



PROTEZIONE CIVILE
 Presidenza del Consiglio dei Ministri
 Dipartimento della Protezione Civile



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

MICROZONAZIONE SISMICA

RELAZIONE ILLUSTRATIVA LIVELLO 3

Regione Emilia-Romagna
Unione Valli e Delizie
Comuni di Argenta, Ostellato e Portomaggiore



Allegato alla delibera di Consiglio Unione Valli e Delizie n. 36 del 29.09.2022 "PIANO URBANISTICO GENERALE (PUG) DELL'UNIONE DEI COMUNI VALLI E DELIZIE (FERRARA) – Adeguamento del PUG adottato con delibera CU n.6 del 24.02.2022 al parere motivato espresso dal CUAV – Approvazione del PUG a norma dell'art. 46 comma 6 della L.R. 24/2017 e contestuale approvazione della Zonizzazione Acustica ai sensi dell'art. 3 della L.R. 15/2001 – Rettifica di errori materiali ed approvazione del PUG e della ZAC completi di tutti gli elaborati"

COPIA CONFORME ai sensi dell'art.23, comma 1 del D.Lgs. n.82/2005 dell'originale sottoscritto con firma digitale e memorizzato digitalmente su banca dati dell'Unione dei Comuni Valli e Delizie (FE).

Il Segretario Generale
D.ssa Rita Crivellari

<p>Regione</p> <p>Emilia-Romagna</p>	<p>Soggetto realizzatore</p> <p>RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI</p> <p>Mandataria</p>  <p>EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY</p> <p>Direzione tecnica Dott. Geol. Carlo Caleffi Dott. Geol. Francesco Cerutti</p> <p>Mandante Dott. Geol. Stefano Castagnetti</p> <p>Collaboratori Dott. Geol. Matteo Baisi Dott. Geol. Marco Baldi</p>	<p>Data</p> <p>Gennaio 2021</p> <p>AGGIORNAMENTO 1 Adeguamento alla DGR 630/2019</p>
--------------------------------------	--	--



INDICE

1.	Introduzione	3
1.1	Articolazione dello studio	4
2.	Indagini ed analisi	7
2.1	Sondaggi a carotaggio continuo	8
2.2	Prove di laboratorio.....	8
2.3	Prove Down-Hole.....	9
2.4	Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono.....	12
2.5	Indagine mediante sismocono.....	13
3.	Analisi di risposta sismica locale.....	16
3.1	Pericolosità sismica di base	16
3.2	Segnali in input	18
3.3	Modello geofisico del sottosuolo.....	19
3.3.1	Litologia.....	19
3.3.2	Determinazione della Vs e del bedrock sismico.....	20
3.3.3	Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G ₀) in funzione della deformazione	26
3.3.4	Codice di calcolo per la valutazione della RSL.....	31
3.3.5	Risultati della modellazione numerica	31
3.3.6	Ciclic stress ratio	34
3.4	RSL nei diversi siti.....	37
3.4.1	RSL per il sito di Argenta S1	37
3.4.2	RSL per il sito di Argenta SCPTU1	41
3.4.3	RSL per il sito di Argenta SCPTU2	45
3.4.4	RSL per il sito di Argenta SCPTU3	49
3.4.5	RSL per il sito di Argenta SCPTU4	53
3.4.6	RSL per il sito di Argenta SCPTU5	57
3.4.7	RSL per il sito di Ostellato S1	61
3.4.8	RSL per il sito di Ostellato SCPTU1	65
3.4.9	RSL per il sito di Ostellato SCPTU2.....	69
3.4.10	RSL per il sito di Portomaggiore S1	73
3.4.11	RSL per il sito di Portomaggiore SCPTU1	77
3.4.12	RSL per il sito di Portomaggiore SCPTU2	81
3.5	Verifica del rischio di liquefazione	85
3.5.1	Analisi dei risultati.....	90
3.6	Criticità del metodo.....	97
4.	Elaborati cartografici.....	97
4.1	Carte delle indagini.....	97
4.2	Carte geologico tecniche	99
4.3	Carte delle frequenze naturali dei terreni	99
4.4	Carte delle aree suscettibili degli effetti locali	100
4.5	Carte delle velocità delle onde di taglio S	103
4.6	Carte di microzonazione sismica	103
4.7	Carte dello scuotimento atteso.....	105
5.	Bibliografia	106
6.	Allegati	108



1. INTRODUZIONE

Il presente Documento costituisce l'integrazione dello *Studio di microzonazione sismica di III livello relativi al territorio dell'Unione dei Comuni Valli e Delizie*, effettuato su incarico dell'Unione Valli e Delizie Argenta - Ostellato - Portomaggiore (cfr. Determinazione n° 356 del 01/09/2016) e finanziato con Ordinanza del Capo del Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014 "Attribuzione contributi a favore degli enti locali- Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica". Lo studio è stato realizzato dagli scriventi nel 2017 e certificato dalla regione Emilia Romagna con prot. PG/2018/0253239 del 10 aprile 2018.

L'integrazione si è resa necessaria a seguito dell'emanazione, successiva alla certificazione dello studio, della D.G.R 630 del 29/04/2019 "*Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (Artt. 22 e 49, L.R. N. 24/2017)*", che prevede ulteriori approfondimenti, rispetto a quelli già effettuati nel 2017, ai fini dell'utilizzo dello studio di microzonazione sismica per la pianificazione comunale.

Lo studio del 2017 è stato redatto nel rispetto dei seguenti riferimenti tecnici:

- Allegato A2 "Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza, di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 293/2015 e Decreto del Capo Dipartimento della Protezione Civile del 14 dicembre 2015" della deliberazione di Giunta regionale n. 573 del 28/04/2016 "O.C.D.P.C. 26 Ottobre 2015, N. 293 - Annualità 2014 - Criteri per l'attribuzione di contributi per la realizzazione di interventi di riduzione del rischio sismico in edifici pubblici strategici e rilevanti, in edifici privati e per studi di microzonazione sismica, di cui all'art. 2, comma 1, lettere A), B) E C). Modalità di concessione e liquidazione dei contributi (da qui in avanti "Allegato A2 della delibera regionale")
- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.0b, Roma, ottobre 2015 - Elaborato e approvato nell'ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica (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")

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	3 di 110



- Allegato A della deliberazione di Giunta regionale della Regione Emilia Romagna n. 2193 del 21/12/2015: "Art. 16 della L.R. n° 20 del 24/03/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica di cui alla deliberazione dell'Assemblea legislativa 2 maggio 2007, n° 12" (da qui in avanti "indirizzi regionali").

Quali aree oggetto di studio, d'accordo con l'Unione dei Comuni sono state prese in esame le stesse aree definite negli studi di secondo livello, già approvati.

Lo studio di terzo livello è stato basato sullo studio di primo e secondo livello redatto da Geotema s.r.l., Studio di geologia Tarabusi e Progeo s.r.l. nel giugno 2015.

La presente integrazione, come detto, è stata redatta in ottemperanza alla DGR 630/2019, che prevede la redazione delle nuove cartografie di microzonazione sismica:

- Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1-0,5\ s}$
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$
- Carta di microzonazione sismica - H_{SM}
- Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4-0,8\ s}$
- Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7-1,1\ s}$
- Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5-1,5\ s}$

Nel corso dello studio, pertanto, sono stati redatti, oltre alla presente relazione, gli elaborati elencati nel capitolo 6.

Si precisa che La Carta geologico tecnica e la Carta delle frequenze naturali dei terreni, per i tre comuni, sono state riprese integralmente dallo studio di microzonazione di secondo livello già citato, a cui si rimanda per la relativa descrizione.

1.1 Articolazione dello studio

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

1. individuazione di tre aree rappresentative delle situazioni più critiche classificate nella fase precedente;
2. realizzazione per ciascuna area di un sondaggio a carotaggio continuo fino alla profondità di 30 m con prelievo di campioni e realizzazione di prova Dowh-hole per la misura in foro delle Vs;
3. individuazione di ulteriori aree critiche su cui realizzare prove SCPTU e CPTU;

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	4 di 110



4. realizzazione di n° 38 CPTU e 9 SCPTU;
5. aggiornamento delle cartografie di primo livello con dati delle nuove indagini:
 - a. Carta delle indagini
 - b. Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs);
6. realizzazione di prove di colonna risonante sui campioni per la determinazione delle curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G₀) in funzione della deformazione;
7. valutazione della riposta sismica locale lungo 12 verticali mediante il programma Strata che calcola la risposta dinamica monodimensionale di una colonna di terreno utilizzando un modello di propagazione lineare delle onde, con proprietà dinamiche del terreno (proprietà elastiche e smorzamento) variabili in funzione del livello deformativo;
8. calcolo dei fattori di amplificazione, per i siti indagati, per un tempo di ritorno TR=475 anni, con smorzamento ζ=5%, relativi ai seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico:
 - $FA_{PGA} = PGA/PGA_0$, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 al suolo di riferimento e PGA è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 alla superficie del sito;
 - $FA_{SA} = SA/SA_0$, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T:
 - SA1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - SA2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$,
 - SA3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$,
 - SA4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;
 - $FH_{SI} = SI/SI_0$, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T:
 - SI1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - SI2 per $0,5s \leq T \leq 1,0s$,
 - SI3 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$.
9. redazione delle cartografie di microzonazione sismica Livello 3 relative agli 8 parametri indicati al punto 7, oltre che allo scuotimento in accelerazione (cm/s²) atteso al sito per gli intervalli di periodi:
 - $0,1s \leq T \leq 0,5s$ (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM}),

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	5 di 110



- $0,4s \leq T \leq 0,8s$ (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 - $H_{SM\ 0,5-1,5\ s}$),

10. verifica a liquefazione mediante il programma Cliq 2.0 della Geologismiki.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	6 di 110



2. INDAGINI ED ANALISI

Di seguito vengono descritte le indagini e le analisi specifiche effettuate per la microzonazione di 3° livello.

In Tab. 1 viene riportato il riepilogo delle prove eseguite con la loro distribuzione in funzione delle località.

Comune	Abitato	CPTU	SCPTU	S
Argenta	Santa Maria Codifume	1		
	Borgo Cortili	1		
	Zuccherificio/ Cà Bergamine/ Podere Motta	1		
	Traghetto	1		
	Ospital Monacale/ Possessione Nuova/ Borgo Madonnina	1		
	San Nicolò	1		
	Benvignante	1		
	Consandolo	1		
	Boccaleone	1		
	Argenta	4	2	1
	Bando		1	
	Campotto	1		
	San Biagio	1		
	Filo		1	
	Longastrino		1	
	Anita	1		
Portomaggiore	Portomaggiore	3		1
	Portoverrara	1		
	Portorotta	1		
	Ripapersico	1	1	
	Quartiere	1		
	Sandolo	1		
	Maiero	1		
	Runco	1		
	Gambulaga	1	1	
	Area POC a Nord di Gambulaga	1		
Ostellato	Medelana/ Rovereto	1	1	
	San Vito	1		
	Dogato	1		
	Libolla	1		



Comune	Abitato	CPTU	SCPTU	S
	Idrovora Tersa/ Possessione Pinzane	1		
	Ostellato	3		1
	Campolungo	1		
	Chiusa Sabbionara / Corte Centrale		1	
	San Giovanni	1		
Totale		38	9	3

Tab. 1 - Indagini in situ eseguite nel corso dello studio

2.1 Sondaggi a carotaggio continuo

Nella campagna d'indagine sono stati eseguiti, da parte della ditta Elletipi s.r.l. di Ferrara, tre sondaggi verticali a carotaggio continuo (uno per comune) tutti spinti a una profondità di 30,0 metri dal piano campagna.

I sondaggi sono stati attrezzati con un tubo in PVC per l'esecuzione della prova down-hole.

Nell'indagine è stata utilizzata una sonda a rotazione impiegando per la perforazione dei carotieri semplici. Nel corso delle operazioni di perforazione sono stati prelevati un totale di 16 campioni indisturbati, usando campionatori in acciaio a pareti sottili (Shelby), ed un campione rimaneggiato nelle sabbie, successivamente inviati al Laboratorio Elletipi per le analisi.

Le stratigrafie di dettaglio sono riportate in allegato.

Nelle litostratigrafie allegate sono riportate:

- le suddivisioni stratigrafiche con relative quote e le descrizioni litologiche effettuate direttamente in campagna con metodi speditivi;
- le quote di prelievo dei campioni indisturbati;
- la determinazione speditiva di campagna del valore di pocket penetrometer, espressi in Kg\cm²;
- il livello di falda misurato durante l'esecuzione della perforazione.

2.2 Prove di laboratorio

I campioni prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati inviati al Laboratorio Elletipi srl di Ferrara per le analisi geotecniche.

Per ogni campione prelevato sono state eseguite le seguenti prove:

- Descrizione geotecnica;

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	8 di 110



- Determinazione dei Limiti di Atterberg;
- Determinazione delle caratteristiche granulometriche;
- Determinazione del peso di volume
- Determinazione dell'umidità naturale.

Inoltre, su sei campioni sono state eseguite prove in colonna risonante per la determinazione dei parametri G/G_0 e D .

I risultati delle prove di laboratorio sono riportati in allegato.

2.3 Prove Down-Hole

Per misurare la velocità delle onde S nel terreno sono state eseguite tre indagini sismiche tipo Down-Hole.

A tale scopo i sondaggi, al termine della perforazione, sono stati attrezzati 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 sondaggio, ad una profondità di 35 metri, utilizzando il sismografo digitale DoReMi della Sara Eletronic Instruments collegato ad un geofono da foro tridimensionale Sara SS-BH con 5 canali di cui uno Verticale e quattro orizzontali da 10 Hz.

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), essendo queste utilizzabili per la determinazione del Modulo dinamico G_0 e del Modulo di Young E .

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).

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	9 di 110



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 interpretativa 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 dei dati così acquisiti consente di ricostruire l'andamento delle velocità delle onde sia di pressione che di taglio in funzione della profondità.

In Fig. 1, a titolo esemplificativo, viene riportato il grafico, in funzione della profondità della velocità delle onde P e S, per il sondaggio in Comune di Portomaggiore.

I risultati delle prove Down hole sono riportati in allegato.

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	10 di 110

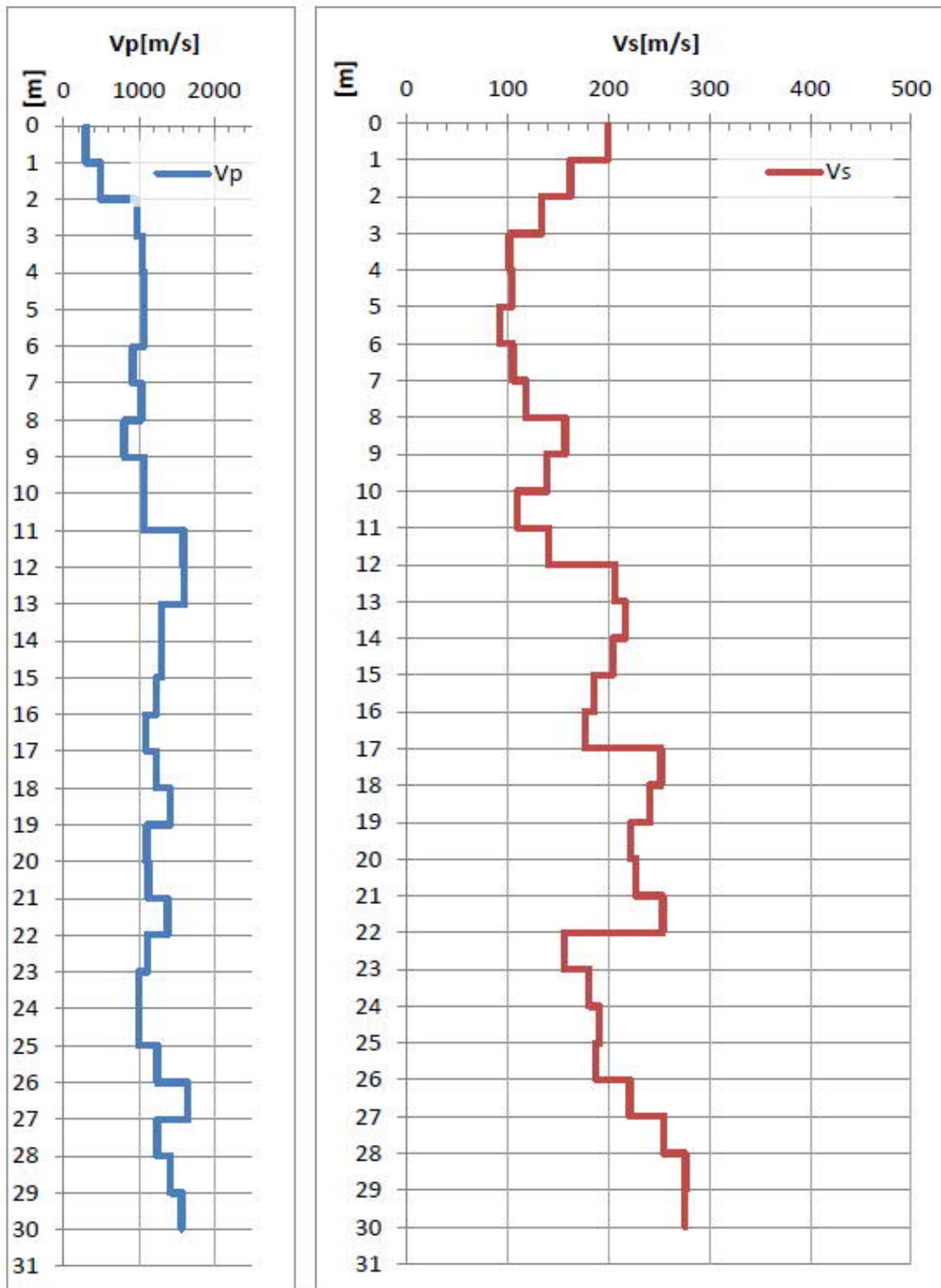


Fig. 1 - Valori di Vp e Vs in funzione della profondità misurati con le prove Down-hole



2.4 Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono

Sono state eseguite 38 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono, e nove prove penetrometriche statiche con l'aggiunta di cono sismico. Le indagini sono state eseguite utilizzando un penetrometro GeoMill da 200 kN di spinta massima con punta Tecnopenta G1-CPL2IN, montato su autocarro Mercedes Unimog 4X4.

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

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

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

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

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

Nei diagrammi e nelle tabelle riportati negli allegati sono riportati i seguenti valori di resistenza (rilevati dalle letture di campagna, durante l'infissione dello strumento):

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

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

I risultati delle prove CPTU sono riportati in allegato.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	12 di 110



2.5 Indagine mediante sismocono

Per verificare le caratteristiche sismiche dei terreni è stata realizzata una prova mediante cono sismico eseguita durante la realizzazione della prova penetrometrica, attrezzando lo strumento con una punta con piezocono e geofoni.

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

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

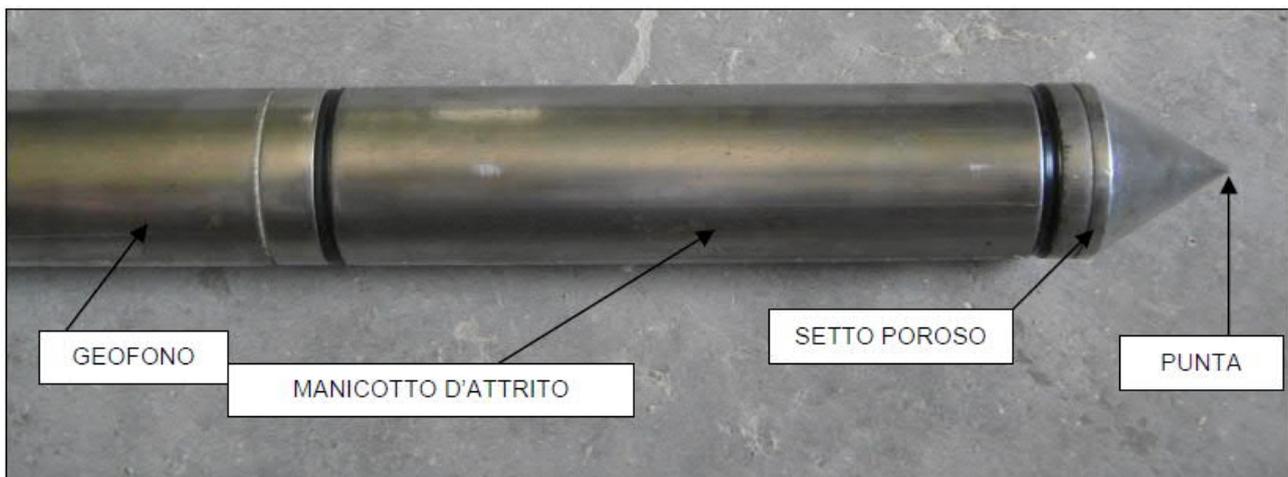


Fig. 2 - Punta del penetrometro elettrico e sismocono

Attraverso il rapporto distanza/tempo di percorrenza, è possibile determinare, direttamente e con grande precisione, le velocità delle onde S, caratterizzando i vari strati di terreno attraversati, fino alla definizione del parametro caratteristico per la classificazione sismica dei suoli, la $V_{s,30}$.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	13 di 110

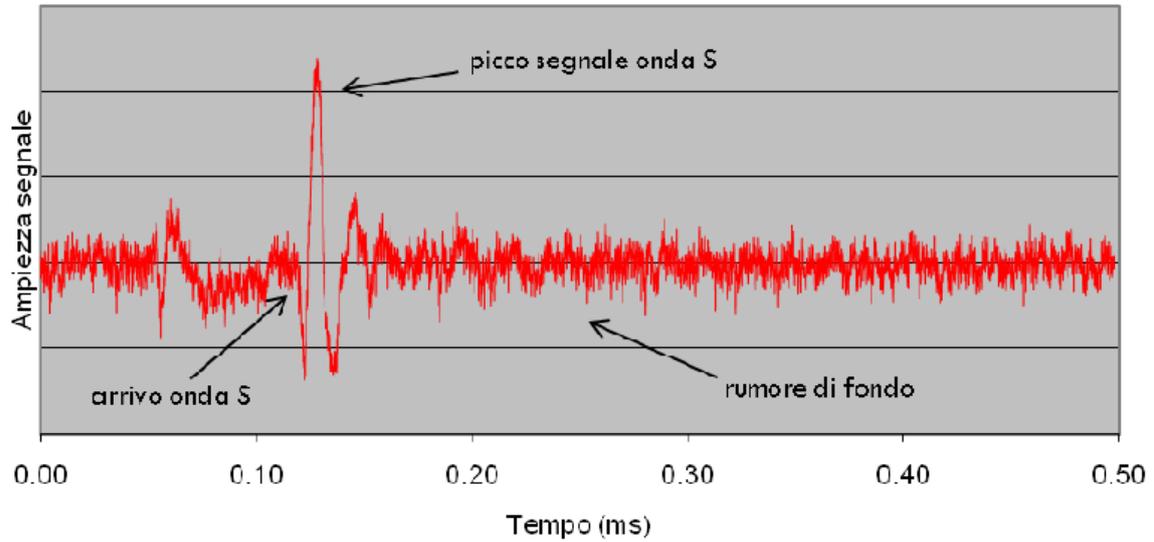


Fig. 3 - Esempio di sismogramma del segnale registrato a 10 m di profondità

In pratica la prova con sismocono è da considerare una prova *Down-Hole* a tutti gli effetti.

In Fig. 8 viene riportato, a titolo esemplificativo, il report di una prova SCPTU, comprensiva dei dati penetrometrici e di Vs.

I risultati delle prove CPTU sono riportati in allegato.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	14 di 110

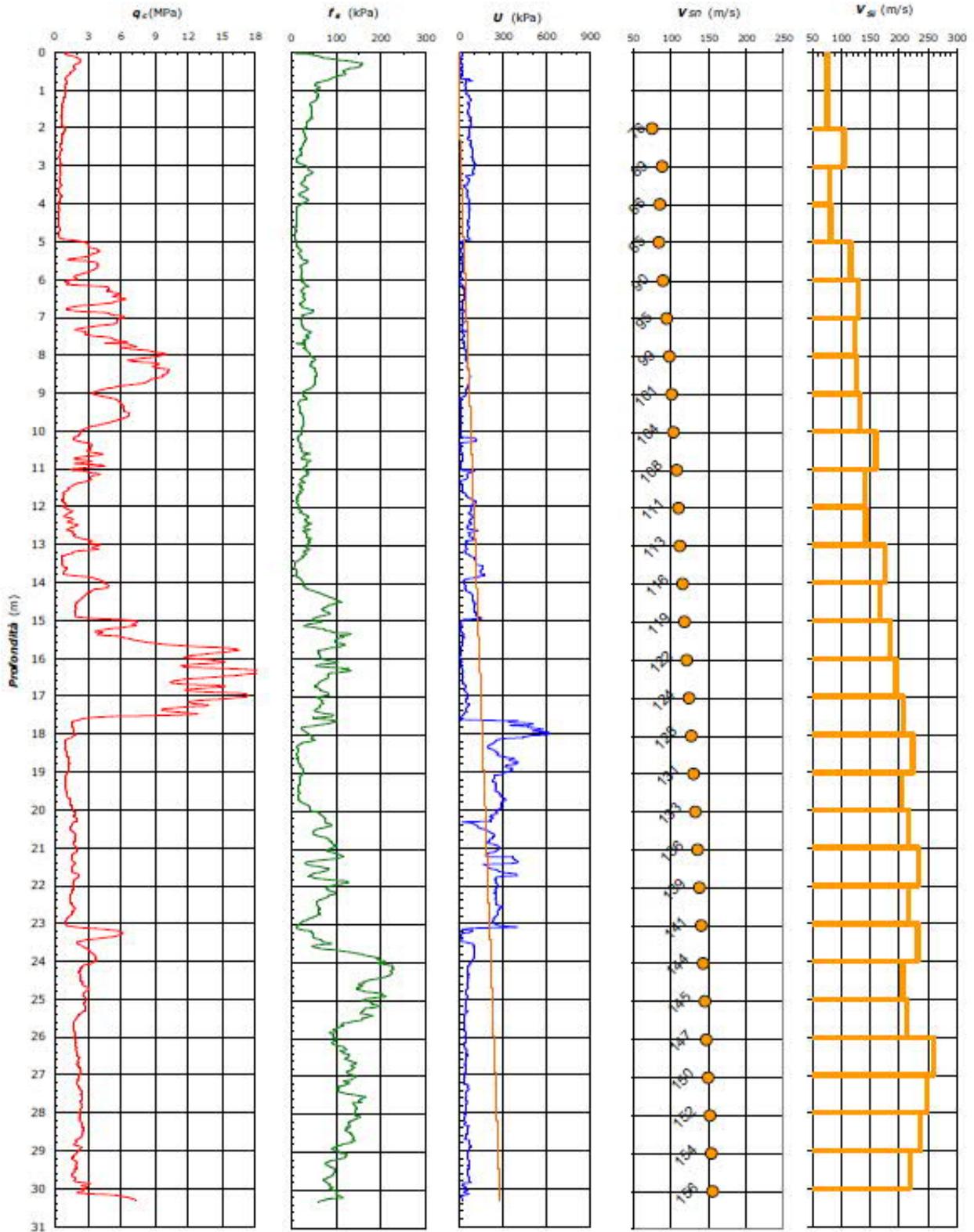


Fig. 4 - Report di una prova SCPTU

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	15 di 110



3. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Di seguito vengono fornite alcune informazioni di carattere generale sulle procedure di valutazione di risposta sismica locale, valide per tutti i siti indagati. Nei successivi paragrafi (§ 3.4), saranno, poi, illustrati i risultati della RSL per ciascun sito.

Nel complesso è stato effettuato uno studio di risposta sismica locale per ben 12 verticali (Tab. 2).

3.1 Pericolosità sismica di base

Nel caso della valutazione della risposta sismica locale di 3° livello 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_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni) di ogni sito indagato;

Per i 12 punti di indagine il parametro a_{refg} risulta il seguente (Tab. 2)

	Punto di indagine	a_{refg} (ag/g)
Argenta	AG_SCPTU1	0.152
	AG_SCPTU2	0.151
	AG_SCPTU3	0.157
	AG_SCPTU4	0.155
	AG_SCPTU5	0.157
	AG_S1	0.157
Ostellato	OS_SCPTU1	0.130
	OS_SCPTU2	0.113
	OS_S1	0.125
Portomaggiore	PO_SCPTU1	0.143
	PO_SCPTU2	0.151
	PO_S1	0.148

Tab. 2 - Valori di a_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni)



Di conseguenza, gli spettri elastici di risposta in accelerazione (Fig. 5) di riferimento per la valutazione della risposta sismica locale, e i conseguenti spettri di risposta in velocità, per il calcolo dell'intensità di Housner, (Fig. 6), sono i seguenti:

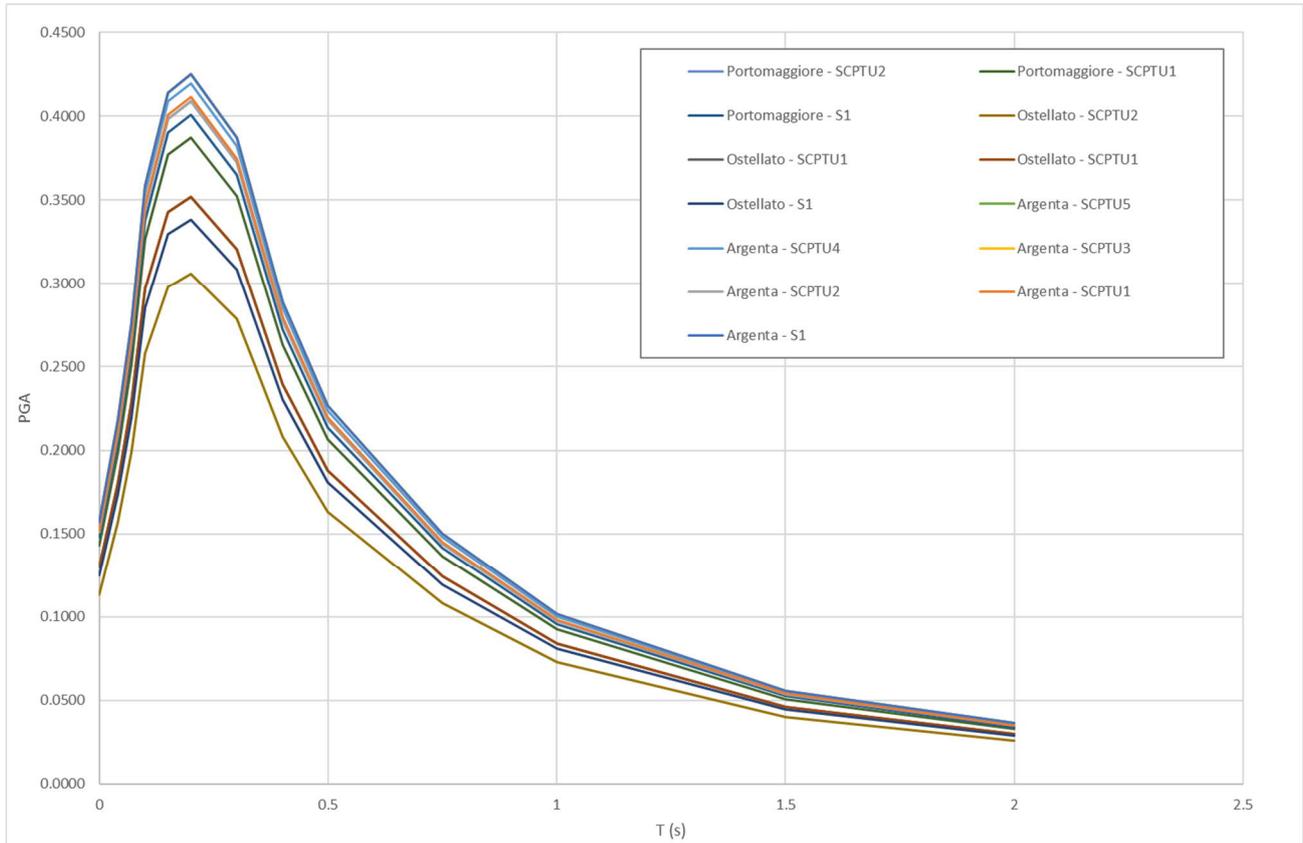


Fig. 5 - Spettri di risposta elastici in accelerazione su suolo A (475Y)

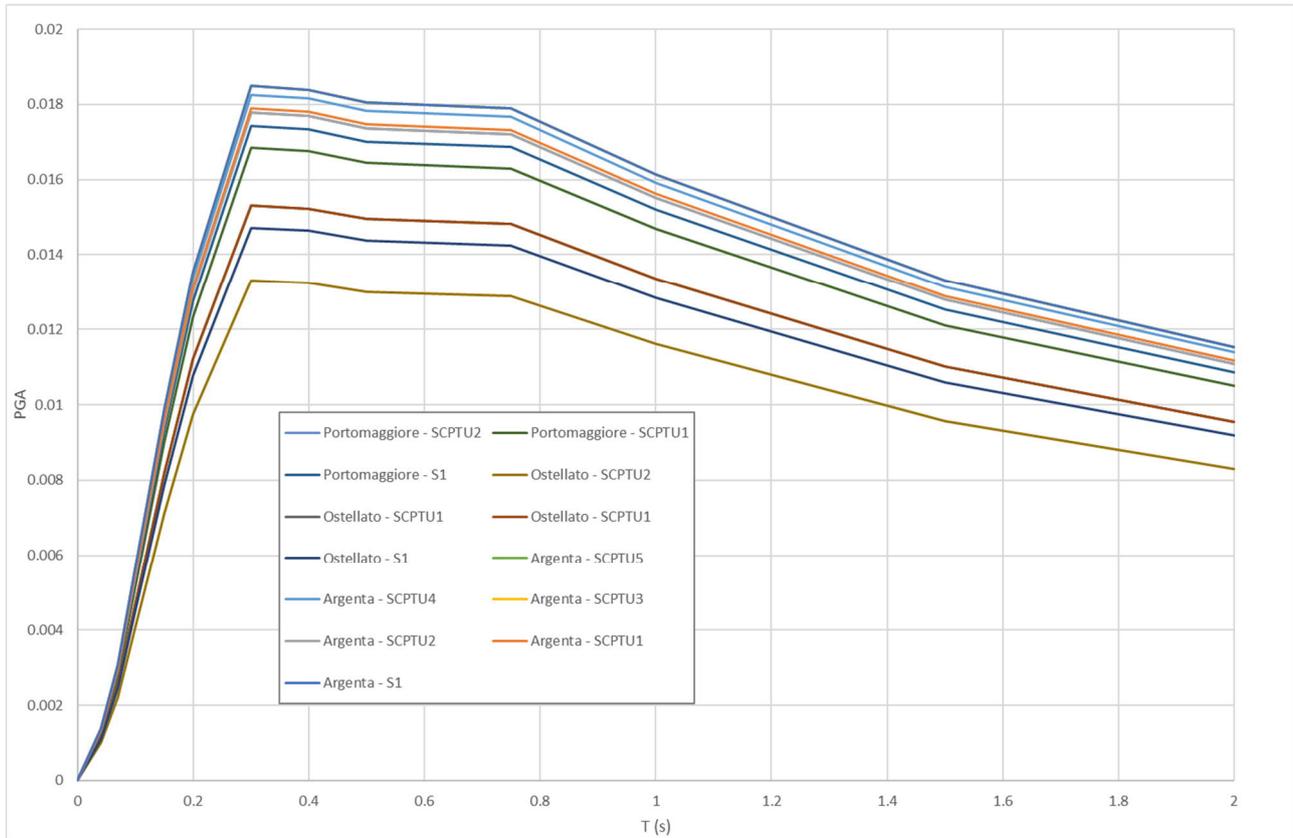


Fig. 6 - Spettri di risposta elastici in velocità su suolo rigido (475Y)

Come si può facilmente constatare esiste una notevole variabilità tra i diversi siti indagati, con accelerazioni di riferimento che vanno da 0.157 a 0.113 g.

3.2 Segnali in input

Quali dati di input sismico sono stati utilizzati, oltre a quelli forniti dalla Regione Emilia Romagna secondo le indicazioni della DGR 2193/2015¹, anche quelli forniti dal software SEISM-HOME² di Eucentre.

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.

¹ disponibili nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale www.regione.emilia-romagna.it/geologia/sismica

² Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. [2012] "Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 1357-1375.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	18 di 110



Nel caso dei sismogrammi RER, il confronto è avvenuto con la forma dello spettro di risposta isoprobabile, con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni, così come rappresentato in Fig. 5, mentre, nel caso di SEISM_HOME, il confronto viene effettuato con lo spettro di risposta indicato dalla NTC 2008, sempre con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni.

Il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale fornisce 3 segnali per ciascun comune; SEISM-HOME, invece, fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008. Per ciascun sito indagato sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino.

Nel complesso, quindi, per ciascun sito, sono stati utilizzati 10 diversi accelerogrammi per le verifiche di risposta sismica locale. Ovviamente, tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto dalla RER e indicato in Tab. 2.

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, difficilmente raggiungibile nelle zone in questione³.

3.3.1 Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati delle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo e delle prove SCPTU realizzati in ciascun sito. La valutazione di risposta sismica locale, infatti, è stata realizzata in corrispondenza di tali verticali d'indagine.

³ A tale proposito vedi § 3.3.2.1

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	19 di 110



3.3.2 Determinazione della Vs e del bedrock sismico

La determinazione della Vs in funzione della profondità è stata effettuata mediante prove Down-hole in foro di sondaggio e mediante prove con sismocono, fino alla profondità di 30 m.

Nel complesso sono state analizzate 12 verticali (3 DH e 9 SCPTU, cfr. Tab. 3 e Fig. 7). Tutte le prove hanno fornito valori di Vs uniformemente crescenti con la profondità e poco correlati con la litologia. I valori di Vs₃₀ calcolati sono generalmente compresi tra 156 e 172 m/s, identificando i terreni nella categoria D (Vs₃₀ < 180 m/s secondo le NTC 2008), con l'eccezione di due prove dove i valori di Vs₃₀ sono leggermente superiori (182 e 198 m/s) indicando una categoria C (da 180 a 360 m/s secondo le NTC 2008).

