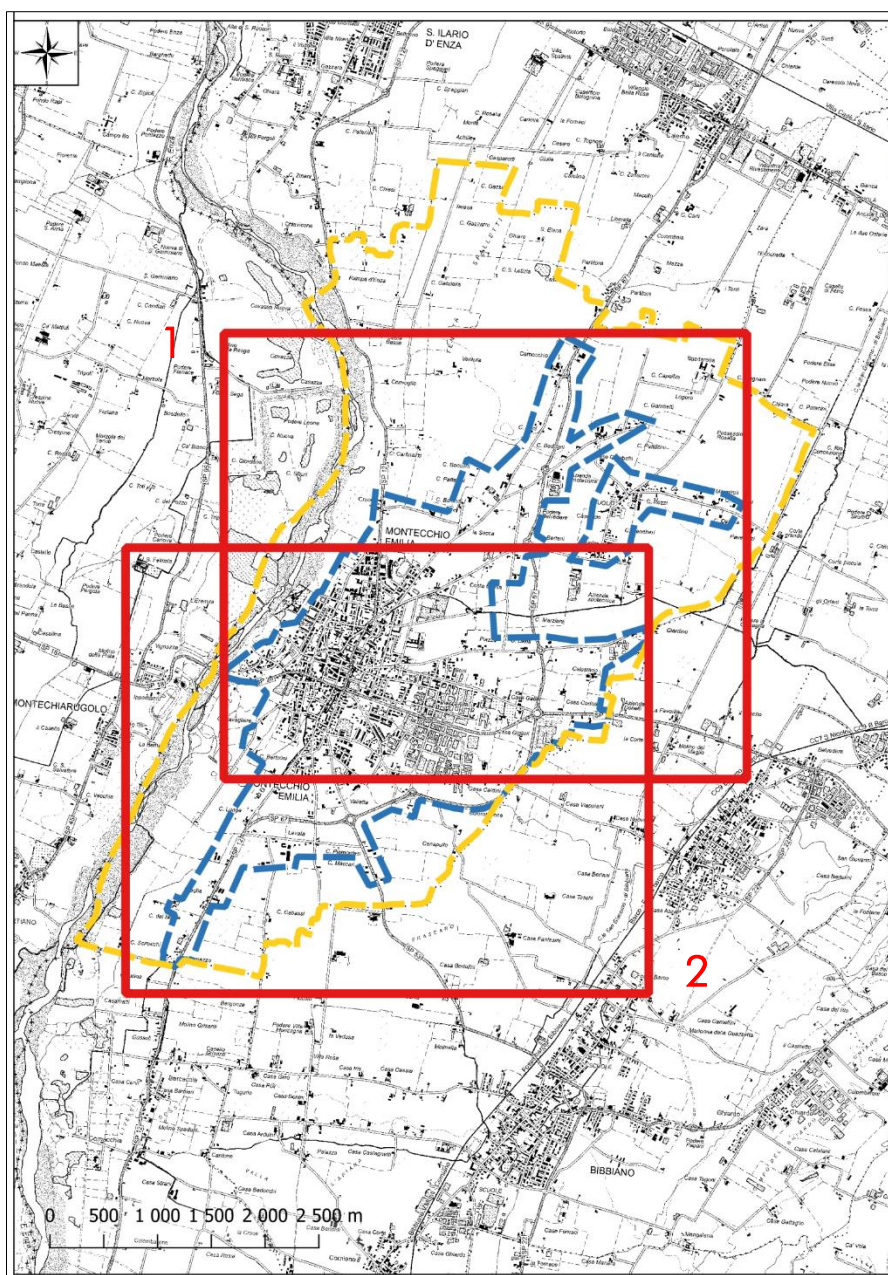


FIG. 42 – QUADRO D'UNIONE DEI TAGLI CARTOGRAFICI ADOTTATI



## 5.1. Carta delle indagini

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

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

Le prove sono state distinte in base alla tipologia in:

- sondaggio a carotaggio continuo
- prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- prova penetrometrica dinamica super pesante (DS)
- prova penetrometrica dinamica pesante (DP)
- prova penetrometrica dinamica media (DN)
- prova penetrometrica dinamica leggera (DL)
- pozzo per acqua
- trincea o pozzetto esplorativo
- prova sismica in foro tipo Downhole
- array sismico, ESAC\SPAC
- stazione microtremore a stazione singola (HVSr)
- MASW
- prova REfractionMicrotremors
- tomografia elettrica

