

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Approfondimenti di Livello 3

Regione Emilia-Romagna
Comune di Castelfranco Emilia



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	<p>RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI Mandataria</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 Dott.ssa Alessandra Cantoni Dott. Geol. Alessandro Ferrari Dott.ssa Ing. Giulia Mainardi</p>	Ottobre 2018



INDICE

1.	Introduzione	3
1.1	Motivazione dello studio di 3° livello	4
1.2	Articolazione dello studio.....	5
2.	Indagini ed analisi	7
2.1	Sondaggi a carotaggio continuo	8
2.2	Prove di laboratorio.....	8
2.3	Prove Down-Hole.....	8
2.4	Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono.....	11
2.5	Indagine mediante sismocono	14
2.6	Rilievo sismico HVSR mediante tromografo	16
3.	Analisi di risposta sismica locale.....	17
3.1	Pericolosità sismica di base	18
3.2	Segnali in input	20
3.3	Modello geofisico del sottosuolo	21
3.3.1	Litologia	22
3.3.2	Determinazione della Vs	22
3.3.3	Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G ₀) in funzione della deformazione	24
3.4	Codice di calcolo per la valutazione della RSL.....	27
3.5	Risultati della modellazione numerica	28
3.5.1	Cyclic stress ratio	32
3.6	RSL nei diversi siti.....	32
3.6.1	RSL per il sito S1-DH1	34
3.6.2	RSL per il sito S2-DH2	38
3.6.3	RSL per il sito SCPTU1	42
3.6.4	RSL per il sito SCPTU2	46
3.6.5	RSL per il sito SCPTU3	50
3.7	Verifica del rischio di liquefazione	54
3.7.1	Analisi dei risultati	58
3.8	Criticità del metodo.....	61
3.8.1	Considerazioni sul bedrock sismico	61
4.	Elaborati cartografici.....	63
4.1	Carte delle indagini	63
4.2	Carte geologico-tecniche	65
4.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni	65
4.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)	66
4.5	Carta della velocità delle onde di taglio S	70
4.6	Carte di microzonazione sismica	70
5.	Bibliografia	75
6.	Allegati	78

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	2 di 79



1. INTRODUZIONE

Nel presente documento vengono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nel corso dello *Studio di microzonazione sismica di III livello del Comune di Castelfranco Emilia*, effettuato su incarico dell'Amministrazione Comunale (cfr. Determinazione Dirigenziale n° 1469 del 28/12/2017) e finanziato con i contributi di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n° 171/2014 e Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna n°1227 del 31/08/2015.

Lo studio 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”)
- 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'Amministrazione Comunale è stato preso in esame l'intero territorio urbanizzato e urbanizzabile già indagato con gli approfondimenti di prima e seconda fase (cfr. paragrafo 1.1).

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

Essi sono stati predisposti, oltre che in versione cartacea, in versione digitale (*pdf*, con risoluzione 300 *dpi*).

I dati cartografici sono forniti anche in formato vettoriale (*shapefile*).

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	3 di 79



Per l'archiviazione dei dati e l'editing dei documenti sono stati seguiti gli standard di riferimento forniti dall'Allegato D della delibera regionale e dagli SRAI (Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica).

L'inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri delle indagini è stato facilitato dall'utilizzo dell'apposito software: "MS - SoftMS" nella versione 4.0.1.

1.1 Motivazione dello studio di 3° livello

In Comune di Castelfranco Emilia sono già stati effettuati, da un'A.T.P. con Engeo s.r.l. mandataria, degli studi di microzonazione sismica, con approfondimenti di 1° e 2° livello, nel rispetto degli ICMS.

Nell'ambito di tali studi, per l'intero territorio urbanizzato e urbanizzabile, è stata effettuata, tramite le procedure semplificate, previste appunto del 2° livello, una microzonazione con attribuzione di differenti fattori di amplificazione, che hanno lo scopo di consentire una valutazione comparativa della pericolosità sismica.

Considerate le caratteristiche litostratigrafiche rilevate, per tale analisi sono stati utilizzati due diversi approcci: dove la successione stratigrafica, fino ad almeno 40 m da p.c., è costituita da depositi omogenei (prevalentemente ghiaiosi, nell'estremità meridionale del Comune, e fini, in quella nord-occidentale) si è considerata la velocità delle onde S nei primi 30 m di sottosuolo (V_{s30}); nella restante parte del territorio comunale, invece, si è ragionato in termini di profondità (H) e velocità delle onde di taglio (V_{sH}) nello strato soprastante quello che "potrebbe" rappresentare un *bedrock* sismico.

Si è così evidenziato, come aspetto più significativo, che quest'ultime zone, all'interno delle quali ricade anche il Capoluogo, presentano fattori di amplificazione molto elevati, in particolare, in termini $F_{a, \text{Intensità spettrale } 0.1s < T_0 < 0.5s}$, coerenti con il fatto che, nelle stesse aree, le indagini effettuate, spesso, mostrano un'importante discontinuità delle Vs a profondità comprese tra 5 e 30 m da p.c.

Valori particolarmente alti, ma più in termini di $F_{a, \text{Intensità spettrale } 0.5s < T_0 < 1.0s}$, si hanno anche all'estremità nord-occidentale del territorio comunale, conseguenza della presenza di depositi fini cui corrispondono V_{s30} generalmente minori di 275 m/s. Essi, invece, risultano minimi in corrispondenza dell'abitato di Piumazzo, dove la presenza di un potente banco di ghiaie subaffiorante comporta il fatto che le V_{s30} siano normalmente comprese tra 475 e 550 m/s.

Gli studi di primo e secondo livello, inoltre, recependo quanto indicato nella valutazione della pericolosità sismica contenuta nel Quadro Conoscitivo del PSC Vigente, hanno individuato come "zone di attenzione per instabilità" (più precisamente, ZALQ1 - Zone di Attenzione per liquefazioni tipo 1) le zone del territorio in cui l'analisi geomorfologica e litologica, a firma del dott. geol. Valeriano Franchi, "ha evidenziato la presenza di dossi/paleodossi e paleoalvei, in cui si presume vi siano consistenti orizzonti sabbiosi".

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	4 di 79



A fronte delle sopradescritte criticità l'approfondimento di terzo livello, di iniziativa pubblica, nell'ambito degli studi finanziati dalla protezione Civile, si giustifica per le seguenti motivazioni:

- grazie ad indagini specifiche nelle aree a rischio di liquefazione, permette di dare consistenza numerica a tale rischio con la definizione dell' "Indice Potenziale di Liquefazione" LPI
- consentendo di svolgere delle analisi della risposta sismica locale, in corrispondenza di alcune situazioni stratigrafiche tipo, contribuisce a dare più chiarezza circa la vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio esistente e a verificare la validità del modello interpretativo applicato nel secondo livello.

La Regione Emilia Romagna ha condiviso le motivazioni sopraesposte e ha deciso di finanziare il presente studio.

1.2 Articolazione dello studio

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

1. individuazione di 5 aree rappresentative delle situazioni più critiche classificate nella fase precedente;
2. realizzazione di 2 sondaggi a carotaggio continuo fino alla profondità di 30 m con prelievo di campioni e realizzazione di prova Down-Hole per la misura in foro delle Vs;
3. realizzazione di 3 prove penetrometriche con cono sismico e piezocono SCPTU fino a 30 m o a rifiuto, per la misura in foro delle Vs, utilizzate anche per le verifiche a liquefazione;
4. realizzazione di 12 prove penetrometriche CPTU, spinte fino alla profondità di 20 m o a rifiuto, per le verifiche a liquefazione;
5. realizzazione di 5 prove HVSR per la determinazione della frequenza caratteristica del terreno in corrispondenza delle 5 indagini precedenti;
6. realizzazione di n° 4 prove di colonna risonante sui campioni prelevati nei sondaggi per la determinazione delle curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G_0) in funzione della deformazione;
7. Aggiornamento delle cartografie con i dati delle nuove indagini:
 - a. Carta delle indagini
 - b. Carta geologico-tecnica
 - c. Carta delle frequenze naturali dei terreni;
 - d. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS);
 - e. Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)
8. valutazione della risposta sismica locale in 5 siti in cui si riteneva di poter disporre di sufficienti dati per la definizione del modello geofisico del sottosuolo. L'elaborazione della RSL è stata realizzata mediante il

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	5 di 79



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;

9. calcolo dei fattori di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FA_{PGA}), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
10. calcolo del fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudovelocità (FA_{IS}) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s.
11. Verifiche a liquefazione su 15 verticali;
12. redazione delle cartografie di microzonazione sismica Livello 3 per i diversi FA:
 - a. FA_{PGA}
 - b. $FA_{IS\ 0.1-0.5\ s}$
 - c. $FA_{IS\ 0.5-1.0\ s}$

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	6 di 79



2. INDAGINI ED ANALISI

Di seguito vengono descritte le indagini e le analisi specifiche effettuate per la microzonazione di 3° livello, rappresentate graficamente in Fig. 1.

Le aree di indagine sono state individuate, in accordo con i Tecnici del Comune, principalmente sulla base degli studi di secondo livello.

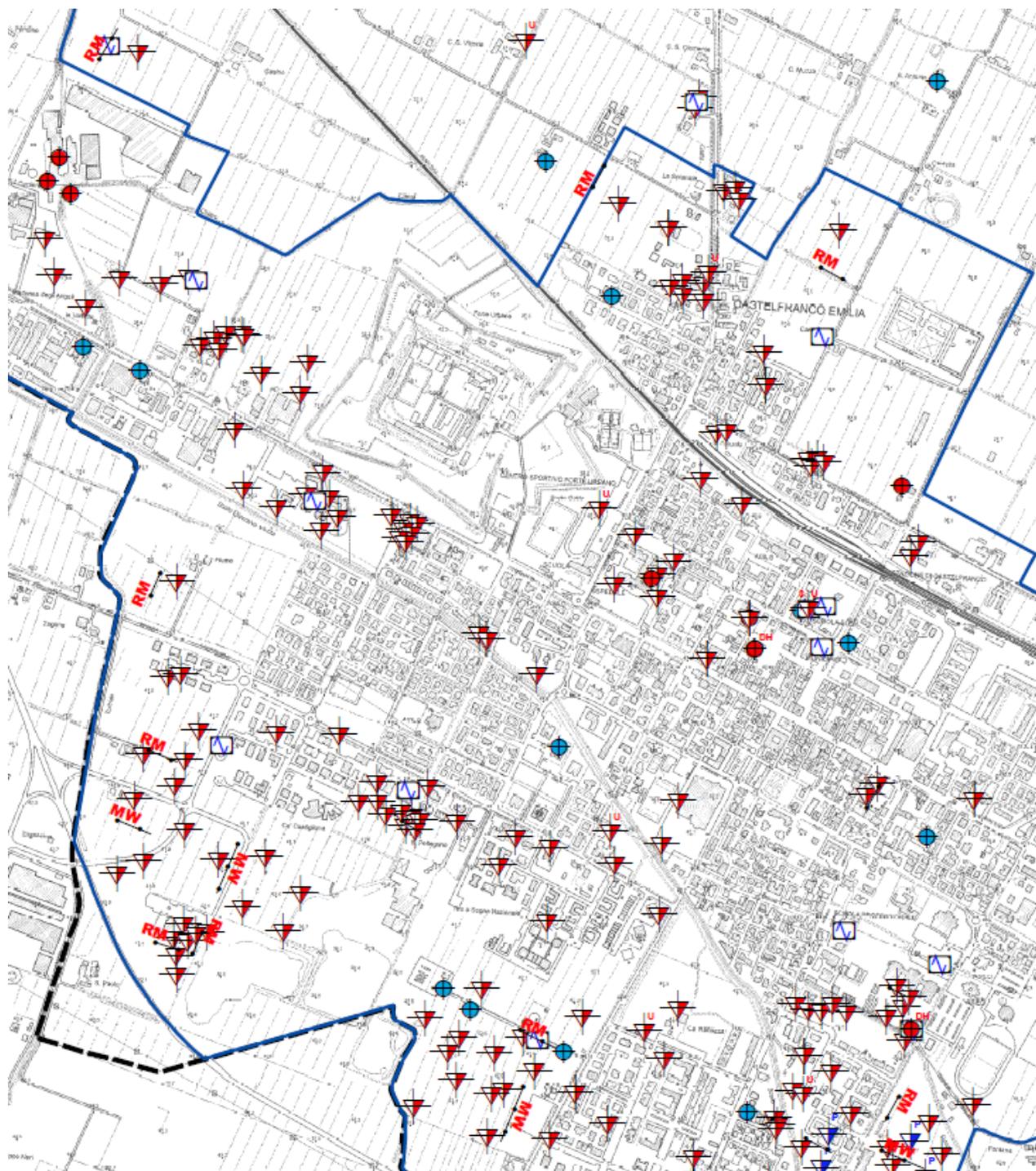


Fig. 1 - Stralcio ubicazione indagini effettuate per l'analisi di III livello

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	7 di 79



2.1 Sondaggi a carotaggio continuo

Nella campagna d'indagine sono stati eseguiti, da parte della ditta Elletipi s.r.l. di Ferrara, due sondaggi verticali a carotaggio continuo (DH1-036006P493 e DH2-036006P494), spinti a una profondità di 30 metri dal piano campagna.

Entrambi 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 n° 4 campioni indisturbati (usando campionatori in acciaio a pareti sottili "Shelby") successivamente inviati al Laboratorio Elletipi s.r.l. per le analisi.

Nelle litostratigrafie allegare 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 dei valori di *pocket penetrometer*, espressi in kPa;
- la determinazione speditiva di campagna dei valori di *torvane*, espressi in kPa;
- il livello di falda misurato durante l'esecuzione della perforazione.

2.2 Prove di laboratorio

I campioni prelevati nel corso dell'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati inviati al Laboratorio Elletipi s.r.l. di Ferrara per le analisi geotecniche.

Per ogni campione prelevato sono state eseguite le seguenti prove:

- descrizione geotecnica;
- determinazione dei *Limiti di Atterberg*;
- determinazione delle caratteristiche granulometriche;
- determinazione del peso di volume
- determinazione dell'umidità naturale.

Inoltre, sui 4 campioni indisturbati sono state eseguite n° 4 prove in colonna risonante per la determinazione dei parametri G/G_0 e D .

I risultati delle prove di laboratorio sono riportati in allegato (*Elaborato 13*) e descritti nel paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

2.3 Prove Down-Hole

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

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	8 di 79



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 a un metro, dal p.c. fino a fondo sondaggio, ad una profondità di 30 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).