		Vs ₃₀	Categoria di Sottosuolo
		m/s	
Argenta	AG_SCPTU1	156	D
	AG_SCPTU2	159	D
	AG_SCPTU3	172	D
	AG_SCPTU4	148	D
	AG_SCPTU5	165	D
	AG_S1	172	D
Ostellato	OS_SCPTU1	198	C
	OS_SCPTU2	158	D
	OS_S1	173	D
Portomaggiore	PO_SCPTU1	182	C
	PO_SCPTU2	162	D
	PO_S1	166	D

Tab. 3 - Vs30 e categorie di sottosuolo

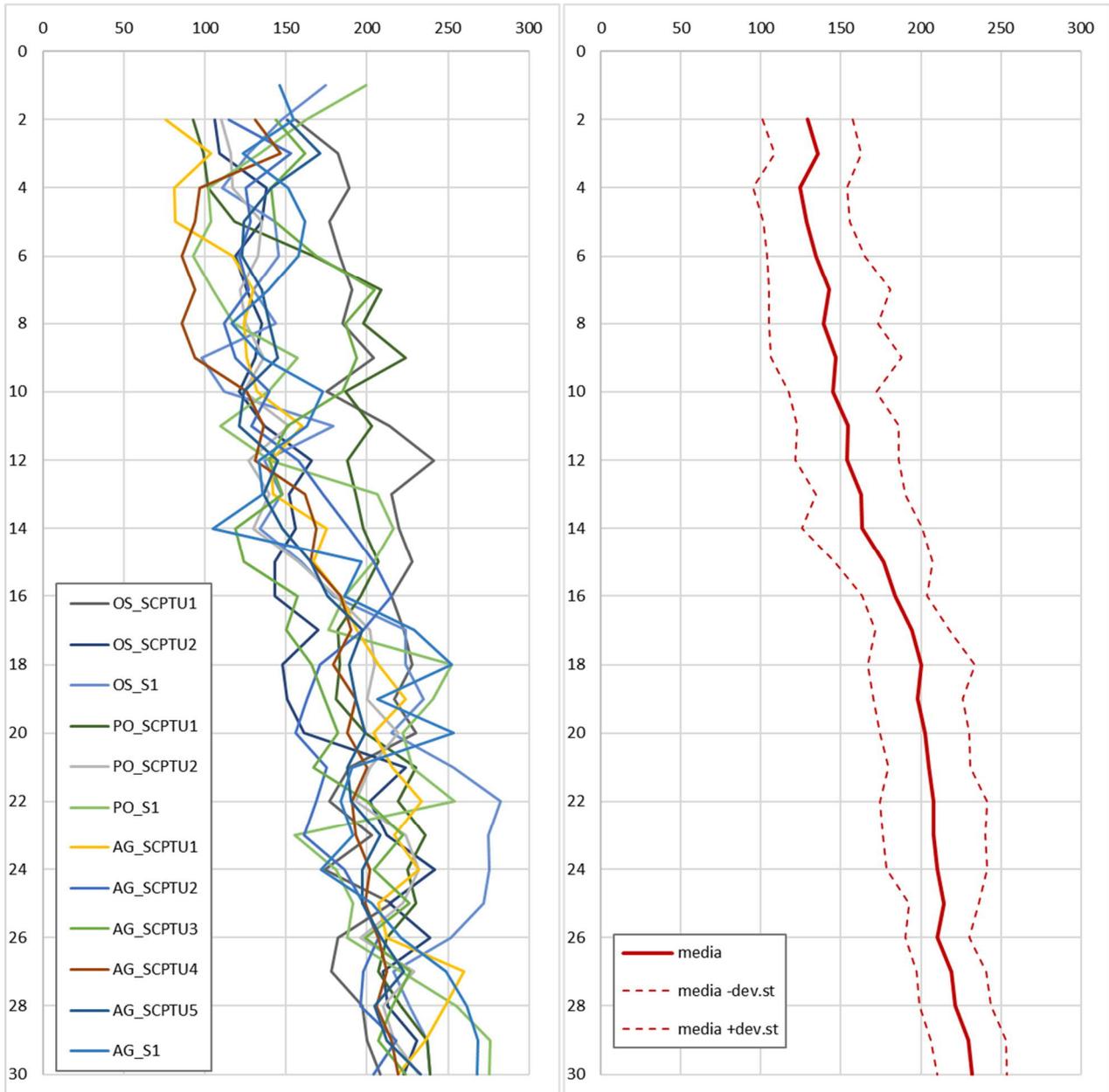


Fig. 7 - Valori di Vs misurati nelle prove DH e SCPTU (a sx tutti i valori, a dx media e deviazione standard)

Per poter valutare la velocità Vs tra la massima profondità raggiunta dalle indagini ed il *bedrock* sismico, è stata utilizzata una interpolazione del tratto misurato, mediante una funzione potenza del tipo $y=ax^b$. Sulla base della funzione ricavata per il tratto misurato si sono poi calcolati i valori di Vs fino alle profondità richieste (Fig. 8).

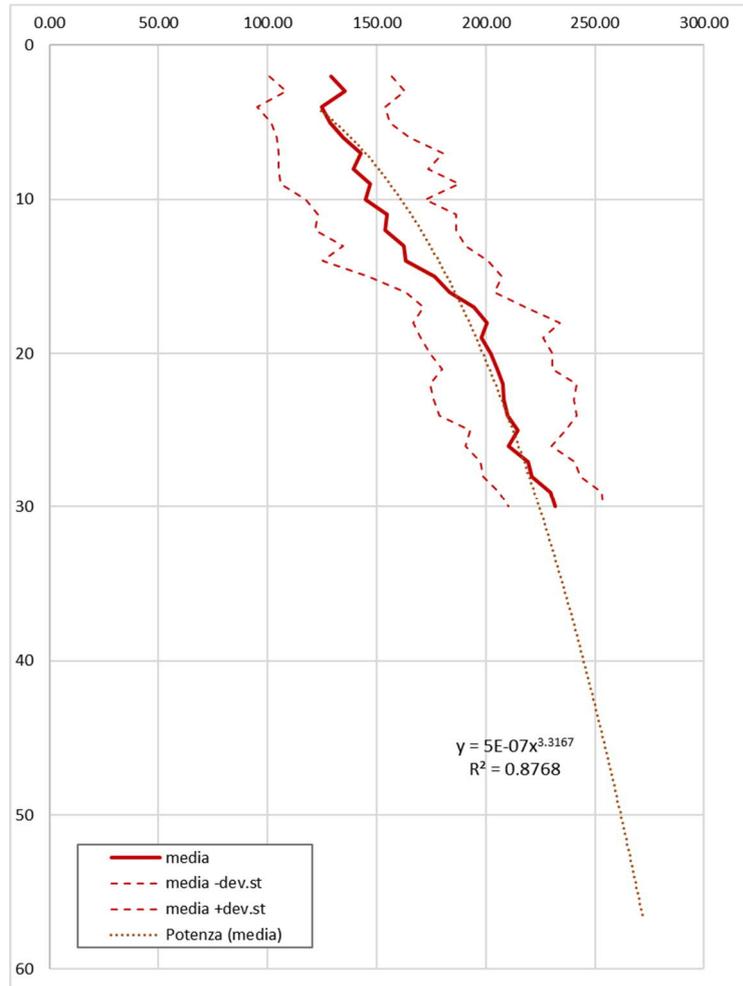


Fig. 8 - Stima della Vs a profondità maggiori di quelle misurate

La definizione della profondità del *bedrock* sismico è stata effettuata mediante un processo iterativo che ha tenuto conto della frequenza principale dei terreni registrata nel corso delle prove HVSR più prossime al sito di indagine (tratte dallo studio di 2° livello) e delle velocità media delle onde S.

Considerata, infatti, la relazione tra la frequenza, la profondità e la velocità delle onde S:

$$f = \frac{V_s}{4H}$$

dove:

f = frequenza del terreno

H = profondità

Vs = velocità delle onde S

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	22 di 110



è possibile ricostruire il grafico di Fig. 9, per velocità V_s crescenti. Nota la frequenza caratteristica del terreno (rappresentata con linee verticali in Fig. 9) e valutata la velocità media in funzione della profondità, mediante la Fig. 7, è possibile una prima stima della profondità della superficie risonante individuata dalle prove HVSR.

Va chiarito che tale superficie, in genere, come meglio illustrato in seguito, non costituisce il vero e proprio *bedrock*, in quanto non raggiunge mai la velocità di 800 m/s.

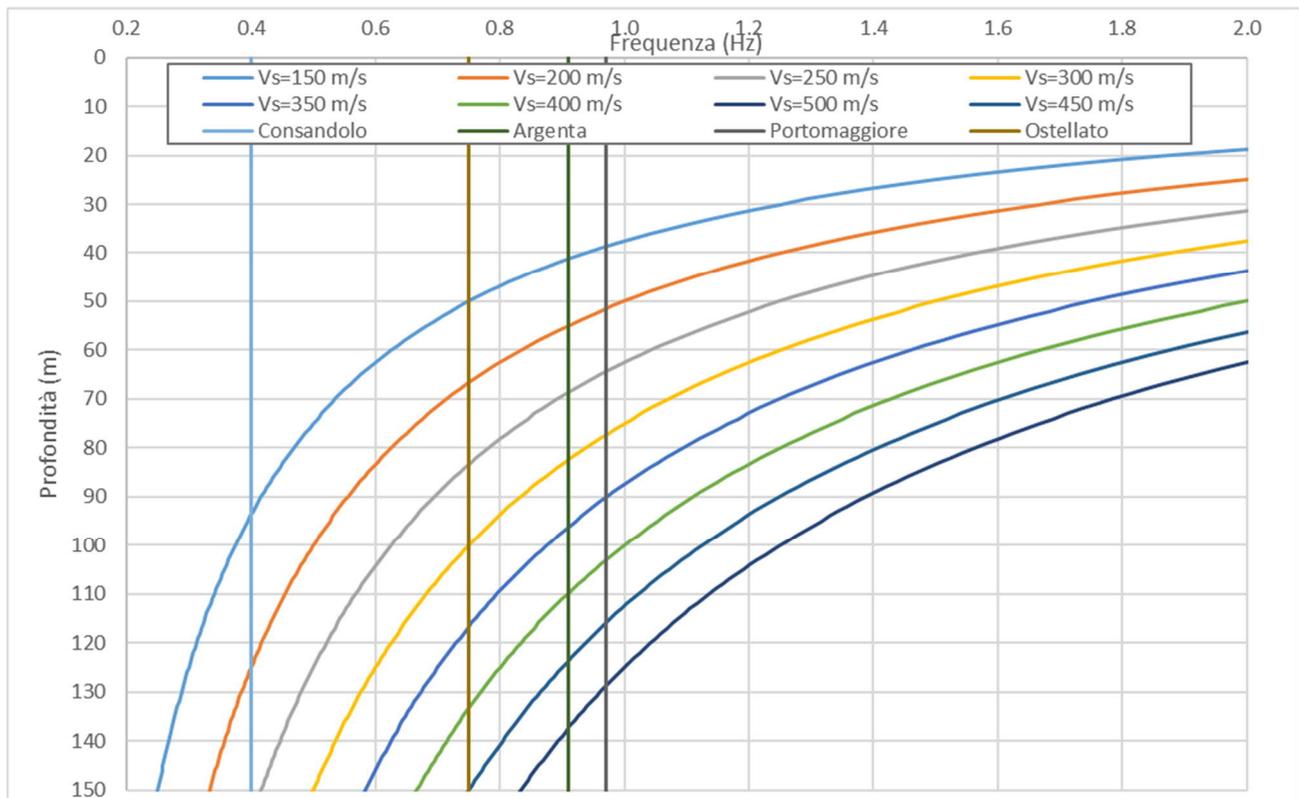


Fig. 9 - Curve frequenza-profondità tracciate per diverse velocità delle onde S

Mediante il processo sopra descritto si giunge alla discretizzazione della V_s in funzione della profondità, sinteticamente illustrata in Fig. 10 per il sito SCPTU2 di Ostellato.

Va chiarito che, una volta definito il modello da inserire nel programma di valutazione della RSL (cfr. § 3.3.4), la profondità del *bedrock* viene fatta variare, rispetto a quella calcolata con il metodo sopra descritto, in modo che la funzione di trasferimento dal *bedrock* alla superficie sia compatibile, almeno nella frequenza fondamentale, con la curva H/V registrata nelle prove HVSR.



In genere, tuttavia, si tratta di modifiche modeste, confermando la bontà del metodo adottato.

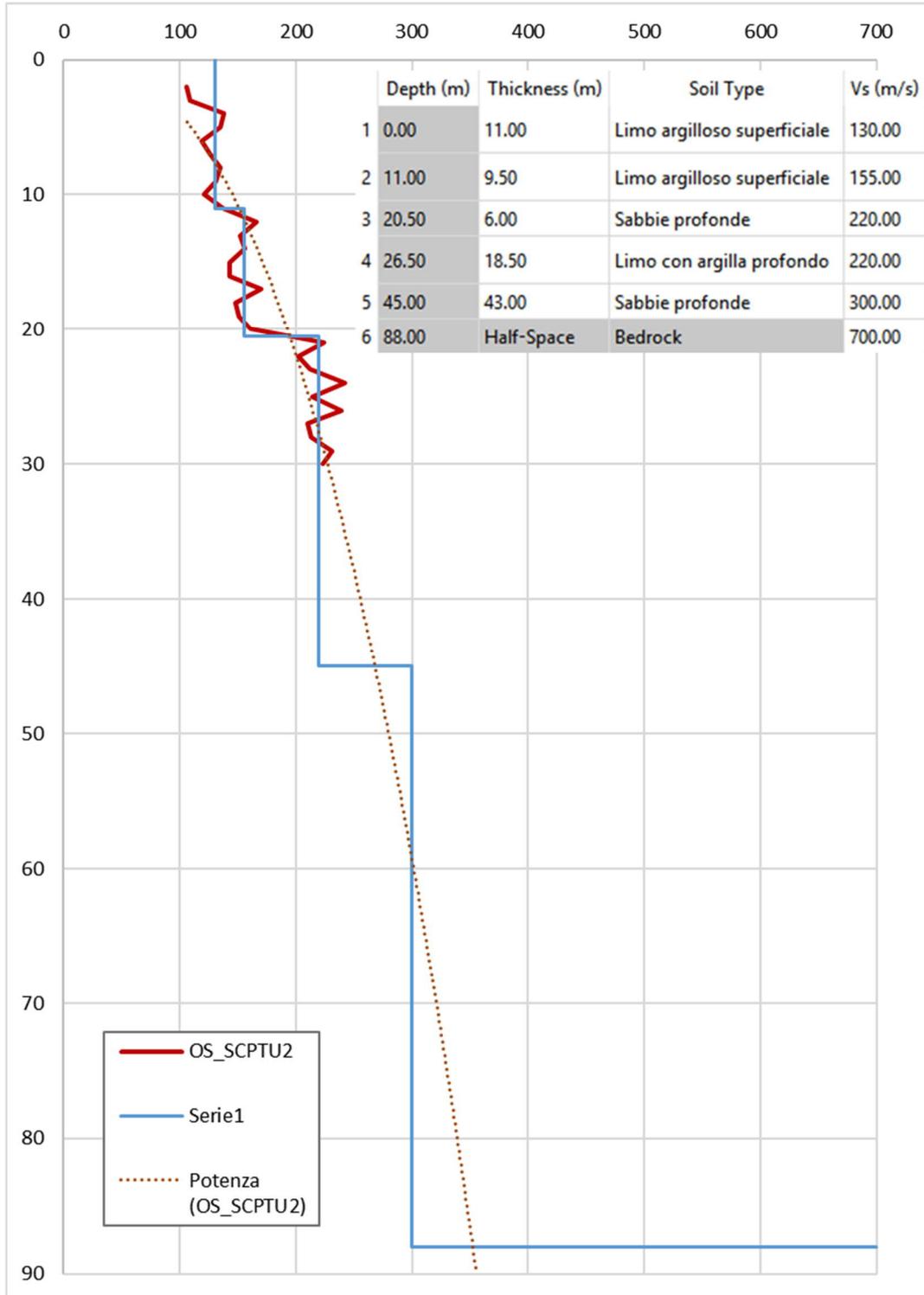


Fig. 10 - Esempio della discretizzazione della Vs per il sito Ostellato SCPTU2



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

In letteratura (Martelli et alii⁴, 2013 e Martelli et alii⁵, 2014) è indicato che "il maggiore contrasto di impedenza si ha in genere tra la base del sistema emiliano-romagnolo superiore (AES), datata tra 350.000 e 450.000 anni, e la base del subsistema AES6, datata circa 230.000-250.000 anni (RER e ENI-Agip, 1998)";

Nello studio di secondo livello è stata proposta una ricostruzione del profilo di velocità correlata ai principali limiti stratigrafici, per la sola zona di Consandolo, zona che presenta il massimo altro strutturale di tutto l'areale in studio.

In tale ricostruzione (riportata integralmente in Fig. 11), si evidenzia come la base del sub sistema AES6 (a profondità di oltre 100 m da p.c.), presenti una velocità V_s inferiore ai 500 m/s e che anche la base dell'AEI (ad oltre 250 m di profondità) presenti velocità inferiori a 700 m/s.

Il metodo utilizzato nel presente studio per la stima della prima superficie riflettente ha consentito di evidenziare, in genere, soltanto i contrasti più superficiali. Ciò lascia presumere che, a maggiori profondità, si possano avere altri contrasti d'impedenza, non evidenziati dalle indagini effettuate.

Tale incertezza, tuttavia, influenza poco il risultato della risposta sismica locale, visto che i periodi di interesse per la microzonazione sono compresi tra 0.1 e 1.5 s, pari a frequenze da 10 a 0.66 Hz. La frequenza di 0.4 Hz indicata come possibile bedrock nello studio di 2° livello risulta pertanto meno significativa di quelle più alte (e quindi riferite a discontinuità più superficiali).

⁴ L. Martelli, L. Calabrese, G. Ercolessi, P. Severi, G. Tarabusi, D. Pileggi, S. Rosselli, L. Minarelli, F. Pergalani, M. Compagnoni, G. Vannucchi, C. Madiari, J. Facciorusso, V. Fioravante, D. Giretti, M. Mucciarelli, E. Priolo, G. Laurenzano – (2014) Cartografia speditiva dell'amplificazione e del rischio di liquefazione nelle aree epicentrali del terremoto dell'Emilia 2012 (ML=5.9). Atti del 32 convegno GNGTS 2013

⁵ L. Martelli, P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tento, D. Gerosa, D. Albarello, F. Guerrini, E. Lunedei, D. Pileggi, F. Pergalani, M. Compagnoni, V. Fioravante e D. Giretti (2014) *Analysis of the local seismic hazard for the stability tests of the main bank of the Po River (northern Italy)*, Boll. Geof. Teor. Appl., 55, 119-134

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	25 di 110

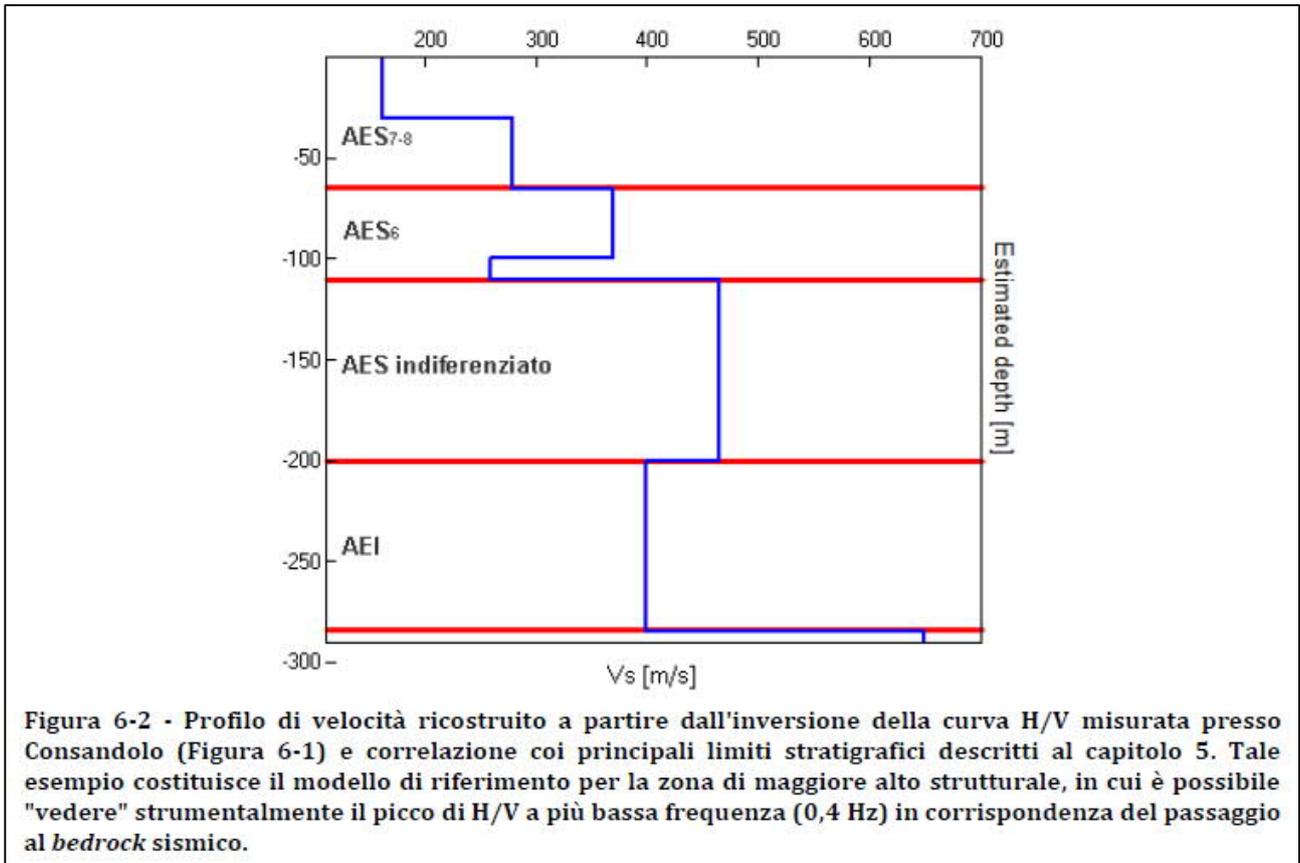


Fig. 11 - Considerazioni sul bedrock sismico riprese dallo studio di microzonazione sismica di II livello

3.3.3 Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G₀) 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/G₀) in funzione della deformazione di taglio γ , sono state realizzate 6 prove di laboratorio in colonna risonante sui campioni prelevati nel corso dei sondaggi.

Tali prove hanno fornito dati sperimentali (Fig. 12) che hanno consentito di definire le leggi di variazione dei parametri D e G/G₀ mediante il modello iperbolico di Yokota (1981).

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	26 di 110

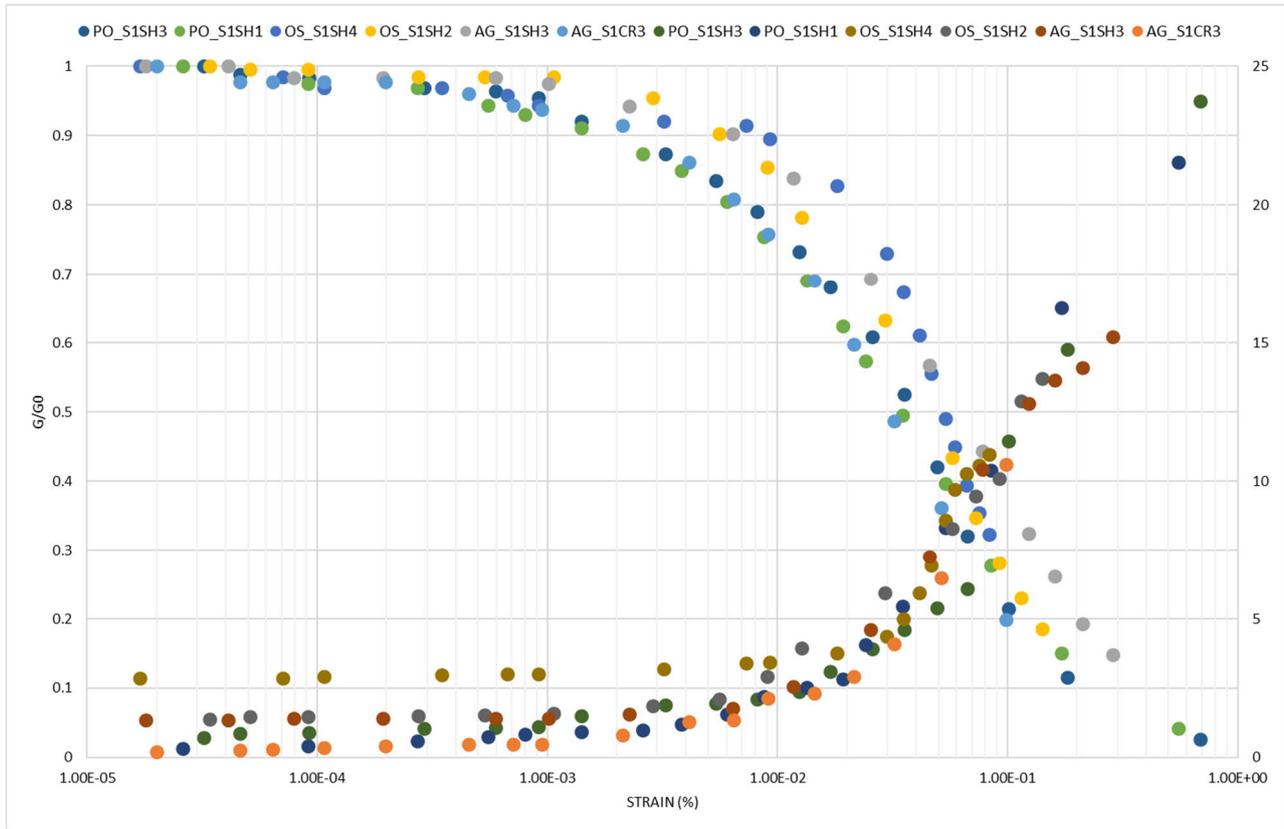


Fig. 12 - Dati sperimentali delle prove RC

Le leggi di variazione proposte da Yokota sono le seguenti:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha\gamma^\beta}$$

$$D = \eta e^{\left[-\lambda \frac{G}{G_0}\right]}$$

Dove:

G/G_0 = modulo di taglio normalizzato

D = rapporto di smorzamento

γ = deformazione di taglio

$\alpha, \beta, \eta, \lambda$ = parametri sperimentali del modello

Il fit dei dati sperimentali alle funzioni sopra descritte è stato effettuato con il metodo dei minimi quadrati (X^2).

In Fig. 13 è riportato un grafico esemplificativo della procedura di normalizzazione utilizzata per il campione S2SH2.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	27 di 110

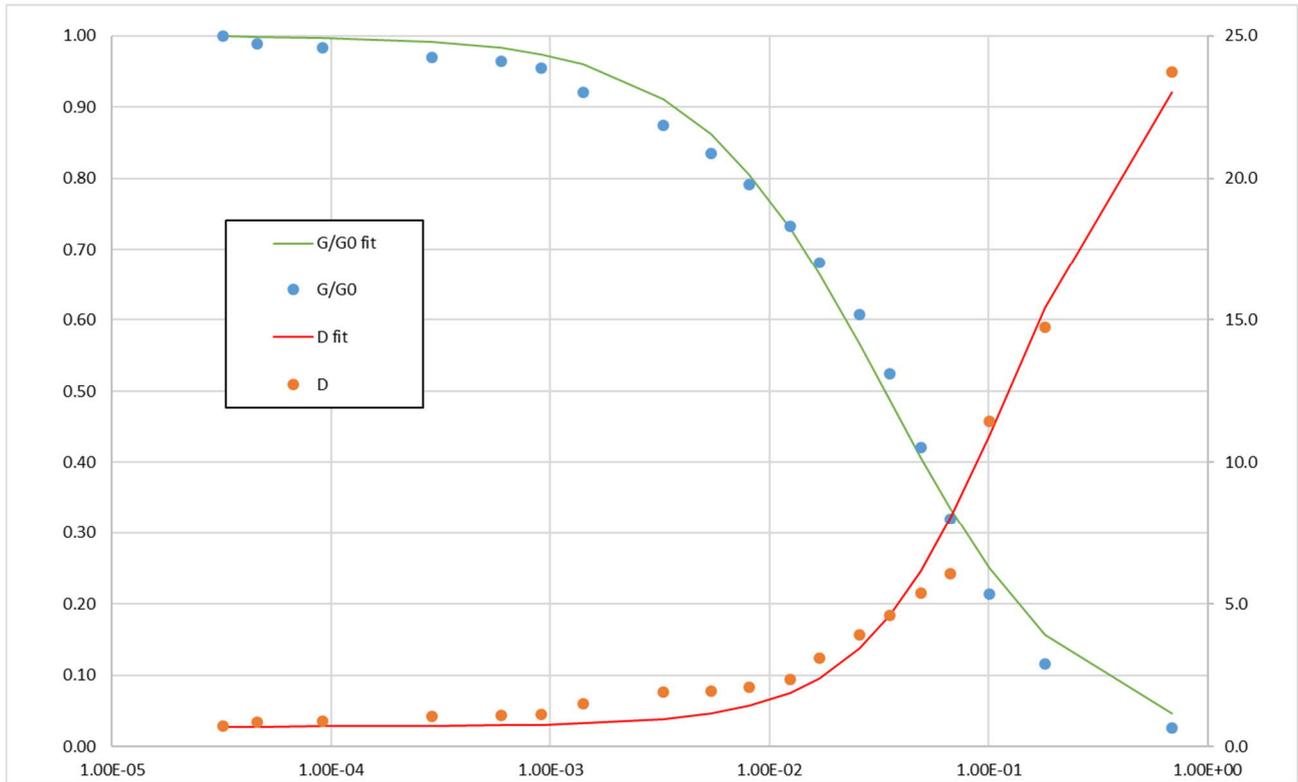


Fig. 13 - Grafico dei dati sperimentali e delle curve di interpolazione per il campione PO_S1SH3

Il riepilogo dei risultati delle analisi sismiche e relative normalizzazioni è riportato in Tab. 4, mentre in Tab. 5 sono riportati i valori delle proprietà indice di tutti i terreni analizzati.

La caratterizzazione di tutti i campioni prelevati è stata utilizzata per confronto al fine di verificare l'estensibilità delle prove RC ai diversi strati.

In Fig. 14 e Fig. 15 sono riportati i grafici delle curve di interpolazione per tutti i campioni.



Comune	Campione	Profondità	Litologia	Parametri curve G/G0 e D				
				G ₀	α	β	η	λ
Argenta	ARG-S1CR1	8.60-9.00	sabbia limosa	60.64	30.54	0.97	26.13	3.8
	ARG-S1SH3	12.00-12.60	limo con argilla	40.99	18.38	1.02	25.21	2.52
Ostellato	OST-S1SH2	16.70-17.30	limo argilloso	65.82	38.88	1.16	22.81	2.52
	OST-S1SH4	24.00-24.60	argilla limosa	68.41	82.79	1.5	23.25	2.12
Portomaggiore	PORT-S1SH1	6.00-6.60	sabbia medio fine limosa	42.65	20.53	0.87	29.07	3.51
	PORT-S1SH3	18.00-18.60	sabbia medio fine limosa	78.14	29.5	1	27.34	3.66

Tab. 4 - Riepilogo dei risultati della ricostruzione delle curve sperimentali

Camp.	Prof.	Litologia (AGI)	Valori indice						Granulometria (AGI)			
			W %	γ _{nat} Mg/m ³	γ _{sec} Mg/m ³	LL %	LP %	IP %	Ghiaia %	Sabbia %	Limo %	Argilla %
AG-S1H1	5.00-5.60	Limo argilloso	32.3	1.85	1.40	56	30	26	0.0	0.7	78.5	20.8
AG-S1H2	8.00-8.60	Limo argilloso	43.4	1.74	1.22	48	28	20	0.0	0.1	78.2	21.6
AG-S1CR1	8.60-9.00	Sabbia limosa (ricostituito)	19.8	2.05	1.71	n.d.	n.p.	n.d.	0.0	81.4		18.6
AG-S1SH3	12.00-12.60	Limo con argilla	44.5	1.77	1.23	57	32	25	0.0	0.4	72.2	27.3
OS-S1SH1	7.55-8.15	Argilla con limo e torba	78.8	1.46	0.81	80	71	19	0.0	1.2	47.1	51.7
OS-S1SH2	16.70-17.30	Limo argilloso	41.2	1.80	1.27	47	26	22	0.0	2.5	74.8	22.7
OS-S1SH3	21.00-21.60	Sabbia medio fine	28.3	1.87	1.45	n.d.	n.p.	n.d.	0.0	97.3		2.7
OS-S1SH4	24.00-24.60	Argilla limosa	23.1	2.04	1.65	58	25	33	0.0	0.4	57.5	42.1
PO-S1SH1	6.00-6.60	Sabbia medio fine limosa	31.4	1.89	1.44	n.d.	n.p.	n.d.	0.0	72.7	24.8	2.5
PO-S1SH2	13.00-13.60	Sabbia medio fine	30.3	1.94	1.49	n.d.	n.p.	n.d.	0.0	92.8		7.2
PO-S1SH3	18.00-18.60	Sabbia medio fine limosa	25.9	1.86	1.48	n.d.	n.p.	n.d.	0.0	87.8		12.2
PO-S1SH4	22.55-23.15	Limo con sabbia	30.8	1.90	1.45	n.d.	n.p.	n.d.	0.0	24.3	70.7	4.9

Tab. 5 - Riepilogo delle proprietà indice dei terreni analizzati

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	29 di 110

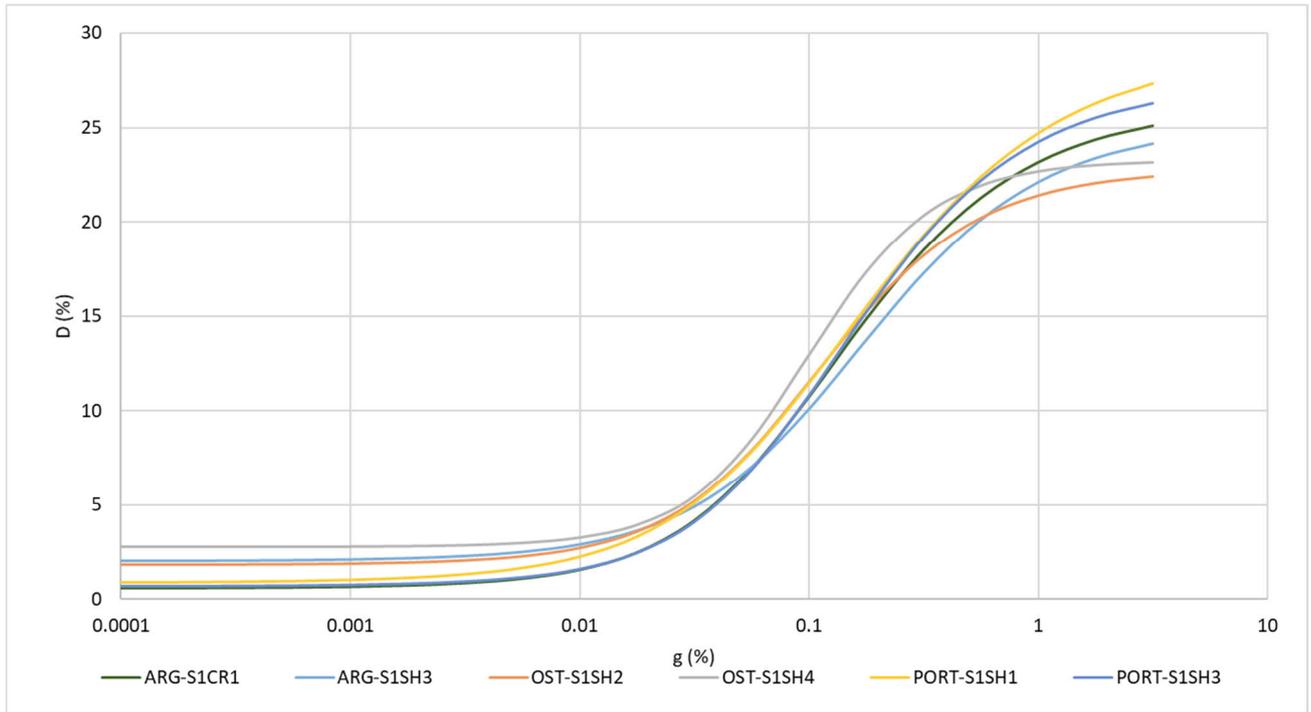


Fig. 14 - Grafico delle curve di interpolazione dello smorzamento (D) in funzione della deformazione

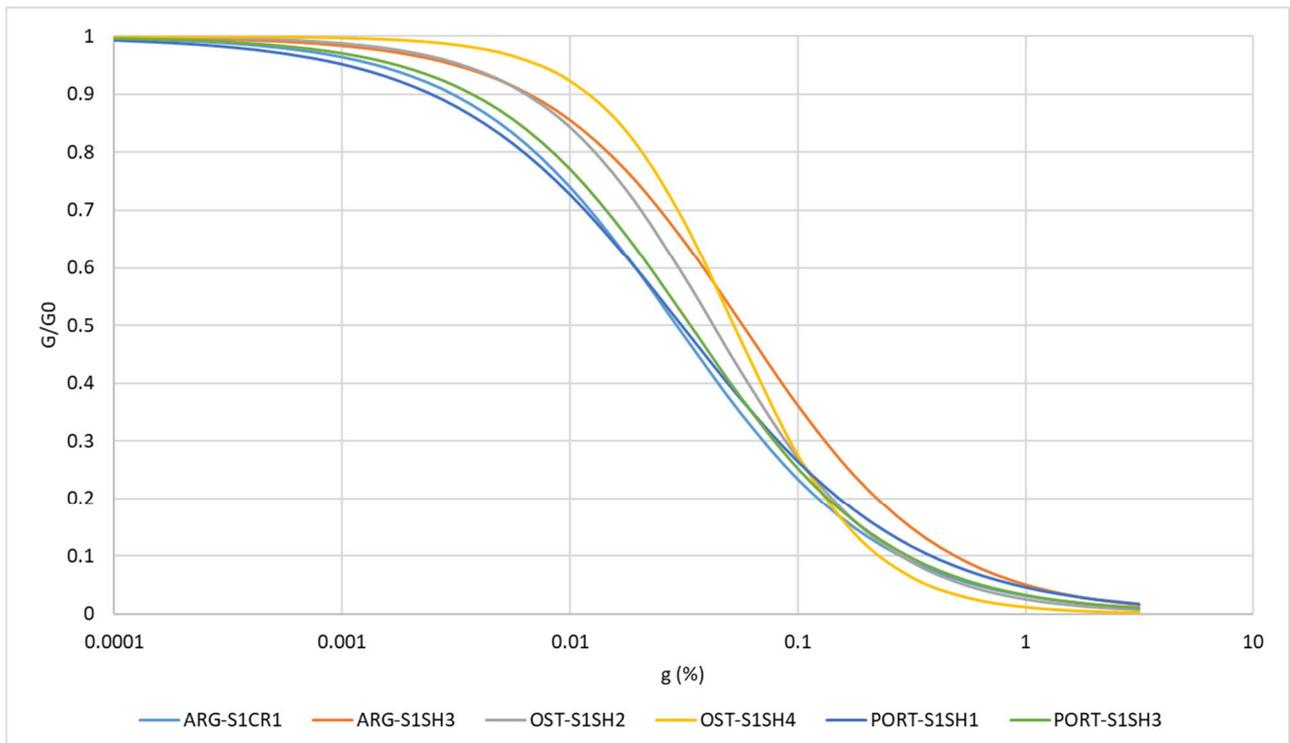


Fig. 15 - Grafico delle curve di interpolazione della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione



3.3.4 Codice di calcolo per la valutazione della RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo Strata⁶ sviluppato da A. Kottke e E. Rathje⁷. Validazioni indipendenti di Strata sono riportate in letteratura (Graizer⁸, 2001), con esito soddisfacente.