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

## Legenda














	Confine comunale
	Area 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
	Prova penetrometrica dinamica leggera
	Pozzo per acqua
	Trincea o pozzetto esplorativo
	Prova sismica in foro tipo Downhole
	Stazione microtremore a stazione singola
	Array sismico, ESAC\SPAC
	Prova RefractionMicrotremors
	Tomografia elettrica
	MASW

FIG. 43 – 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	15	1	16
Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)	36	-	36
Prova penetrometrica dinamica super pesante	44	-	44
Prova penetrometrica dinamica pesante	1	-	1
Prova penetrometrica dinamica media	14	-	14
Prova penetrometrica dinamica leggera	2	-	2
Pozzo per acqua	9	-	9
Trincea o pozzetto esplorativo	3	-	3
Prova simica in foro tipo Down-hole	-	1	1
Stazione microtremore a stazione singola	73	6	79
Array sismico, ESAC\SPAC	1	-	1
Prova MASW	39	4	43
Prova REfractionMicrotremors	44	-	44
Tomografia elettrica	8	-	8

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), generalmente esigua (minore di 3 m), al di sotto della quale 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. 45 e in Fig. 46, stralci rispettivamente delle Sezioni 35 e 31 tratte dal sito web del Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna. Nella Sezione 35, che attraversa il settore centrale del Comune, con andamento SSW-NNE, (cfr. le tracce riportate in Fig. 44 oltre che nella Carta geologico-tecnica) si osserva un alto strutturale con spessori minimi del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) e di

quello Inferiore (AEI) - rispettivamente pari a pochi metri e a 20 m - in corrispondenza dell'asse dell'anticlinale; mentre, aumentano ai lati, in particolare, verso l'estremità settentrionale del Comune, fino a diventare dell'ordine dei 50 (AES) o dei 200 m (AEI). Diversamente, nella Sezione 31, all'incirca ortogonale alle 35, si nota che, spostandosi verso ESE, si approfondiscono, all'incirca, l'AES da 30 a 60 m, l'AEI da 80 a 120 m da p.c.



FIG. 44 – TRACCIA DELLE SEZIONI 31 E 35 (DA SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA) IN COMUNE DI MONTECCHIO EMILIA