Nel secondo caso, si formano, perlopiù, 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, come già indicato, 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. 2 viene riportato il grafico, in funzione della profondità della velocità delle sole onde S.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	9 di 79

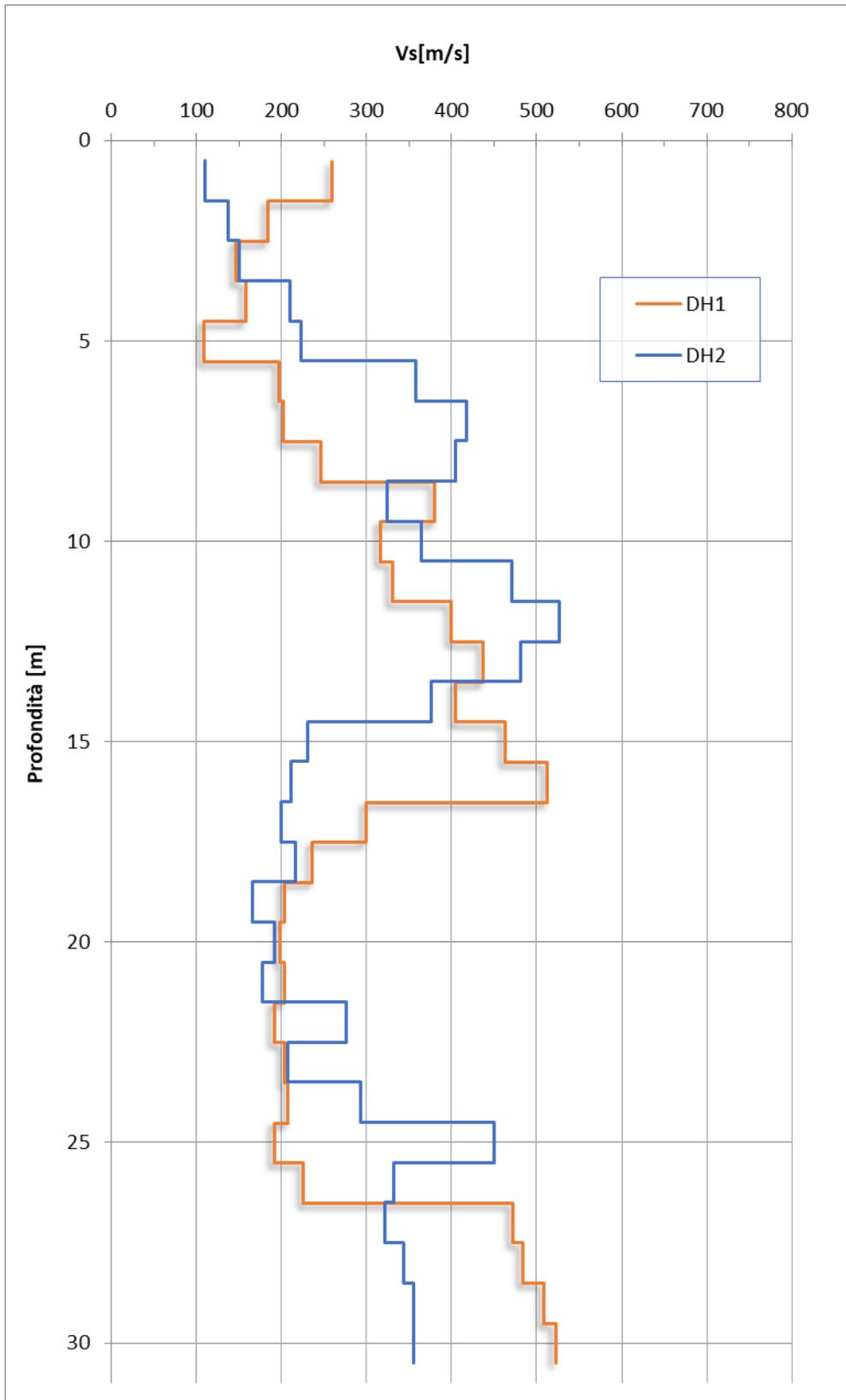


Fig. 2 - Valori di Vs in funzione della profondità misurati con le due prove Down-Hole

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	10 di 79



2.4 Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono

Nella campagna d'indagine sono state eseguite, sempre da parte della ditta Elletipi s.r.l. di Ferrara, n° 15 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono, 3 delle quali attrezzate con cono sismico (cfr. paragrafo 2.5). Le indagini sono state eseguite utilizzando un penetrometro *GeoMill* da 200 kN di spinta massima con punta *Tecnopenta G1-CPL2IN*, montato su autocarro *Mercedes Unimog 4 X 4*.

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

Lo sforzo necessario per l'infissione viene determinato a mezzo di un opportuno sistema di misura estensimetrico collegato alla punta e 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 registrati 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 nell'*Elaborato 14* 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);
- incl. (gradi) = inclinazione della punta;

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

In Fig. 3 e in Fig. 4 sono riportati, a titolo esemplificativo, i grafici che rappresentano le variazioni della resistenza alla punta (R_p) e della resistenza laterale (F_s) con la profondità, relativi alle 12 prove penetrometriche CPTU distribuite nelle diverse MOPS.

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	11 di 79

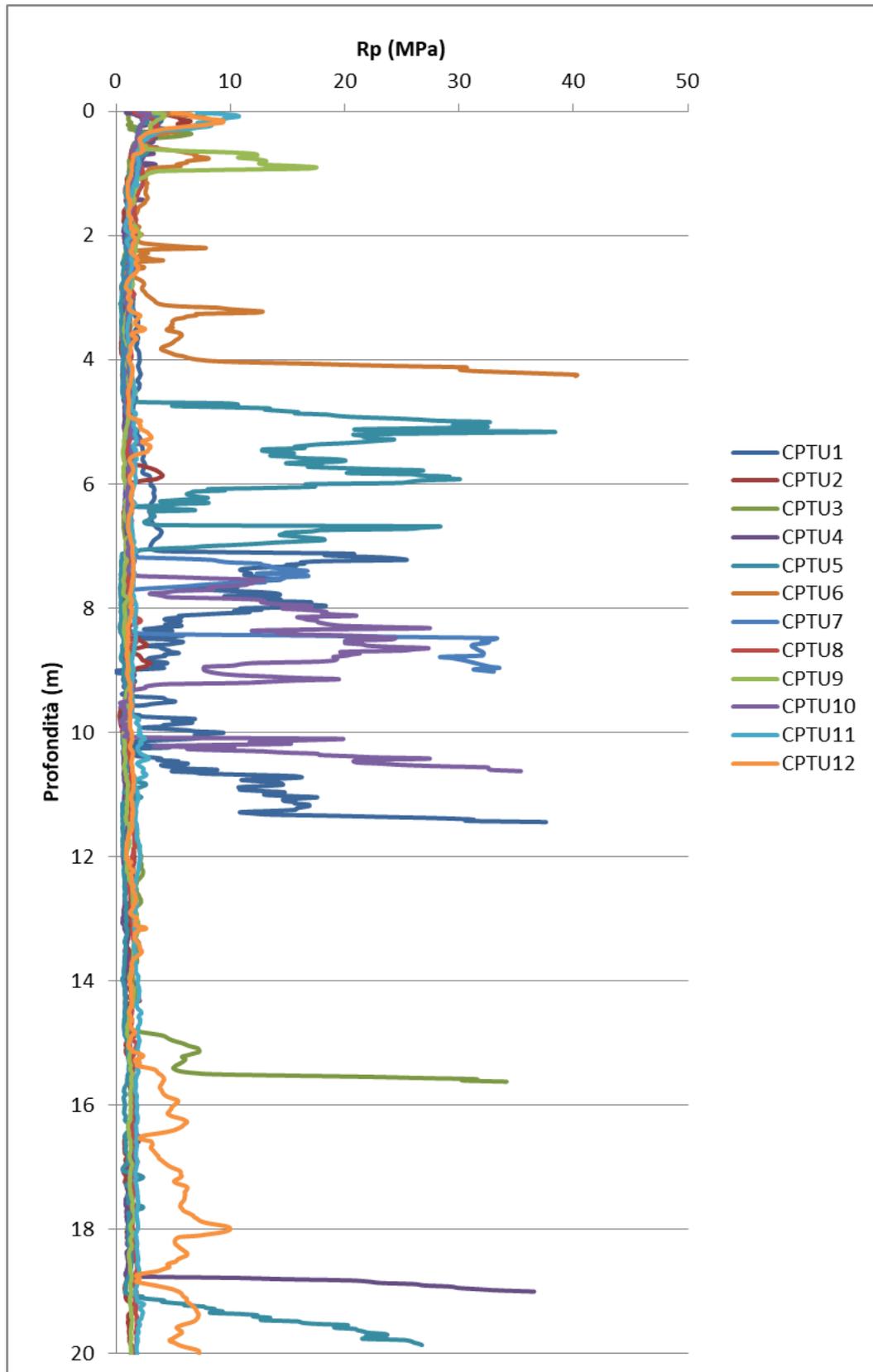


Fig. 3 - Rappresentazione grafica della resistenza alla punta (R_p) con la profondità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	12 di 79

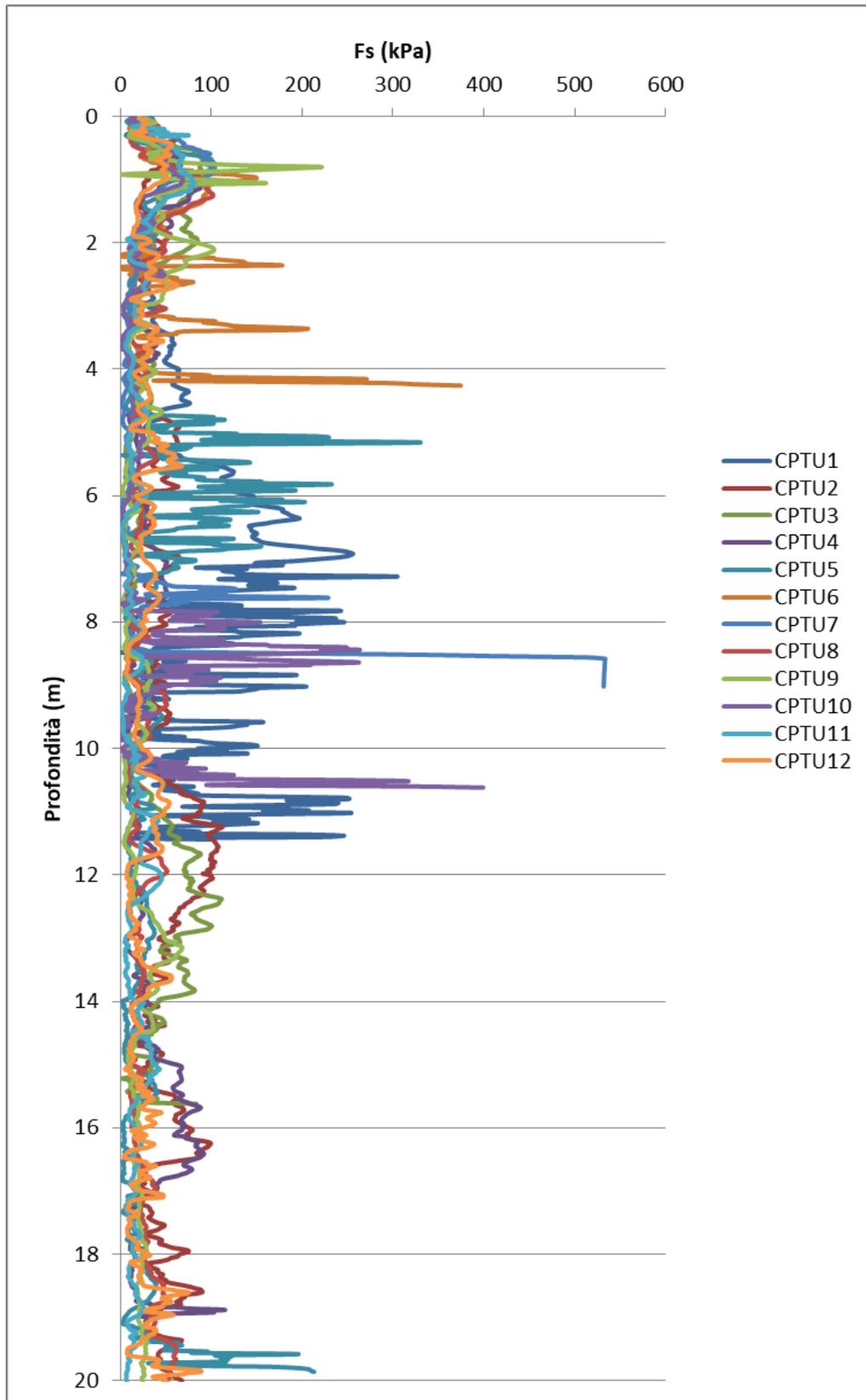


Fig. 4 - Rappresentazione grafica della resistenza laterale (Fs) con la profondità

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	13 di 79



2.5 Indagine mediante sismocono

Per verificare le caratteristiche sismiche dei terreni sono state realizzate n°3 prove mediante sismocono eseguite durante la realizzazione delle prove penetrometriche (denominate 036006P490SCPT495, 036006P491, 036006P492), 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. 5 - 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.

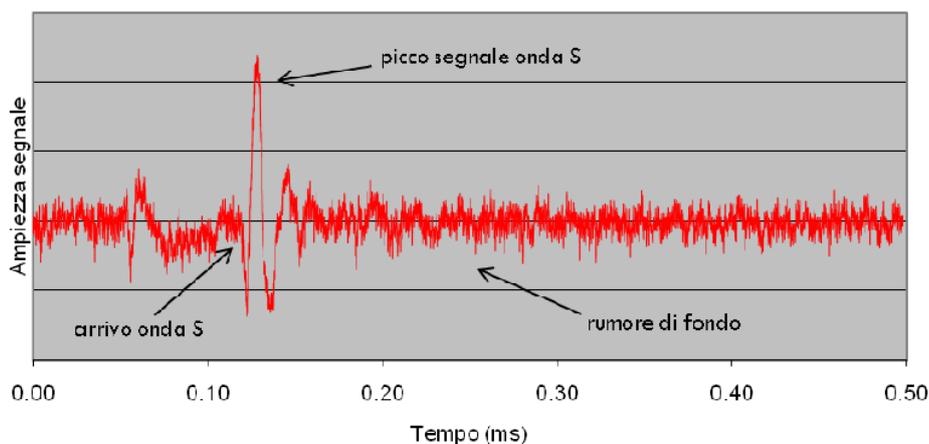


Fig. 6 - Esempio di sismogramma del segnale registrato a 10 m di profondità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	14 di 79



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

In Fig. 7 viene riportato il grafico, in funzione della profondità della velocità delle sole onde S registrate in tutte le prove SCPT appositamente effettuate per il presente studio.