Strata calcola la risposta dinamica monodimensionale (1D) di una colonna di terreno utilizzando un modello di propagazione lineare delle onde, con proprietà dinamiche del terreno (proprietà elastiche e smorzamento) variabili in funzione del livello deformativo.

Il programma adotta le seguenti convenzioni:

- La risposta del deposito è causata da onde di taglio polarizzate orizzontalmente che si propagano verticalmente nel *bedrock* verso la superficie lungo una colonna verticale monodimensionale di terreno;
- Le superfici di stratificazione sono orizzontali;
- Le superfici del *bedrock* e delle stratificazioni si estendono lateralmente all'infinito;
- La stratificazione è lateralmente omogenea;
- La superficie topografica è priva di irregolarità.

La valutazione della RSL è stata effettuata utilizzando il modello "lineare equivalente" (EQL), che considera la variazione dei parametri di rigidità e smorzamento dei terreni in funzione della deformazione indotta dal sisma.

3.3.5 Risultati della modellazione numerica

I risultati della analisi condotte con il codice STRATA, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire, per ciascun sito:

- La funzione di trasferimento del segnale sismico dal *bedrock* alla superficie;
- Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA - di cui in Fig. 16 si riporta un esempio), da cui è stato derivato, mediante la formula $PSV(Ti) = Ti * PSA(Ti) / 2\pi$, lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità (PSV di cui in Fig. 17 si riporta un esempio); gli spettri rappresentati sono ottenuti come mediana dei valori degli spettri di tutti i segnali sismici in output.

⁶ Ellen M. Rathje; Albert Kottke (2010), "Strata," <https://nees.org/resources/strata>.

⁷ Kottke, Albert R., and Rathje, Ellen M. (2008) Technical Manual for Strata. PEER Report 2008/10. University of California, Berkeley, California

⁸ Treasure island geotechnical array - case study for site response analysis. 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion August 23-26, 2011 · University of California Santa Barbara

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	31 di 110



- La curva di variazione dell'accelerazione con la profondità (di cui in Fig. 18si riporta un esempio);
- Il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (F_{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 (cfr. Fig. 6). In sostanza viene calcolato il rapporto degli indici di Housner negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s, per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido). I rapporti risultano pertanto:

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

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

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

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

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

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

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

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

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	32 di 110

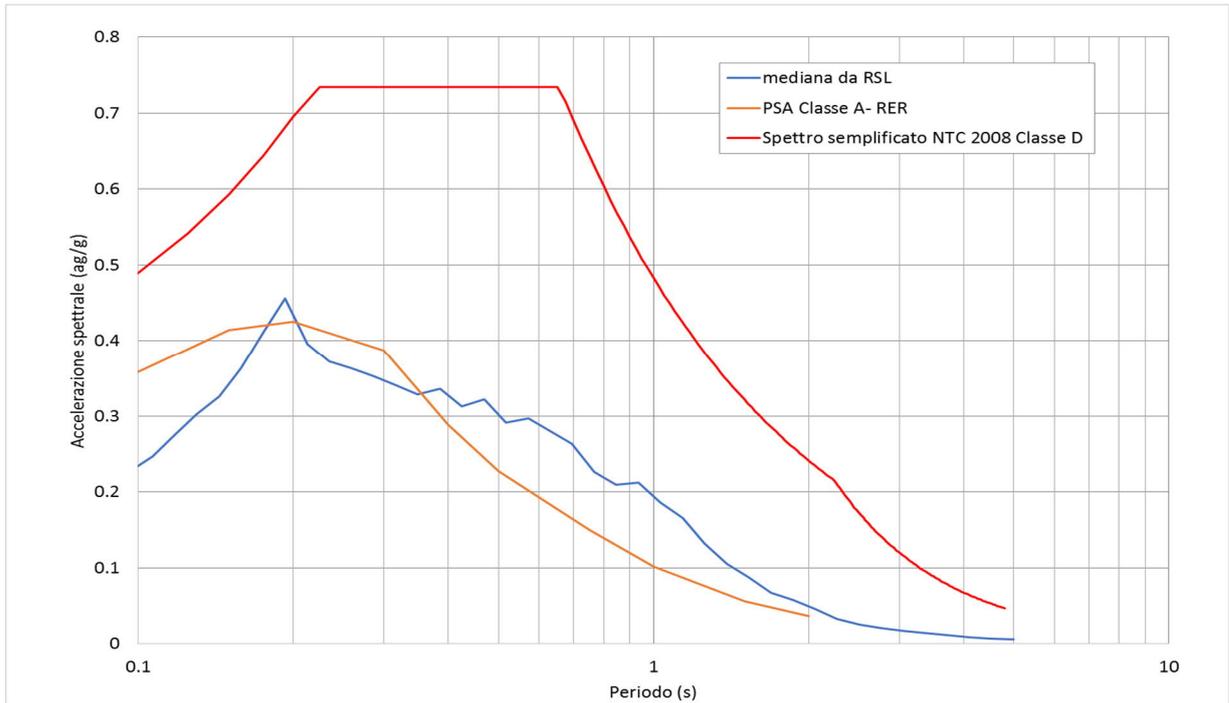


Fig. 16 - Spettro elastico in accelerazione per il sito S1 Argenta

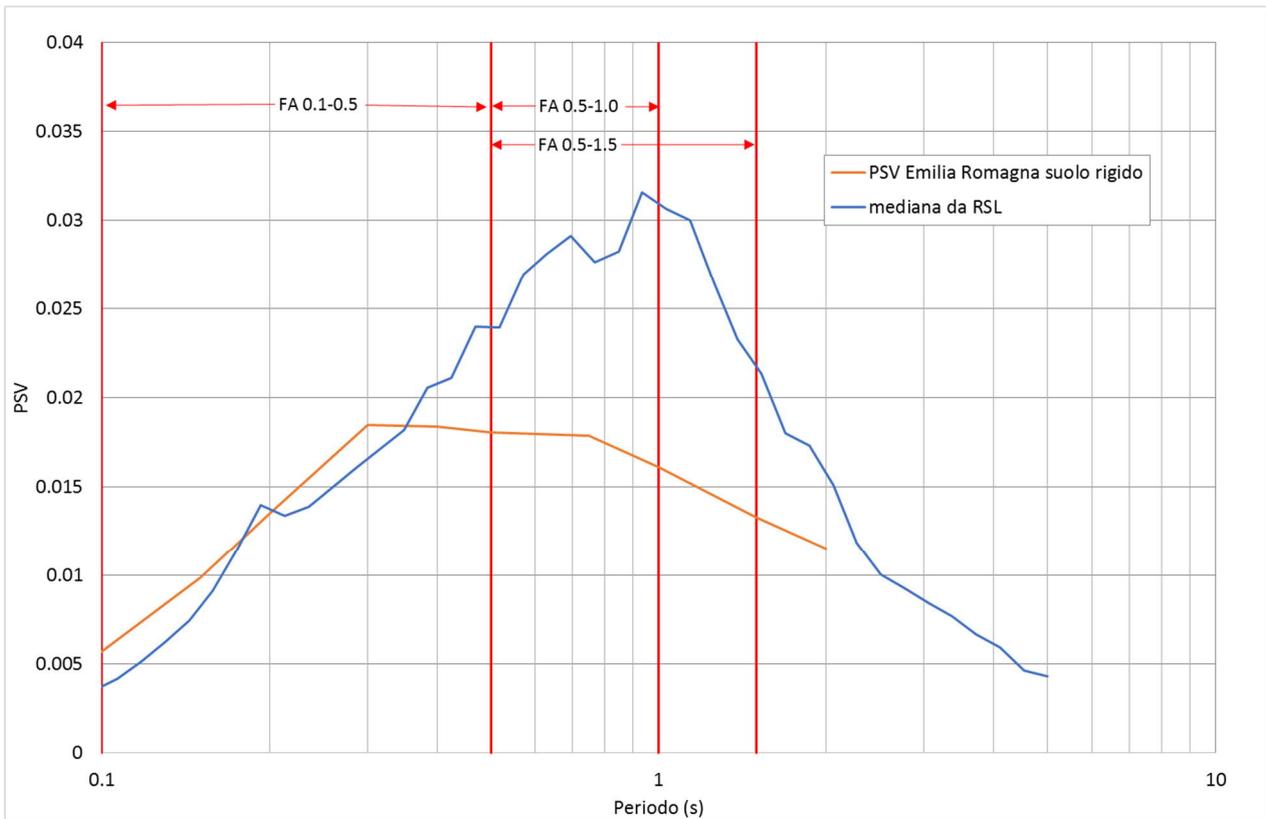




Fig. 17 - Spettro elastico in velocità per il sito S1 Argenta con indicazione dei campi di integrazione per il calcolo dei diversi FA_{IS}

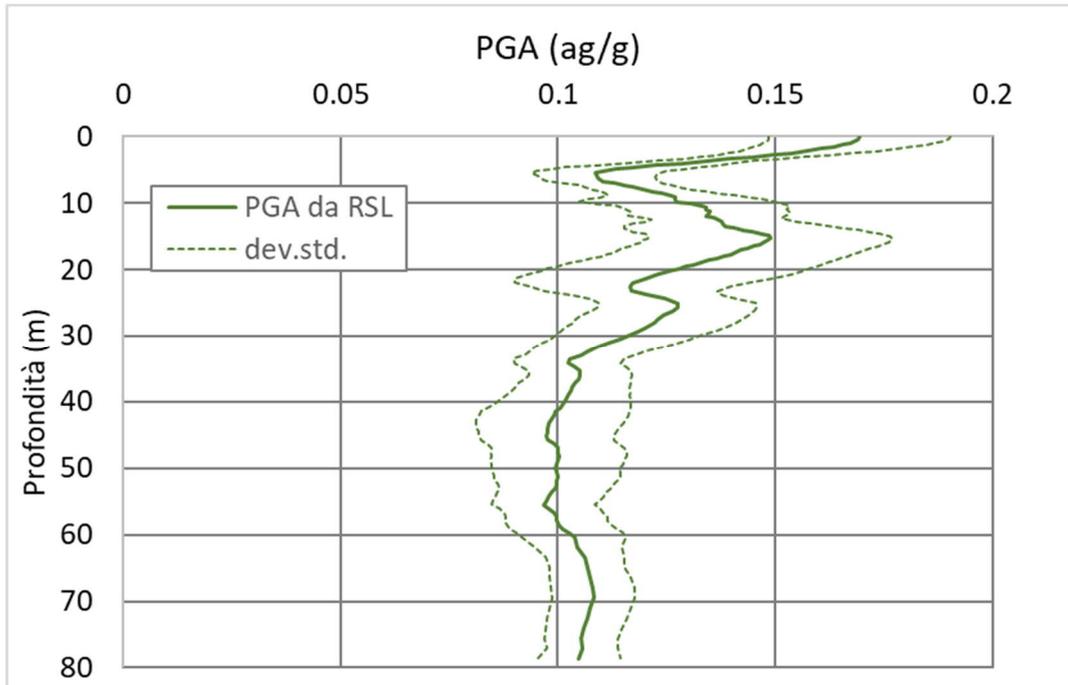


Fig. 18 - Variazione dell'accelerazione con la profondità per il sito S1 Argenta

3.3.6 Ciclic stress ratio

Il programma Strata fornisce un ulteriore elemento di notevole interesse per le verifiche sismiche, ed in particolare per le verifiche a liquefazione e cioè lo sforzo ciclico di taglio (*cyclic stress ratio* CSR).

Lo sforzo ciclico di taglio viene utilizzato nei programmi di verifica a liquefazione ed in genere, in assenza della RSL, viene valutato mediante l'espressione semplificata:

$$CSR = 0,65 \frac{a_g}{g} S \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \frac{r_d}{MSF}$$

dove:

- S è il coefficiente di profilo stratigrafico, definito in Tab. 6,
- MSF è il fattore correttivo per la magnitudo definito in Tab. 7.
- r_d è il fattore correttivo per la profondità calcolato con la formula r_d = 1 - 0,015z.



Categoria suolo	Spettri di Tipo 1 S ($M > 5,5$)	Spettri di Tipo 2 S ($M \leq 5,5$)
A	1,00	1,00
B	1,20	1,35
C	1,15	1,50
D	1,35	1,80
E	1,40	1,60

Tab. 6 - Coefficiente del profilo stratigrafico

Magnitudo	Seed H. B. & Idriss I. M. (1982)
5.2	1.75
5.5	1.43
6.0	1.32
6.5	1.19
7.0	1.08
7.5	1.00
8.0	0.94
8.5	0.89

Tab. 7 - Fattore correttivo MSF

Il programma Strata fornisce invece direttamente il valore di CSR in funzione della profondità. Il valore di CSR da RSL fornisce una valutazione del rischio di liquefazione sicuramente più affidabile, per i siti in analisi.

Dalla Fig. 19 risulta evidente, infatti, come il valore di CSR nei primi metri sia molto superiore a quello calcolato in automatico a parità di PGA sia calcolata con la RSL, sia calcolata sulla base delle NTC 2008 utilizzando la adeguata categoria di sottosuolo.

In Fig. 19 (a sinistra) viene presentato il confronto tra la CRS calcolata con i diversi metodi per la prova SCPTU1 a Portomaggiore. La risposta sismica locale, in questo caso, ha fornito una PGA molto simile a quella calcolata con le NTC (a_{max} da RSL 0.216 g, a_{max} da NTC 0.211 g). La CSR calcolata in automatico dal programma in entrambi i casi è fortemente sottostimata rispetto a quella calcolata con Strata fino ad una profondità di circa 12 m.

La figura a destra è invece riferita alla prova SCPTU 2 a Ostellato. In questo caso il valore di a_{max} derivante dalla RSL ($a_{max} = 0.130$ g) è molto inferiore a quello calcolato con le NTC ($a_{max} = 0.203$ g). Anche in questo caso la CSR calcolata con metodi "automatici" dal programma appare sottostimata.

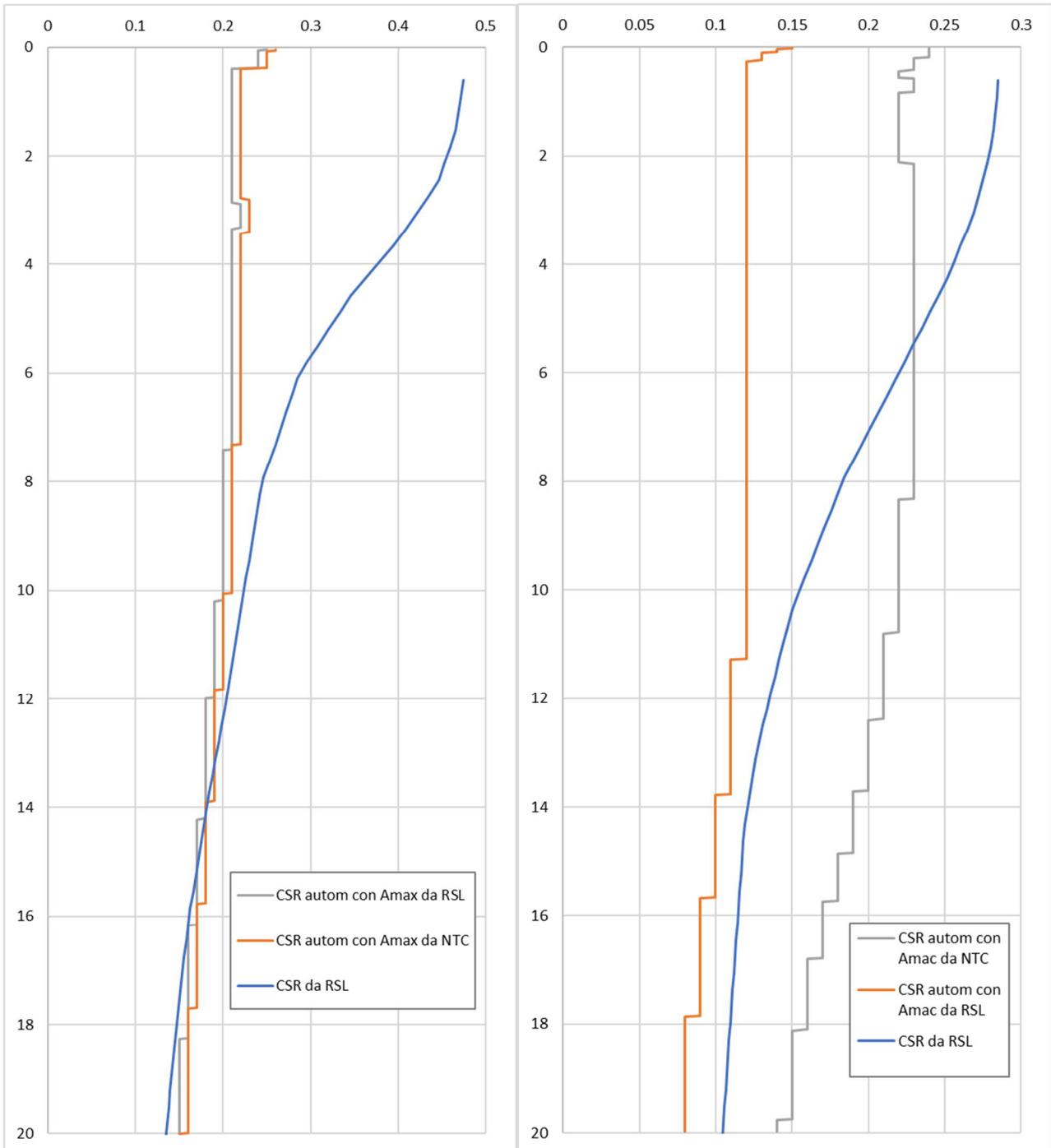


Fig. 19 - Confronto tra il valore di CSR calcolato in automatico (Cliq) e quello calcolato mediante RSL per i siti di Portomaggiore (SCPTU1) (a sx) e Ostellato (SCPTU2) (a dx)



3.4 RSL nei diversi siti

Di seguito vengono sinteticamente riportati i risultati delle analisi di risposta sismica locale per tutti i 12 siti indagati con tale metodologia. Dapprima si fornisce la rappresentazione sintetica del modello sismostratigrafico adottato e quindi vengono rappresentati:

- Il grafico dello spettro elastico in accelerazione da RSL confrontato con quello semplificato derivato dalle NTC per la categoria di sottosuolo corrispondente e con lo spettro su suolo rigido fornito dalla Regione Emilia Romagna.
- Il grafico dello spettro elastico in velocità da RSL confrontato con quello su suolo rigido fornito dalla Regione Emilia Romagna.
- Il grafico della variazione dell'accelerazione con la profondità.
- La tabella con i vari fattori di amplificazione calcolati, confrontati con i corrispondenti valori calcolati nello studio di microzonazione di 2° livello.

3.4.1 RSL per il sito di Argenta S1

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Argille sup.	9	9	18.0	150	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie sup.	3	12	19.5	160	30.54	0.97	26.13	3.80
Argille prof.	3	15	19.0	130	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	2	17	19.0	198	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie prof.	4	21	20.0	230	29.50	1.00	27.34	3.66
Argille prof.	4	25	19.0	185	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	10	35	19.0	270	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	43	78	19.0	370	18.38	1.02	25.21	2.52
Bedrock			24.0	500				

Tab. 8 - Modello geofisico

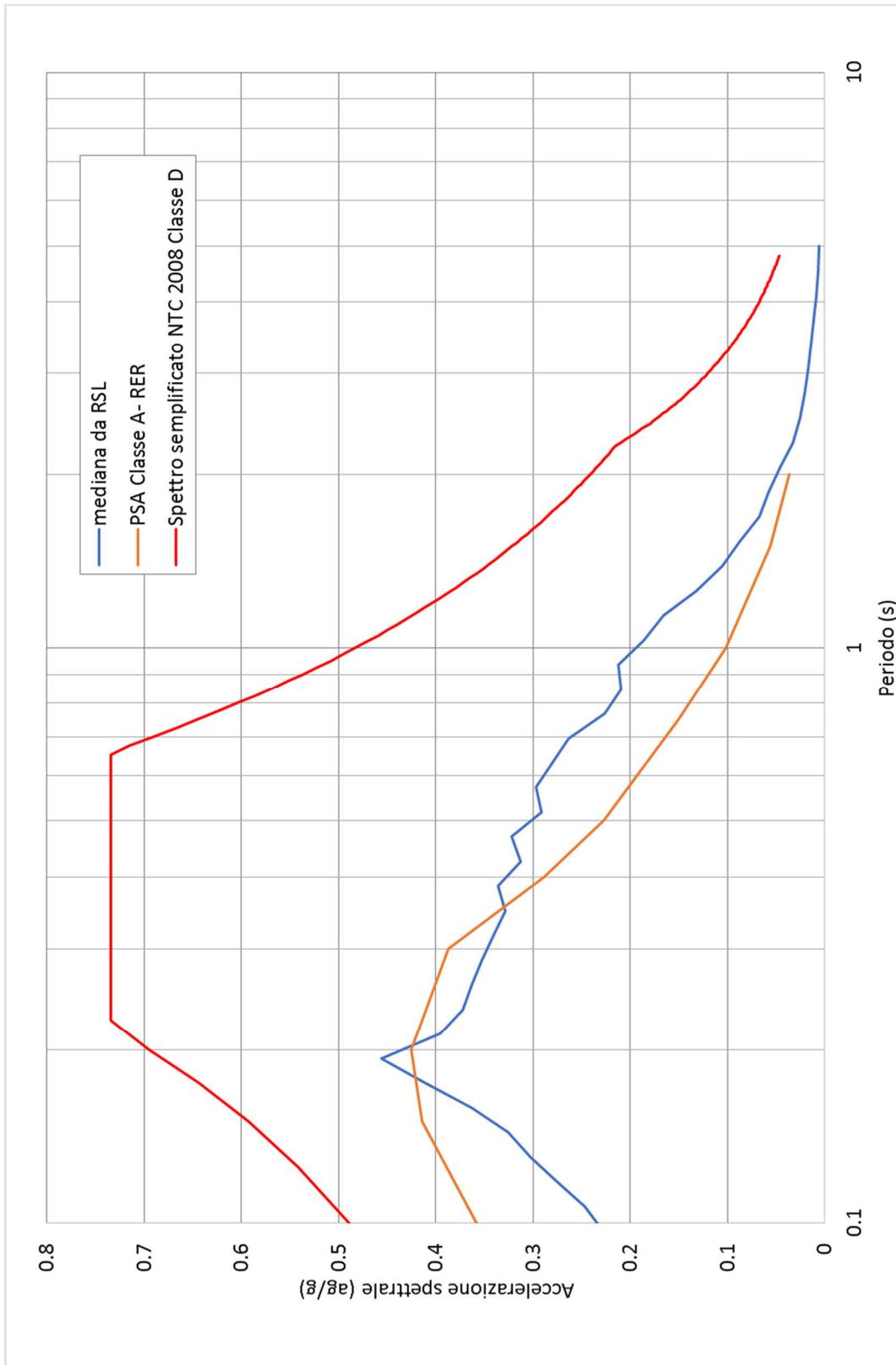


Fig. 20 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

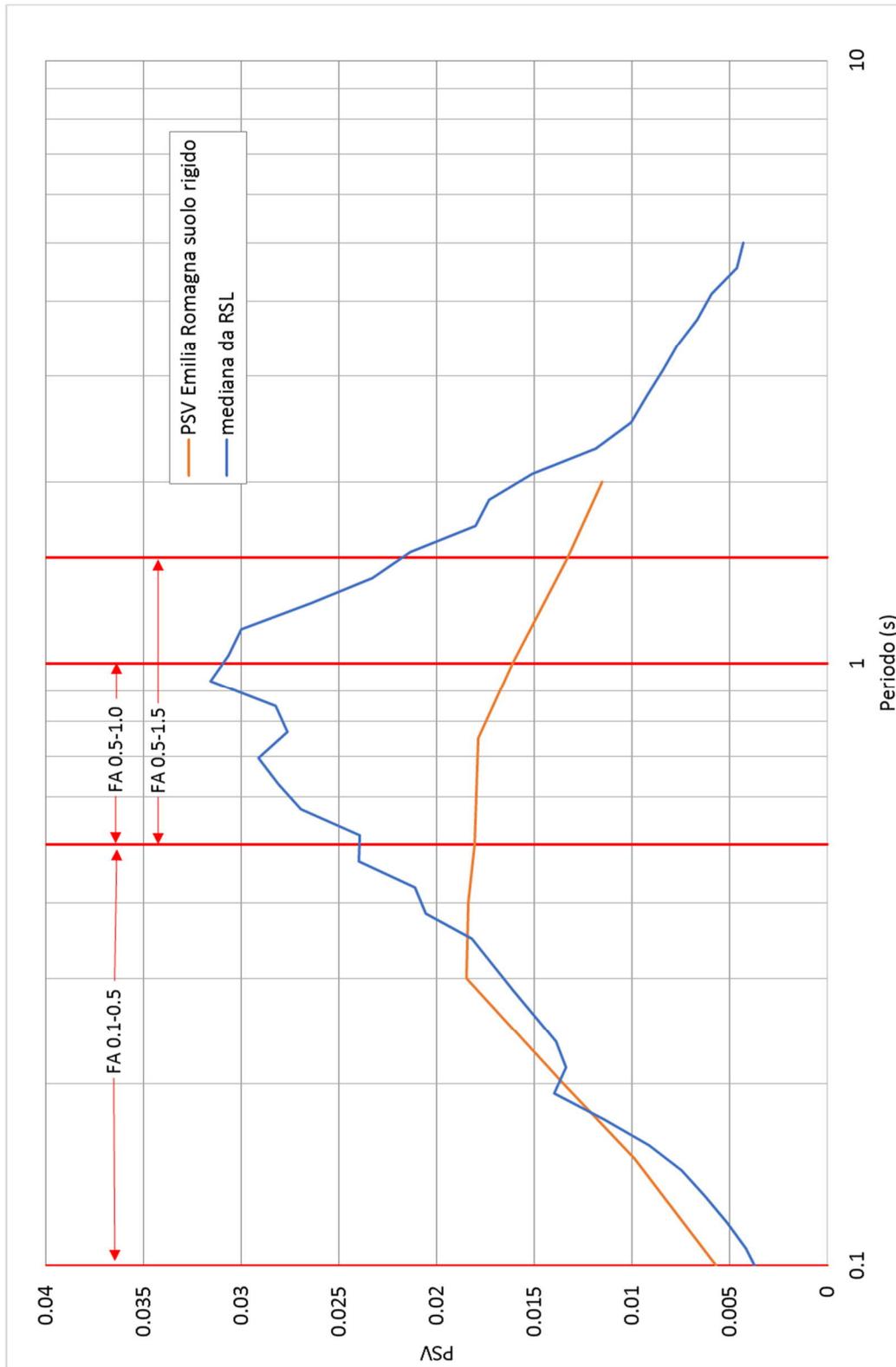


Fig. 21 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

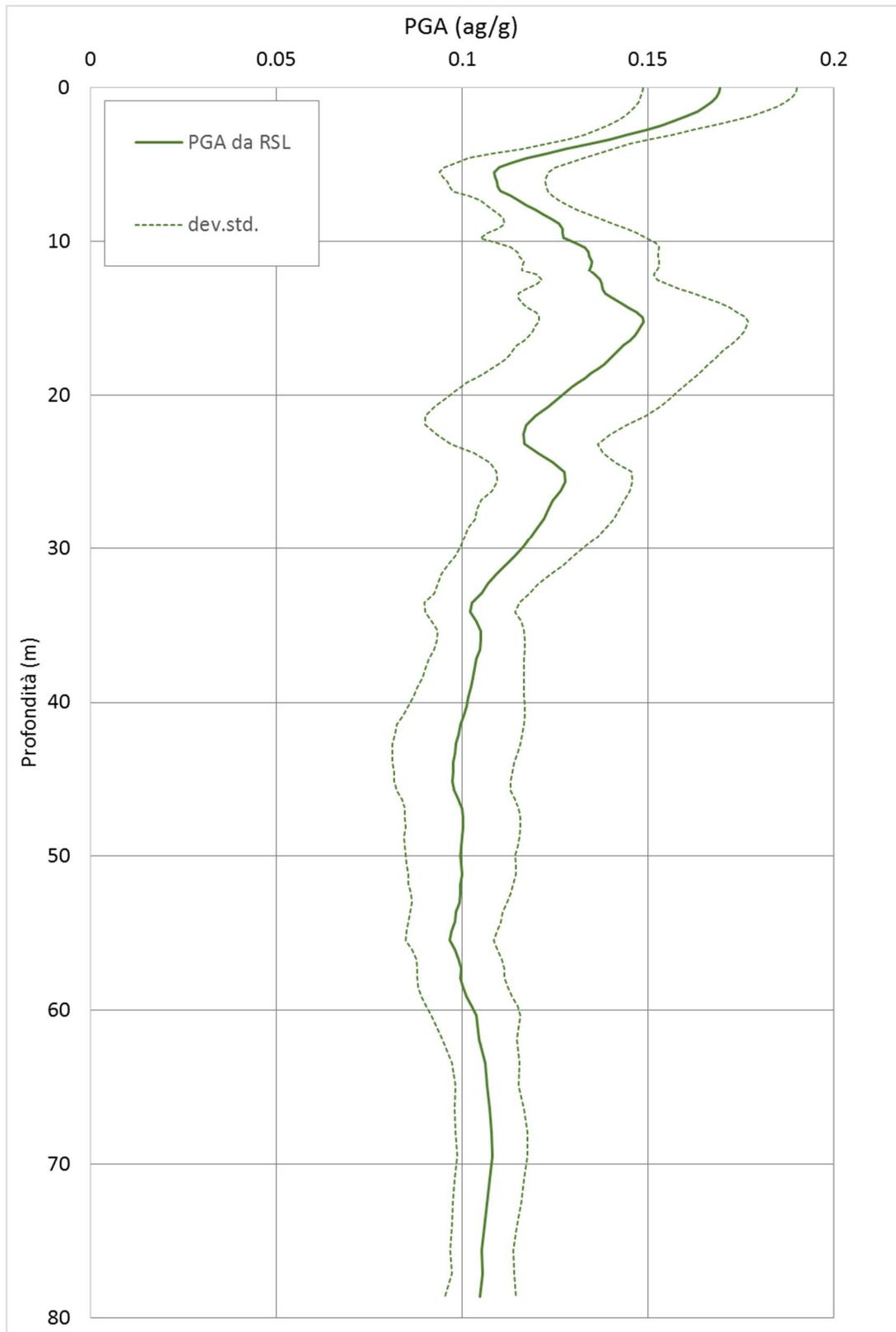


Fig. 22 - Variazione dell'accelerazione con la profondità



	RSL	DAL 112/2007
$FA_{SA\ 0.1-0.5s}$	1.22	
$FA_{SA\ 0.4-0.8s}$	1.68	
$FA_{SA\ 0.5-1.5s}$	1.75	
$FA_{SA\ 0.7-1.1s}$	1.87	
FA_{PGA}	1.08	1.50
$FH_{IS\ 0.1-0.5s}$	1.04	1.80
$FH_{IS\ 0.5-1.0s}$	1.70	2.50
$FH_{IS\ 0.5-1.5s}$	1.73	

Tab. 9 - Argenta S1- fattori di amplificazione

3.4.2 RSL per il sito di Argenta SCPTU1

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Argille sup.	6	6	18.0	90	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie sup.	5	11	19.5	130	30.54	0.97	26.13	3.80
Argille prof.	3	14	19.0	150	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie prof.	3	17	20.0	180	29.50	1.00	27.34	3.66
Argille prof.	20	37	19.0	220	18.38	1.02	25.21	2.52
Bedrock			24.0	500				