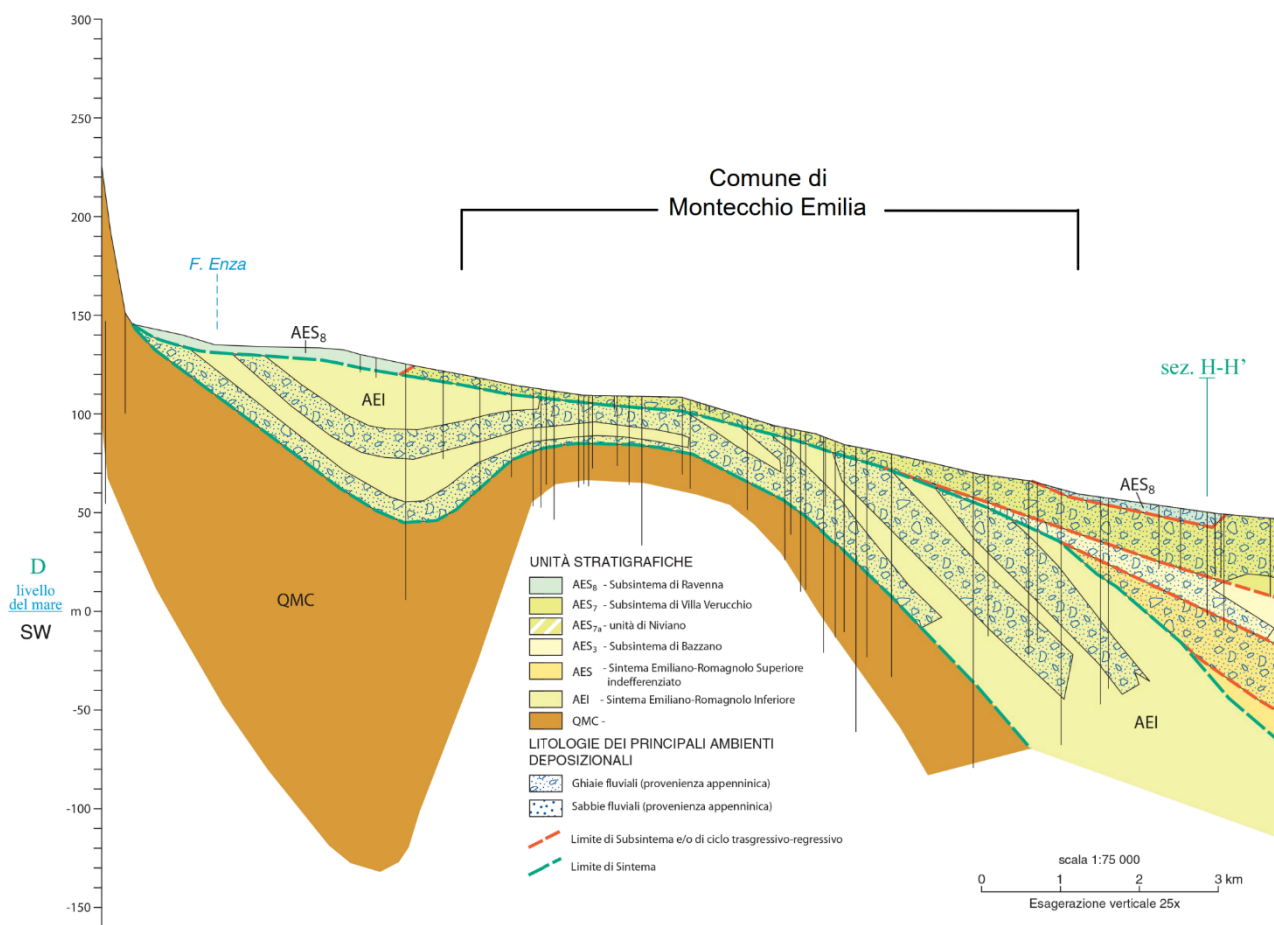


FIG. 45 - STRALCIO DELLA SEZIONE 35 TRATTA DAL SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