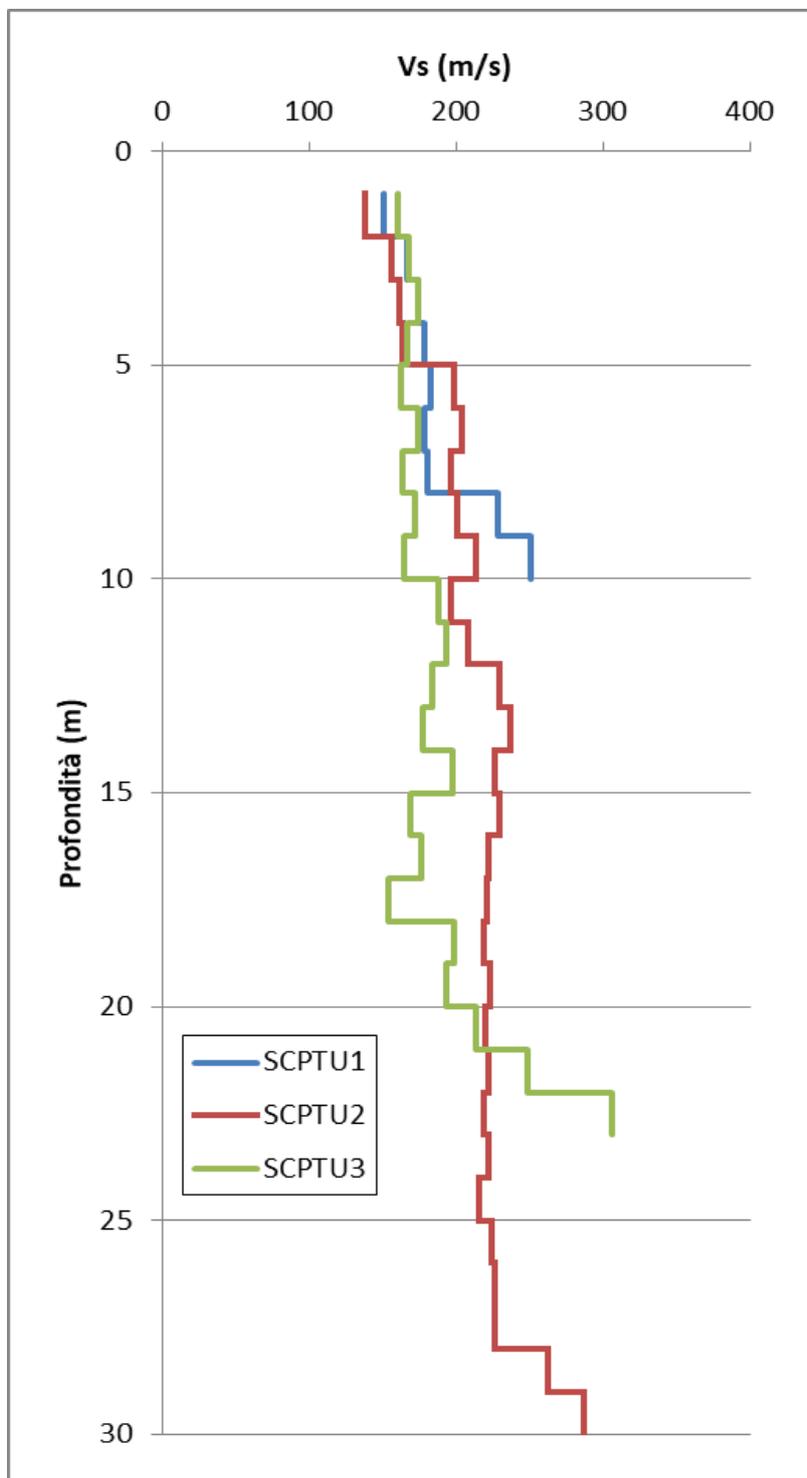


Fig. 7 - Valori di Vs in funzione della profondità misurati per le diverse prove SCPTU

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	15 di 79



2.6 Rilievo sismico HVSR mediante tromografo

Ai fini della determinazione della frequenza caratteristica dei suoli in corrispondenza dei punti delle nuove indagini sismiche (DH e SCPTU) sono state eseguite n°5 prove HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) tramite tromografo digitale.

I risultati dei rilievi sismici mediante tromografo sono riportati nell' *Elaborato 10*.

Le prove sono state condotte utilizzando un sismometro a stazione singola (tromografo digitale con sensori da 2 Hz) in grado di registrare i microtremori lungo le due direzioni orizzontali (X, Y) e lungo quella verticale (Z), di un ampio intervallo di frequenze (0.1-100 Hz) e per una durata sufficientemente lunga (mediamente 20 minuti).

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

Le misure registrate sono state poi elaborate e restituite graficamente in forma di spettri H/V (rapporto H/V in funzione della frequenza - Fig. 8 prova 034027P959).

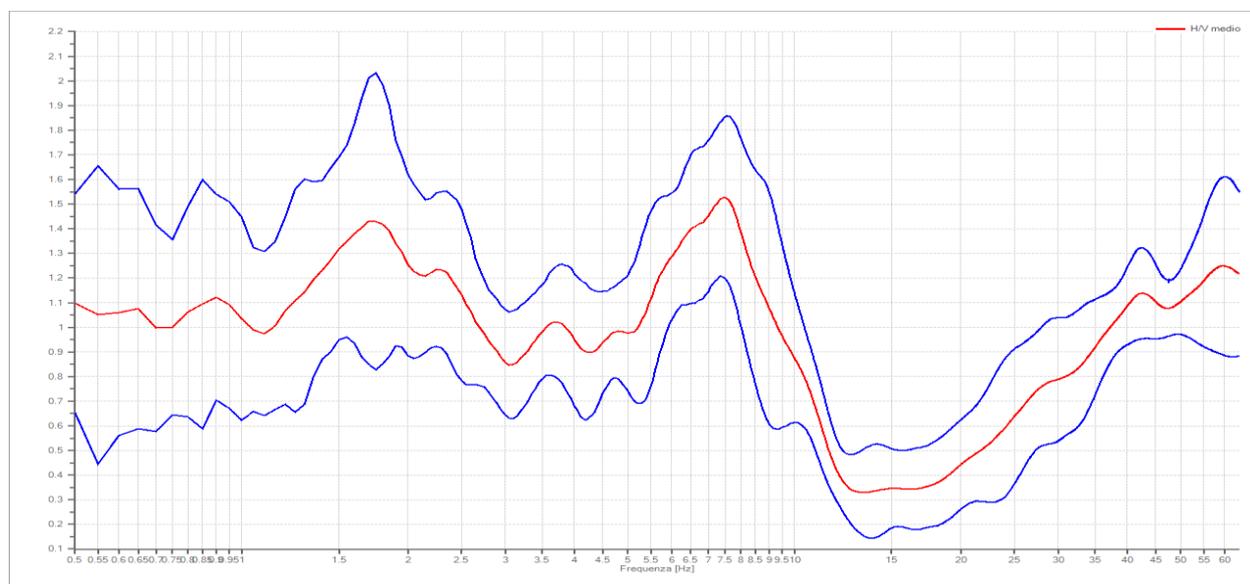


Fig. 8 – Elaborazione della misura 036006P490 registrata dal tromografo digitale: rapporto H/V

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	16 di 79



3. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

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

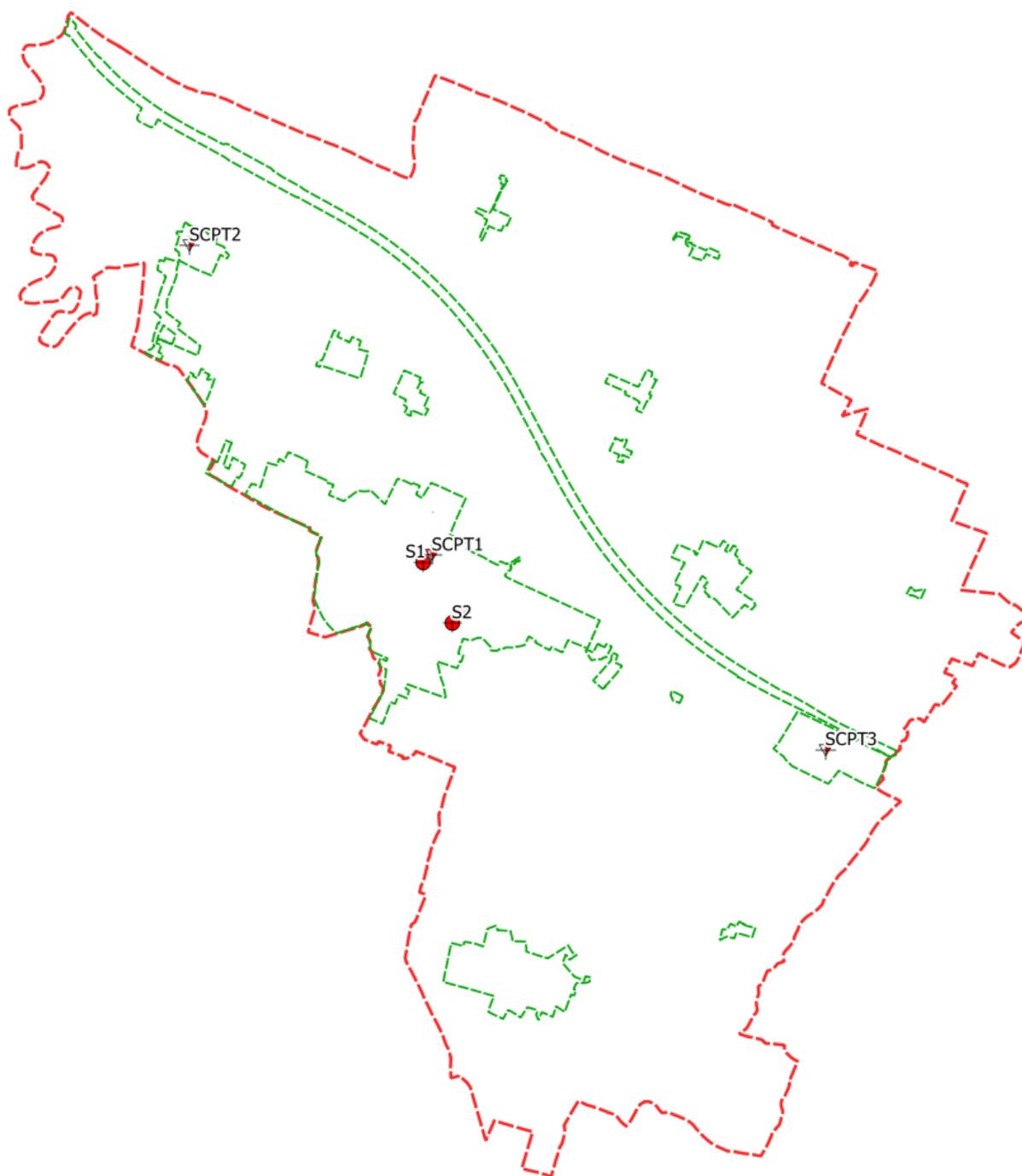


Fig. 9 - Ubicazione prove utilizzate per analisi di risposta sismica locale

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	17 di 79



Nel complesso sono state eseguite 5 analisi di risposta sismica locale utilizzando le nuove analisi effettuate, la cui ubicazione è riportata nella figura precedente. Le ubicazioni delle prove sono state concordate con i Tecnici del Comune di Castelfranco Emilia ed hanno anche lo scopo di valutare le problematiche sismiche di alcuni edifici strategici.

L'analisi è stata eseguita su tutte le verticali indagate nel presente studio, in cui è stata eseguita una misura diretta di Vs (2 DH e 3 SCPT); per le 2 verticali con la prova DH si disponeva, inoltre, di dati di curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidezza, G/G_0) in funzione della deformazione di taglio γ ;

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 $a_{ref,g}$ (10% di probabilità di superamento in 50 anni) di ogni sito indagato;

Per ogni punto di indagine, in Tab. 1 viene riportato il parametro $a_{ref,g}$:

Sito	$a_{ref,g}$ (a_g/g)
S1	0.164
S2	0.163
SCPTU1	0.164
SCPTU2	0.163
SCPTU3	0.164

Tab. 1 - Valori di $a_{ref,g}$ (10% di probabilità di superamento in 50 anni)

Una volta definita la $a_{ref,g}$ per la zona oggetto di studio, è possibile rappresentare gli spettri elastici di risposta in accelerazione (Fig. 10) 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. 11).