Tab. 10 - Modello geofisico

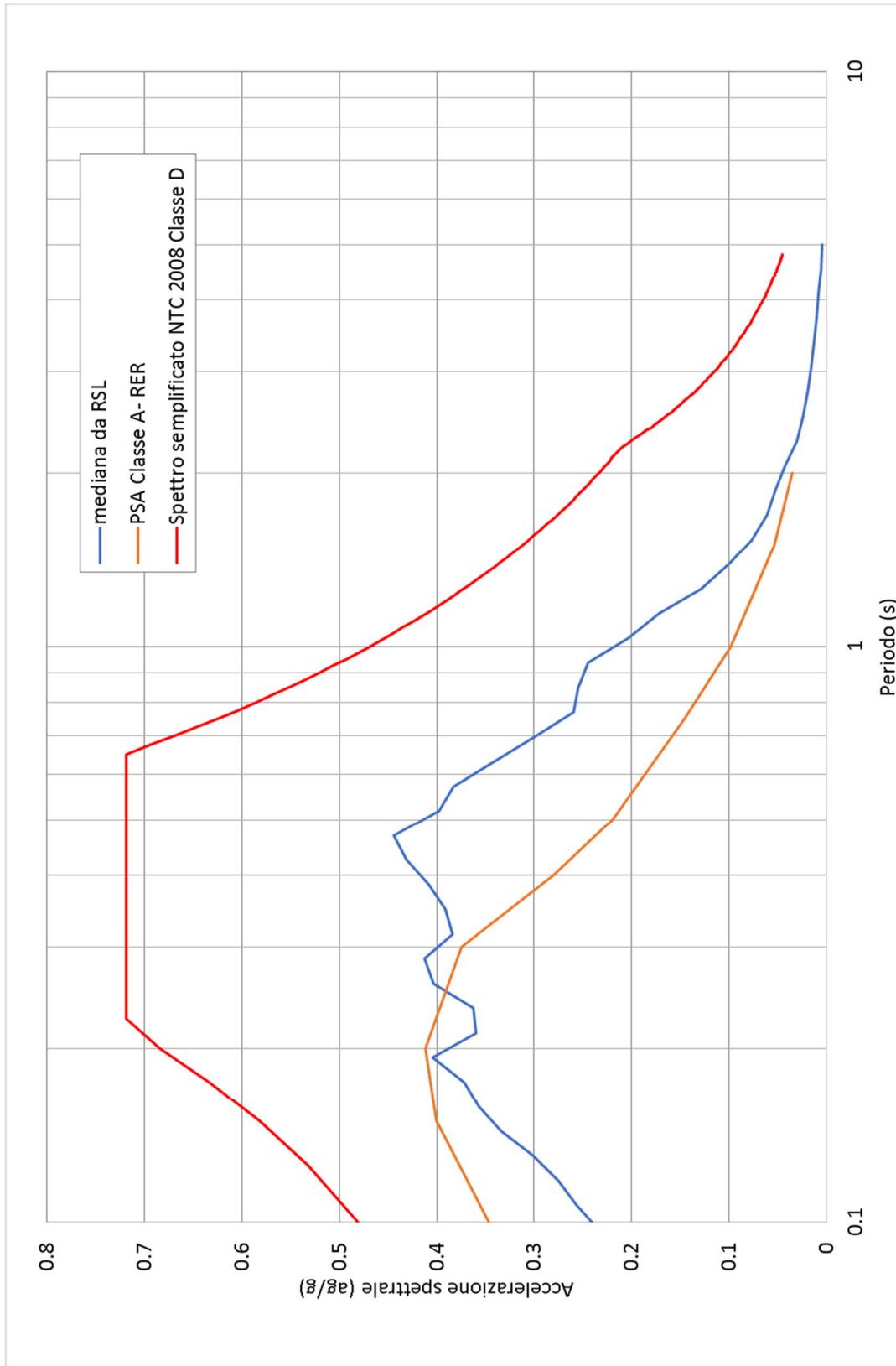


Fig. 23 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	42 di 110

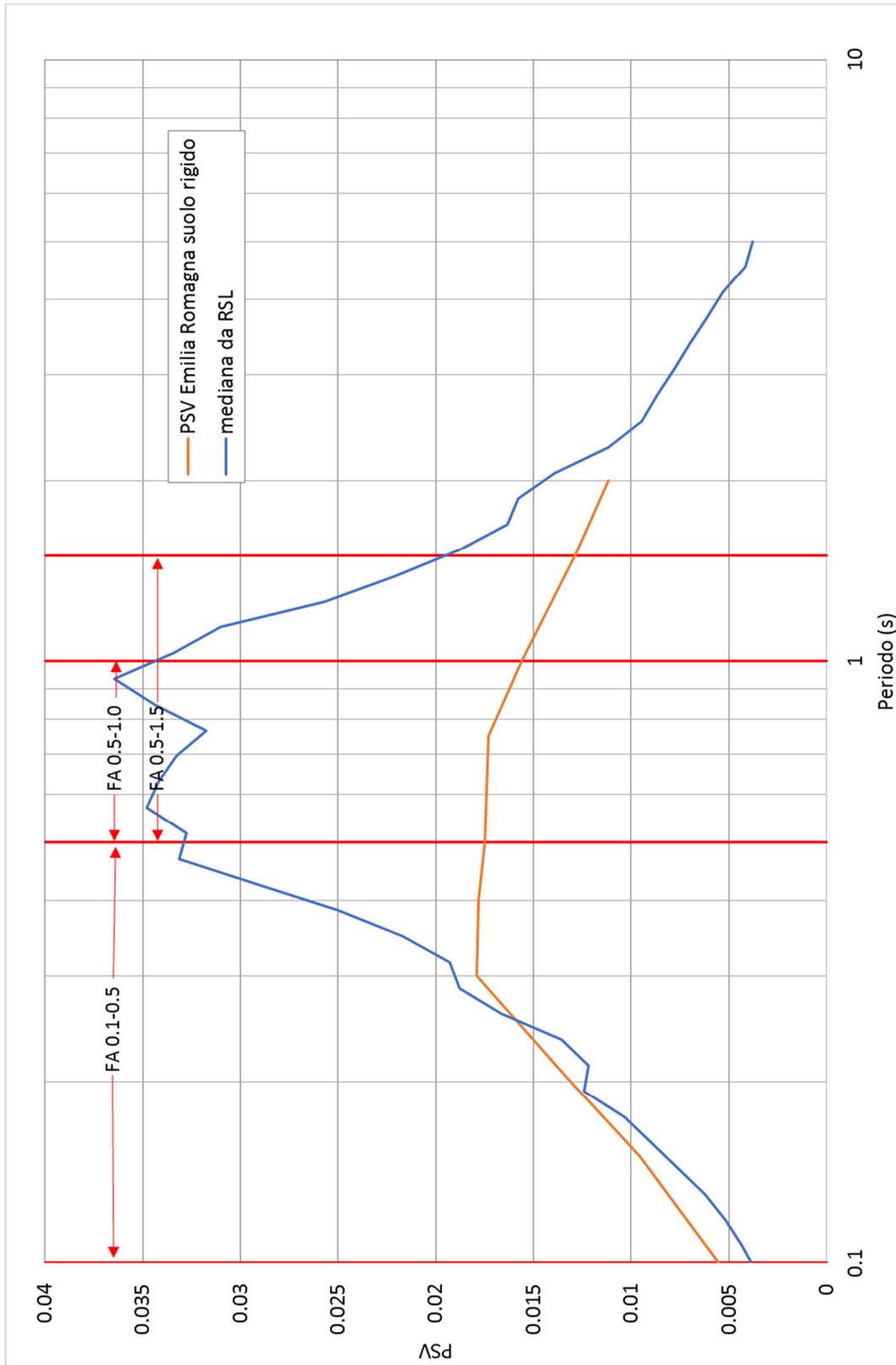


Fig. 24 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	43 di 110

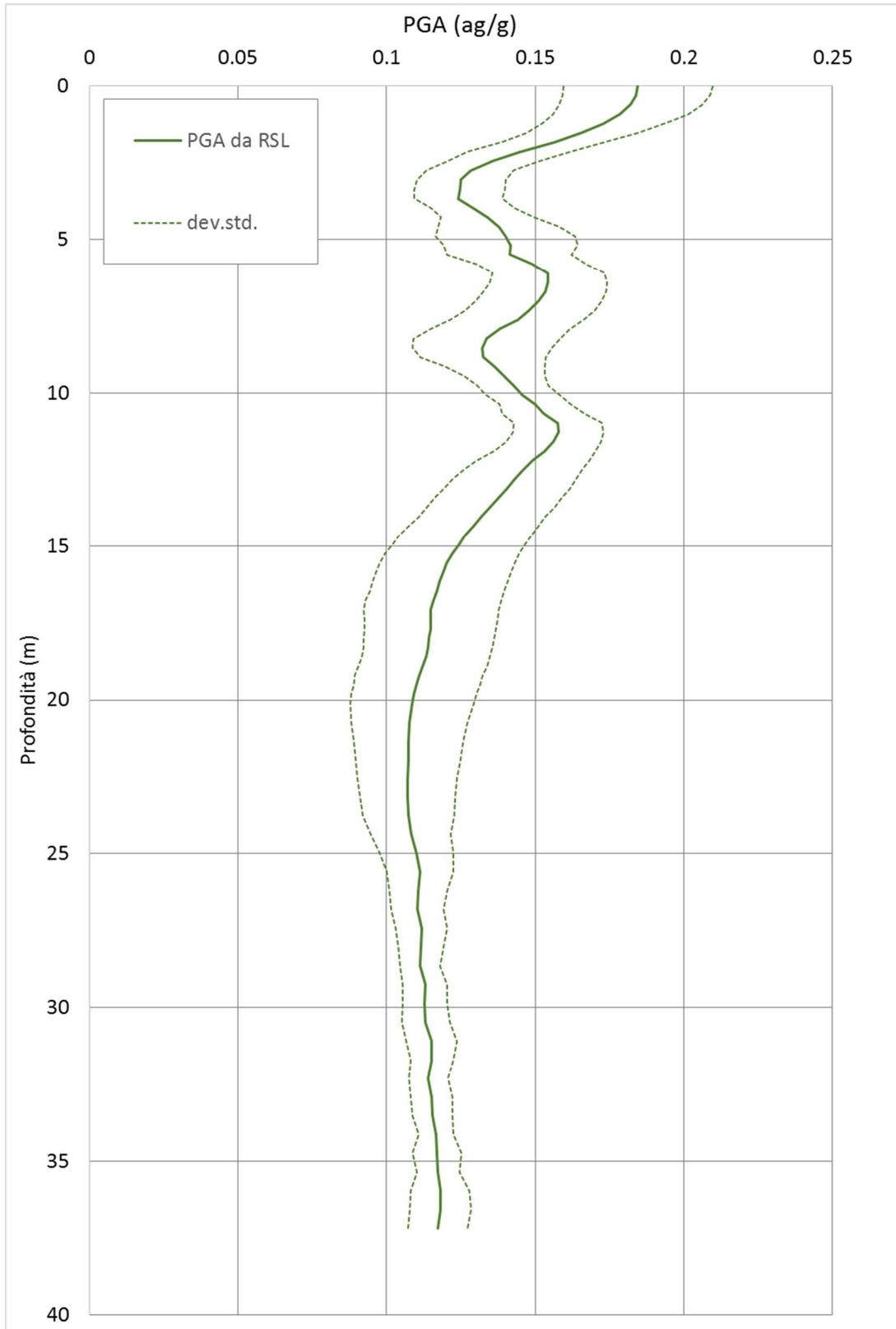


Fig. 25 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	44 di 110



	Valore	DAL 112/2007
FA _{SA} 0.1-0.5s	1.16	
FA _{SA} 0.4-0.8s	1.53	
FA _{SA} 0.5-1.5s	1.37	
FA _{SA} 0.7-1.1s	1.34	
FA _{PGA}	1.22	1.50
FH _{IS} 0.1-0.5s	1.28	1.80
FH _{IS} 0.5-1.0s	2.04	2.50
FH _{IS} 0.5-1.5s	1.89	

Tab. 11 - Argenta SCPTU1- fattori di amplificazione

3.4.3 RSL per il sito di Argenta SCPTU2

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Argille sup.	12	12	18.0	125	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie sup.	12	24	19.5	190	30.54	0.97	26.13	3.80
Argille prof.	4	28	19.0	200	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie prof.	4	32	20.0	210	29.50	1.00	27.34	3.66
Argille prof.	28	60	19.0	275	18.38	1.02	25.21	2.52
Bedrock			24.0	300				

Tab. 12 - Modello geofisico

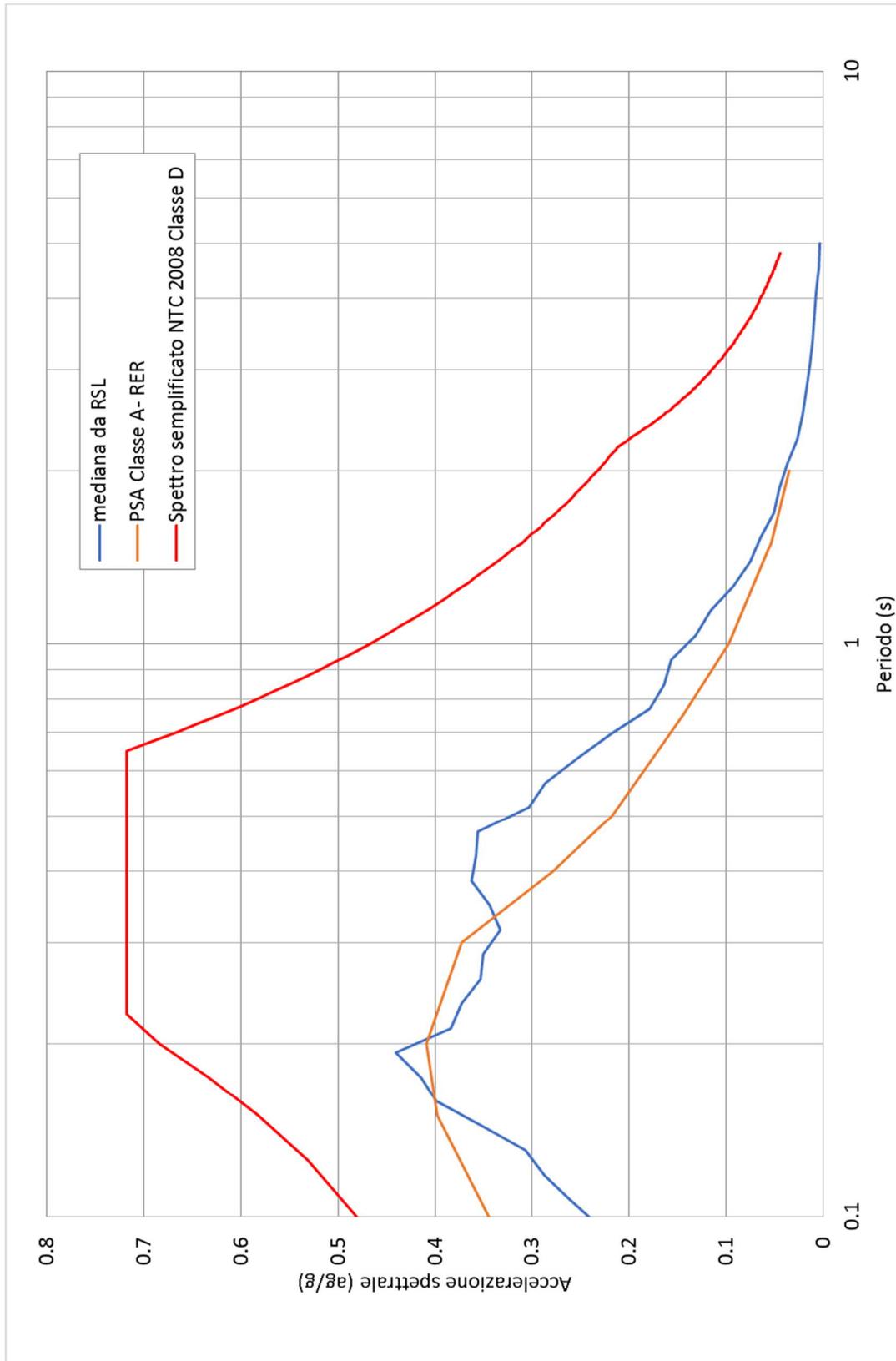


Fig. 26 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	46 di 110

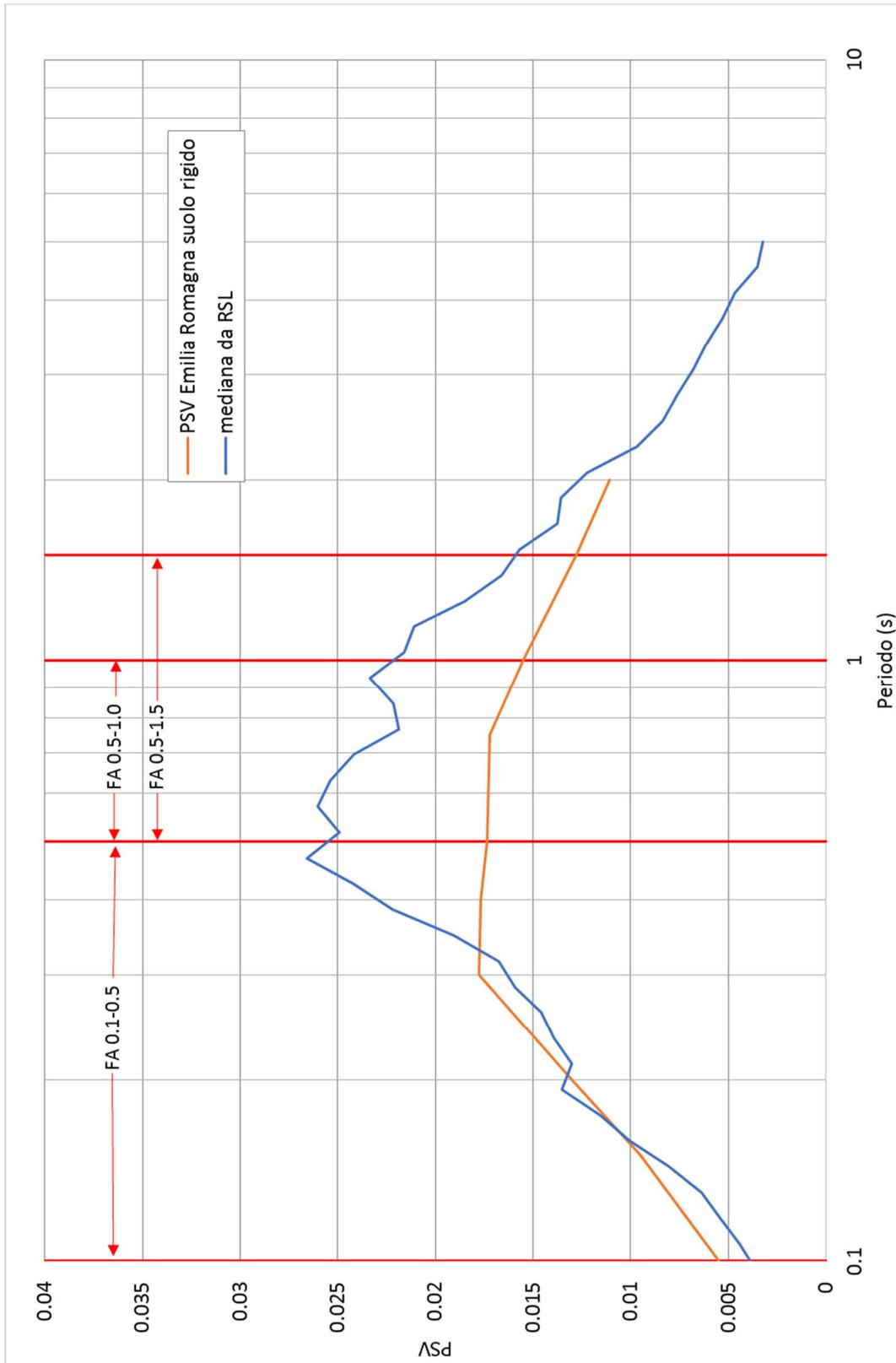


Fig. 27 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

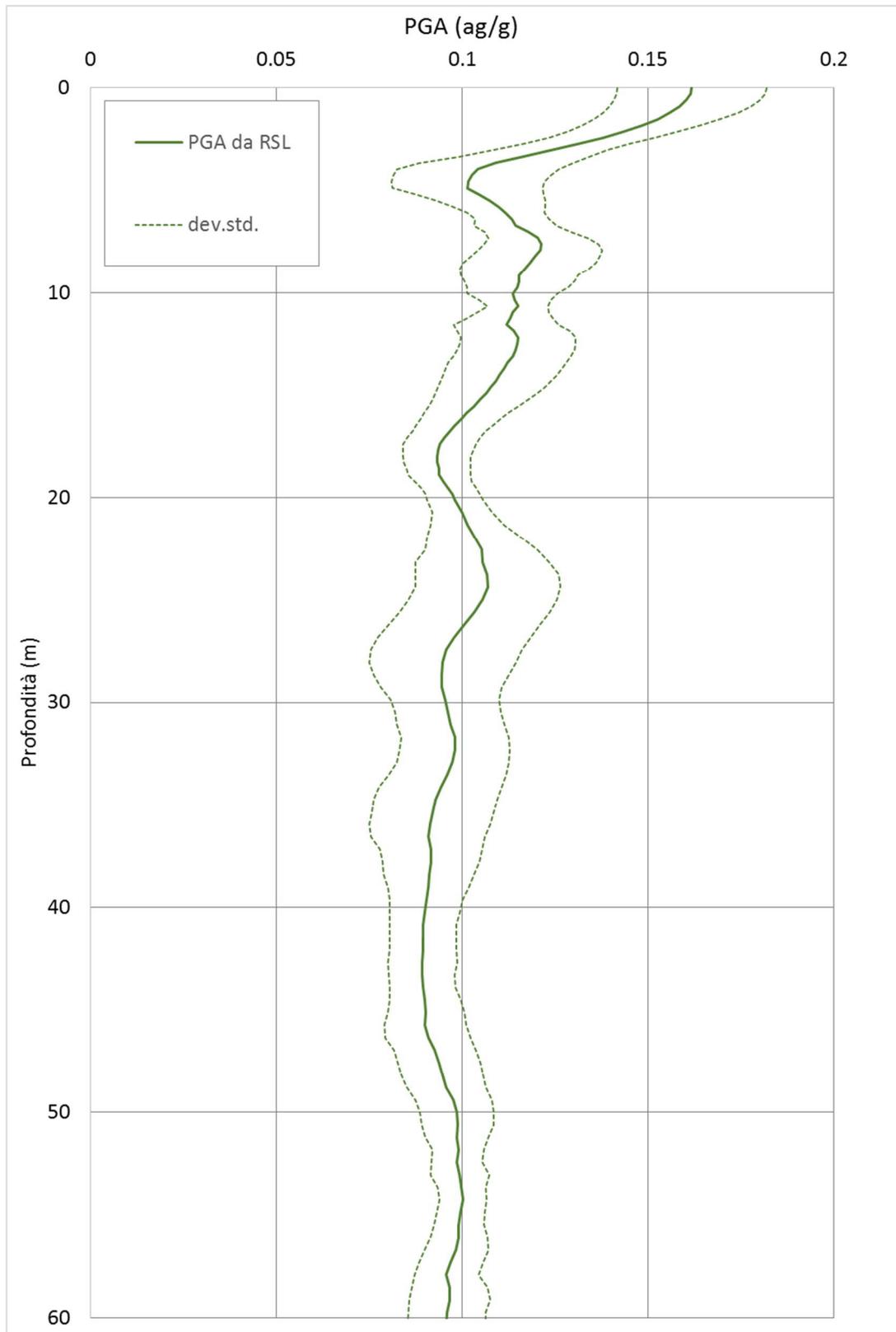


Fig. 28 - Variazione dell'accelerazione con la profondità



	Valore	DAL 112/2007
$FA_{SA\ 0.1-0.5s}$	1.18	
$FA_{SA\ 0.4-0.8s}$	1.64	
$FA_{SA\ 0.5-1.5s}$	1.66	
$FA_{SA\ 0.7-1.1s}$	1.75	
FA_{PGA}	1.07	1.50
$FH_{IS\ 0.1-0.5s}$	1.12	1.80
$FH_{IS\ 0.5-1.0s}$	1.40	2.50
$FH_{IS\ 0.5-1.5s}$	1.35	

Tab. 13 - Argenta - SCPTU2 - fattori di amplificazione

3.4.4 RSL per il sito di Argenta SCPTU3

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ kN/m ³	Vs m/s	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m			α	β	η	λ
Argille sup.	5.3	5.3	18.0	150	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie sup.	5.2	10.5	19.5	190	30.54	0.97	26.13	3.80
Argille prof.	11.5	22	19.0	150	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	8	30	19.0	215	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	38	68	19.0	340	18.38	1.02	25.21	2.52
Bedrock			24.0	430				

Tab. 14 - Modello geofisico

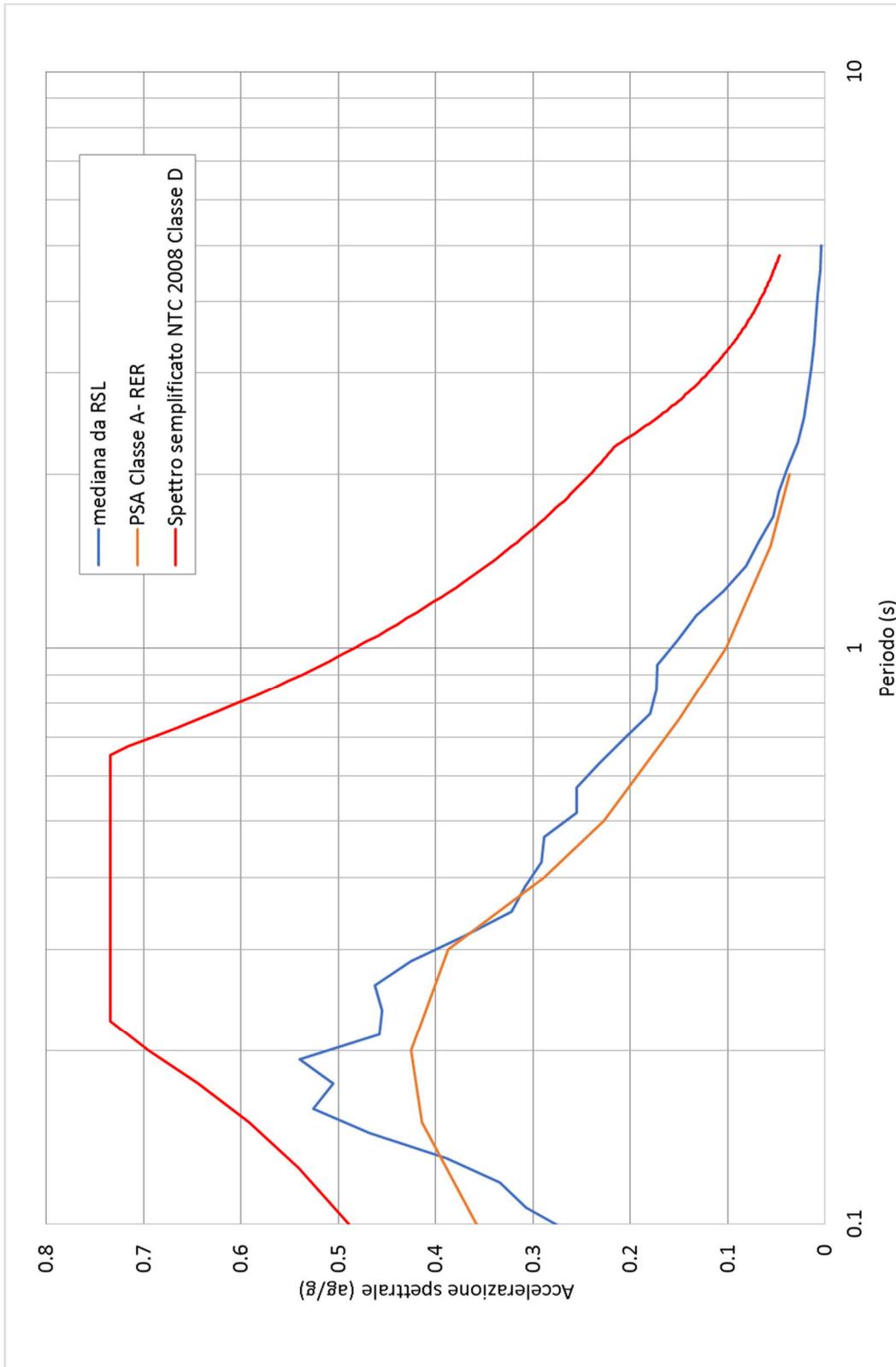


Fig. 29 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

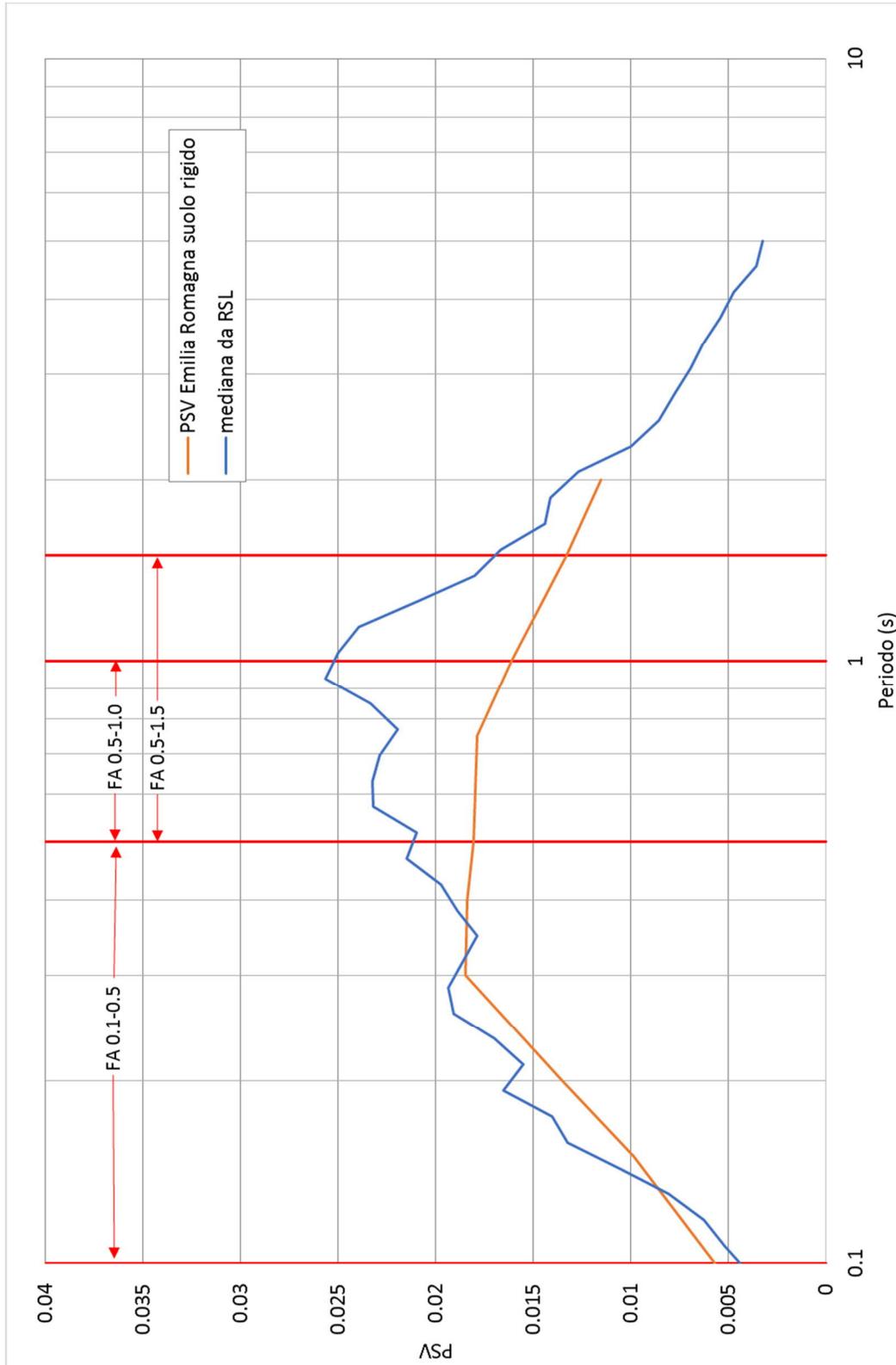


Fig. 30 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	51 di 110

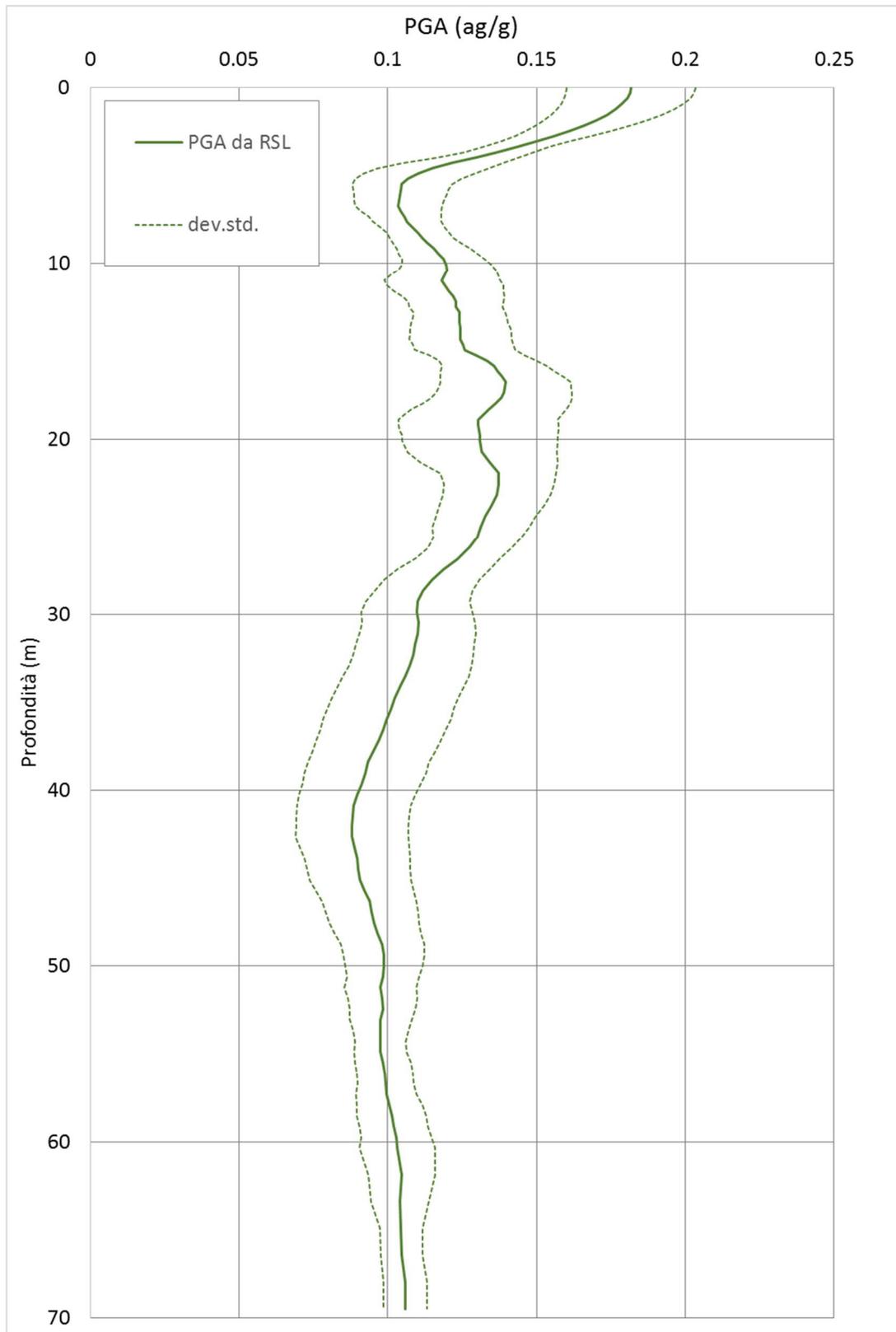


Fig. 31 - Variazione dell'accelerazione con la profondità



	RSL	DAL 112/2007
FA _{SA} 0.1-0.5s	1.08	
FA _{SA} 0.4-0.8s	1.37	
FA _{SA} 0.5-1.5s	1.62	
FA _{SA} 0.7-1.1s	1.80	
FA _{PGA}	1.16	1.50
FH _{IS} 0.1-0.5s	1.10	1.80
FH _{IS} 0.5-1.0s	1.39	2.50
FH _{IS} 0.5-1.5s	1.38	

Tab. 15 - Argenta SCPTU3- fattori di amplificazione

3.4.5 RSL per il sito di Argenta SCPTU4

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Argille sup.	4	4	18.0	130	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille sup.	5.5	9.5	18.0	90	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie sup.	3	12.5	19.5	135	30.54	0.97	26.13	3.80
Argille prof.	3	15.5	19.0	168	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	3	18.5	19.0	188	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie prof.	2	20.5	20.0	190	29.50	1.00	27.34	3.66
Argille prof.	10	30.5	19.0	210	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie prof.	8	38.5	20.0	235	29.50	1.00	27.34	3.66
Bedrock			24.0	270				