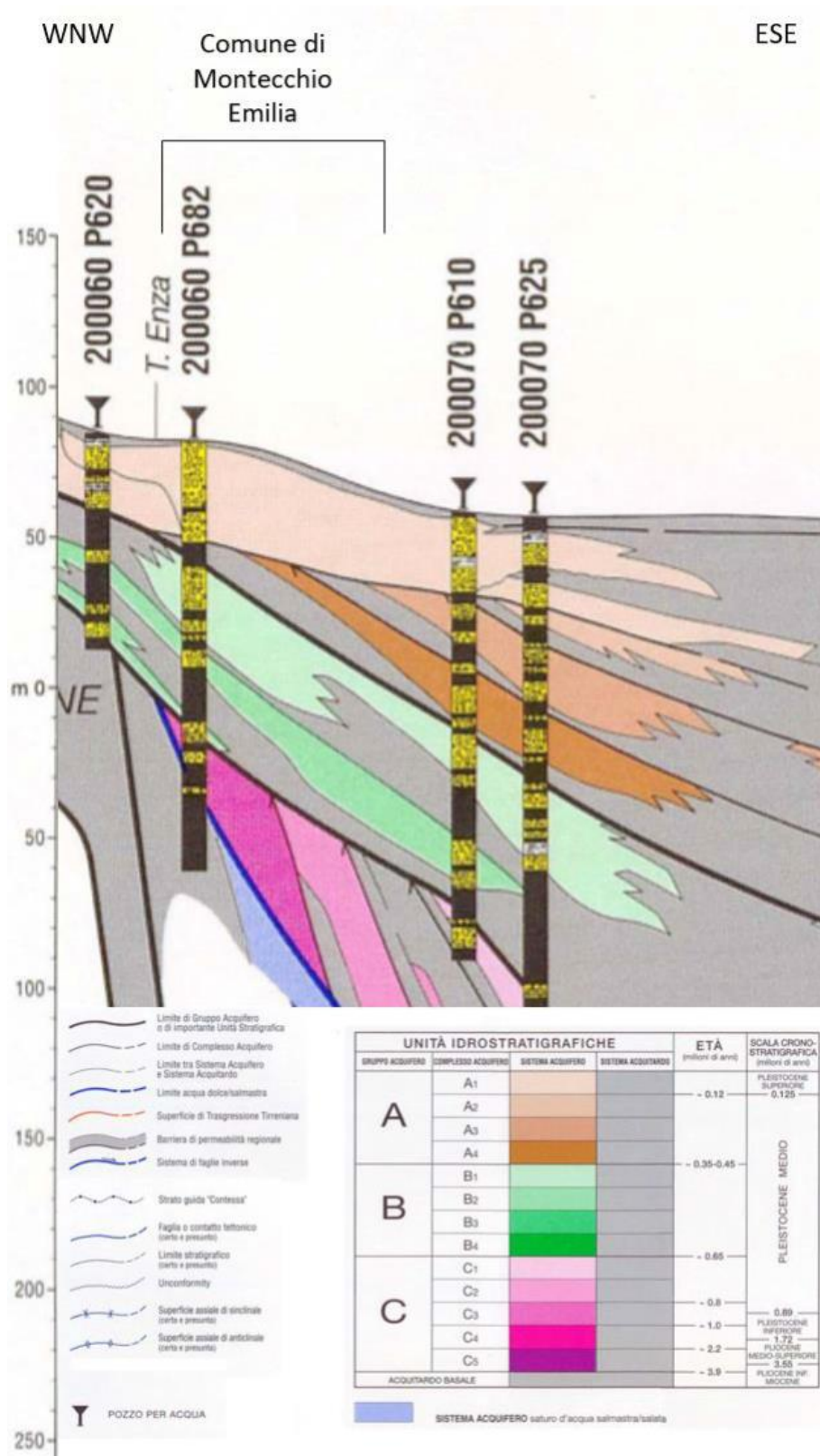


FIG. 46 - STRALCIO DELLA SEZIONE 31 TRATTA DAL SITO WEB DEL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA



Nella Carta Geologico-tecnica, come si osserva in Fig. 47, dovendo attenersi agli standard di rappresentazione degli SRAI, sono state distinte le seguenti tipologie di terreni di copertura:

- **GW** – *Ghiaie pulite con granulometria ben assortita*: sono dovute alla deposizione, in ambiente fluviale e sono state individuate per lo più nel settore occidentale;
- **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;
- **ML** – *Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità*: interessano la zona centro-meridionale del territorio comunale, completamente, l'area urbanizzata e urbanizzabile.

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

- **es** – argine/barre/canali;
- **tf** – terrazzo fluviale;
- **pd** – piana pedemontana.

Inoltre, nella Carta Geologico-tecnica, tra gli elementi geologici e idrogeologici sono stati rappresentati alcuni pozzi, indicando i valori di soggiacenza della falda freatica, e il sondaggio (P206) di nuova esecuzione che ha raggiunto il substrato geologico.

Infine, sono state indicate le tracce delle sezioni geologico-tecniche significative e rappresentative del modello del sottosuolo, riprese da RER.

## Legenda



Confine comunale



Area oggetto di Microzonazione Sismica

## Terreni di copertura



GWes Ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaia e sabbie di argine/barre/canali



GMpd Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo di piana pedemontana



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

## Elementi geologici e idrogeologici



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



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



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

FIG. 47 – 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. 72), di cui n. 65 ritenuti significativi, con associati i risultati delle singole prove, mentre solo n. 7 risultano "piatte", ovvero prive di picco significativo.

In particolare, sono stati indicati il valore F del picco significativo, corrispondente alla frequenza di ampiezza maggiore e, quando presente, un secondo picco significativo (frequenza secondaria), meno evidente del primo ( $F_1$ ).

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. 48.

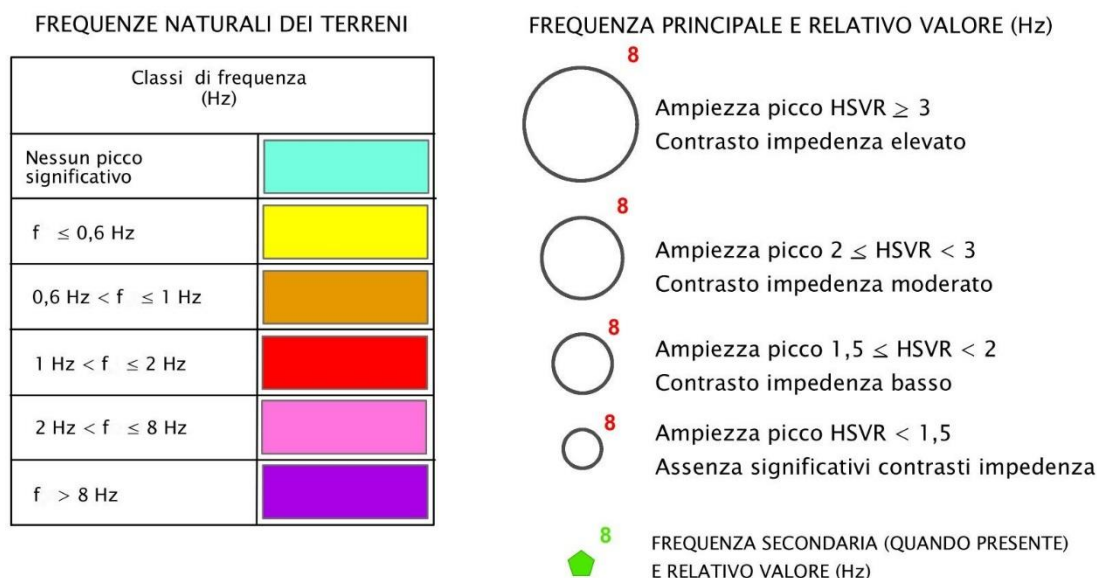


FIG. 48 – LEGENDA DELLA CARTA DELLE FREQUENZE

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 Montecchio Emilia, sono di gran lunga dominanti le prove con picchi principali di ampiezza significativa 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.