Come si può facilmente constatare dalla tabella le accelerazioni su suolo di tipo A (suolo rigido) sono sostanzialmente analoghi in tutto il territorio analizzato.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	18 di 79

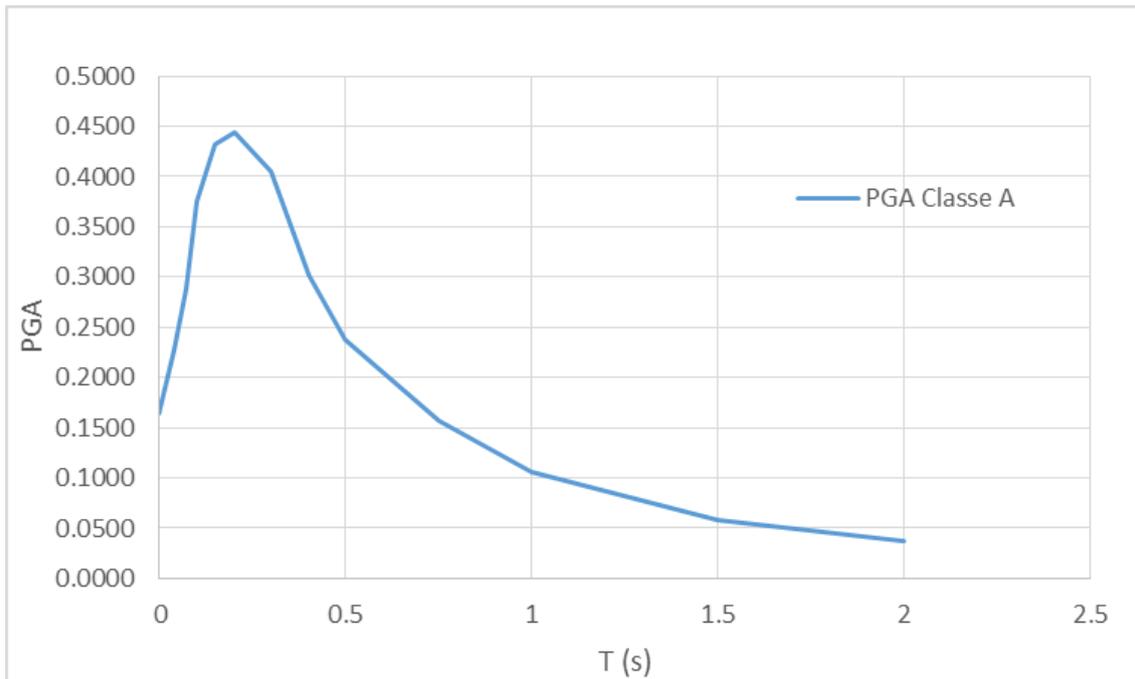


Fig. 10 - Spettro di risposta elastico in accelerazione su suolo rigido (475Y) corrispondente al valore di $a_{ref,g}=0.164$ per i siti di RSL

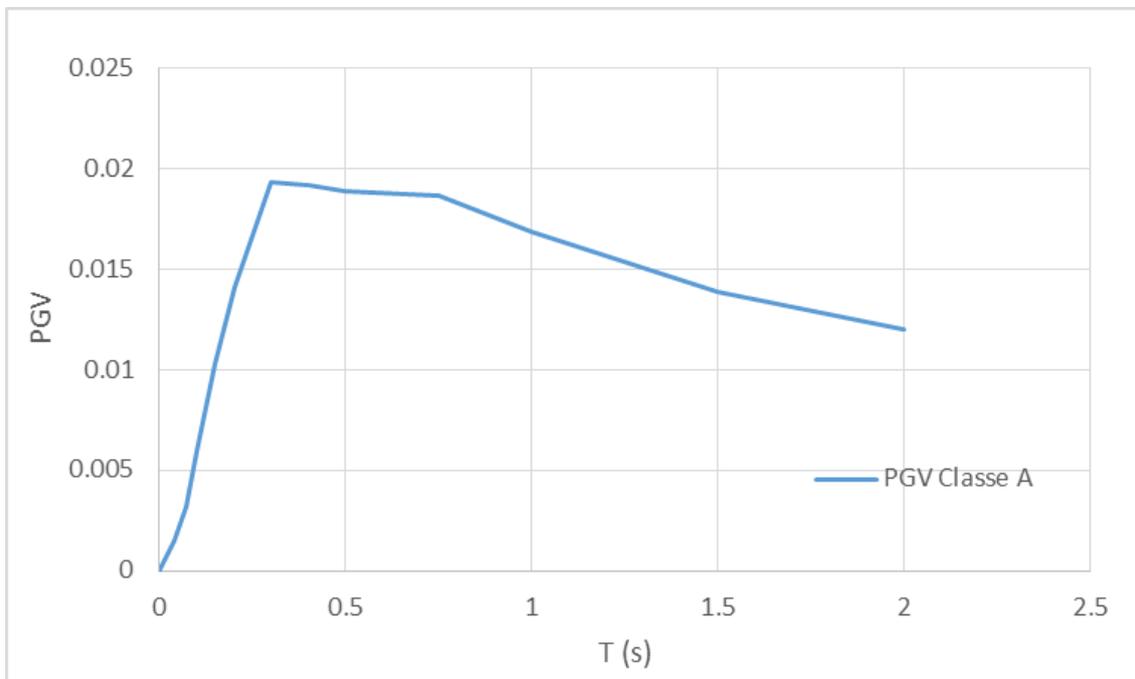


Fig. 11 - Spettro di risposta elastico in velocità su suolo rigido (475Y) corrispondente al valore di $a_{ref,g}=0.164$ per i siti di RSL

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	19 di 79



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.

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 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 tutti i siti di cui si è eseguita la RSL sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino ai punti analizzati (16282).

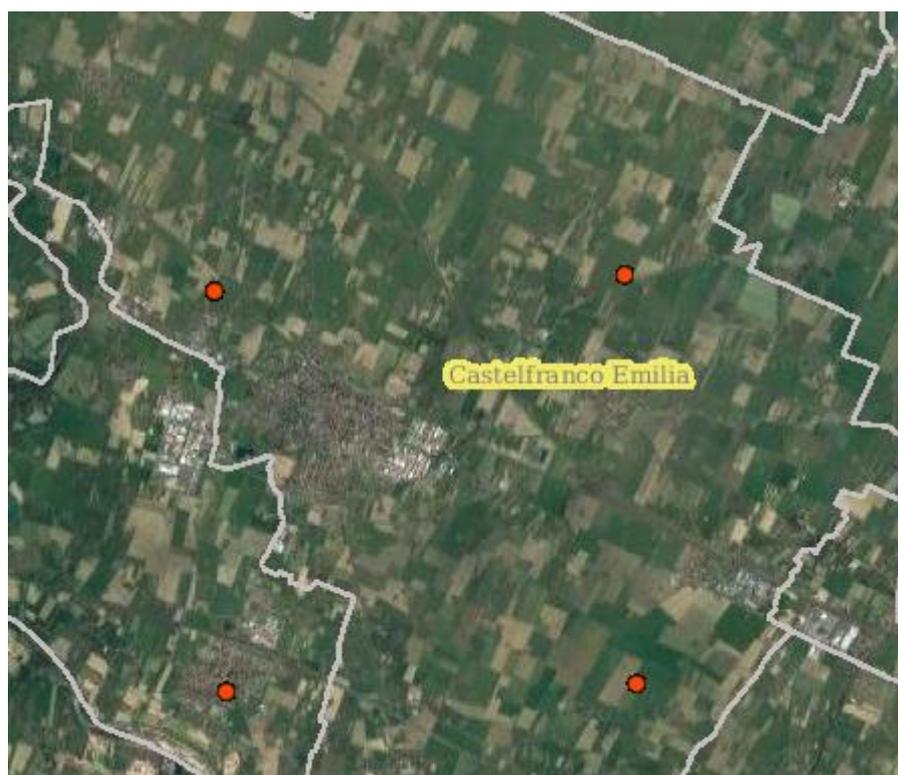


Fig. 12 - Ubicazione dei nodi del reticolo di riferimento sul sito Seism-home

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.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	20 di 79



Nel complesso, quindi, per ciascun sito, sono stati utilizzati 10 diversi accelerogrammi per le verifiche di risposta sismica locale (Tab. 2 e Fig. 13). Ovviamente, tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto dalle NTC per ciascun punto di indagine.

Segnali RER	Segnali Seism-Home
000046xa_034027.xy	TR475_ID16282_1
000126xa_034027.xy	TR475_ID16282_2
000354xa_034027.xy	TR475_ID16282_3
	TR475_ID16282_4
	TR475_ID16282_5
	TR475_ID16282_6
	TR475_ID16282_7

Tab. 2 - Segnali in input utilizzati nelle analisi di RSL

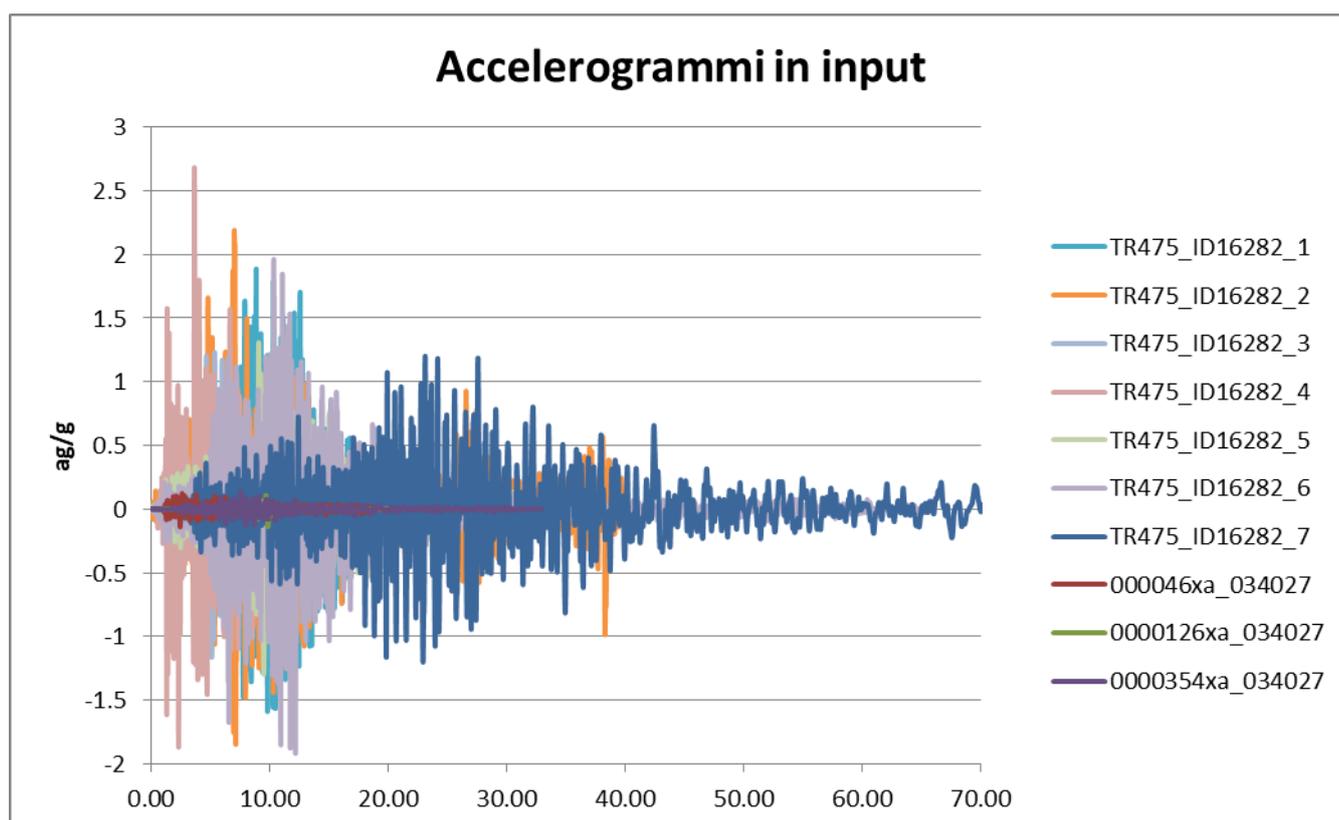


Fig. 13 - Esempio di segnali di input utilizzati nelle analisi di RSL

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:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	21 di 79



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

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

A proposito della definizione del bedrock sismico, si rimanda al Cap. 3.8 - Criticità del metodo, in cui la questione viene discussa approfonditamente.

3.3.1 Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati delle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo o i risultati delle prove penetrometriche con cono sismico realizzati nei diversi siti; laddove necessario le informazioni sono state integrate con la stratigrafia di pozzi limitrofi l'area oggetto di studio forniti dal database geologico della Regione Emilia Romagna.

3.3.2 Determinazione della V_s

Per quanto riguarda la velocità delle onde S in funzione della profondità si è fatto riferimento alle misure delle prove Down-Hole e delle prove con cono sismico fino alla massima profondità indagata. Per i livelli inferiori, utili per la definizione del bedrock sismico, si è integrato con la stratigrafia di pozzi del database regionale assumendo V_s da letteratura.

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

Si è constatato, infatti, che l'introduzione di un eccessivo numero di strati nel software di calcolo (cfr. § 3.4), che sarebbero stati opportuni per seguire più fedelmente l'andamento della V_s con la profondità, introduce una complessità che non migliora i risultati.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	22 di 79

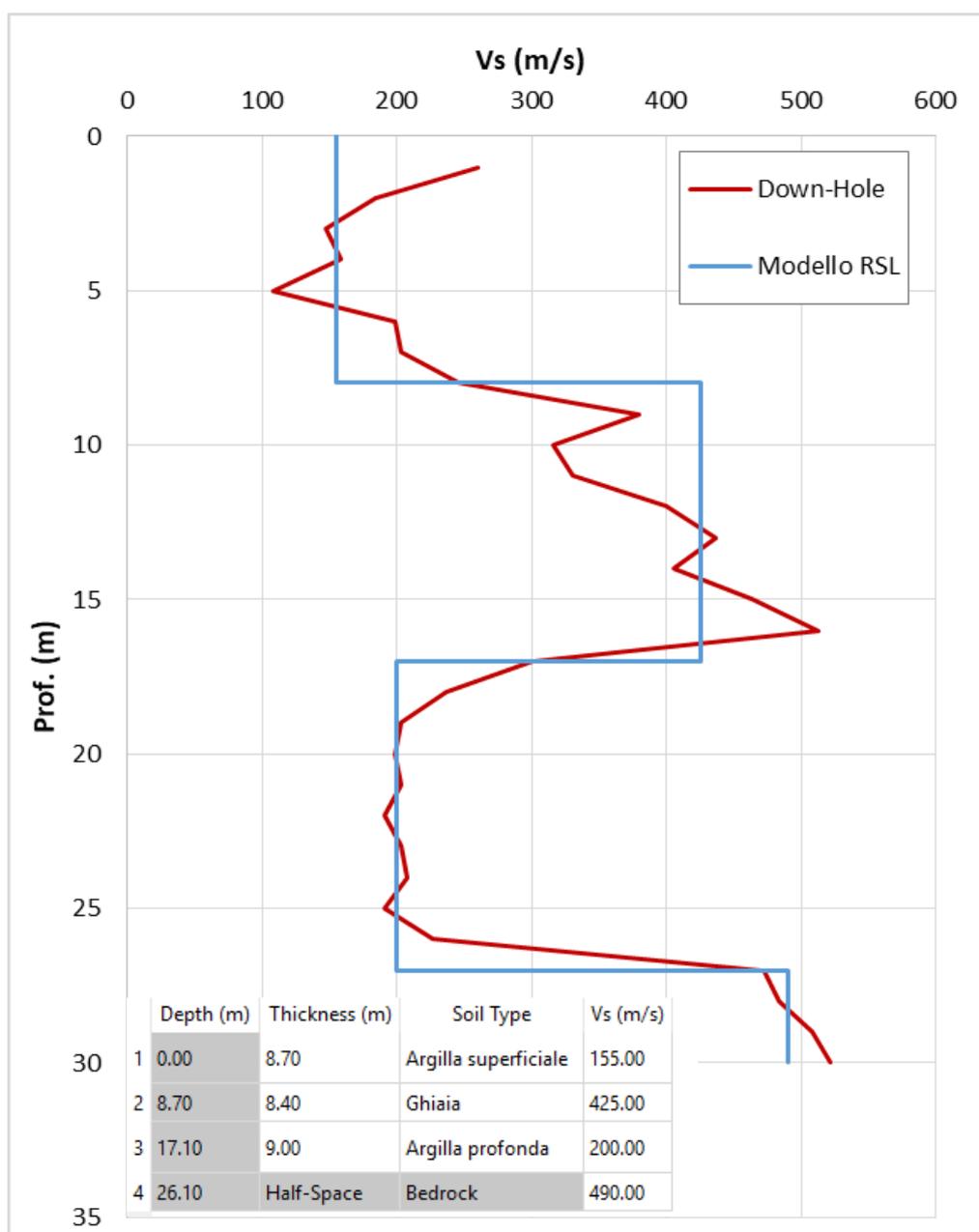


Fig. 14 - Esempio di discretizzazione della Vs e modello geofisico del codice di calcolo per uno dei siti oggetto di indagine

Mediante il processo sopra descritto si giunge ad una prima discretizzazione della Vs in funzione della profondità.