Tab. 16 - Modello geofisico

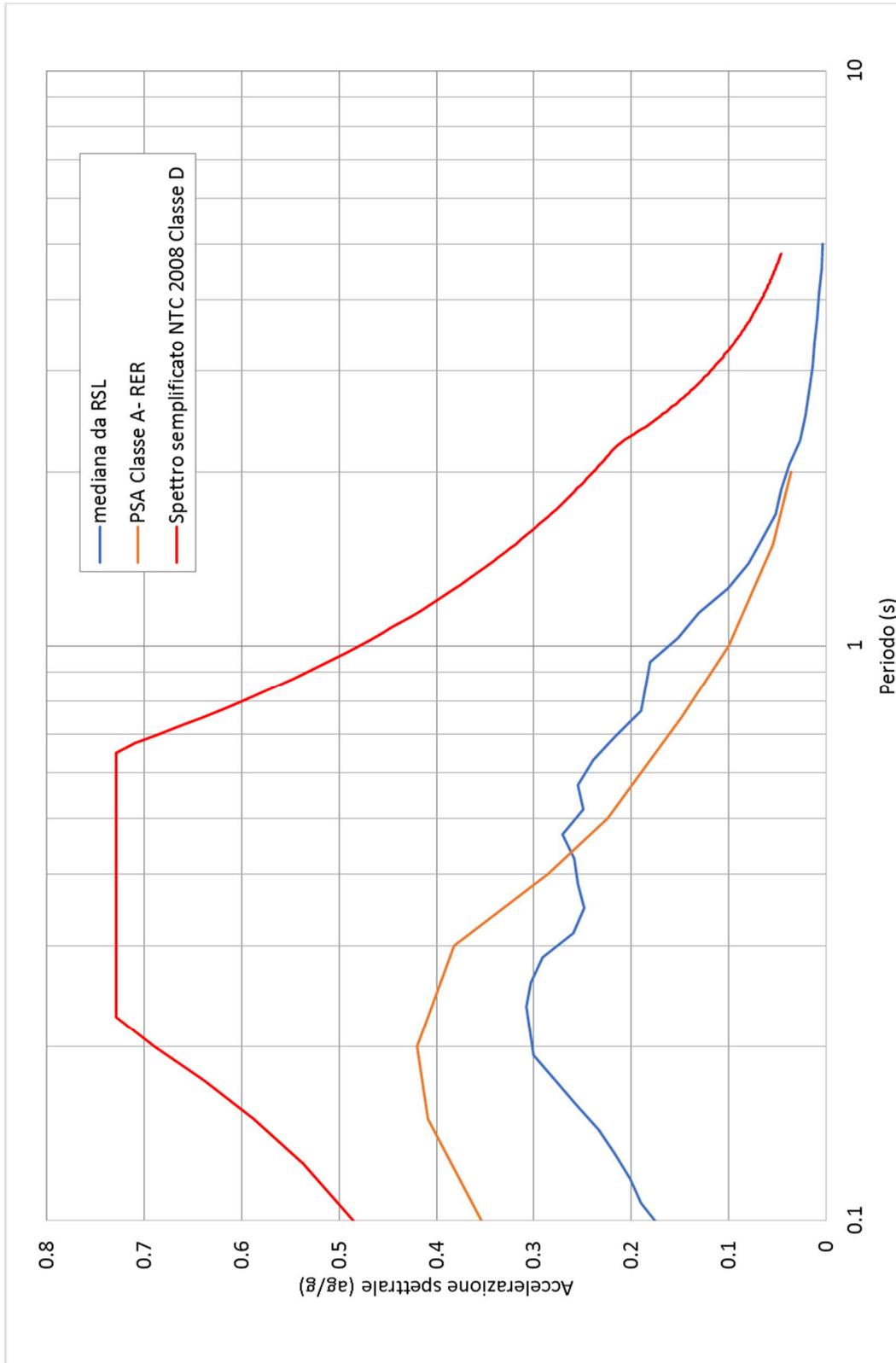


Fig. 32 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	54 di 110

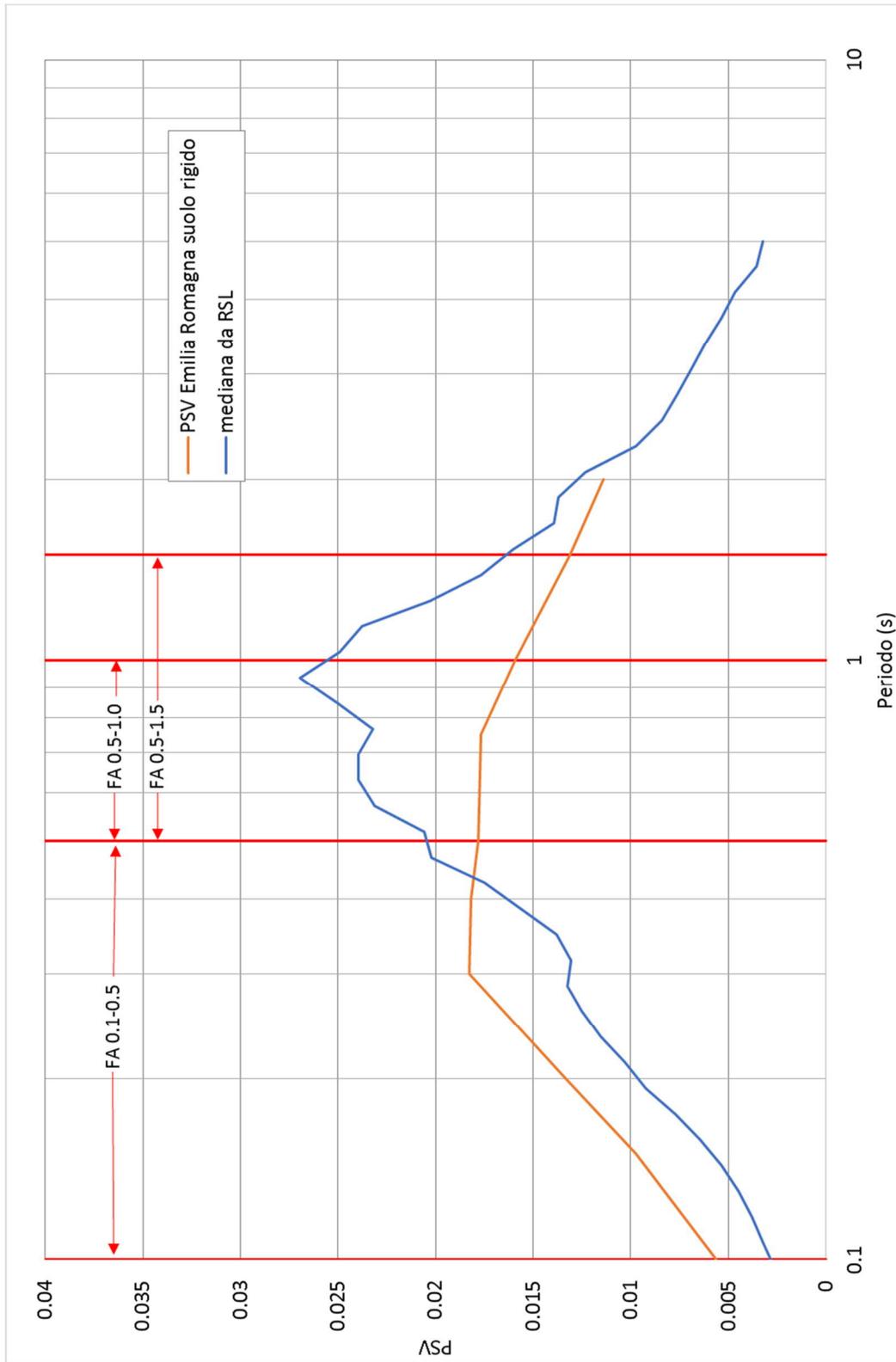


Fig. 33 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	55 di 110

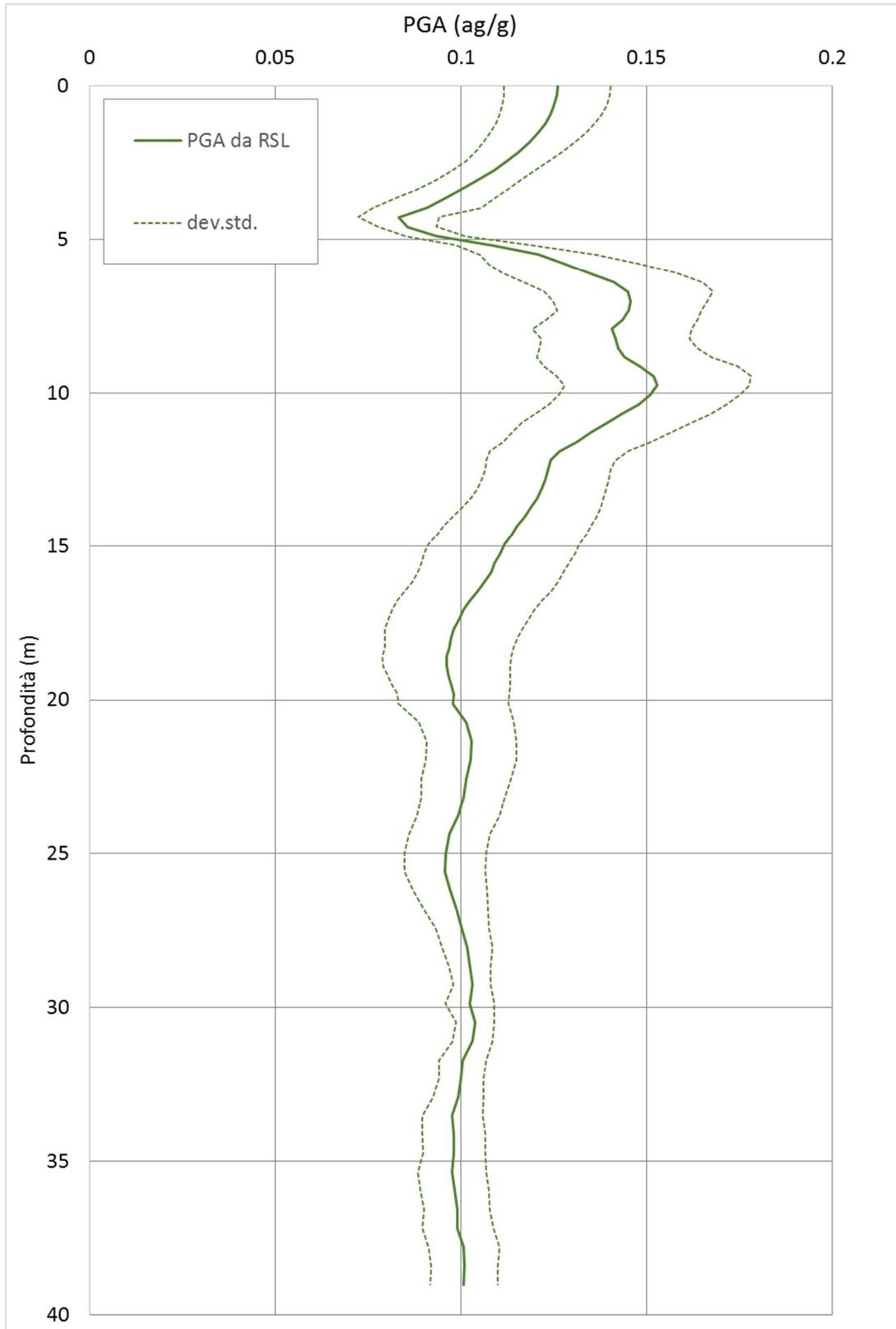


Fig. 34 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	56 di 110



	RSL	DAL 112/2007
$FA_{SA\ 0.1-0.5s}$	1.15	
$FA_{SA\ 0.4-0.8s}$	1.71	
$FA_{SA\ 0.5-1.5s}$	1.71	
$FA_{SA\ 0.7-1.1s}$	1.78	
FA_{PGA}	0.82	1.50
$FH_{IS\ 0.1-0.5s}$	0.83	1.80
$FH_{IS\ 0.5-1.0s}$	1.46	2.50
$FH_{IS\ 0.5-1.5s}$	1.41	

Tab. 17 - Argenta SCPTU4- fattori di amplificazione

3.4.6 RSL per il sito di Argenta SCPTU5

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Argille sup.	15	15	18.0	140	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	15	30	19.0	200	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	38	68	19.0	280	18.38	1.02	25.21	2.52
Bedrock			24.0	360				

Tab. 18 - Modello geofisico

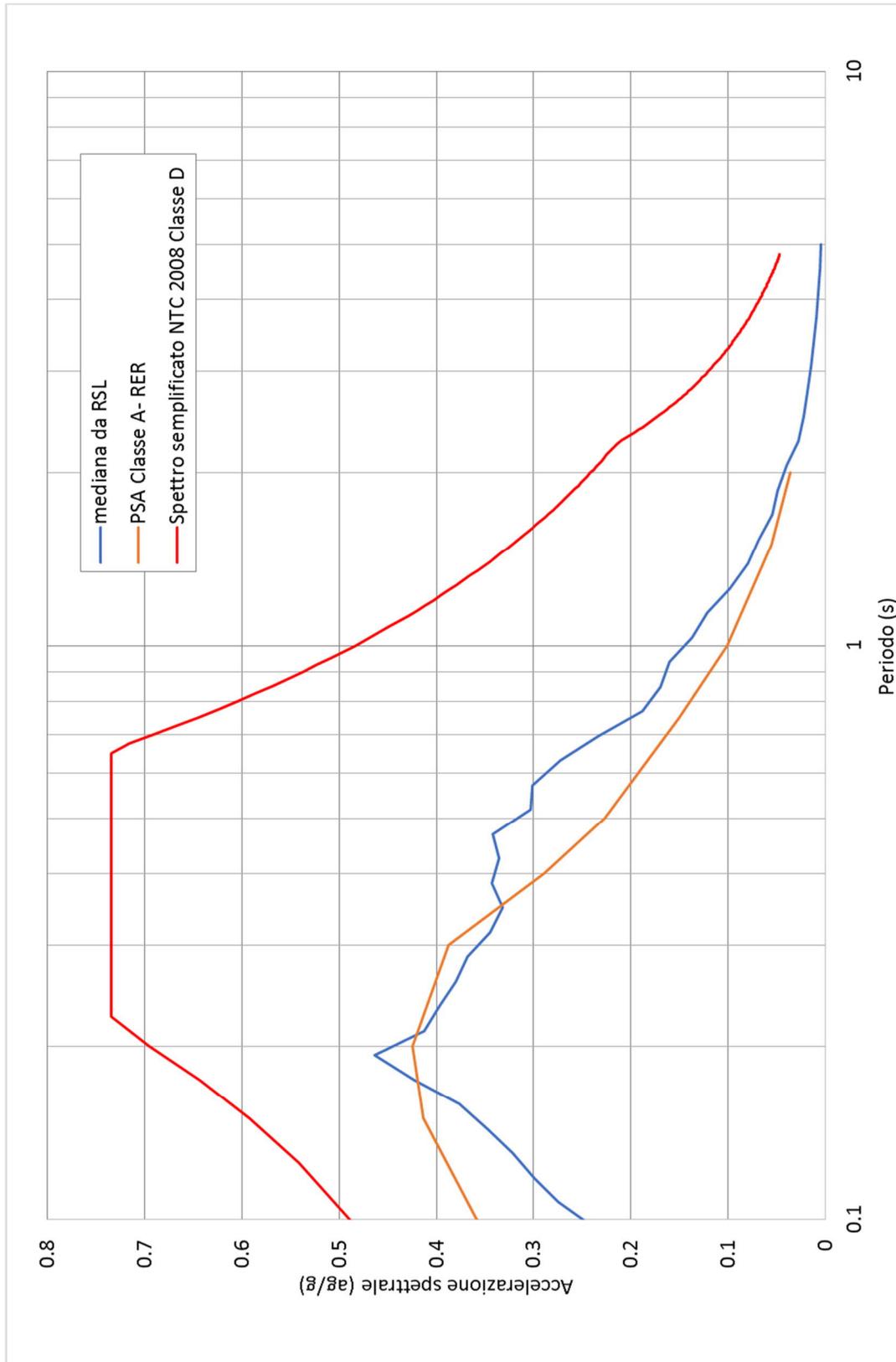


Fig. 35 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	58 di 110

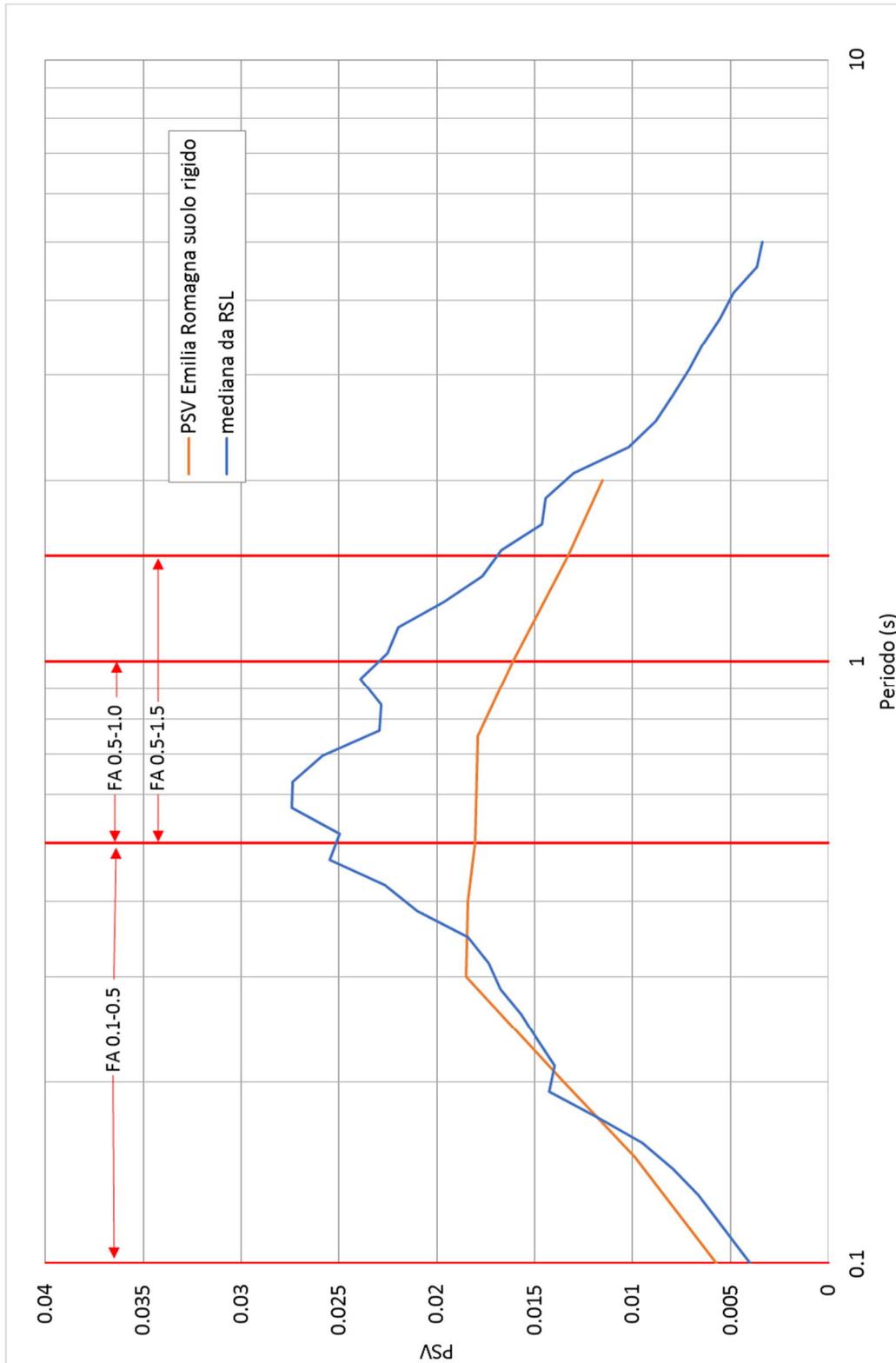


Fig. 36 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	59 di 110

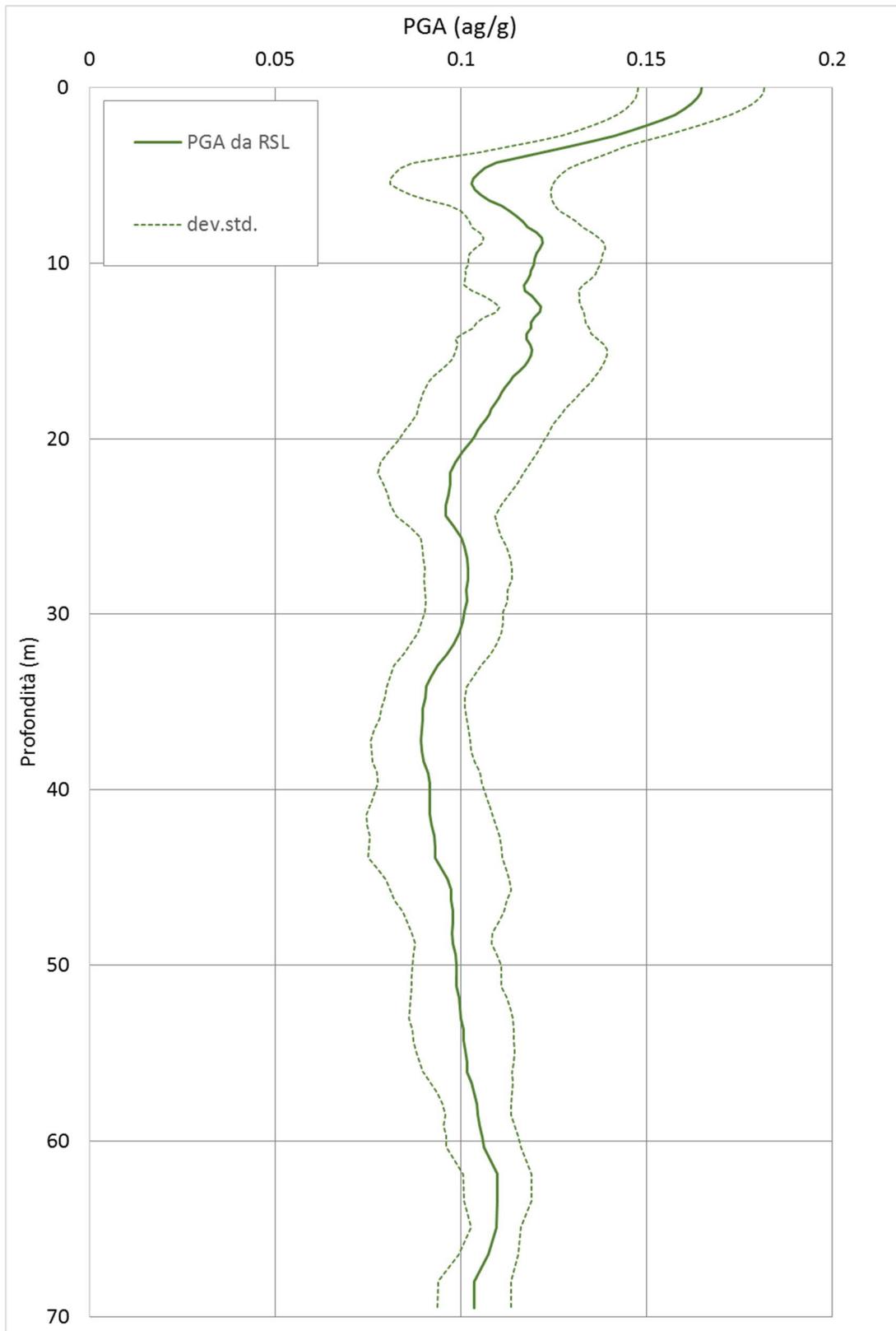


Fig. 37 - Variazione dell'accelerazione con la profondità



	RSL	DAL 112/2007
$FA_{SA\ 0.1-0.5s}$	1.10	
$FA_{SA\ 0.4-0.8s}$	1.55	
$FA_{SA\ 0.5-1.5s}$	1.61	
$FA_{SA\ 0.7-1.1s}$	1.71	
FA_{PGA}	1.05	1.50
$FH_{IS\ 0.1-0.5s}$	1.09	1.80
$FH_{IS\ 0.5-1.0s}$	1.41	2.50
$FH_{IS\ 0.5-1.5s}$	1.37	

Tab. 19 - Argenta SCPTU5- fattori di amplificazione

3.4.7 RSL per il sito di Ostellato S1

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Limo argilloso sup.	17	17	18.0	140	38.88	1.16	22.81	2.52
Sabbie prof.	4	21	20.0	225	29.50	1.00	27.34	3.66
Sabbie prof.	2	23	20.0	280	29.50	1.00	27.34	3.66
Limo con argilla prof.	3	26	19.0	275	82.79	1.50	23.25	2.12
Limo con argilla prof.	4	30	19.0	235	82.79	1.50	23.25	2.12
Limo con argilla prof.	23	53	19.0	250	82.79	1.50	23.25	2.12
Sabbie prof.	30	83	20.0	350	29.50	1.00	27.34	3.66
Bedrock			24.0	600				

Tab. 20 - Modello geofisico

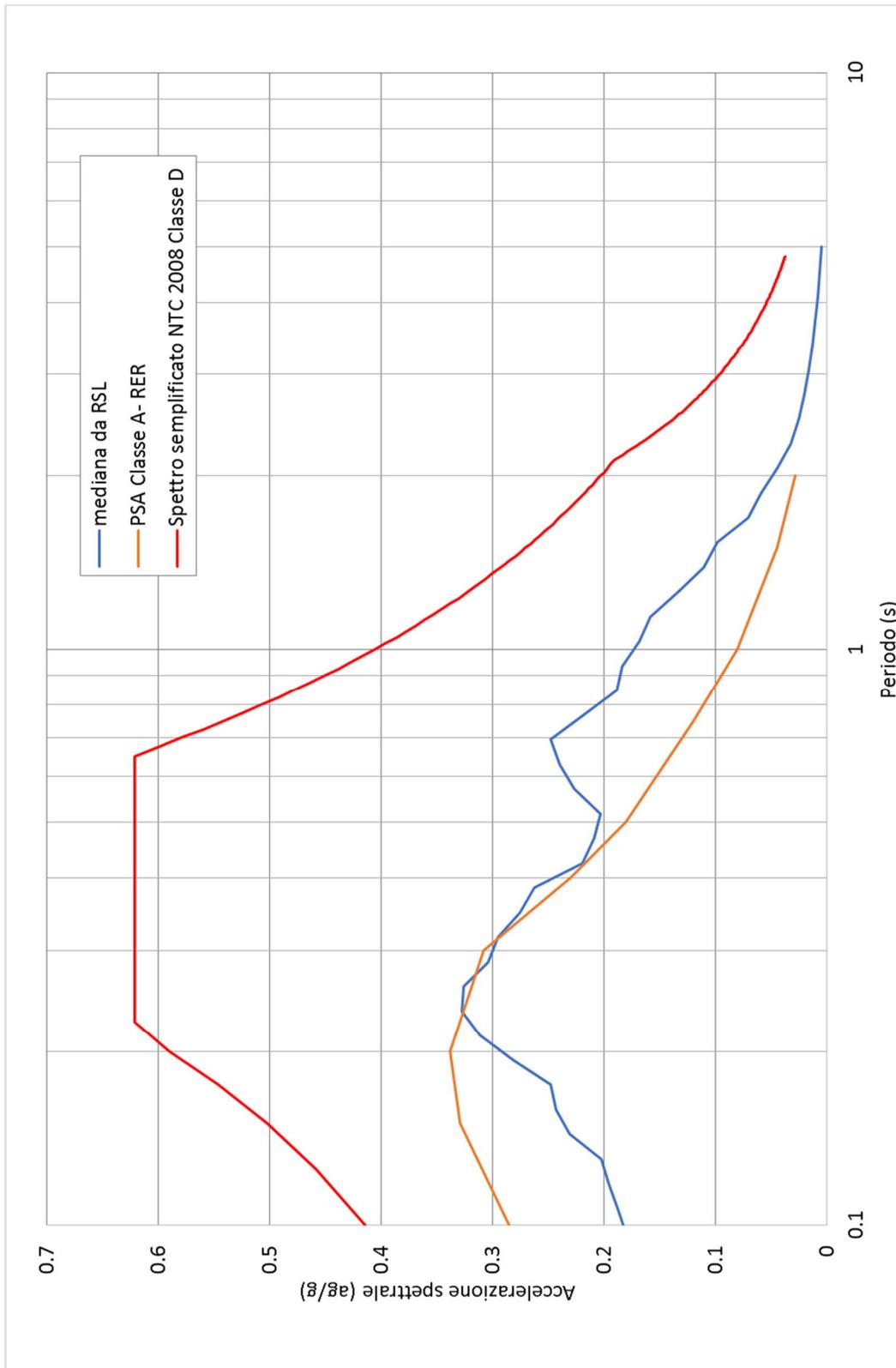


Fig. 38 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

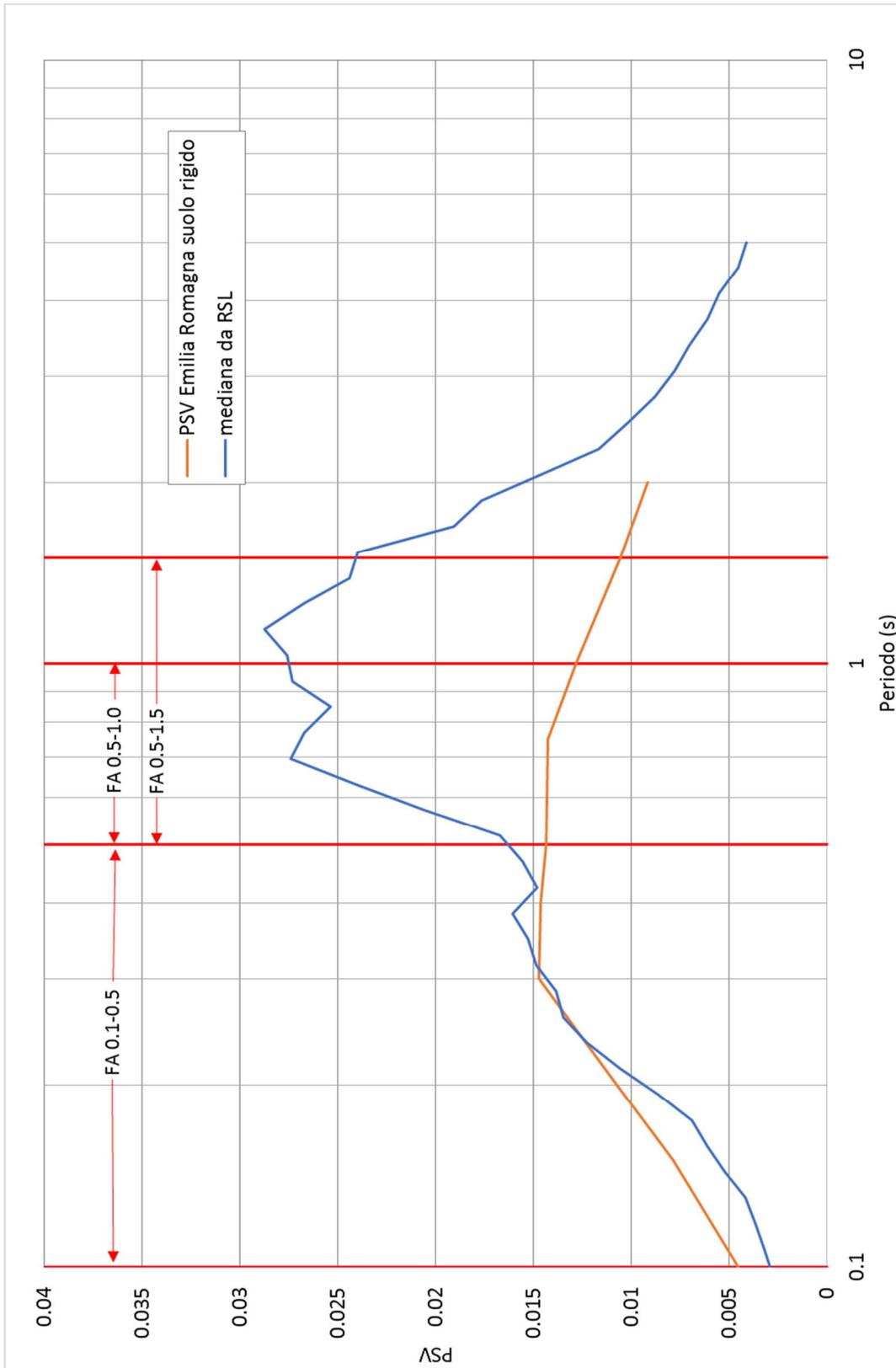


Fig. 39 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	63 di 110

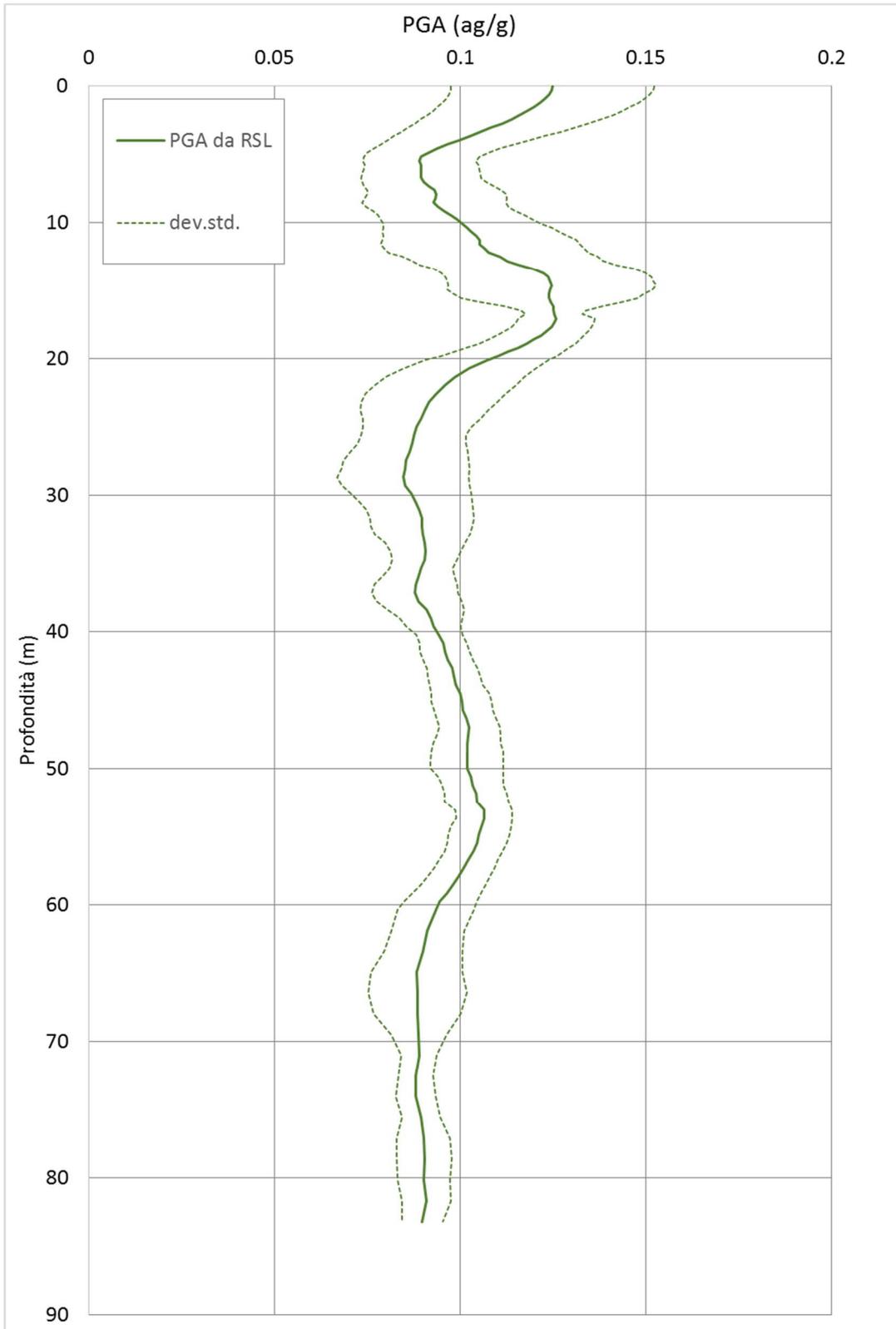


Fig. 40 - Variazione dell'accelerazione con la profondità



	RSL	DAL 112/2007
$FA_{SA\ 0.1-0.5s}$	1.18	
$FA_{SA\ 0.4-0.8s}$	1.76	
$FA_{SA\ 0.5-1.5s}$	1.86	
$FA_{SA\ 0.7-1.1s}$	1.93	
FA_{PGA}	1.00	1.50
$FH_{IS\ 0.1-0.5s}$	0.97	1.80
$FH_{IS\ 0.5-1.0s}$	1.90	2.50
$FH_{IS\ 0.5-1.5s}$	2.09	

Tab. 21 - Ostellato S1 - fattori di amplificazione

3.4.8 RSL per il sito di Ostellato SCPTU1

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Limo argilloso sup.	4	4	18.0	180	38.88	1.16	22.81	2.52
Sabbie sup.	7	11	18.5	190	20.53	0.87	29.07	3.51
Sabbie prof.	9.5	20.5	20.0	220	29.50	1.00	27.34	3.66
Limo con argilla prof.	22	42.5	19.0	190	82.79	1.50	23.25	2.12
Bedrock			24.0	350				