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

PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A	F1	A1
035027P32	19,97	5,10		
035027P75	19,97	2,00	0,19	1,60
035027P76	19,97	3,80	0,22	1,70
035027P104	19,91	5,50		
035027P52	19,90	3,50		
035027P130	19,81	4,00		
035027P35	19,70	2,40		
035027P90	18,72	2,40	0,22	1,90
035027P49	18,40	2,80		
035027P72	18,40	2,30		
035027P94	18,13	2,30	0,25	1,90
035027P97	18,13	2,10		
035027P77	18,09	3,60	0,19	1,60
035027P140	17,81	2,00	0,55	1,20
035027P96	17,75	2,00		
035027P202	17,60	4,00		
035027P86	17,50	2,40		
035027P44	16,90	1,40		
035027P87	15,91	4,80	0,35	1,50
035027P99	15,53	2,20		
035027P103	15,50	6,26		
035027P83	15,00	2,20		
035027P85	14,69	3,20		
035027P167	13,80	5,20		
035027P42	12,50	2,90		
035027P18	11,03	2,50		
035027P109	10,84	2,00	0,22	1,70
035027P143	6,00	1,80		
035027P201	5,80	2,10		
035027P47	5,20	2,00		
035027P62	4,56	3,20	14,50	2,10
035027P197	1,08	1,03	0,39	1,30
035027P107	0,94	2,10		
035027P101	0,88	2,40	3,80	2,10
035027P207	0,80	3,70		
035027P55	0,75	1,50		





PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A	F1	A1
035027P84	0,75	1,80		
035027P135	0,75	1,60		
035027P198	0,75	2,12		
035027P93	0,55	1,80		
035027P95	0,50	1,80		
035027P102	0,50	1,90		
035027P157	0,50	2,10		
035027P199	0,50	2,40	1,15	1,70
035027P106	0,47	1,30		
035027P74	0,41	1,70		
035027P105	0,40	1,50		
035027P150	0,40	2,00		
035027P100	0,35	1,80		
035027P110	0,34	1,80		
035027P88	0,31	1,70		
035027P17	0,30	1,80		
035027P108	0,25	1,50		
035027P111	0,25	1,20		
035027P154	0,25	2,10		
035027P178	0,25	1,50		
035027P81	0,22	1,70		
035027P89	0,22	1,80		
035027P91	0,22	1,50		
035027P73	0,20	1,80		
035027P92	0,19	1,40		
035027P79	0,16	1,70		
035027P82	0,16	1,90		
035027P98	0,15	1,70		
035027P152	0,13	2,00		
035027P19	0			
035027P15	0			
035027P66	0			
035027P78	0			
035027P80	0			
035027P112	0			
035027P145	0			

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

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

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), rappresenta il documento fondamentale del primo livello di approfondimento. Nel presente studio viene proposta una revisione di tale cartografia che tiene conto dei nuovi punti di misura di rumore ambientale (con indicazione del valore di  $f_0$ ) acquisiti sia da archivio comunale che dalla campagna indagini per il terzo livello di approfondimento.

In questa cartografia, alla scala 1:10'000, l'intero territorio comunale viene distinto a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti 3 categorie:

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

Dalla lettura della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica si osserva che, in Comune di Montecchio Emilia, è presente solo la categoria 2 - Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali. Più precisamente, su tutto il territorio, è stata individuata un'unica zona di seguito descritta (cfr. Fig. 49):

- **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 rinvenivano, dei depositi di origine alluvionale, prevalentemente ghiaiosi, stratificati, con spessori pluridecametrici.