Va chiarito che, una volta definito il modello da inserire nel programma di valutazione di RSL con la procedura sopra descritta, i dati inseriti sono stati fatti variare per fare in modo che la funzione di trasferimento dal bedrock alla superficie fosse compatibile con la curva H/V registrata nella prova HVSR del sito, almeno per la frequenza principale. I dati riportati nei grafici di discretizzazione, come quello sopra riportato (Fig. 14) sono quelli effettivamente utilizzati nella RSL.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	23 di 79



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 n°4 prove di laboratorio in colonna risonante sui campioni prelevati nel corso dei sondaggi effettuati per questo studio.

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

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/G₀ = 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 (X²).

In Fig. 15 è riportato un grafico esemplificativo della procedura di normalizzazione utilizzata per il campione DH1SH1.

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	24 di 79

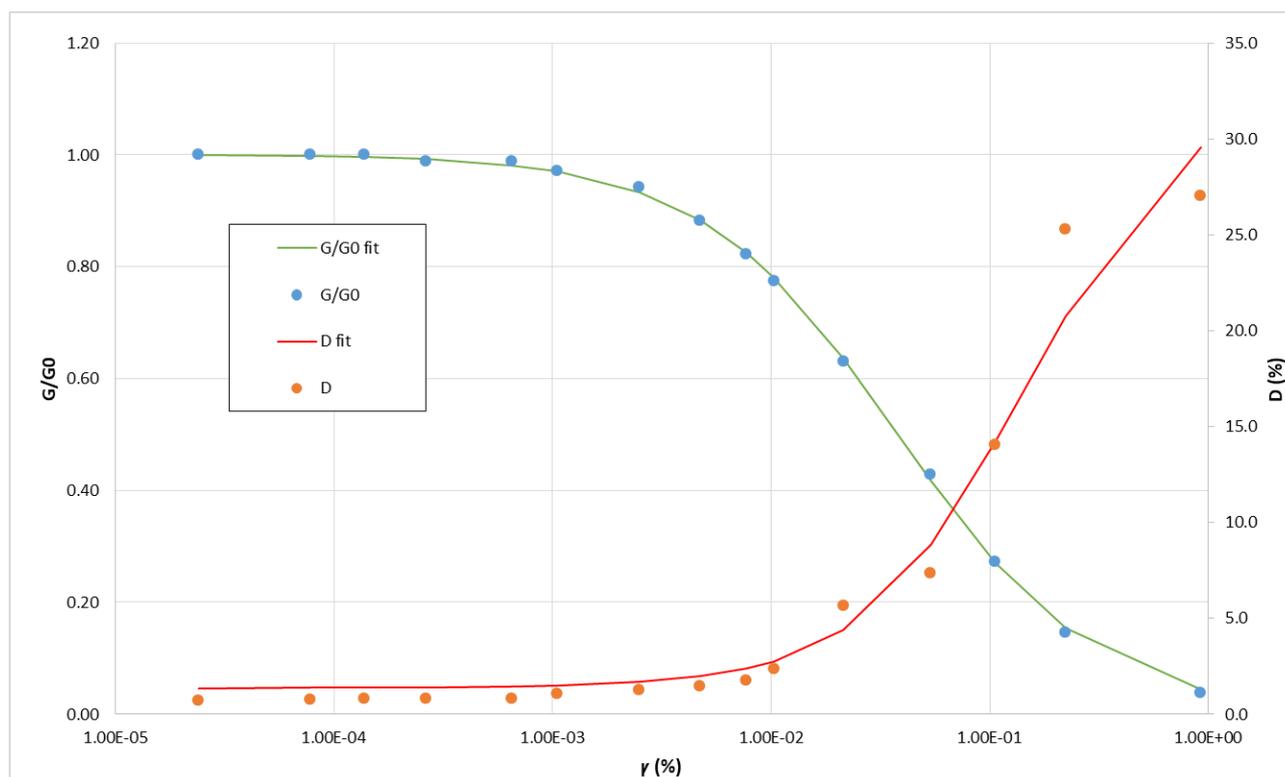


Fig. 15 - Grafico dei dati sperimentali e delle curve di interpolazione per il campione DH1SH1

In Tab. 3 sono riportati i valori delle proprietà indice dei terreni analizzati nel presente studio.

Camp.	Prof.	Litologia (AGI)	Valori indice						Granulometria (UNI)			
			W	γ_{nat}	γ_{sec}	LL	LP	IP	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla
			%	Mg/m ³	Mg/m ³	%	%	%	%	%	%	%
DH1SH1	6.00 – 6.60	Limo con argilla grigio	31.3	1.91	1.46	46	21	25	1	6.4	65.3	27.3
DH1SH2	24.00 - 24.60	Limo argilloso sabbioso	28.1	1.94	1.51	53	23	31	0.2	14.2	53.3	32.3
DH2SH1	15.00 – 15.60	Limo con argilla grigio	29.8	1.92	1.48	72	33	39	0	2.7	53.0	44.3
DH2SH2	21.00 – 21.60	Limo con argilla deb. sabbioso	26.3	1.94	1.53	41	23	18	0.2	6.7	68.2	25.0

Tab. 3 - Riepilogo delle proprietà indice dei terreni analizzati



Per lo studio della risposta sismica, non sono state utilizzate solamente le curve calcolate per il presente studio, ma sono stati utilizzati anche i dati di curve da letteratura e curve presenti nell'archivio degli scriventi per indagini precedentemente effettuate.

In effetti, nel corso delle procedure di valutazione di RSL si è constatato che, nella maggioranza dei casi, l'utilizzo delle curve di ottenute dalla analisi di laboratorio non consentivano di definire picchi di frequenza (nella funzione di trasferimento) analoghi a quelli derivati dalle prove HVSR, per questo motivo si è deciso di utilizzare curve di bibliografia, che rispondevano invece in maniera adeguata. La scelta di tali curve (Vucetic e Dobry) si è basata sulle caratteristiche litologiche e sulla plasticità.

In Fig. 16 e Fig. 17 sono riportati i grafici di tutte le curve di degradazione utilizzate per l'analisi di risposta sismica locale per caratterizzare i terreni; il riepilogo dei parametri caratteristici delle diverse curve è riassunto in Tab. 4.

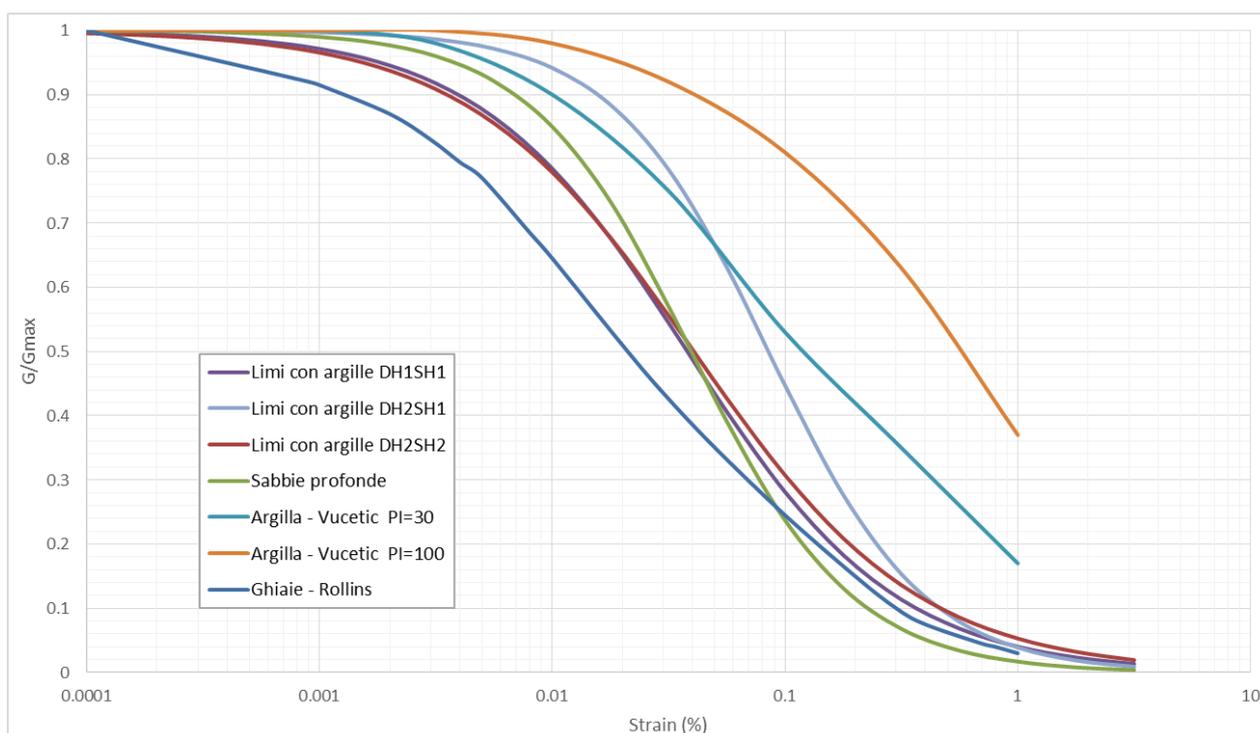


Fig. 16 - Grafico delle curve di G/G_0 da campioni indisturbati e da letteratura

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	26 di 79

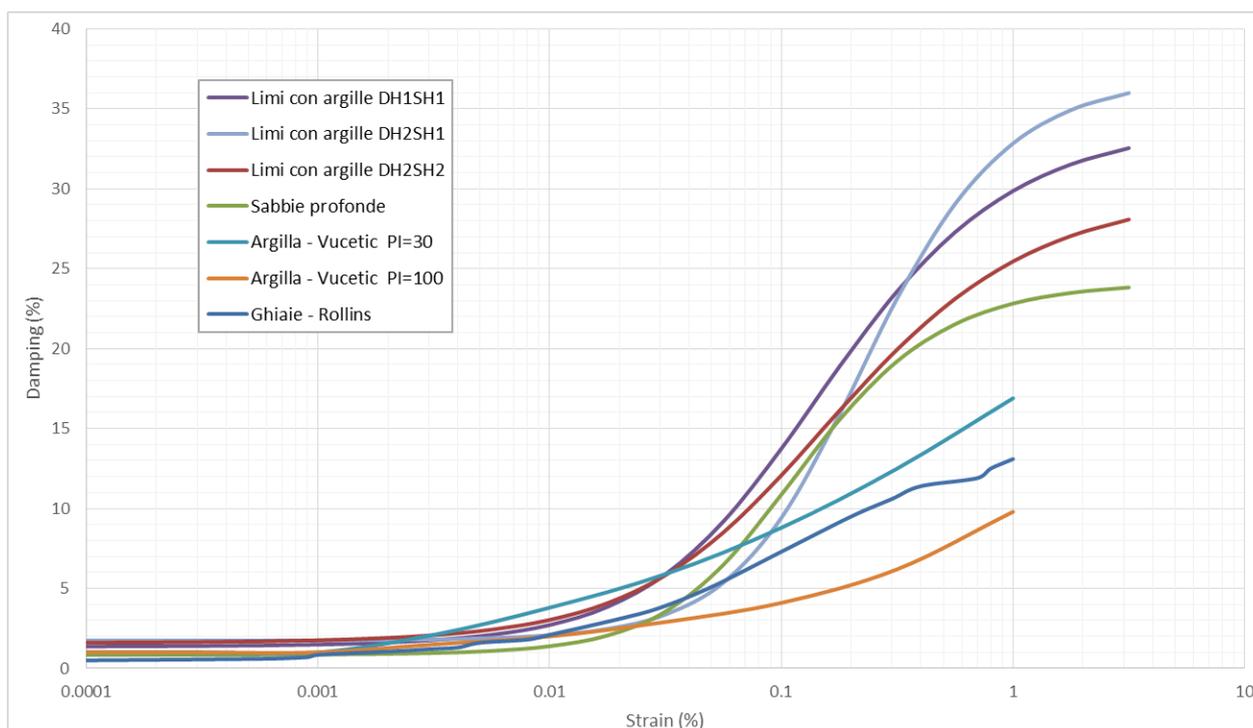


Fig. 17 - Grafico delle curve di D da campioni indisturbati e da letteratura

Camp.	Prof. (m)	Litologia (UNI)	Parametri curve G/G0 e D					
			Prova	G_0 (MPa)	α	β	η	λ
DH1SH1	6.00 – 6.60	Limo con argilla	RC	53.42	23.86	0.97	34.00	3.22
DH2SH1	15-15.60	Limo con argilla	RC	37.52	24.68	1.30	37.00	3.06
DH2SH2	21-21.60	Limo con argilla	RC	109.49	17.90	0.90	29.73	2.93
archivio		Sabbie prof. bassa reggiana	RC		58.56	1.26	24.15	3.36
letteratura		Argilla – Vucetic e Dobry PI=30			5.12	0.81	30.24	3.06
letteratura		Argilla – Vucetic e Dobry PI=100			1.68	0.88	42.68	3.77
letteratura		Ghiaia - Rollins			21.55	0.80	14.74	3.08

Tab. 4 - Riepilogo dei parametri caratteristici di tutte le curve utilizzate

3.4 Codice di calcolo per la valutazione della RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo Strata³ sviluppato da A. Kottke e E. Rathje⁴. Validazioni indipendenti di Strata sono riportate in letteratura (Graizer⁵, 2001), con esito soddisfacente.