Tab. 22 - Modello geofisico

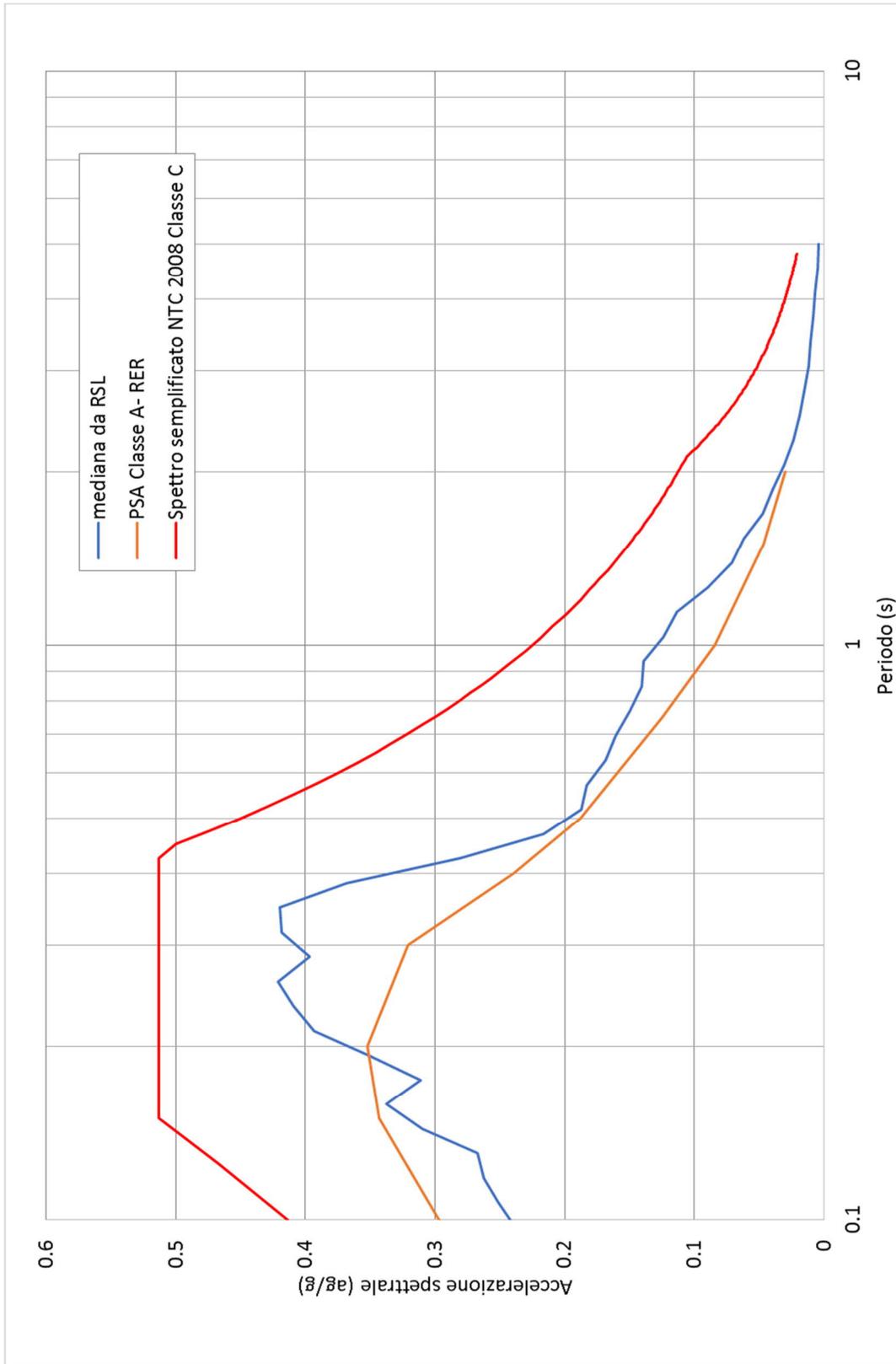


Fig. 41 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	66 di 110

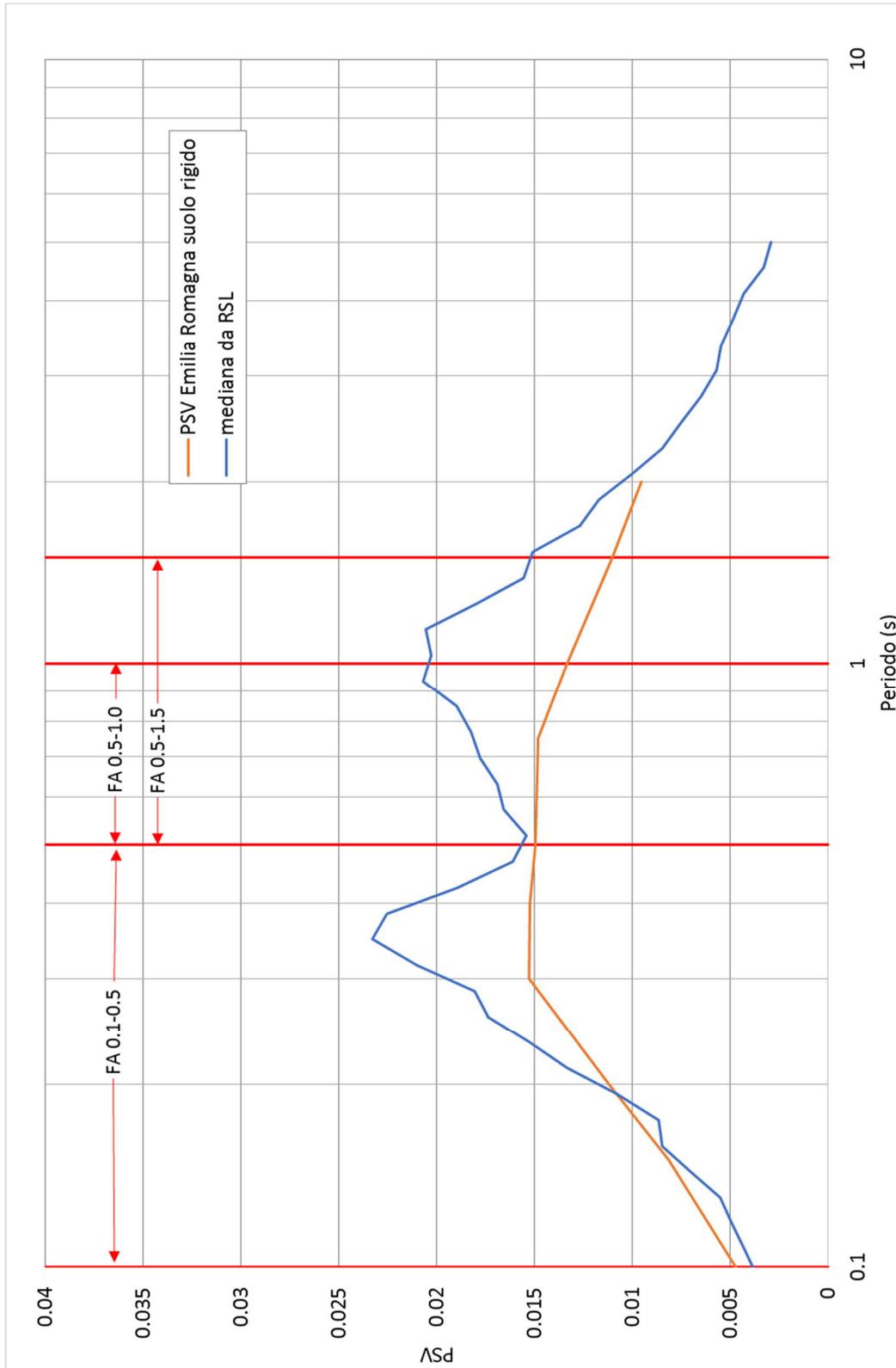


Fig. 42 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	67 di 110

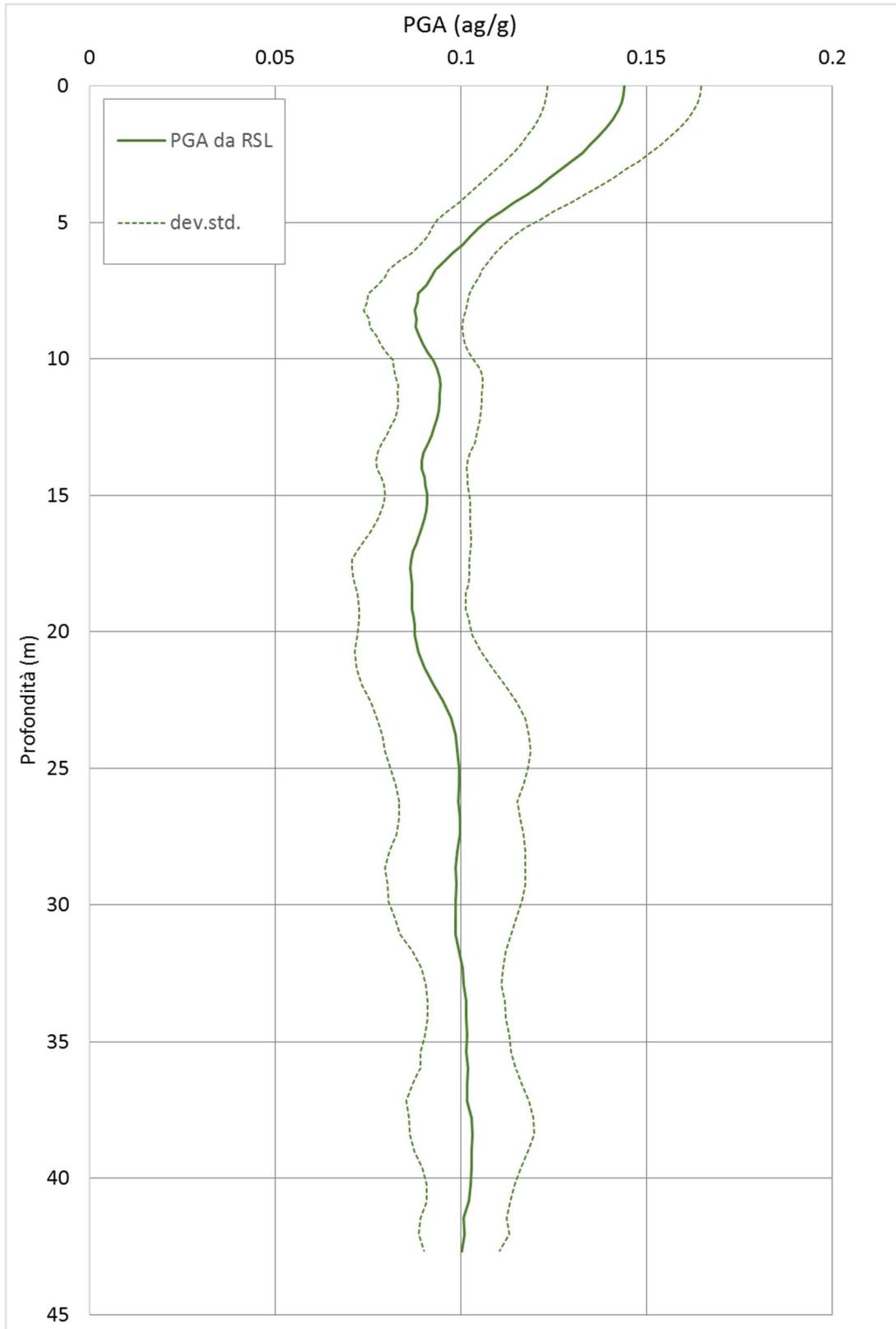


Fig. 43 - Variazione dell'accelerazione con la profondità



	RSL	DAL 112/2007
FA _{SA} 0.1-0.5s	1.04	
FA _{SA} 0.4-0.8s	1.04	
FA _{SA} 0.5-1.5s	1.02	
FA _{SA} 0.7-1.1s	1.01	
FA _{PGA}	1.11	1.50
FH _{IS} 0.1-0.5s	1.17	1.80
FH _{IS} 0.5-1.0s	1.33	2.50
FH _{IS} 0.5-1.5s	1.39	

Tab. 23 - Ostellato SCPTU1 - fattori di amplificazione

3.4.9 RSL per il sito di Ostellato SCPTU2

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Limo argilloso sup.	11	11	18.0	130	38.88	1.16	22.81	2.52
Limo argilloso sup.	9.5	20.5	18.0	155	38.88	1.16	22.81	2.52
Sabbie prof.	6	26.5	20.0	220	29.50	1.00	27.34	3.66
Limo con argilla prof.	18.5	45	19.0	220	82.79	1.50	23.25	2.12
Sabbie prof.	43	88	20.0	300	29.50	1.00	27.34	3.66
Bedrock			24.0	700				

Tab. 24 - Modello geofisico

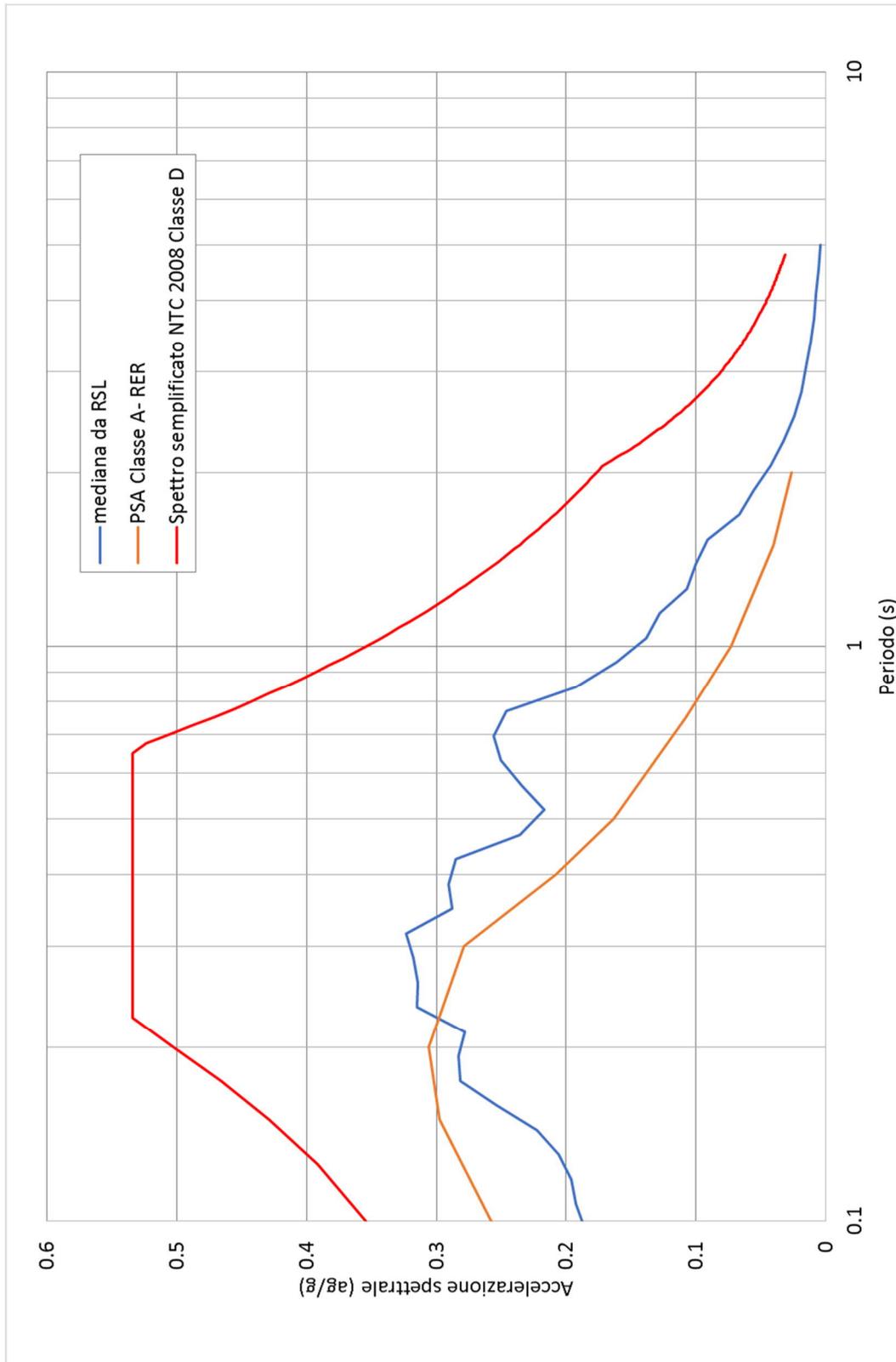


Fig. 44 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

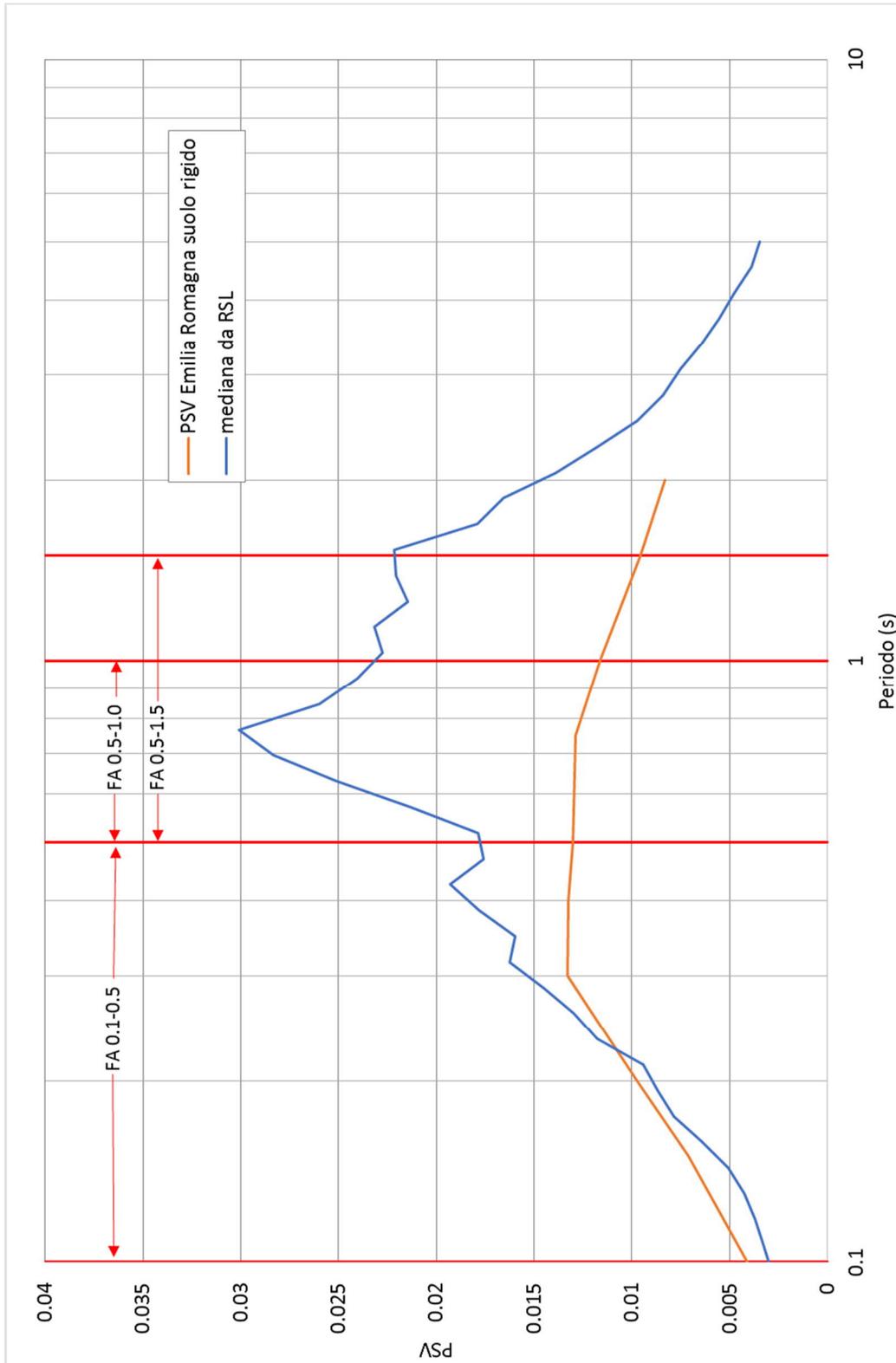


Fig. 45 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	71 di 110

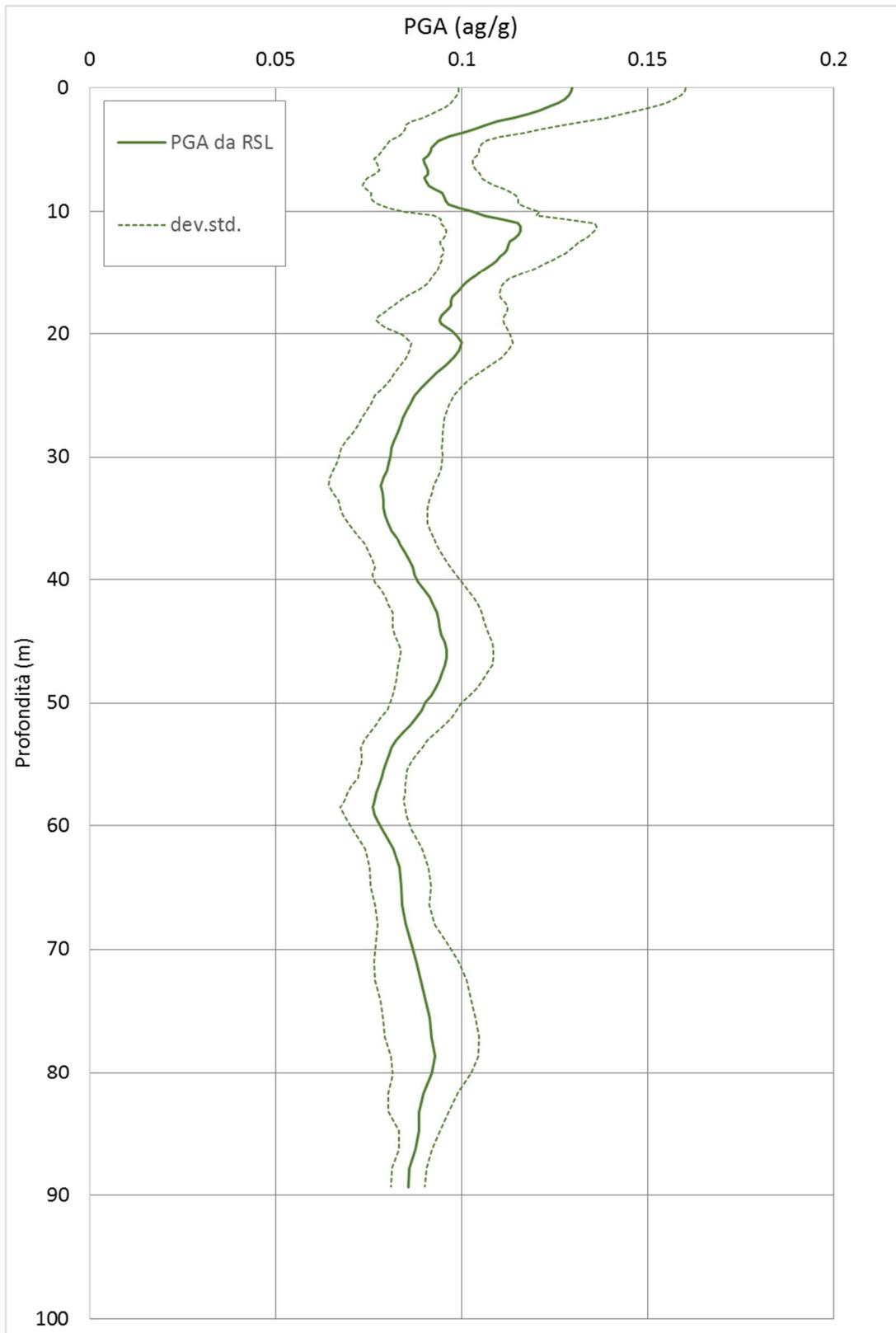


Fig. 46 - Variazione dell'accelerazione con la profondità



	RSL	DAL 112/2007
$FA_{SA 0.1-0.5s}$	1.33	
$FA_{SA 0.4-0.8s}$	1.52	
$FA_{SA 0.5-1.5s}$	1.32	
$FA_{SA 0.7-1.1s}$	1.28	
FA_{PGA}	1.15	1.50
$FH_{IS 0.1-0.5s}$	1.16	1.80
$FH_{IS 0.5-1.0s}$	2.04	2.50
$FH_{IS 0.5-1.5s}$	2.11	

Tab. 25 - Ostellato SCPTU2 - fattori di amplificazione

3.4.10 RSL per il sito di Portomaggiore S1

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Argille sup.	4	4	18.0	150	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie sup.	4	8	19.5	100	20.53	0.87	29.07	3.51
Sabbie sup.	4.5	12.5	19.5	125	20.53	0.87	29.07	3.51
Sabbie prof.	5	17.5	20.0	200	29.50	1.00	27.34	3.66
Sabbie prof.	5	22.5	20.0	240	29.50	1.00	27.34	3.66
Argille prof.	4	26.5	19.0	180	82.79	1.50	23.25	2.12
Argille prof.	13.5	40	19.0	280	82.79	1.50	23.25	2.12
Sabbie prof.	13	53	20.0	430	29.50	1.00	27.34	3.66
Bedrock			24.0	500				

Tab. 26 - Modello geofisico

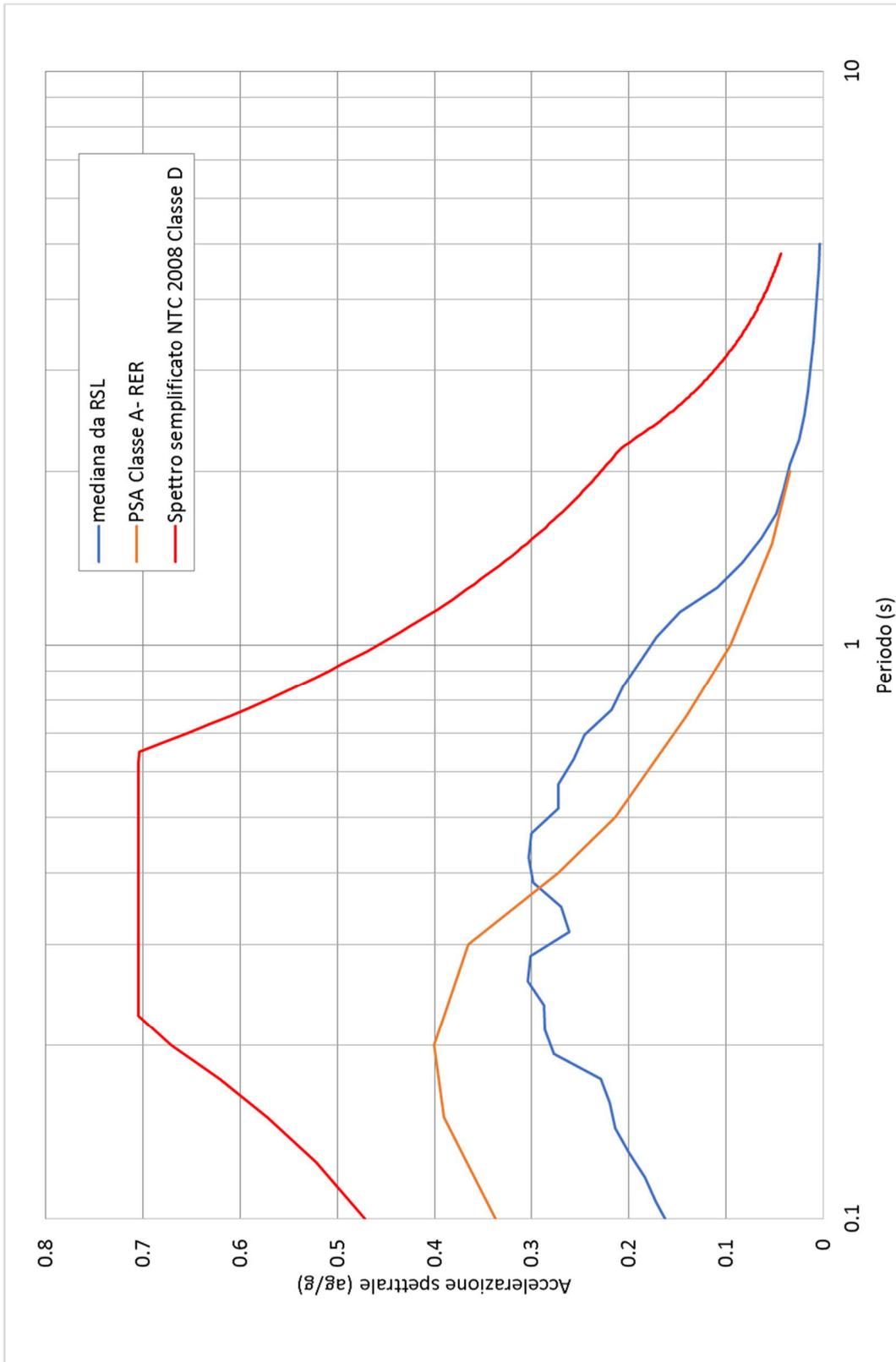


Fig. 47 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	74 di 110

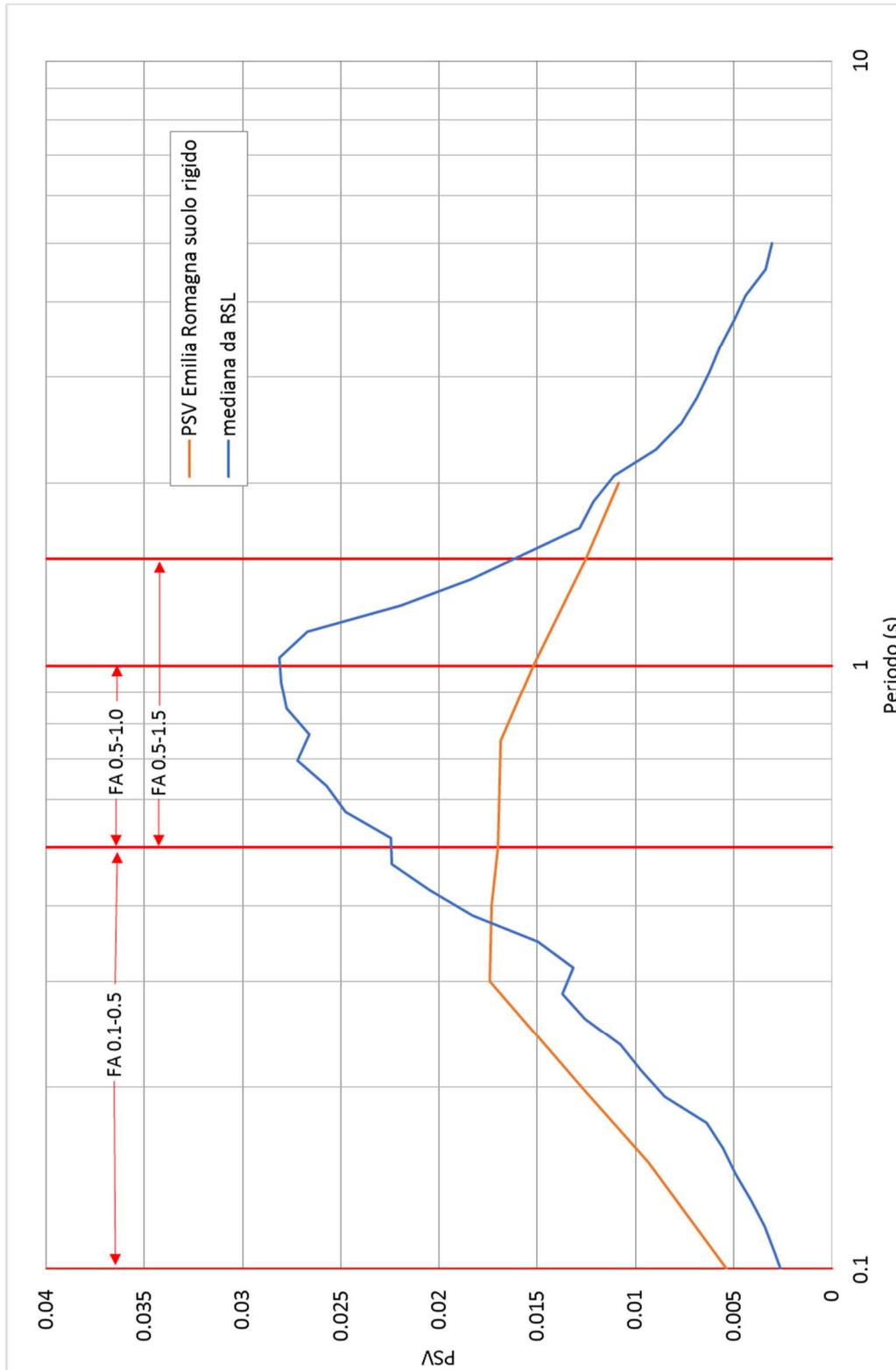


Fig. 48 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	75 di 110

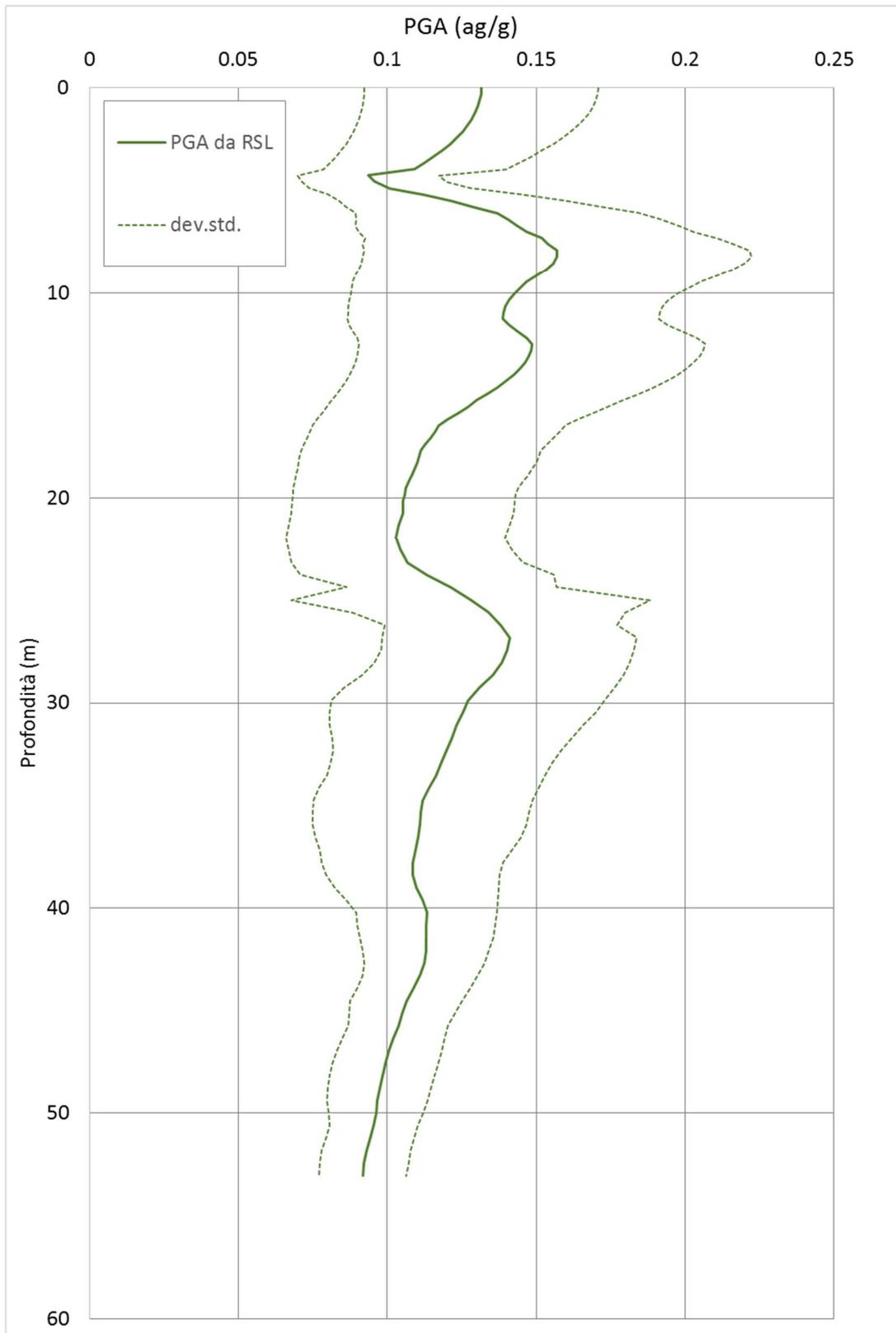


Fig. 49 - Variazione dell'accelerazione con la profondità



	RSL	DAL 112/2007
$FA_{SA\ 0.1-0.5s}$	0.99	
$FA_{SA\ 0.4-0.8s}$	1.74	
$FA_{SA\ 0.5-1.5s}$	2.17	
$FA_{SA\ 0.7-1.1s}$	2.36	
FA_{PGA}	0.89	1.50
$FH_{IS\ 0.1-0.5s}$	0.92	1.80
$FH_{IS\ 0.5-1.0s}$	1.68	2.50
$FH_{IS\ 0.5-1.5s}$	1.59	

Tab. 27 - Portomaggiore S1 - fattori di amplificazione

3.4.11 RSL per il sito di Portomaggiore SCPTU1

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	Vs	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Argille sup.	5	5	18.0	150	18.38	1.02	25.21	2.52
Sabbie sup.	16	21	19.5	100	20.53	0.87	29.07	3.51
Argille prof.	14	35	19.0	180	82.79	1.50	23.25	2.12
Sabbie prof.	16	51	20.0	240	29.50	1.00	27.34	3.66
Argille prof.	34	85	19.0	180	82.79	1.50	23.25	2.12
Bedrock			24.0	570				