## ZONA 1

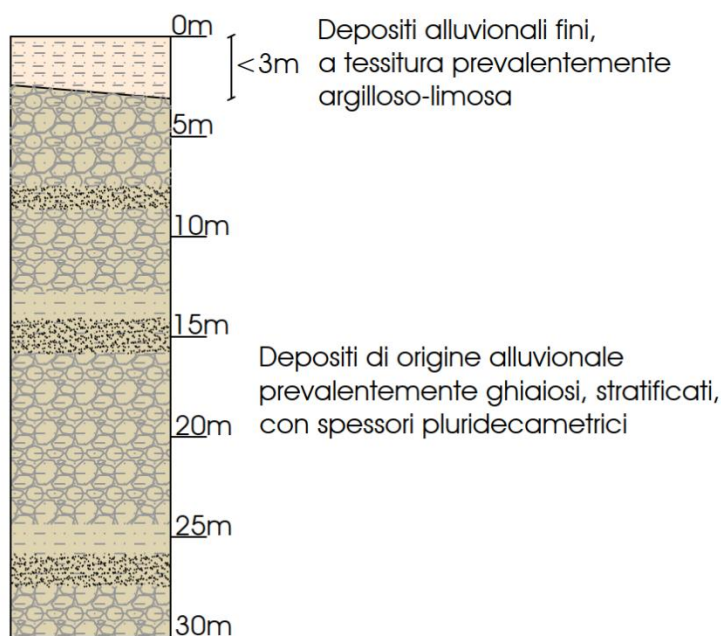


FIG. 49 – COLONNINA LITOSTRATIGRAFICA SINTETICA, RAPPRESENTATIVA DELLA MICROZONA STABILE SUSCETTIBILE DI AMPLIFICAZIONE LOCALE

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

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

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

In tali elaborati sono ubicati tutti i punti di misura, distinguendoli a seconda della tipologia di prova effettuata (prova tromografica, Down-Hole e MASW, indicate come tali anche quando accoppiate con le ReMi) e indicando il corrispondente valore di  $V_{s30}$  (sempre in m/s), dove:

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

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

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



A riguardo, va chiarito che, come già effettuato nel precedente studio di 2° livello, si è indicato la  $V_{s30}$  per tutte le indagini effettuate all'interno della zona 1, in quanto, presumibilmente, il contrasto di velocità più significativo si rinviene a una profondità inferiore a 3 m o superiore a 30 m

Dati riepilogati nella seguente Tab. 32.

PROVA	MOPS	$V_{s30}$
035027P143	2001	338
035027P145	2001	304
035027P15	2001	346
035027P150	2001	406
035027P152	2001	330
035027P154	2001	329
035027P17	2001	538
035027P18	2001	633
035027P19	2001	315
035027P32	2001	355
035027P35	2001	364
035027P42	2001	413
035027P47	2001	351
035027P49	2001	304
035027P52	2001	349
035027P62	2001	304
035027P66	2001	405
035027P72	2001	351
035027L10	2001	396
035027L11	2001	477
035027L12	2001	437
035027L13	2001	291
035027L14	2001	478
035027L15	2001	471
035027L16	2001	457
035027L17	2001	406
035027L18	2001	405
035027L19	2001	408
035027L2	2001	464
035027L20	2001	368
035027L21	2001	541
035027L22	2001	479
035027L23	2001	429
035027L24	2001	351
035027L25	2001	352
035027L26	2001	456
035027L29	2001	391



PROVA	MOPS	Vs <sub>30</sub>
035027L3	2001	420
035027L30	2001	432
035027L31	2001	446
035027L32	2001	427
035027L33	2001	422
035027L34	2001	456
035027L35	2001	447
035027L36	2001	467
035027L37	2001	453
035027L38	2001	461
035027L39	2001	329
035027L4	2001	498
035027L40	2001	414
035027L41	2001	322
035027L42	2001	367
035027L43	2001	387
035027L44	2001	340
035027L45	2001	305
035027L46	2001	282
035027L47	2001	279
035027L48	2001	273
035027L49	2001	373
035027L5	2001	465
035027L50	2001	271
035027L51	2001	312
035027L52	2001	327
035027L53	2001	368
035027L54	2001	427
035027L55	2001	422
035027L56	2001	312
035027L57	2001	391
035027L58	2001	349
035027L59	2001	363
035027L60	2001	366
035027L61	2001	373
035027L62	2001	361
035027L63	2001	328
035027L64	2001	362
035027L65	2001	364
035027L66	2001	360
035027L67	2001	355
035027L68	2001	364



PROVA	MOPS	Vs <sub>30</sub>
035027L75	2001	414
035027L76	2001	441
035027L77	2001	427
035027L8	2001	409
035027L80	2001	481
035027L81	2001	395
035027L82	2001	390
035027L83	2001	315
035027L9	2001	369
035027L94	2001	442
035027L95	2001	429
035027L96	2001	347
035027L97	2001	379

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

Come visto nello studio di 2° livello, detti risultati hanno consentito di distinguere, all'interno dell'unica MOPS individuata per l'intero territorio comunale, 3 aree, raffigurate in Fig. 50, cui sono stati attribuiti, una volta mediati e con alcune correzioni a favore di sicurezza, i valori di Vs30 indicati nella seguente tabella.