³ Ellen M. Rathje; Albert Kottke (2010), "Strata," <https://nees.org/resources/strata>.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	27 di 79



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 rigidezza e smorzamento dei terreni in funzione della deformazione indotta dal sisma.

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 comunale:

- La funzione di trasferimento del segnale sismico dal *bedrock* alla superficie (Fig. 18);
- Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA), da cui è stato derivato, mediante la formula $PSV(T_i) = T_i \cdot PSA(T_i) / 2\pi$, lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità (PSV); gli spettri rappresentati sono ottenuti come mediana dei valori degli spettri di tutti i segnali sismici in output (Fig. 19, Fig. 20 e Fig. 21). Gli spettri elastici PSA della RSL vengono sempre paragonati con gli spettri semplificati delle Norme Tecniche.
- La curva di variazione dell'accelerazione con la profondità (Fig. 22);
- Il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FA_{PGA}), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudovelocità (FA_{IS}) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido. In sostanza viene calcolato il rapporto degli indici di Housner negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s, per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido). I rapporti risultano pertanto:

⁴ Kottke, Albert R., and Rathje, Ellen M. (2008) Technical Manual for Strata. PEER Report 2008/10. University of California, Berkeley, California

⁵ 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

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
		MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0



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

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

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

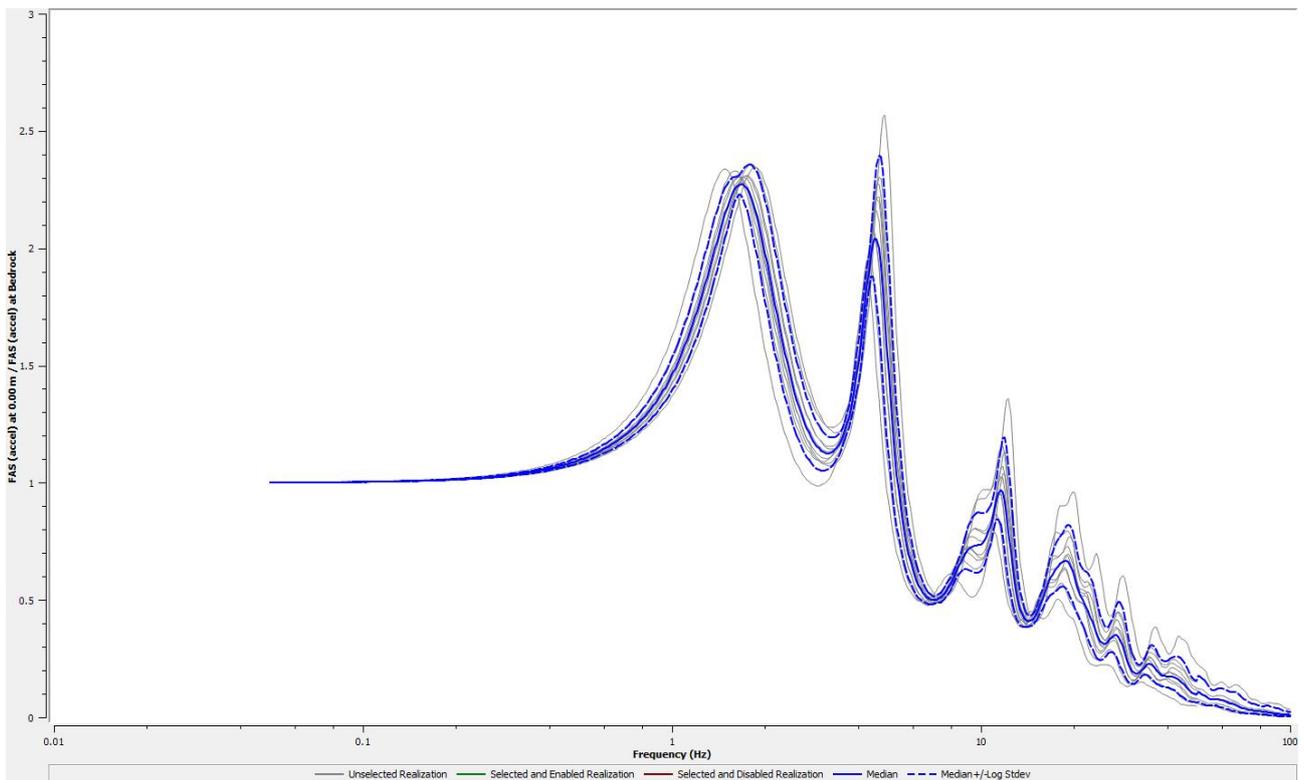


Fig. 18 - Esempio dell'output di Strata relativo alla funzione di trasferimento (in grigio le funzioni per ciascun segnale utilizzato, in blu continuo la media, in blu tratteggiato la deviazione standard)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	29 di 79

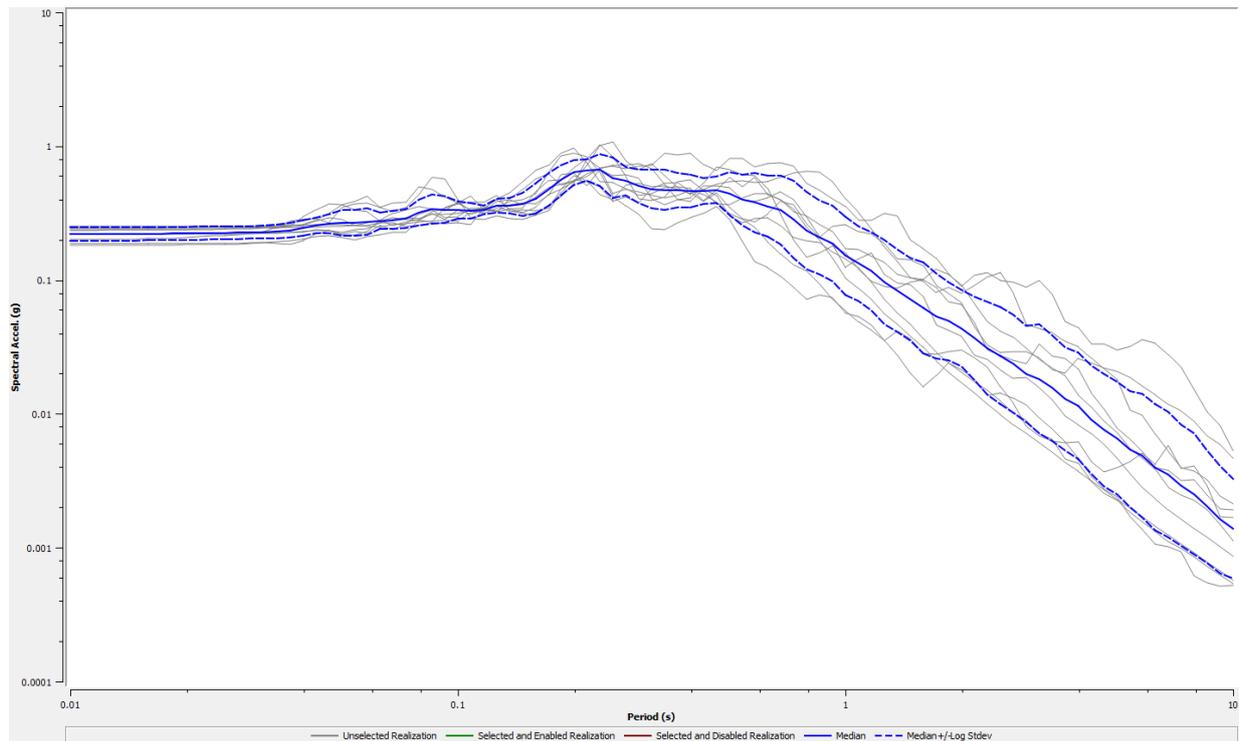


Fig. 19 - Esempio dell'output di Strata relativo allo spettro di risposta elastico in PSA (in grigio le funzioni per ciascun segnale utilizzato, in blu continuo la media, in blu tratteggiato la deviazione standard)

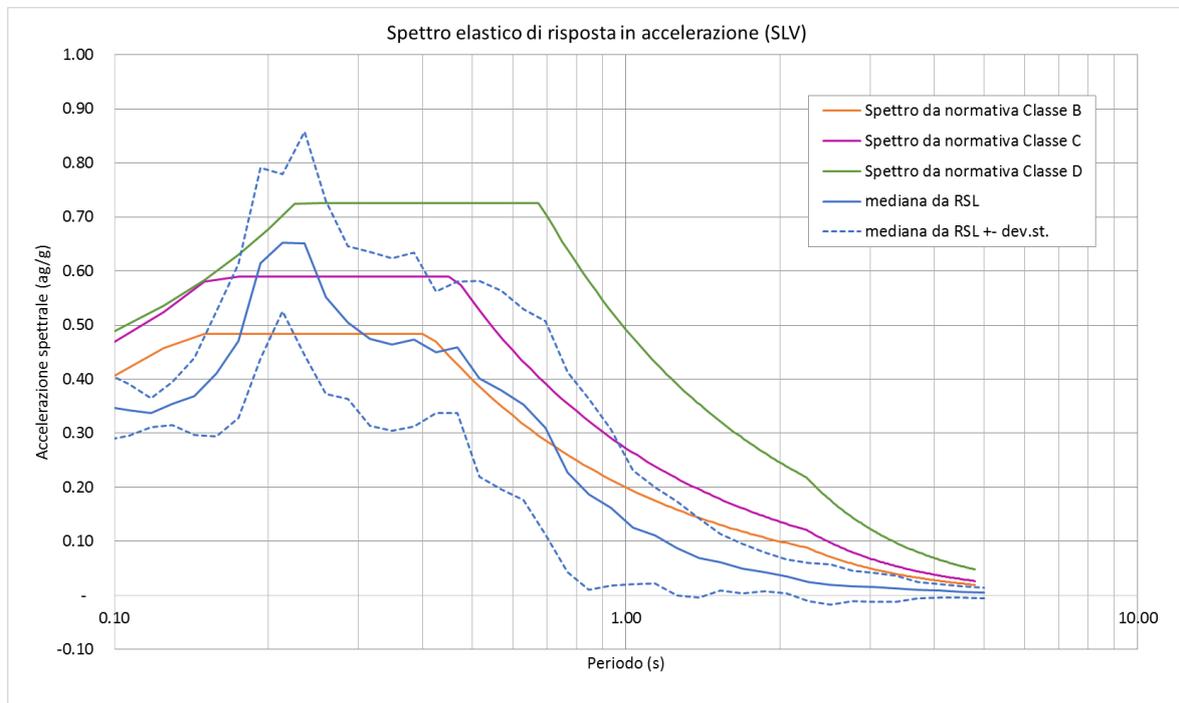


Fig. 20 - Esempio del confronto tra lo spettro elastico in accelerazione e gli spettri semplificati delle NTC 2018

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	30 di 79

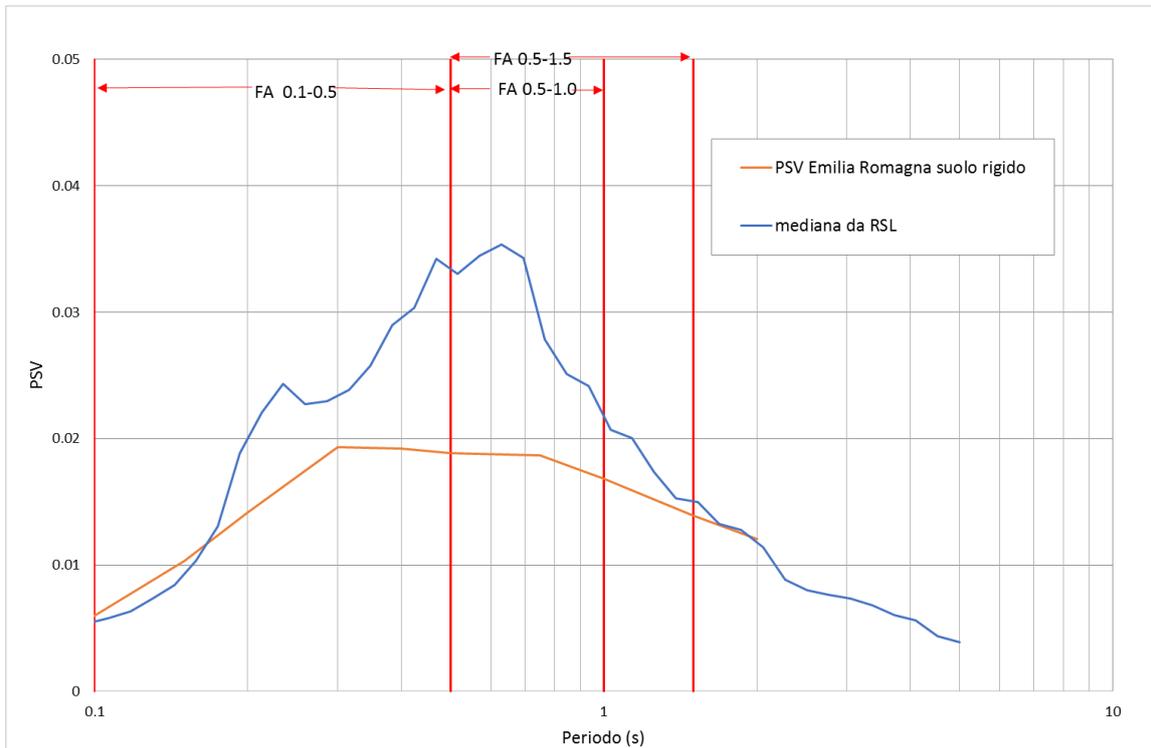


Fig. 21 - Esempio del confronto tra gli spettri elastici in velocità, da cui si calcolano i fattori di amplificazione