Tab. 28 - Modello geofisico

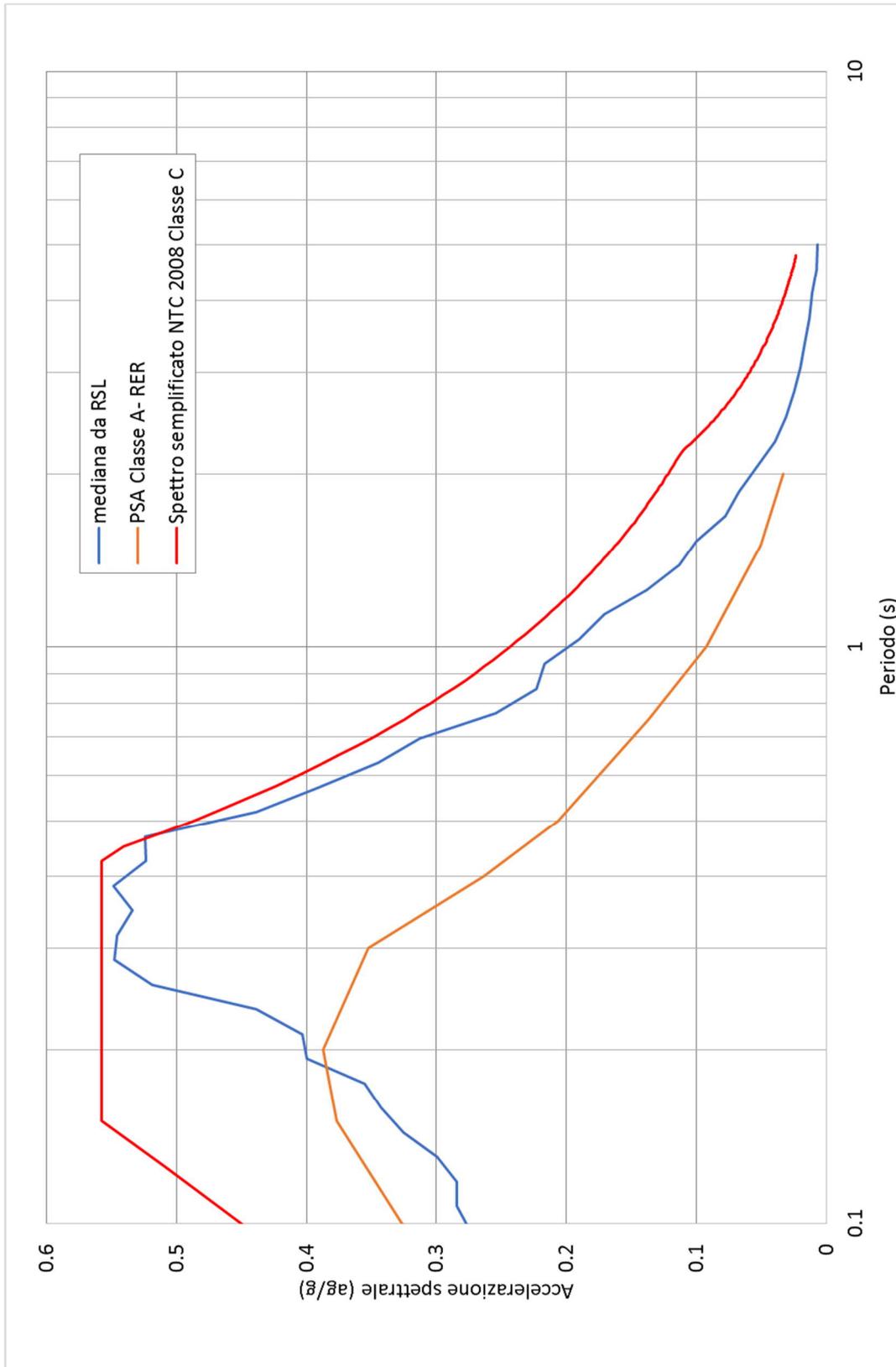


Fig. 50 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	78 di 110

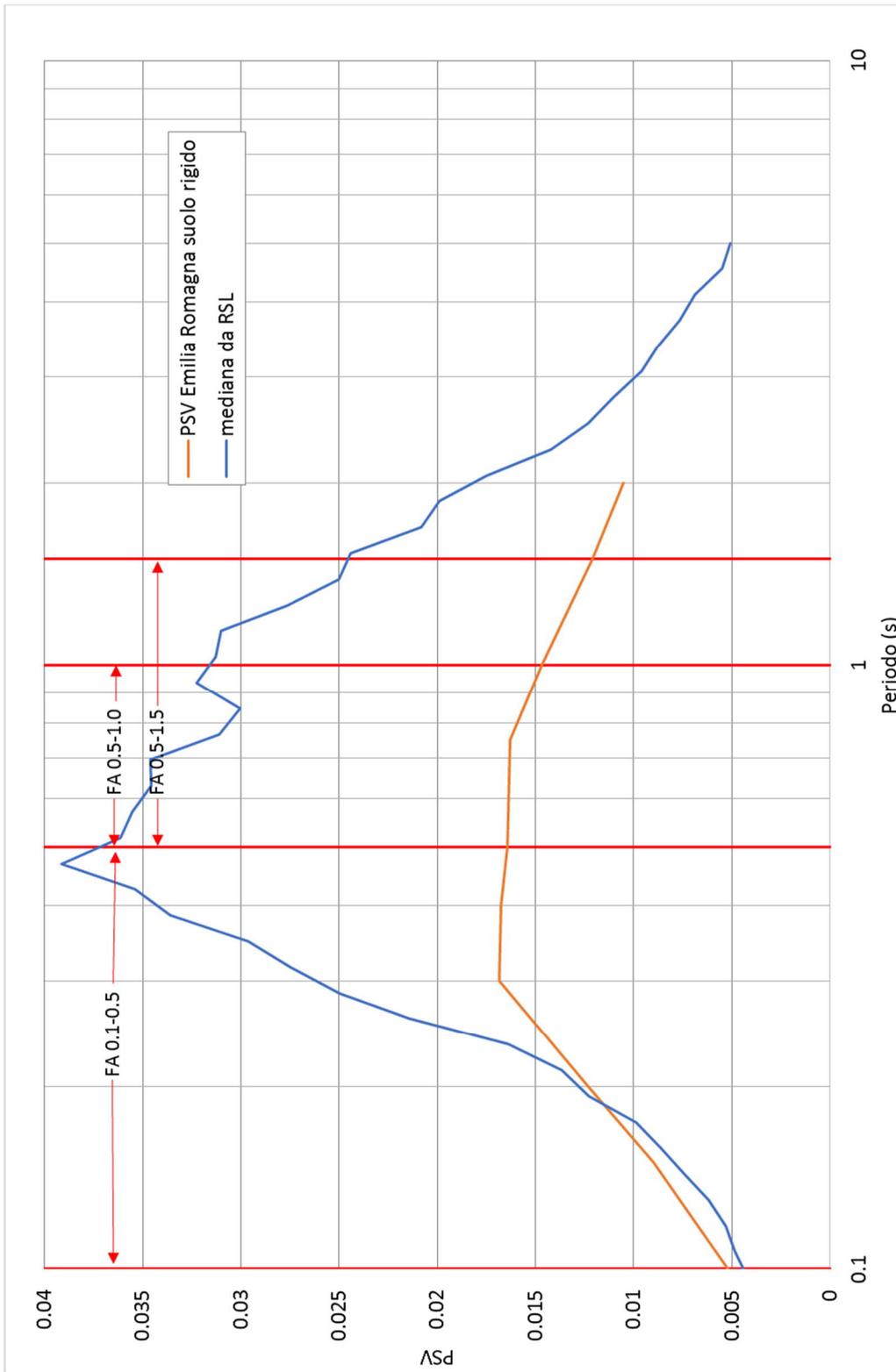


Fig. 51 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	79 di 110

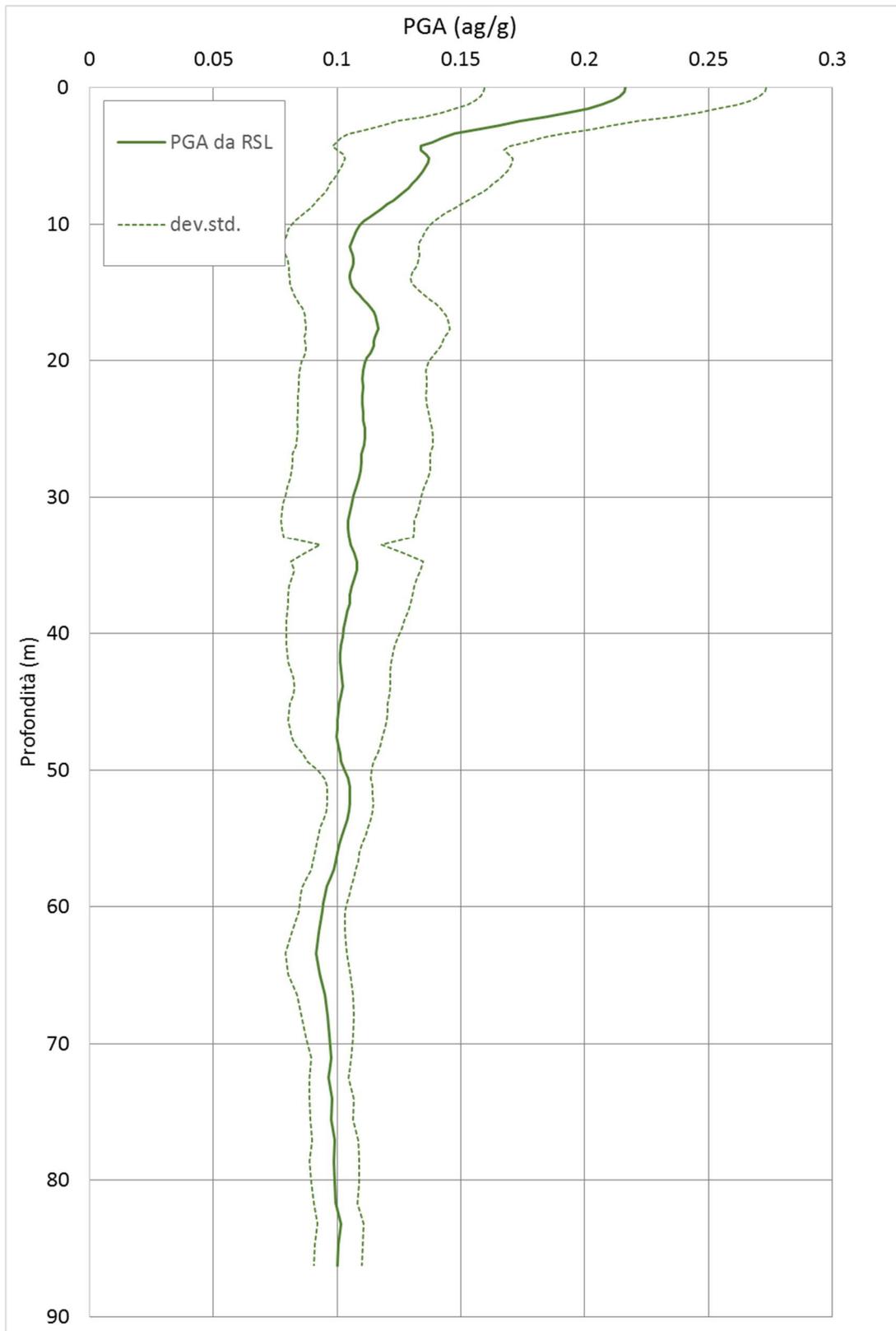


Fig. 52 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	80 di 110



	RSL	DAL 112/2007
$F_{SA} 0.1-0.5s$	0.60	
$F_{SA} 0.4-0.8s$	0.86	
$F_{SA} 0.5-1.5s$	1.12	
$F_{SA} 0.7-1.1s$	1.04	
F_{PGA}	1.52	1.50
$FH_{IS} 0.1-0.5s$	1.63	1.80
$FH_{IS} 0.5-1.0s$	2.08	2.50
$FH_{IS} 0.5-1.5s$	2.08	

Tab. 29 - Portomaggiore SCPTU1 - fattori di amplificazione

3.4.12 RSL per il sito di Portomaggiore SCPTU2

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Prof.	γ	V_s	Parametri G/G0		Parametri D	
	m	m	kN/m ³	m/s	α	β	η	λ
Argille sup.	15	15	18.0	130	18.38	1.02	25.21	2.52
Argille prof.	25	40	19.0	210	82.79	1.50	23.25	2.12
Argille prof.	40	80	19.0	300	82.79	1.50	23.25	2.12
Bedrock			24.0	360				

Tab. 30 - Modello geofisico

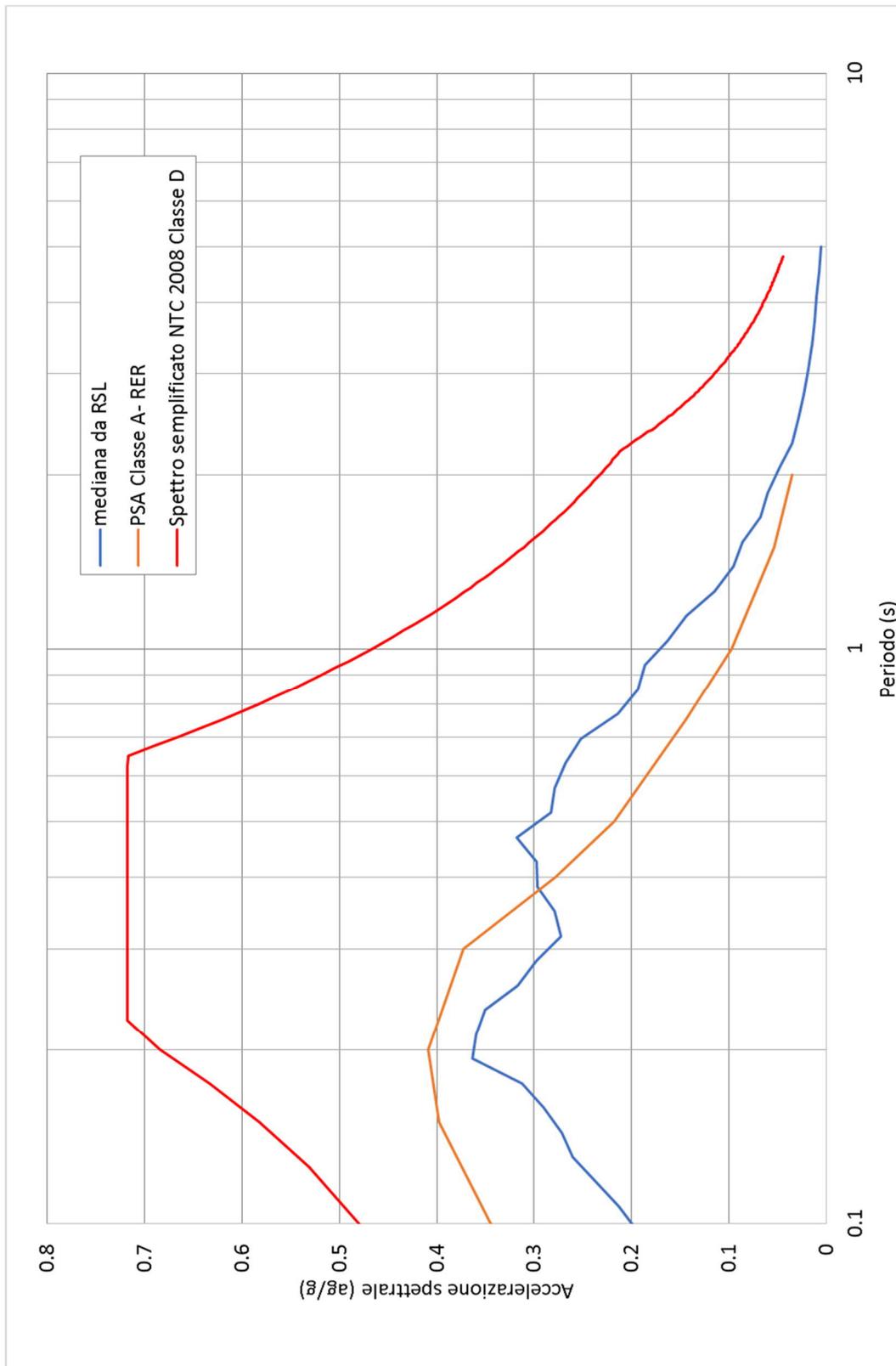


Fig. 53 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

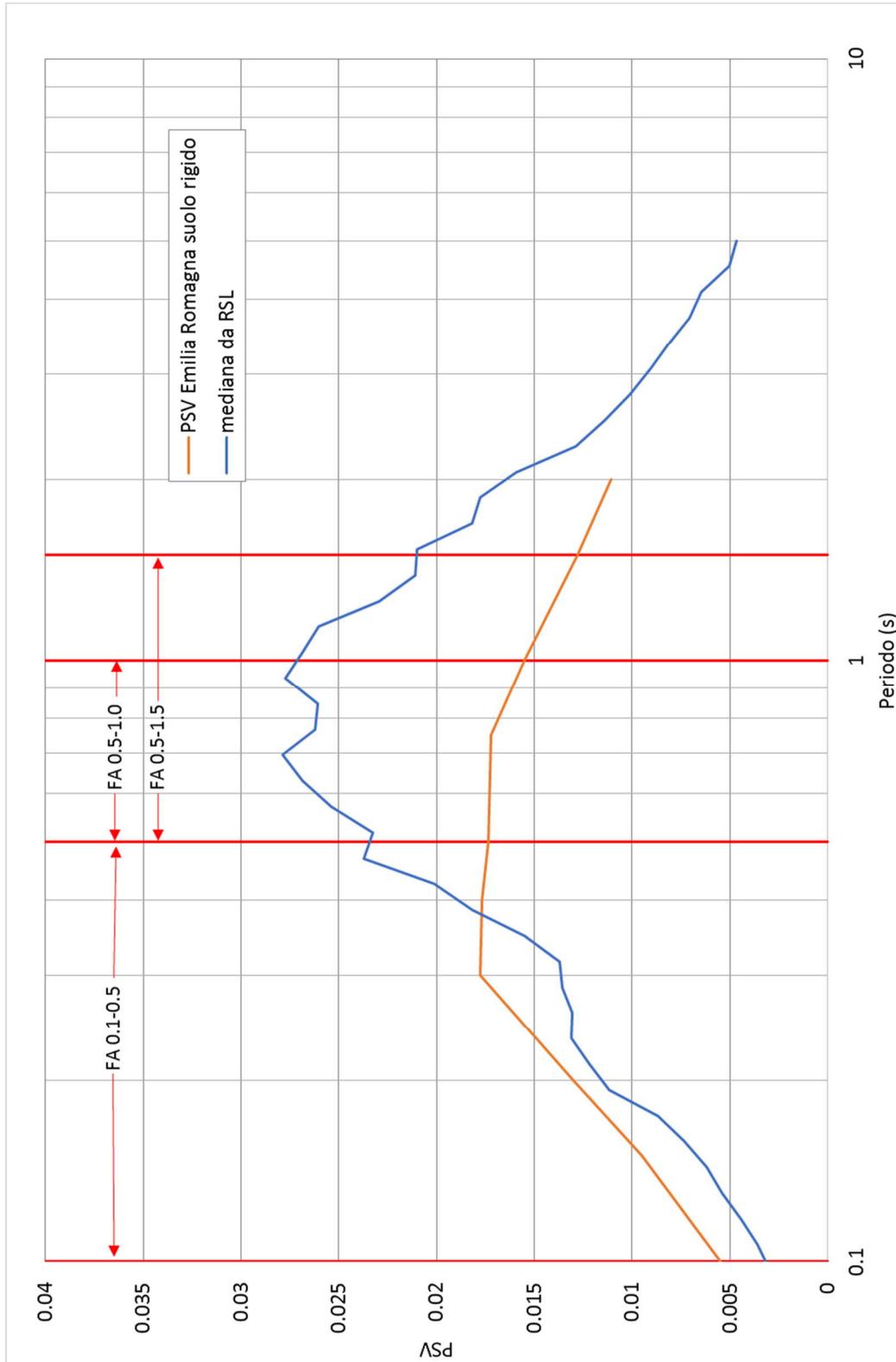


Fig. 54 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	83 di 110

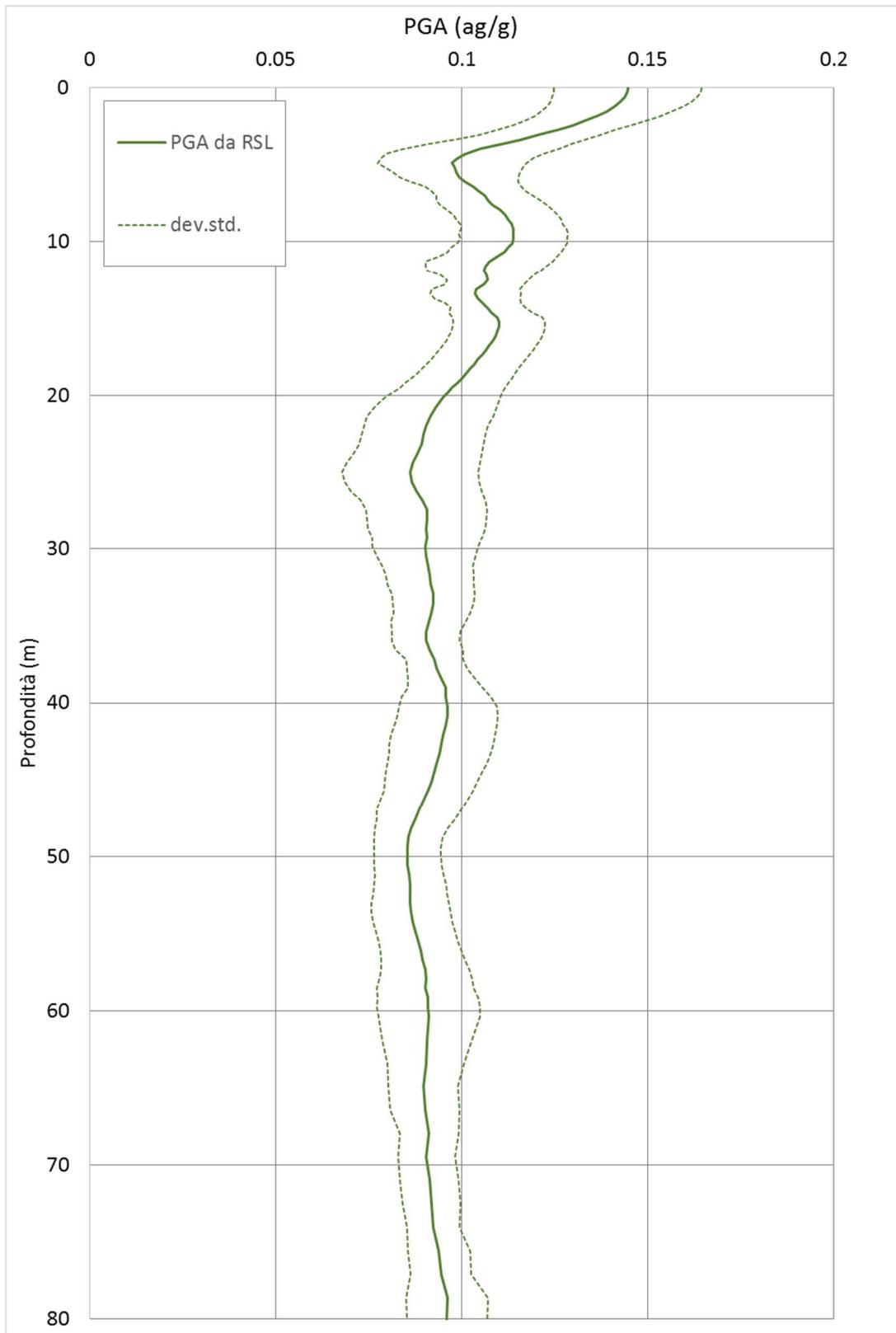


Fig. 55 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	84 di 110



	RSL	DAL 112/2007
$FA_{SA} 0.1-0.5s$	1.10	
$FA_{SA} 0.4-0.8s$	1.60	
$FA_{SA} 0.5-1.5s$	1.70	
$FA_{SA} 0.7-1.1s$	1.79	
FA_{PGA}	0.96	1.50
$FH_{IS} 0.1-0.5s$	0.97	1.80
$FH_{IS} 0.5-1.0s$	1.62	2.50
$FH_{IS} 0.5-1.5s$	1.63	

Tab. 31 - Portomaggiore SCPTU2 - fattori di amplificazione

3.5 Verifica del rischio di liquefazione

Il rischio di liquefazione è stato valutato prendendo in considerazione le 47 verticali indagate mediante prove CPTU e SCPTU effettuate nel corso del presente studio e le 18 prove CPTU realizzate nel corso degli studi di microzonazione di 2° livello. Nel complesso, quindi sono state verificate a liquefazione ben 65 verticali.

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

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

Il rischio di liquefazione può essere stimato con metodi semplificati da prove CPTU mediante il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione LPI di *Iwasaki et al.* (1982). Le prove CPTU sono preferibili per la migliore ripetibilità delle misure e per la continuità dei profili penetrometrici. L'indice LPI⁹ è un parametro di sintesi che, mediante un valore

⁹ LPI = Liquefaction Potential Index è tradotto con IL = Indice di Liquefazione nella cartografia di MS

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	85 di 110



numerico compreso tra 0 e 100, quantifica i possibili effetti della liquefazione in superficie, tenendo conto di severità dell'azione sismica, e di profondità, spessore e valore del fattore di sicurezza degli strati liquefacibili.

Per poter valutare la severità degli effetti *Iwasaki* ha proposta la scala riportata in Tab. 32

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

Tab. 32 - Valutazione del rischio di liquefazione secondo *Iwasaki*

Valutazioni più recenti riportate da *Sonmez* (2003), basate su sismi di magnitudo inferiore a quelli utilizzati da *Iwasaki* consigliano tuttavia di rimodulare le classi di pericolosità come riportato in Tab. 33:

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

Tab. 33 - Valutazione del rischio di liquefazione secondo *Sonmez*

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

L'indice LPI è definito nel modo seguente:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	86 di 110



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

Dove:

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

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

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

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

dove:

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

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

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

CSR^{10} = rapporto di tensione ciclica (*Cyclic Stress Ratio*)

Nelle verifiche effettuate nel presente studio, per il calcolo del CRR sono stati utilizzati sia il metodo NCEER (modificato da *Roberson* 2010) che il metodo di Boulanger & Idriss (2014) entrambi implementati dal programma CLIQ della *Geologimiki*. In Fig. 56 viene presentata, in forma di *flow-chart*, la procedura di calcolo di CRR utilizzata dal programma per la verifica con il metodo NCEER, in Fig. 57 la procedura di Boulanger & Idriss.

In tali verifiche, come valori di CSR, sono stati utilizzati quelli calcolati mediante la RSL, come descritto nel paragrafo 3.3.6.

I report delle verifiche effettuate sono stati prodotti esclusivamente per il metodo di Robertson che, come verrà illustrato successivamente (§ 3.5.1), è apparso più aderente alla realtà locale. Anche le cartografie di 3° livello sono state redatte tenendo conto di risultati di tale metodo.

¹⁰ Come illustrato in precedenza (cap. 3.3.6) per il presente studio il valore di CSR è stato ottenuto direttamente dalla RSL.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	87 di 110

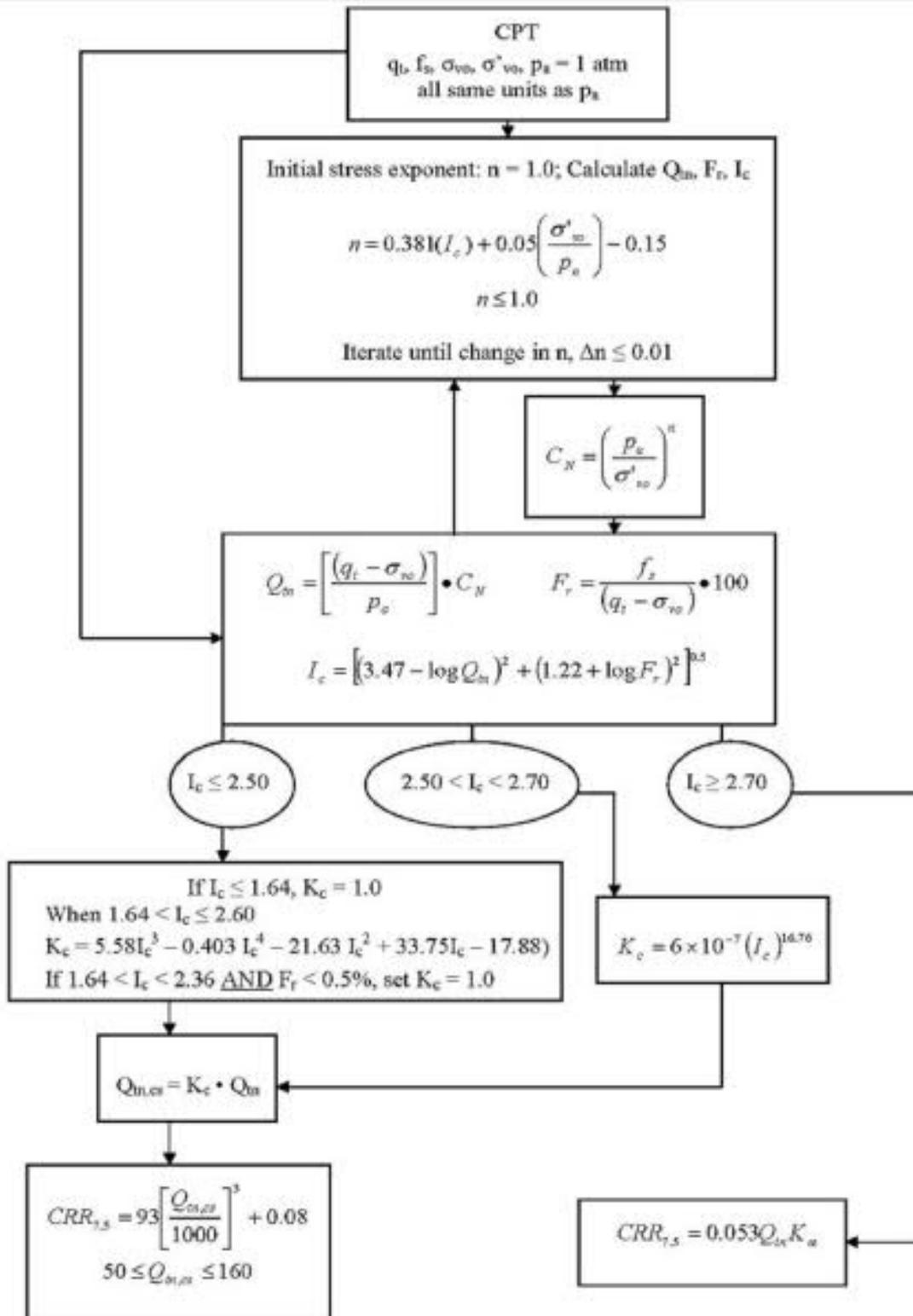


Fig. 56 - Flow chart della procedura di verifica NCEER modificata da Roberson (2010)

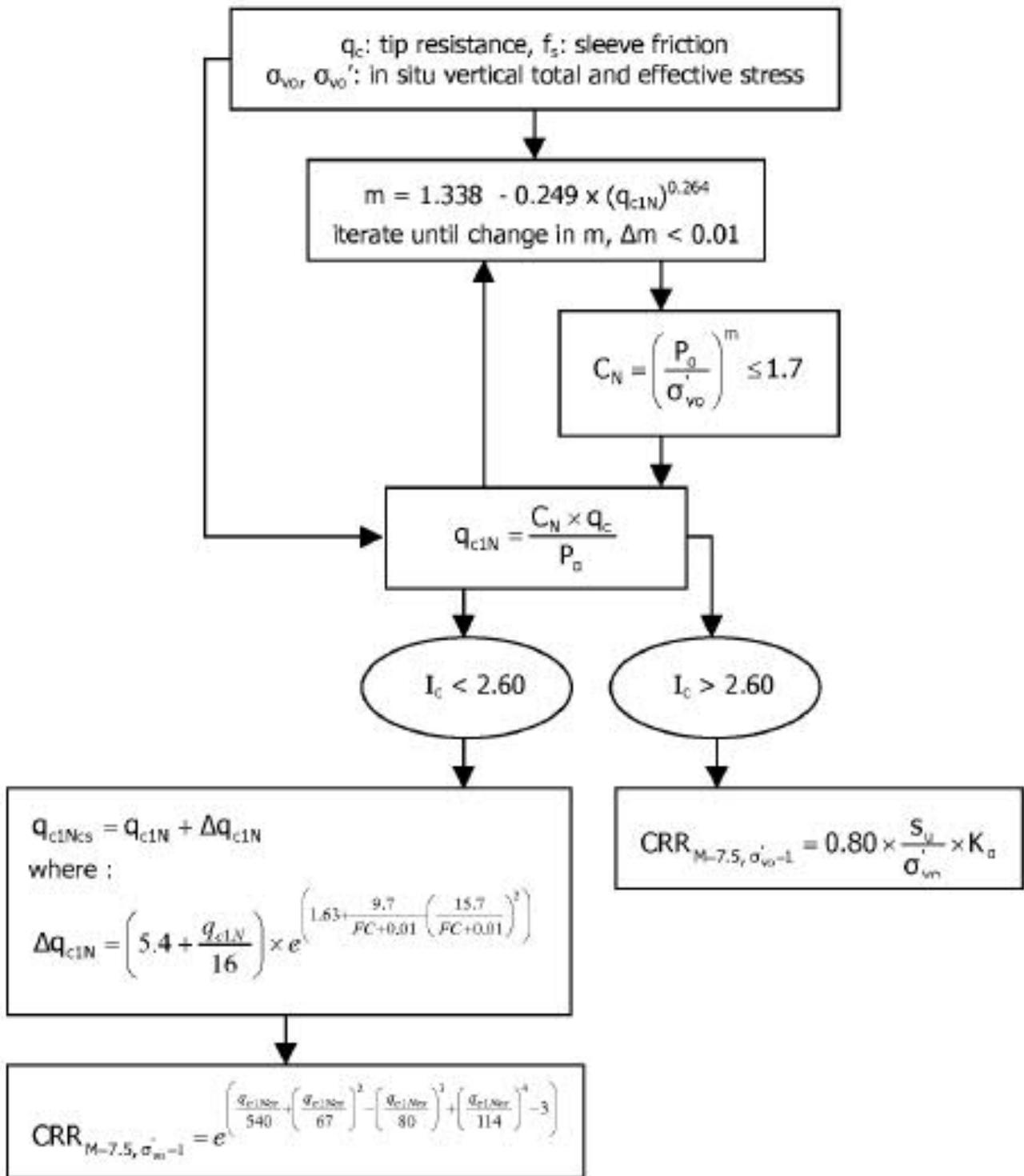


Fig. 57 - Flow chart della procedura di verifica Boulanger & Idriss (2014)



Per la verifica, oltre ai dati delle prove CPTU, è necessario fornire al programma la magnitudo attesa al sito. Per tale dato è stato utilizzato il valore massimo della zona di riferimento in cui sono inclusi i tre comuni (Zona 912 - Fig. 58) della classificazione ZS9 dell'IMCS, che è pari a $M_w=6.14$.

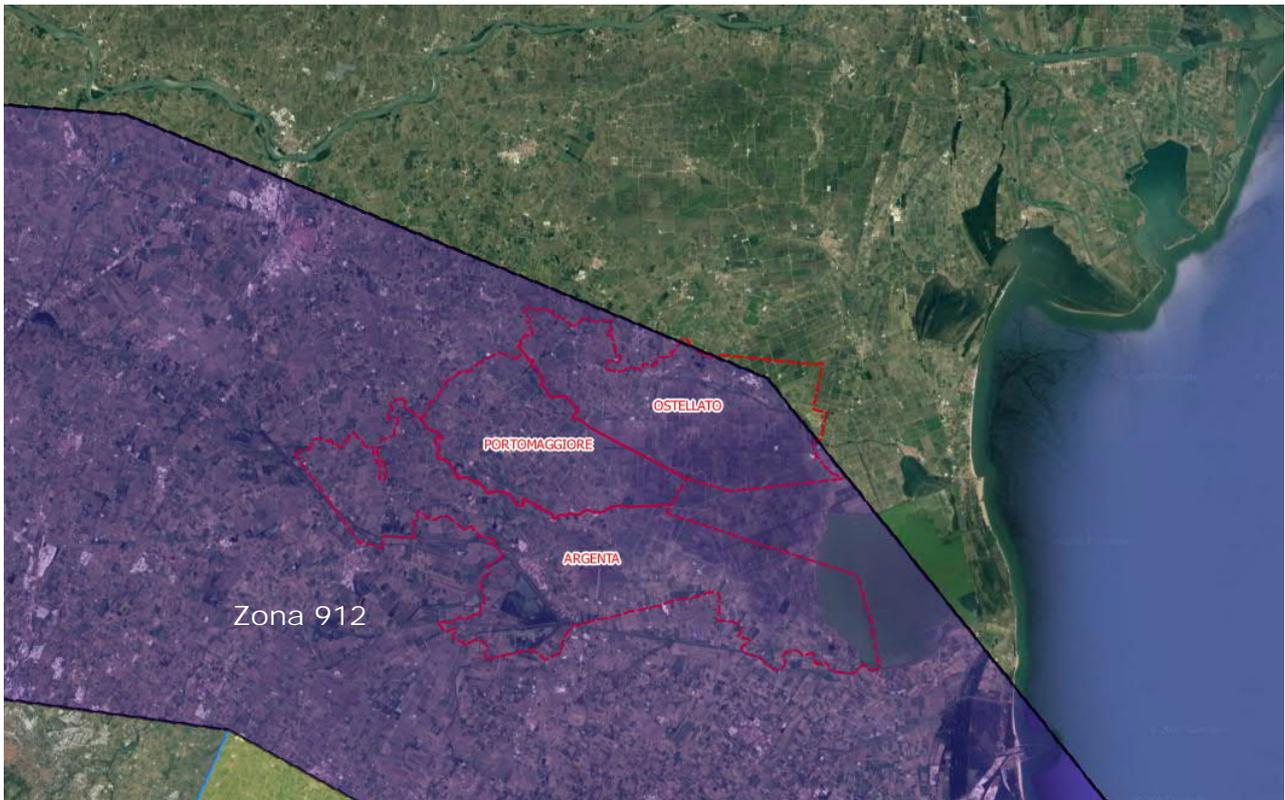


Fig. 58 - Classificazione ZS9

In tutte le verifiche, a titolo cautelativo, è stato impostato il livello di falda a piano campagna in caso di sisma.

3.5.1 Analisi dei risultati

Per ciascuna prova è stato prodotto un report che contiene sia i grafici interpretativi della prova stessa (resistenze penetrometriche, litologia, ecc.), sia i grafici relativi alla liquefazione ed in particolare (Fig. 59):

- Il confronto tra CSR e CCR
- La variazione del fattore di sicurezza
- La cumulata del valore di LPI

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	90 di 110

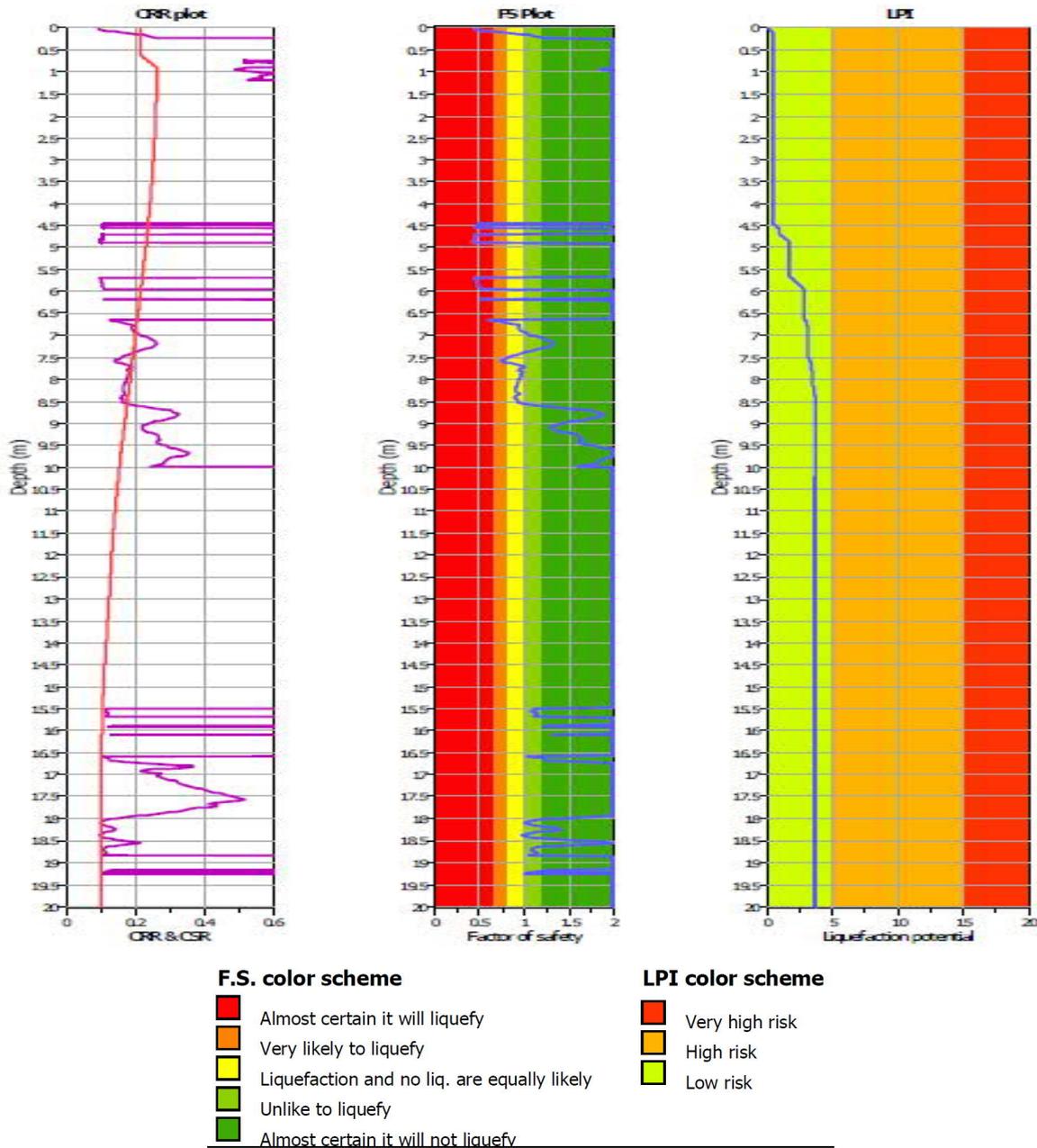


Fig. 59 - Grafici di CSR-CRR, dei fattori di sicurezza FS e dell'indice di liquefazione (LPI), valutati per la prova AG_CPTU1

Nel complesso, come era da attendersi, viste le caratteristiche litostratigrafiche del territorio, il rischio di liquefazione risulta molto variabile in relazione alle caratteristiche deposizionali dei diversi siti.