ZONA	Vs30 (m/s)
Zona 1 – Area 1	400
Zona 1 – Area 2	300
Zona 1 – Area 3	350

TAB. 33 – TABELLA RIEPILOGATIVA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S UTILIZZATE IN COMUNE DI MONTECCHIO EMILIA

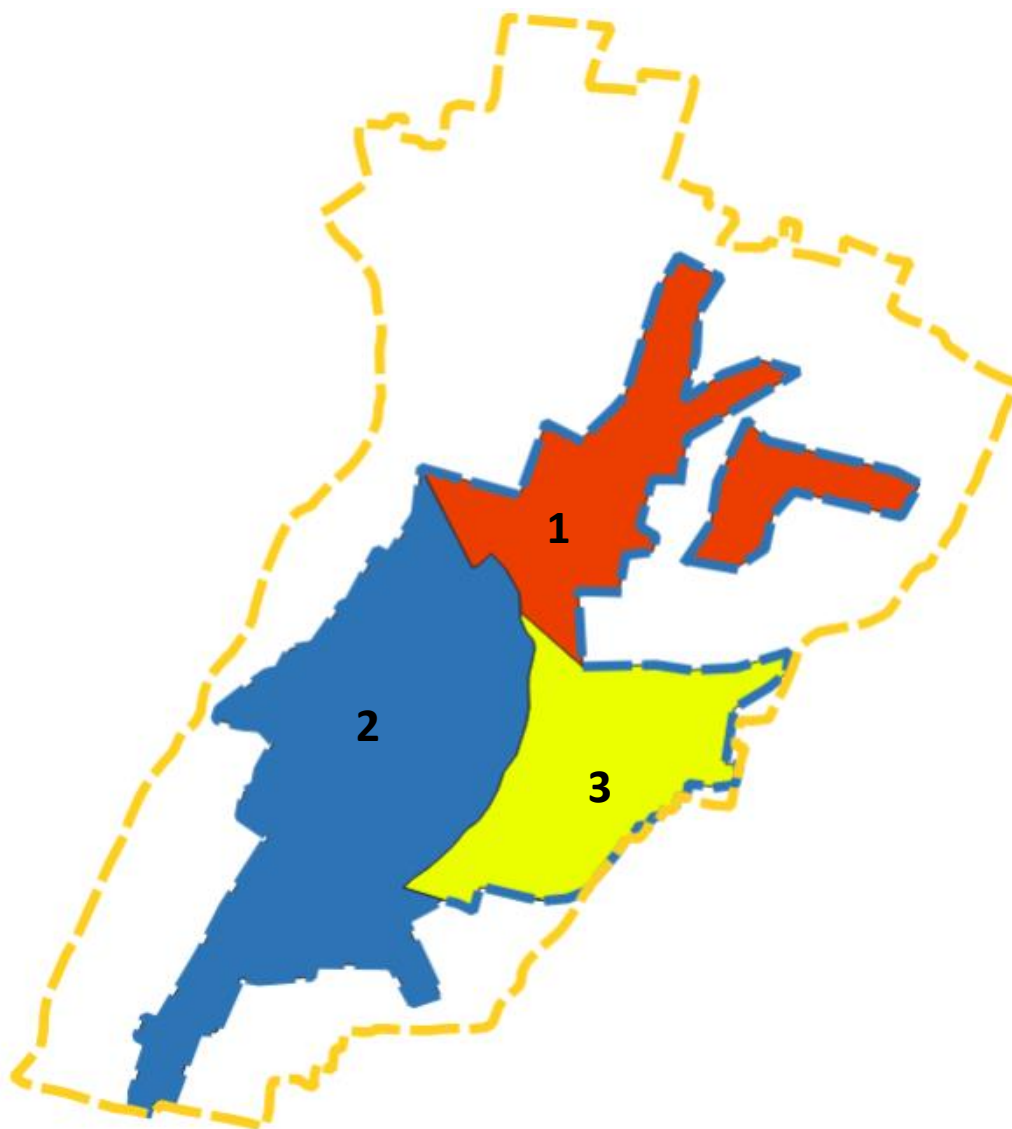


FIG. 50 – AREE DELLA MOPS IN SITO PER LA DEFINIZIONE DELLA VELOCITÀ

## 5.6. Carta di microzonazione sismica

Nelle Carte di microzonazione sismica di Livello 3, in scala 1: 5'000, il territorio è suddiviso sulla base dei seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico, calcolati per un tempo di ritorno  $TR=475$  anni, con smorzamento  $\zeta=5\%$  (cfr. capitolo 3):