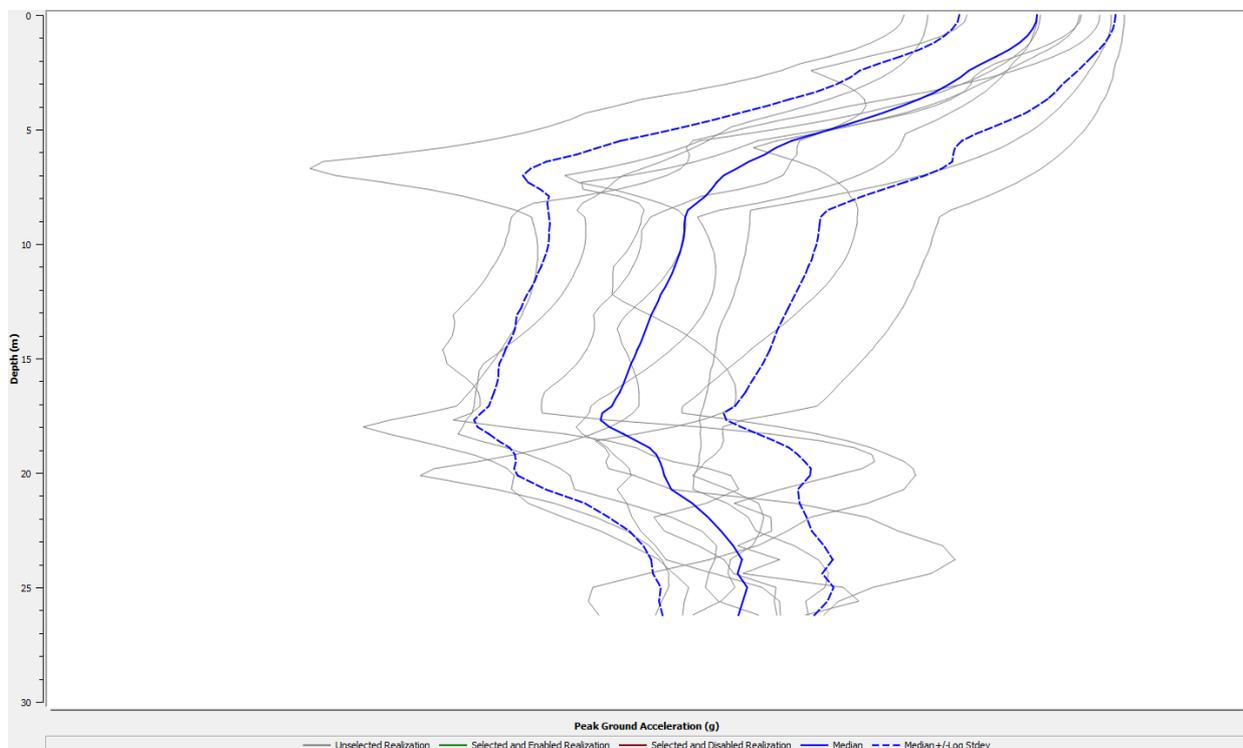


Fig. 22 - Esempio del profilo di accelerazione con la profondità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	31 di 79



3.5.1 Cyclic 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. 5.
- **MSF** è il fattore correttivo per la magnitudo definito in Tab. 6.
- **r_d** è il fattore correttivo per la profondità calcolato con la formula $r_d = 1 - 0,015z$.

Categoria suolo	Spettri di Tipo 1	Spettri di Tipo 2
	S (M > 5,5)	S (M ≤ 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. 5 - 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. 6 - Fattore correttivo MSF

Il programma Strata fornisce invece direttamente il valore di CSR in funzione della profondità. L'utilizzo del valore di CSR da RSL fornisce una valutazione del rischio di liquefazione sicuramente più affidabile.

Considerato che tale parametro è stato utilizzato per le verifiche a liquefazione delle nelle prove CPTU, esso è stato calcolato solo per le indagini penetrometriche con cono sismico appositamente effettuate per questo studio. La scelta del CSR da adottare alle diverse prove CPTU è stata effettuata sulla base delle analogie litostratigrafiche e di resistenza penetrometrica.

3.6 RSL nei diversi siti

Di seguito vengono sinteticamente riportati i risultati delle analisi di risposta sismica locale per tutti i siti indagati (Fig. 9). Dapprima si fornisce la rappresentazione sintetica del modello sismostratigrafico adottato e quindi vengono rappresentati:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	32 di 79



- 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. Da tale grafico vengono calcolati, per integrazione, negli intervalli indicati i fattori di amplificazione $FA_{ISO,1-0,5 s}$, $FA_{ISO,5-1,0 s}$, $FA_{ISO,5-1,5 s}$.
- Il grafico della variazione dell'accelerazione con la profondità.
- La tabella con i vari fattori di amplificazione calcolati.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	33 di 79



3.6.1 RSL per il sito S1-DH1

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
Argilla superficiale	8.70	0.00	18.00	155.00	5.12	0.81	30.24	3.06
Ghiaia	8.40	8.70	20.00	425.00	21.55	0.80	14.74	3.08
Argilla profonda	9	17.10	19.00	200.00	5.12	0.81	30.24	3.06
Bedrock		26.10	22.00	490.00				