In Tab. 34 vengono rappresentati i valori di LPI calcolati sia mediante il metodo di Robertson che quello di Boulanger & Idriss. Il confronto è riportato graficamente anche nelle Fig. 61 e Fig. 62.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	91 di 110



Comune	Località	Codice indagine	Robertson 2010		Boulangier & Idriss 2014		Cambio classe
			IL	classe	IL	classe	
Argenta	Argenta	AG_CPTU_1	3.72	2<IL<5	13.13	5<IL<15	aumento
	Ospital Monacale	AG_CPTU_10	6.02	5<IL<15	13.09	5<IL<15	
	Traghetto	AG_CPTU_11	0.83	IL<2	1.67	IL<2	
	Argenta	AG_CPTU_12	20.84	IL>15	32.06	IL>15	
	Zuccherificio Cà Bergamine	AG_CPTU_13	0.43	IL<2	0.77	IL<2	
	Borgo Cortili	AG_CPTU_14	2.82	2<IL<5	3.91	2<IL<5	
	Argenta	AG_CPTU_15	1.96	IL<2	2.63	2<IL<5	aumento
	Santa Maria Codifiume	AG_CPTU_16	6.47	5<IL<15	8.16	5<IL<15	
	Argenta	AG_CPTU_2	8.26	5<IL<15	14.67	5<IL<15	
	Bevignante	AG_CPTU_3	0.88	IL<2	2.48	2<IL<5	aumento
	Sant'Agata Molino di Filo	AG_CPTU_4	2.09	2<IL<5	4.66	2<IL<5	
	Anita	AG_CPTU_5	1.69	IL<2	6.7	5<IL<15	aumento
	San Biagio	AG_CPTU_6	1.12	IL<2	3.09	2<IL<5	aumento
	Campotto	AG_CPTU_7	1.67	IL<2	3.25	2<IL<5	aumento
	Boccaleone	AG_CPTU_8	13.29	5<IL<15	22.73	IL>15	aumento
	Consandolo	AG_CPTU_9	15.08	IL>15	18.99	IL>15	
	Longastrino	AG_SCPT_1	2.53	2<IL<5	7.99	5<IL<15	aumento
	Bando	AG_SCPT_2	2.97	2<IL<5	5.61	5<IL<15	aumento
	Argenta	AG_SCPT_3	10.82	5<IL<15	20.8	IL>15	aumento
	Filo	AG_SCPT_4	0	IL<2	0.3	IL<2	
	Argenta	AG_SCPT_5	0.18	IL<2	0.23	IL<2	
	Longastrino	MS2_CPTU10_AG	0.93	IL<2	3.51	2<IL<5	aumento
	Campotto	MS2_CPTU11_AG	1.92	IL<2	3.09	2<IL<5	aumento
	Argenta	MS2_CPTU12_AG	11.81	5<IL<15	16.74	IL>15	aumento
	Bando	MS2_CPTU13_AG	2.5	2<IL<5	5.89	5<IL<15	aumento
	Consandolo	MS2_CPTU14_AG	11.28	5<IL<15	20.06	IL>15	aumento
	Consandolo	MS2_CPTU15_AG	0.58	IL<2	0.95	IL<2	
	Santa Maria Codifiume	MS2_CPTU16_AG	5.47	5<IL<15	7.83	5<IL<15	
	Benvignante	MS2_CPTU17_AG	1.26	IL<2	3.39	2<IL<5	aumento
	Boccaleone	MS2_CPTU18_AG	3.68	2<IL<5	7.36	5<IL<15	aumento
Anita	MS2_CPTU9_AG	13.45	5<IL<15	21.69	IL>15	aumento	
Ostellato	Dogato	MS2_CPTU1_OS	6.53	5<IL<15	11.41	5<IL<15	
	Ostellato	MS2_CPTU2_OS	1.72	IL<2	6.26	5<IL<15	aumento
	San Giovanni	MS2_CPTU3_OS	13.42	5<IL<15	34.34	IL>15	aumento



Comune	Località	Codice indagine	Robertson 2010		Boulangier & Idriss 2014		Cambio classe
			Valore	Classe	Valore	Classe	
	Medelana Rovereto	MS2_CPTU4_OS	4.02	2<IL<5	8.04	5<IL<15	aumento
	San Vito	MS2_CPTU5_OS	8.23	5<IL<15	16.16	IL>15	aumento
	Ostellato	OS_CPTU_1	0.1	IL<2	3.45	2<IL<5	aumento
	Medelana Rovereto	OS_CPTU_10	5.62	5<IL<15	8.53	5<IL<15	
	San Vito	OS_CPTU_2	1.32	IL<2	3.05	2<IL<5	aumento
	Libolla	OS_CPTU_3	0.89	IL<2	2.99	2<IL<5	aumento
	Possesione Pinzane	OS_CPTU_4	1.26	IL<2	3.49	2<IL<5	aumento
	Campolungo	OS_CPTU_5	1.48	IL<2	7.7	5<IL<15	aumento
	San Giovanni	OS_CPTU_6	14.02	5<IL<15	29.98	IL>15	aumento
	Ostellato	OS_CPTU_7	4.82	2<IL<5	7.33	5<IL<15	aumento
	Ostellato	OS_CPTU_8	0.53	IL<2	0.99	IL<2	
	Dogato	OS_CPTU_9	1.52	IL<2	3.51	2<IL<5	aumento
	Medelana Rovereto	OS_SCPT_1	6.98	5<IL<15	23.88	IL>15	aumento
	Chiusa Sabbionara Corte Centra	OS_SCPT_2	2.45	2<IL<5	3.24	2<IL<5	
	Portomaggiore	Portomaggiore	MS2_CPTU6_PO	0.2	IL<2	3.56	2<IL<5
Maiero		MS2_CPTU7_PO	1.45	IL<2	3.65	2<IL<5	aumento
Portorotta		MS2_CPTU8_PO	8.26	5<IL<15	11.85	5<IL<15	
Casetto Grande (POC)		PO_CPTU_1	2.74	2<IL<5	4.29	2<IL<5	
Gambulaga		PO_CPTU_10	15.72	IL>15	30.41	IL>15	
Portomaggiore		PO_CPTU_11	2.44	2<IL<5	5.74	5<IL<15	aumento
Portomaggiore		PO_CPTU_12	0.17	IL<2	1.49	IL<2	
Portomaggiore		PO_CPTU_2	0.94	IL<2	1.47	IL<2	
Ripapersico		PO_CPTU_3	1.08	IL<2	3.72	2<IL<5	aumento
Portoverrara		PO_CPTU_4	3.66	2<IL<5	10.05	5<IL<15	aumento
Portorotta		PO_CPTU_5	6.75	5<IL<15	11.8	5<IL<15	
Quartiere		PO_CPTU_6	6.2	5<IL<15	17.59	IL>15	aumento
Sandolo		PO_CPTU_7	6.09	5<IL<15	9.16	5<IL<15	
Maiero		PO_CPTU_8	5.09	5<IL<15	7.74	5<IL<15	
Runco		PO_CPTU_9	10.56	5<IL<15	27.19	IL>15	aumento
Gambulaga	PO_SCPT_1	18.13	IL>15	44.03	IL>15		
Ripapersico	PO_SCPT_2	2.17	2<IL<5	5.4	5<IL<15	aumento	

Tab. 34 - Valori di LPI calcolati



Classi	IL	Robertson		B&I	
		num.	%	num.	%
Rischio basso	IL<2	26	40.0	8	12.3
Rischio moderato	2<IL<5	14	21.5	19	29.2
Rischio alto	5<IL<15	21	32.3	23	35.4
Rischio molto alto	IL>15	4	6.2	15	23.1
Totale		65	100.0	65	100.0

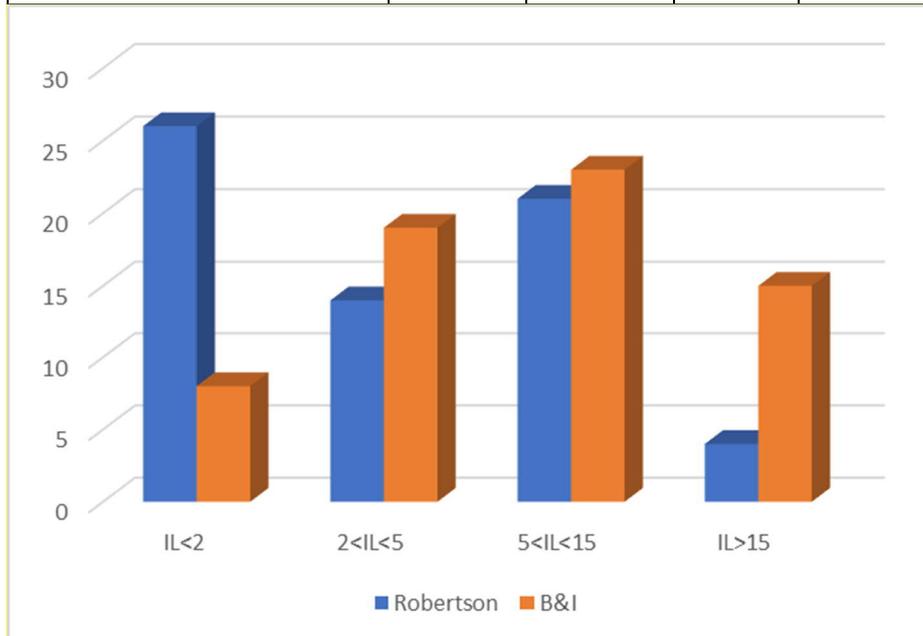


Fig. 60 - Statistiche di confronto

Dalle tabelle e dalle figure precedenti risulta evidente che il metodo di Boulanger e Idriss evidenzia un rischio di liquefazione molto più elevato di quello di Robertson. In particolare, oltre il 55% del territorio appare a rischio alto o molto alto (IL>5), mentre tale percentuale scende al 38% con Robertson.

Tale valutazione appare ingiustificata, soprattutto in rapporto al fatto che l'accelerazione utilizzata per la stima è riferita ad un tempo di ritorno di 475 anni. È pur vero che per l'area in questione si hanno evidenze storiche di fenomeni di liquefazione, ma non così estese su tutto il territorio.

Entrambi i metodi presentano analogo "significato geologico", differenziando adeguatamente le zone caratterizzate dalla presenza di dossi sabbiosi e paleoalvei dalle aree di valle, che per loro natura sono meno soggette al rischio di liquefazione (cfr Fig. 61 e Fig. 62).

Le cartografie di 3° livello, pertanto, sono state redatte utilizzando i dati riferiti al metodo di Robertson.

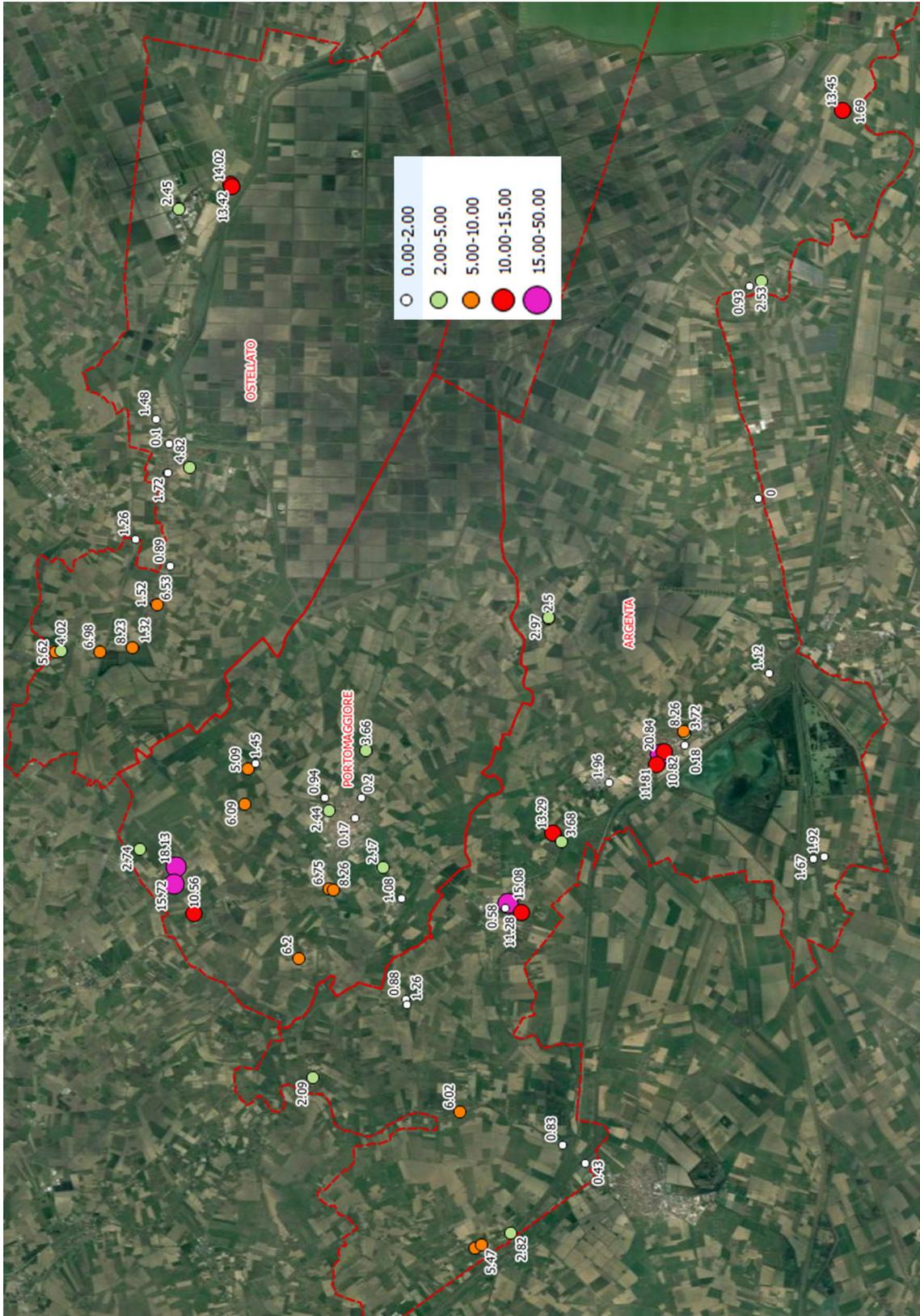


Fig. 61 - Area indagata con valori di LPI calcolati con Robertson 2010

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	95 di 110

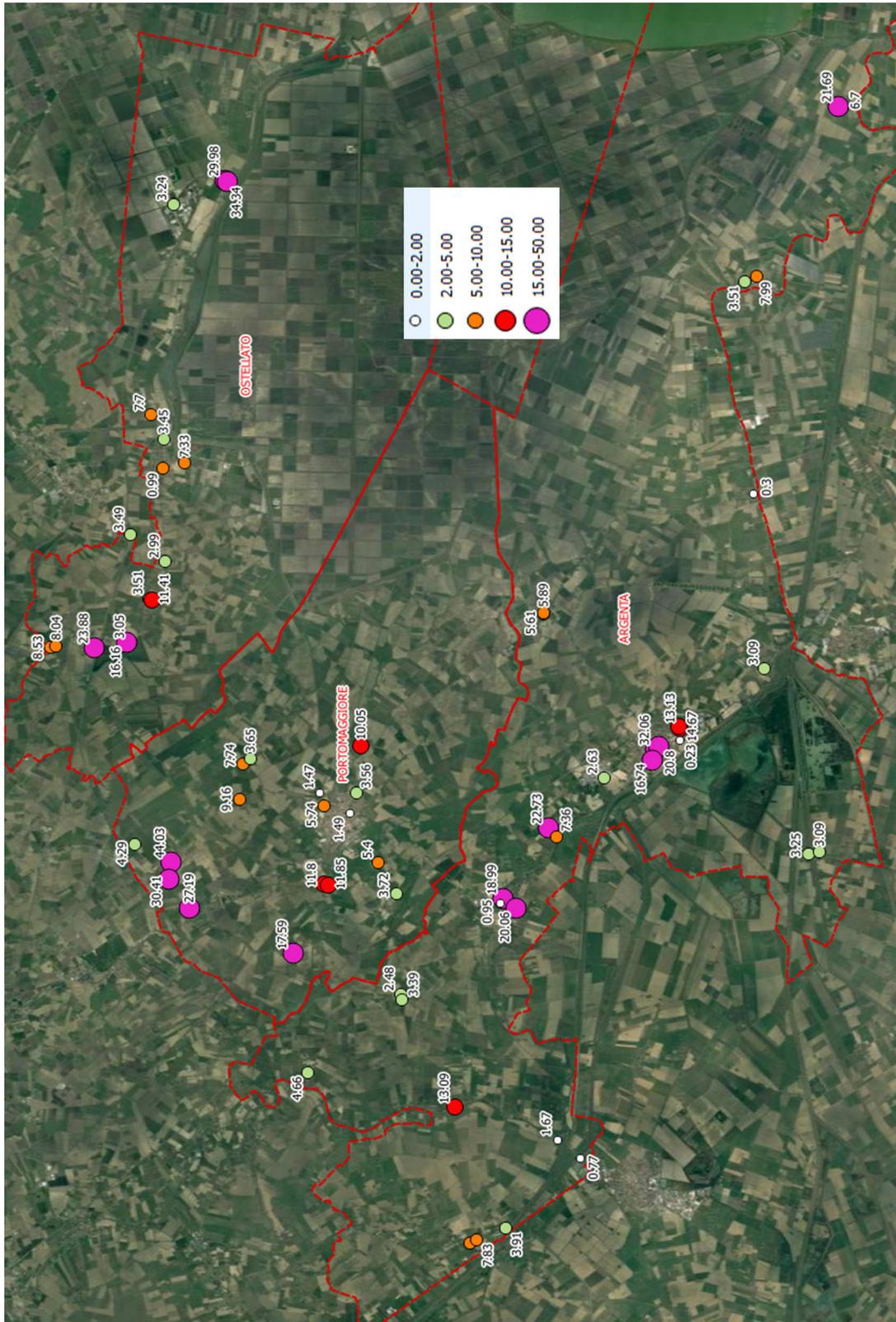


Fig. 62 - Area indagata con valori di LPI calcolati con Boulanger & Idriss 2014

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	96 di 110



3.6 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 del territorio.

Va evidenziato, tuttavia, che i risultati, soprattutto in termini di rischio di liquefazione, appaiono talora difficilmente correlabili tra loro vista l'elevata variabilità spaziale delle caratteristiche litostratigrafiche.

Talora, nello spazio di poche decine di metri, la stratigrafia cambia in maniera sostanziale e imprevedibile.

Spesso i risultati delle prove CPTU hanno disatteso quanto previsto sulla base delle MOPS individuate nello studio di microzonazione di secondo livello. Tale difformità è da imputare proprio alla considerevole variabilità laterale dei depositi, soprattutto per le zone di canale e di argine prossimale e distale.

Nella redazione delle cartografie di 3° livello, pertanto, si sono attribuiti valori cautelativi sia dei fattori di amplificazione che del IL, attribuendo cioè a ciascuna area omogenea i valori più elevati riscontrati all'interno della stessa.

Un'ulteriore, importante, criticità è già stata segnalata nel Cap. 3.3.2.1, relativamente alla difficoltà di individuare con adeguata precisione il bedrock sismico.

4. ELABORATI CARTOGRAFICI

4.1 Carte delle indagini

Nelle Carte delle indagini, alla scala 1:10.000, sono state riportate le ubicazioni delle prove di nuova esecuzione e dei dati pregressi, relativi a indagini geognostiche e/o sismiche a corredo di pratiche edilizie depositate presso gli Uffici Tecnici Comunali, oltre a quelle contenute nel database fornito dal Servizio Geologico Regionale.

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
- sondaggio da cui sono stati prelevati campioni
- sondaggio a distruzione di nucleo
- pozzo per idrocarburi
- pozzo per acqua
- prova sismica in foro tipo Downhole

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	97 di 110



- prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)
- prova penetrometrica con piezocono e cono sismico
- prova dilatometrica
- trincea o pozzetto esplorativo
- stazione microtremore a stazione singola
- MASW
- ESAC/SPAC
- REMI

come raffigurato nella legenda riportata in Fig. 63.

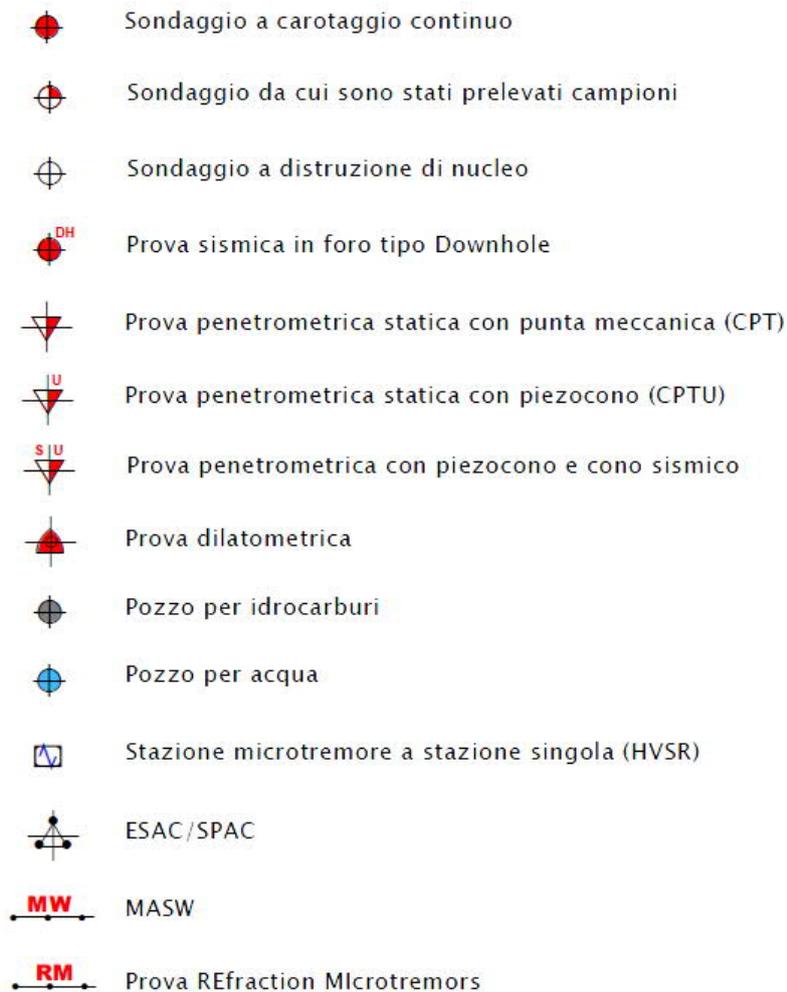


Fig. 63 – Legenda delle Carte delle indagini

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	98 di 110



Nelle carte sono indicate anche alcune indagini esterne ai perimetri del territorio urbanizzato e urbanizzabile, ove sono state concentrate le analisi, ma ugualmente utili a definire le sue caratteristiche litostratigrafiche.

4.2 Carte geologico tecniche

Ai soli fini della completezza della documentazione nel presente studio sono state riprese le Carte geologico tecniche redatte nell'ambito dello studio di secondo livello.

Per la descrizione della cartografia si rimanda alle relazioni illustrative di MS2.

4.3 Carte delle frequenze naturali dei terreni

Sulla base di tutti i dati tomografici disponibili sono state redatte le Carte delle frequenze naturali dei terreni.

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

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

Gli indirizzi tecnici a cui si è fatto riferimento prescrivono, per rendere graficamente più evidenti le variazioni in relazione alla posizione, di utilizzare colorazioni differenti per distinguere le prove a seconda della frequenza principale ottenuta, definendo le seguenti classi:

- $F_0 \leq 0,6$ Hz
- $0,6 \text{ Hz} < F_0 \leq 1$ Hz
- $1 \text{ Hz} < F_0 \leq 2$ Hz
- $2 \text{ Hz} < F_0 \leq 8$ Hz
- $F_0 > 8$ Hz

Inoltre, sono state utilizzate simbologie diverse a seconda che la prova sia caratterizzata, in corrispondenza della frequenza principale, da:

- un contrasto di impedenza elevato ($HSVR \geq 3$)
- un contrasto di impedenza moderato ($2 \leq HSVR < 3$)
- un contrasto di impedenza basso ($1,5 \leq HSVR < 2$ Hz)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	99 di 110



frequenza picco significativo (Hz)	ampiezza picco			spessore atteso (m)
	$1,5 \leq \text{HVSr} < 2$	$2 \leq \text{HVSr} < 3$	$\text{HVSr} \geq 3$	
$F_0 \leq 0,6$				> 200
$0,6 < F_0 \leq 1$				200 - 100
$1 < F_0 \leq 2$				100 - 30
$2 < F_0 \leq 8$				30 - 10
$F_0 > 8$				< 10
Assenza di picchi significativi				

Fig. 64 - Legenda della Carta delle frequenze

4.4 Carte delle aree suscettibili degli effetti locali

La carta delle aree suscettibili di effetti locali è un elaborato di sintesi fondamentale del primo livello di approfondimento degli studi microzonazione e come tale è stata ripresa dagli studi di MS effettuati nella fase precedente.

Questa cartografia riporta la classificazione del territorio indagato in zone suscettibili di amplificazioni locali e zone suscettibili di instabilità in quanto nell'area risultano completamente assenti zone classificabili come stabili. Nelle tavole, inoltre, sono riportate le ubicazioni dei punti di misura del rumore ambientale.

Le zone suscettibili di amplificazioni locali sono state definite sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica (Fig. 65) e distinte in 6 classi di cui in carta sono visibili le perimetrazioni.

Alle classi individuate sono stati associati codici identificativi numerici progressivi (2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006) e successivamente attribuite colorazioni distinte, utilizzando toni in sequenza del verde, giallo e marrone, come previsto da dagli standard sopra citati.

Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi con la descrizione delle relative successioni in base alle quali sono state definite le classi zonali. Tali descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	100 di 110

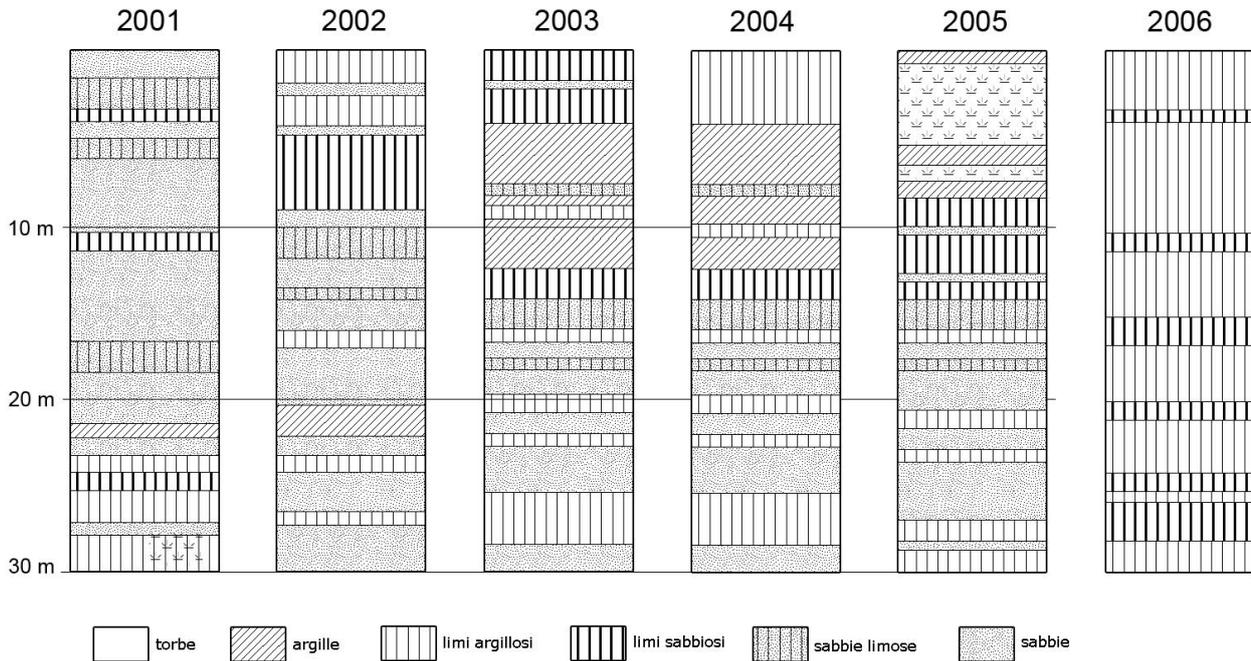


Fig. 65 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone individuate nel territorio comunale

Zona 2001

Terreni di copertura costituiti prevalentemente da depositi sabbiosi con alternanze limo- sabbiose per i primi 20-25 metri, caratterizzati da un generale aumento della granulometria e dell'addensamento al di sotto dei 10 metri, seguiti da depositi in prevalenza limo-argillosi a consistenza media.

Zona 2002

Terreni di copertura costituiti da un primo intervallo di 3-6 metri di depositi in prevalenza limo-argillosi a consistenza media, a cui seguono spessori significativi di limi sabbiosi e sabbie caratterizzati da un generale aumento della granulometria e dell'addensamento con la profondità, intervallati, oltre i 10 metri di profondità, da limitati spessori di depositi limo- argillosi.

Zona 2003

Terreni di copertura costituiti da un primo intervallo di 3-5 metri di depositi in prevalenza limo-sabbiosi, a cui seguono spessori di almeno 7 metri di argille e limi a consistenza da media a bassa, con rare intercalazioni limo-sabbiose di spessore

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	101 di 110



decimetrico. Oltre i 10 metri sono presenti livelli almeno metrici di limi sabbiosi e sabbie ad addensamento da medio ad elevato, intervallati da spessori variabili e in genere in aumento con la profondità, di limi argillosi e argille a consistenza media.

Zona 2004

Terreni di copertura costituiti da un primo intervallo di almeno 10 metri di depositi in prevalenza limo-argillosi a consistenza da media a bassa seguiti da livelli almeno metrici di limi sabbiosi e sabbie ad addensamento da medio ad elevato, intervallati da spessori variabili e in genere in aumento con la profondità, di limi argillosi e argille a consistenza media.

Zona 2005

Terreni di copertura costituiti da un primo intervallo di almeno 7 metri di depositi argillosi a consistenza bassa con diffusi livelli torbosi, seguiti da livelli metrici di limi sabbiosi e sabbie ad addensamento da medio ad elevato, intervallati da spessori variabili e in genere in aumento con la profondità di limi argillosi e argille a consistenza media.

Zona 2006

Terreni di copertura costituiti da almeno 20 metri di depositi in prevalenza limo-argillosi a consistenza da media a bassa, con rare intercalazioni limo-sabbiose ad addensamento da basso a medio di spessore decimetrico, la cui frequenza aumenta in genere con la profondità.

Le zone cartografate come suscettibili di instabilità (corrispondenti a tutte le zone eccetto la 2006) presentano tutte potenziali problematiche legate a fenomeni di liquefazione. Tali aree sono state classificate come zone di attenzione per liquefazione di tipo 1 e rappresentate in carta mediante retino con relativo codice identificativo (3050), come previsto dagli standard di microzonazione adottati. Alcune aree che presentano spessori significativi di depositi potenzialmente liquefacibili, sono anche caratterizzate dalla presenza di riporto antropico in superficie e quindi possono essere interessate da cedimenti differenziali cosismici. All'interno degli ambiti studiati questa situazione è stata individuata solo nell'area urbana di Argenta in corrispondenza di antichi fossati oggi tombati. Queste aree sono indicate in carta come sovrapposizione di zone di attenzione per instabilità differenti e rappresentate con colore pieno rosso scuro (3050)..

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	102 di 110



4.5 Carte delle velocità delle onde di taglio S

In ottemperanza ai riferimenti tecnici citati nelle premesse, sono state redatte per tutte le aree oggetto di studio delle Carte delle velocità delle onde di taglio S (V_s).

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 SCPTU, Prova Down-hole, MASW, ESAC/SPAC, ReMi) e indicando il corrispondente valore di V_{S30} (in m/s), dove:

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

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

4.6 Carte di microzonazione sismica

Le Carte di microzonazione sismica di Livello 3 in scala 1:10.000 fanno parte degli elaborati grafici conclusivi del presente studio. Tutte le aree cartografate sono state redatte con studi di terzo livello.

Come precedentemente indicato, l'amplificazione è stata calcolata per un tempo di ritorno $TR=475$ anni, con smorzamento $\zeta =5\%$, relativamente ai seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico:

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

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	103 di 110



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 $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

Nelle cartografie sono state individuate le seguenti classi:

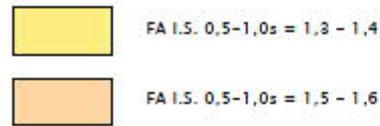
- Le aree stabili (con FA pari o inferiore a 1 e IL inferiore a 2)
- Le aree stabili ma suscettibili di amplificazioni locali (con FA superiore a 1 e 1.2 e IL inferiore a 2)
- Le aree suscettibili di instabilità (con FA superiore a 1 e con IL superiore a 2)

A seconda della cartografia considerata sono state, inoltre, rappresentate con colorazioni differenti i diversi intervalli di FA. Sulle tavole sono stati inoltre rappresentati i valori di IL calcolati per tutti i 65 punti verificati.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	104 di 110



Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali



Zone suscettibili di instabilità



Verticale di verifica alla liquefazione con indicato il valore di IL



Fig. 66 - Legenda adottata per le tavole di 3° livello

4.7 Carte 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 cm/s^2).

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

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	105 di 110



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

Gli intervalli di periodi considerati sono:

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

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

Per gli altri intervalli di periodo sono, invece, stati calcolati, sempre per $T_R=475$ anni, dallo spettro su suolo A utilizzando i dati di accelerazione spettrale ($Se(T)$) forniti da INGV¹¹ nell'ambito degli studi per la redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274.

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

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

5. 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 Tinto A. (2010): UNIONE TERRE DI CASTELLI: VALIDAZIONE DELLA

¹¹ Montaldo V., Meletti C., 2007. Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3, <http://esse1.mi.ingv.it/d3.html>

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	106 di 110



MICROZONAZIONE SISMICA DI II LIVELLO (2010) - 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale Geofisica della Terra Solida, Prato

- Boulanger, R. W. and Idriss, I. M. (2014) "CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures", Report UCD/CGM- 14/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 138 pp.
- Gruppo di lavoro MS (2008): INDIRIZZI E CRITERI PER LA MICROZONAZIONE SISMICA. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd
http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proceedings 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Berkeley, 32-56.
- Marcellini A., Martelli L, Tento A., Daminelli R. (2009): L'AMPLIFICAZIONE SISMICA NEGLI "INDIRIZZI PER GLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA IN EMILIA-ROMAGNA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA"
- 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
- Robertson, P.K. and Wride, C.E., (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 35(3): 442-459.
- Robertson, P.K., (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied strength Using the Cone Penetration Test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 136(6): 842-853
- Robertson P.K., Cabal K.L. (2015) "Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering 6th edition. Gregg Drilling & testing Inc.
- CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA – Scala 1:250.000 (2004) - Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse, Sezione di Firenze
- Geotema s.r.l., Studio di geologia Tarabusi e Progeo s.r.l. (2015) – Studio di microzonazione di secondo livello – Unione dei Comuni Valli e Delizie – Argenta – Ostellato – Portomaggiore.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	107 di 110



- 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

6. ALLEGATI

Nel corso dello studio sono stati redatti i seguenti elaborati grafici ed allegati:
Comune di Argenta:

Tav. 1a - 1b	Carta delle indagini	scala 1:10.000
Tav. 2a - 2b ¹²	Carta geologico tecnica	Scala 1:10.000
Tav. 3a - 3b	Carta delle frequenze naturali dei terreni	Scala 1:10.000
Tav. 4a - 4b	Carta delle indagini	
Tav. 5a - 5b	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	scala 1:10.000
Tav. 6a - 6b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA}	scala 1:10.000
Tav. 7a - 7b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.1s < T_0 < 0.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 8a - 8b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.5s < T_0 < 1.0s}$	scala 1:10.000
Tav. 9a - 9b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.5s < T_0 < 1.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 10a-10b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.1s < T_0 < 0.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 11a-11b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.4s < T_0 < 0.8s}$	scala 1:10.000
Tav. 12a-12b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.7s < T_0 < 1.1s}$	scala 1:10.000
Tav. 13a-13b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.5s < T_0 < 1.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 14a-14b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - H_{Sm}	scala 1:10.000
Tav. 15a-15b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm\ 0.4s-0.8s}$	scala 1:10.000
Tav. 16a-16b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm\ 0.7s-1.1s}$	scala 1:10.000
Tav. 17a-17b	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm\ 0.5s-1.5s}$	scala 1:10.000

Comune di Ostellato:

¹² La Carta geologico tecnica e la Carta delle frequenze naturali dei terreni, per i tre comuni, sono state riprese integralmente dallo studio di microzonazione di secondo livello redatto da Geotema s.r.l., Studio di geologia Tarabusi e Progeo s.r.l. nel giugno 2015.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Gennaio 2021	1	108 di 110



Tav. 1c	Carta delle indagini	scala 1:10.000
Tav. 2c	Carta geologico tecnica	Scala 1:10.000
Tav. 3c	Carta delle frequenze naturali dei terreni	Scala 1:10.000
Tav. 4c	Carta delle indagini	
Tav. 5c	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	scala 1:10.000
Tav. 6c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA}	scala 1:10.000
Tav. 7c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.1s < T_0 < 0.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 8c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.5s < T_0 < 1.0s}$	scala 1:10.000
Tav. 9c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.5s < T_0 < 1.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 10c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.1s < T_0 < 0.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 11c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.4s < T_0 < 0.8s}$	scala 1:10.000
Tav. 12c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.7s < T_0 < 1.1s}$	scala 1:10.000
Tav. 13c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.5s < T_0 < 1.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 14c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - H_{Sm}	scala 1:10.000
Tav. 15c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm\ 0.4s-0.8s}$	scala 1:10.000
Tav. 16c	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm\ 0.7s-1.1s}$	scala 1:10.000
Tav. 17	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm\ 0.5s-1.5s}$	scala 1:10.000

Comune di Portomaggiore:

Tav. 1d	Carta delle indagini	scala 1:10.000
Tav. 2d	Carta geologico tecnica	Scala 1:10.000
Tav. 3d	Carta delle frequenze naturali dei terreni	Scala 1:10.000
Tav. 4d	Carta delle indagini	
Tav. 5d	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	scala 1:10.000
Tav. 6d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA}	scala 1:10.000
Tav. 7d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.1s < T_0 < 0.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 8d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.5s < T_0 < 1.0s}$	scala 1:10.000
Tav. 9d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS\ 0.5s < T_0 < 1.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 10d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.1s < T_0 < 0.5s}$	scala 1:10.000
Tav. 11d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.4s < T_0 < 0.8s}$	scala 1:10.000
Tav. 12d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA\ 0.7s < T_0 < 1.1s}$	scala 1:10.000



Tav. 13d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $F_{SA} 0.5s < T_0 < 1.5s$	scala 1:10.000
Tav. 14d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - H_{Sm}	scala 1:10.000
Tav. 15d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm} 0.4s-0.8s$	scala 1:10.000
Tav. 16d	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm} 0.7s-1.1s$	scala 1:10.000
Tav. 17	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{Sm} 0.5s-1.5s$	scala 1:10.000