- $FA_{PGA} = PGA/PGA_0$ , dove  $PGA_0$  è l'accelerazione massima orizzontale a periodo  $T=0$  al suolo di riferimento e  $PGA$  è l'accelerazione massima orizzontale a periodo  $T=0$  alla superficie del sito;
- $FA_{SA} = SA/SA_0$ , dove  $SA_0$  è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e  $SA$  è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi  $T$ :
  - $SA1$  per  $0.1s \leq T \leq 0.5s$ ,



- SA2 per  $0.4s \leq T \leq 0.8s$ ,
- SA3 per  $0.7s \leq T \leq 1.1s$ ,
- SA4 per  $0.5s \leq T \leq 1.5s$ ,
- $FH_{SI} = SI/SI_0$ , dove  $SI_0$  è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e  $SI$  l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi  $T$ :
  - SI1 per  $0.1s \leq T \leq 0.5s$ ,
  - SI2 per  $0.5s \leq T \leq 1.0s$ ,
  - SI3 per  $0.5s \leq T \leq 1.5s$ .

Nella seguente Tab. 34 sono indicate le analisi di Risposta Sismica Locale utilizzate per calcolare i sopraindicati parametri della microzona individuata (2001), riportando a che sito sono riferite e in che paragrafo della presente relazione sono descritte.

MOPS	Analisi di Risposta Sismica Locale	Tipo di zona	Sito RSL	Paragrafo
2001	RSL.1	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Parco del Noce nero	3.6.1
2001	RSL.2	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Croce arancione	3.6.2
2001	RSL.3	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Ospedale	3.6.3
2001	RSL.4	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Magazzini comunali	3.6.4
2001	RSL.5	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Via IV Novembre	3.6.5
2001	RSL.6	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Aiola	3.6.6
2001	RSL.7	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Cornocchio	3.6.7

TAB. 34 – 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. 51 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.

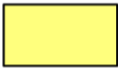









Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (classe del parametro di amplificazione) <sup>14</sup>	
	1.1 – 1.2
	1.3 – 1.4
	1.5 – 1.6
	1.7 – 1.8
	1.9 – 2.0
	2.1 – 2.2
	2.3 – 2.4
	2.5 – 3.0
	3.1 – 3.5
	>3.5

FIG. 51 – 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  $\Delta T$  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  $ASL_{UHS}/\Delta T$ , 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 INGV<sup>13</sup> 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. 52 – LEGENDA ADOTTATA PER L'ACCORPAMENTO DEI VALORI DI  $H_{SM}$

<sup>13</sup> 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

- Albarello D., Castellaro S. (2011): TECNICHE SISMICHE PASSIVE: INDAGINI A STAZIONE SINGOLA, Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2 – 2011, Appendice I e II, pp 50-62
- 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](http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833)
- Locati M., Camassi, R. e Stucchi M. (a cura di) (2011) . DBMI11, LA VERSIONE 2011 DEL DATABASE MICROSISMICO ITALIANO. Milano,Bologna, <http://Emidius.mi.ingv.it/DBMI11>
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, THE 2015 VERSION OF THE ITALIAN MACROSEISMIC DATABASE. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L., Poggi V. (2019): MAPPING THE SEISMIC BEDROCK IN THE PO-PLAIN (ITALY) THROUGH AMBIENT VIBRATION MONITORING. Bull. Seism. Soc. Am., 109(1), 164-177. doi: 10.1785/0120180193
- Marcellini A., Martelli L, Tento A., Daminelli R. - L'AMPLIFICAZIONE SISMICA NEGLI "INDIRIZZI PER GLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA IN EMILIA-ROMAGNA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA" (2009)
- Martelli L. (coord.), Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F. C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F. (2017a): CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA E AREE LIMITROFE. Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. Con note illustrative e CD. DREAM Italia. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/pubblicazioni/cartografia-geo-tematica/carta-sismotettonica-della-regione-emilia-romagna-e-aree-limitrofe-edizione-2016>
- Martelli L., Santulin M., Sani F., Tamaro A., Bonini M., Rebez A., Corti G., Slejko D. (2017b): SEISMIC HAZARD OF THE NORTHERN APENNINES BASED ON 3D SEISMIC SOURCES. Journal of Seismology. DOI 10.1007/s10950-017-9665-1. Versione estesa in italiano "Analisi 3D della pericolosità sismica dell'Appennino settentrionale" in <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/convegni-seminari-corsi/2017-nuovi-studi-sulla-pericolosita-sismica-regionale>
- Meletti C. e Valensise G., (2004). ZONAZIONE SISMOGENETICA ZS9-APP. 2 AL RAPPORTO CONCLUSIVO. In: "Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM



3274 del 20 marzo 2003". Rapporto per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.

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



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