Tab. 7 - Modello geofisico

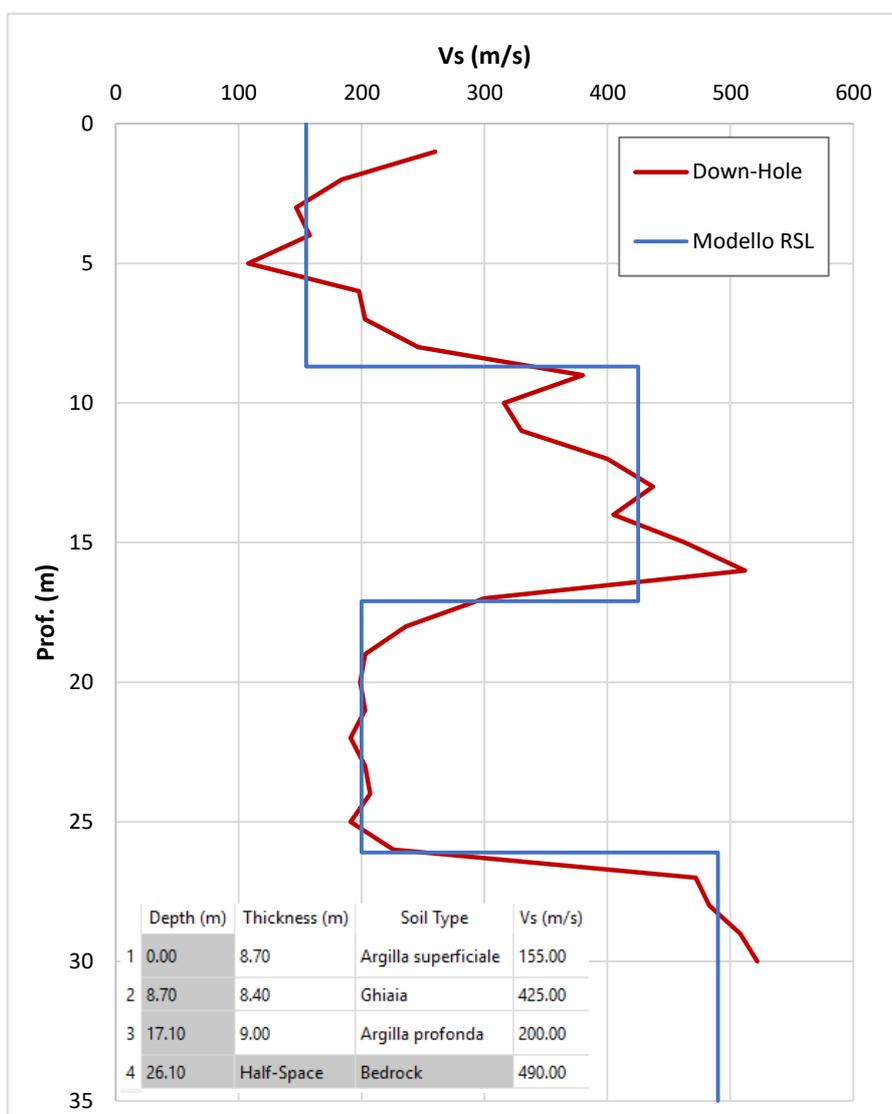


Fig. 23 - Discretizzazione della Vs e modello geofisico del codice di calcolo

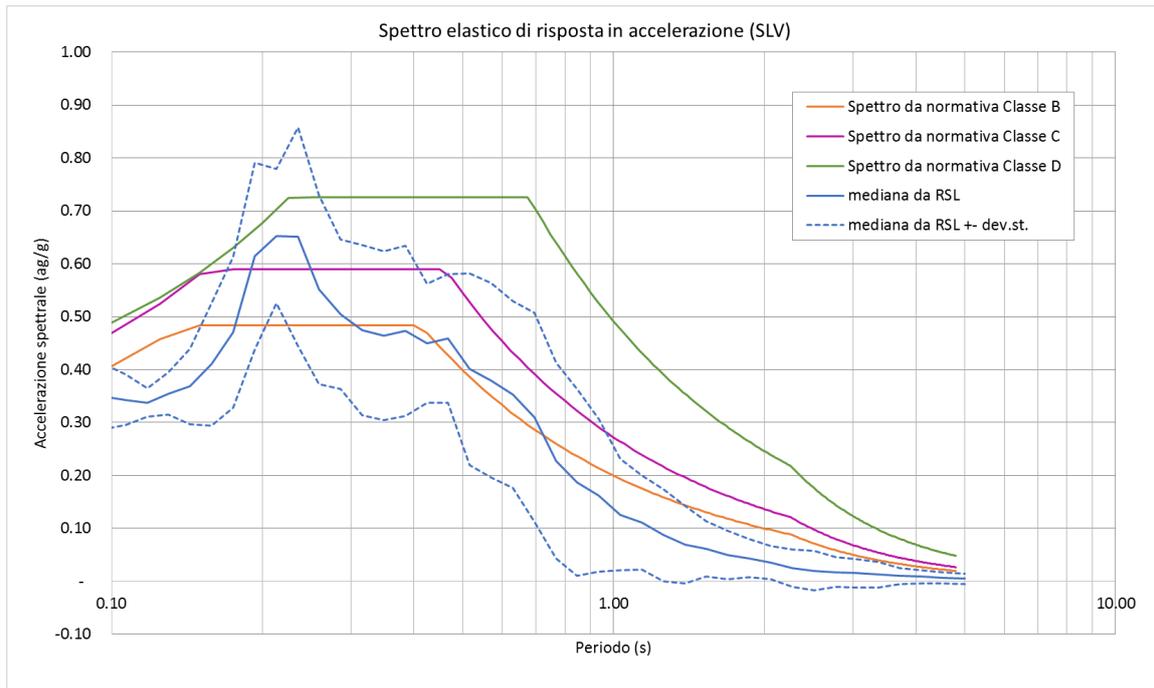


Fig. 24 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

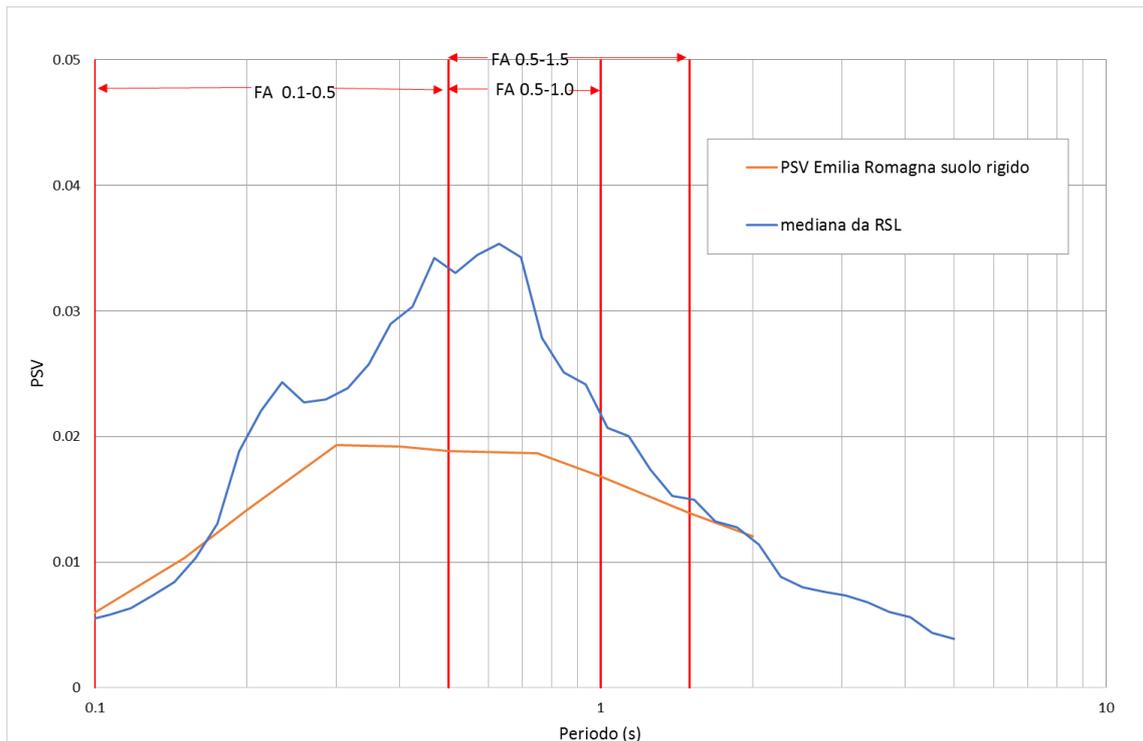


Fig. 25 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	35 di 79

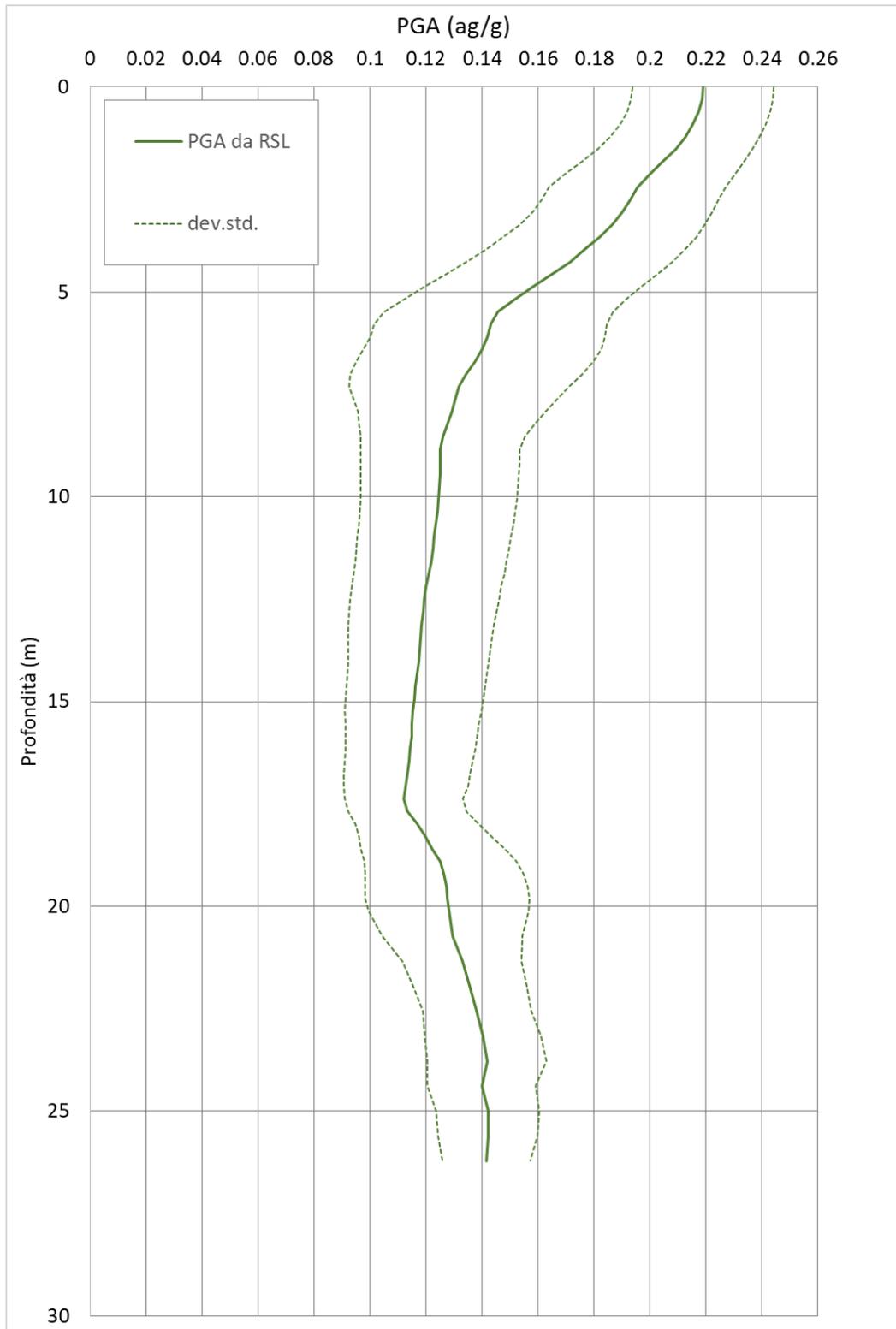


Fig. 26 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

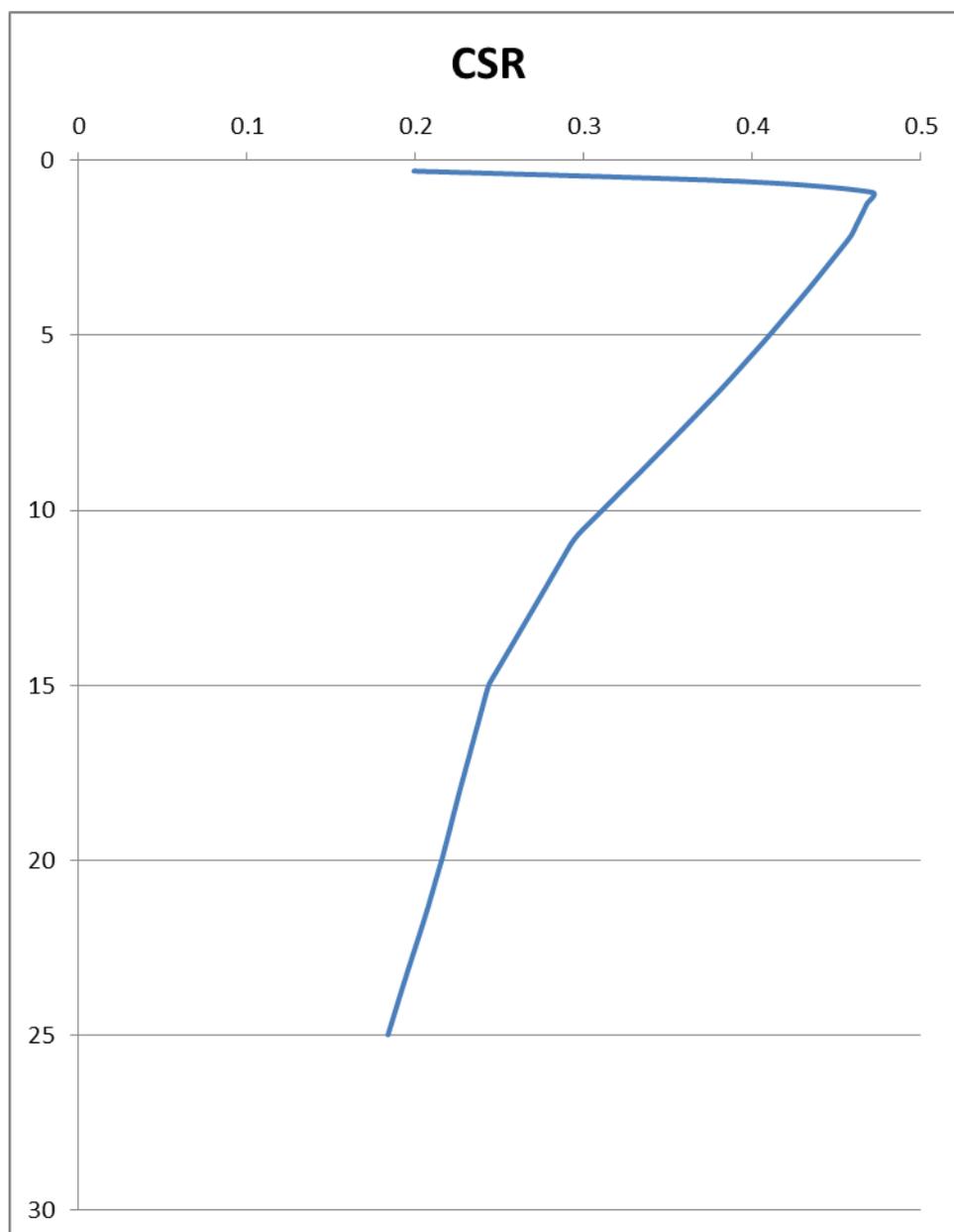


Fig. 27 - Variazione del Cyclic Stress Ratio con la profondità

	RSL
FA_{PGA}	1.34
$FA_{IS\ 0.1-0.5}$	1.40
$FA_{IS\ 0.5-1.0}$	1.54
$FA_{IS\ 0.5-1.5}$	1.33

Tab. 8 - Fattori di amplificazione



3.6.2 RSL per il sito S2-DH2

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
Argilla superficiale	4.50	0.00	18.00	155.00	23.86	0.97	34.00	3.22
Ghiaia	9.90	4.50	20.00	430.00	21.55	0.80	14.74	3.08
Argilla profonda	9.70	14.40	18.50	210.00	17.90	0.90	29.73	2.93
Ghiaia	0.90	24.10	21.00	430.00	21.55	0.80	14.74	3.08
Sabbia	12.50	25.00	19.00	340.00	58.56	1.26	24.15	3.36
Bedrock		37.50	22.00	450.00				

Tab. 9 - Modello geofisico

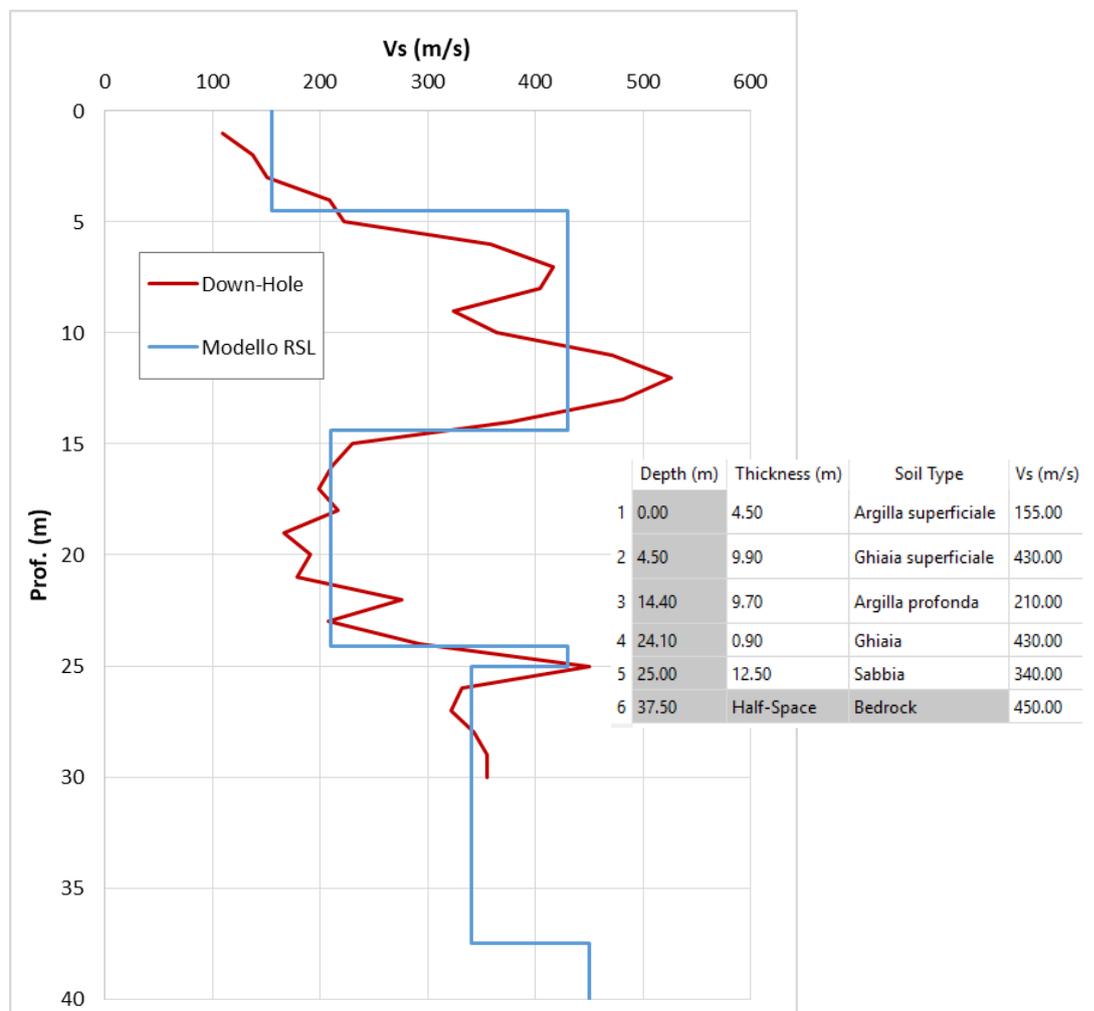


Fig. 28 - Discretizzazione della Vs e modello geofisico con codice di calcolo

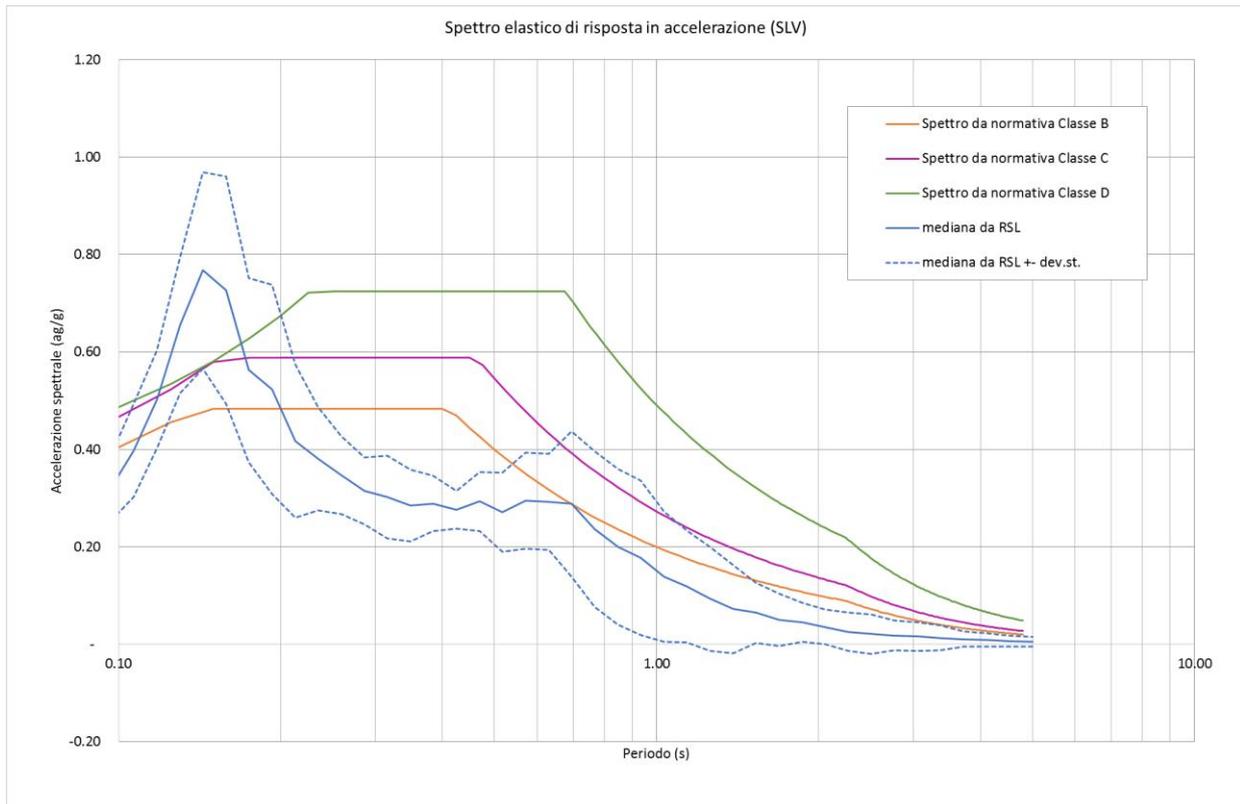


Fig. 29 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

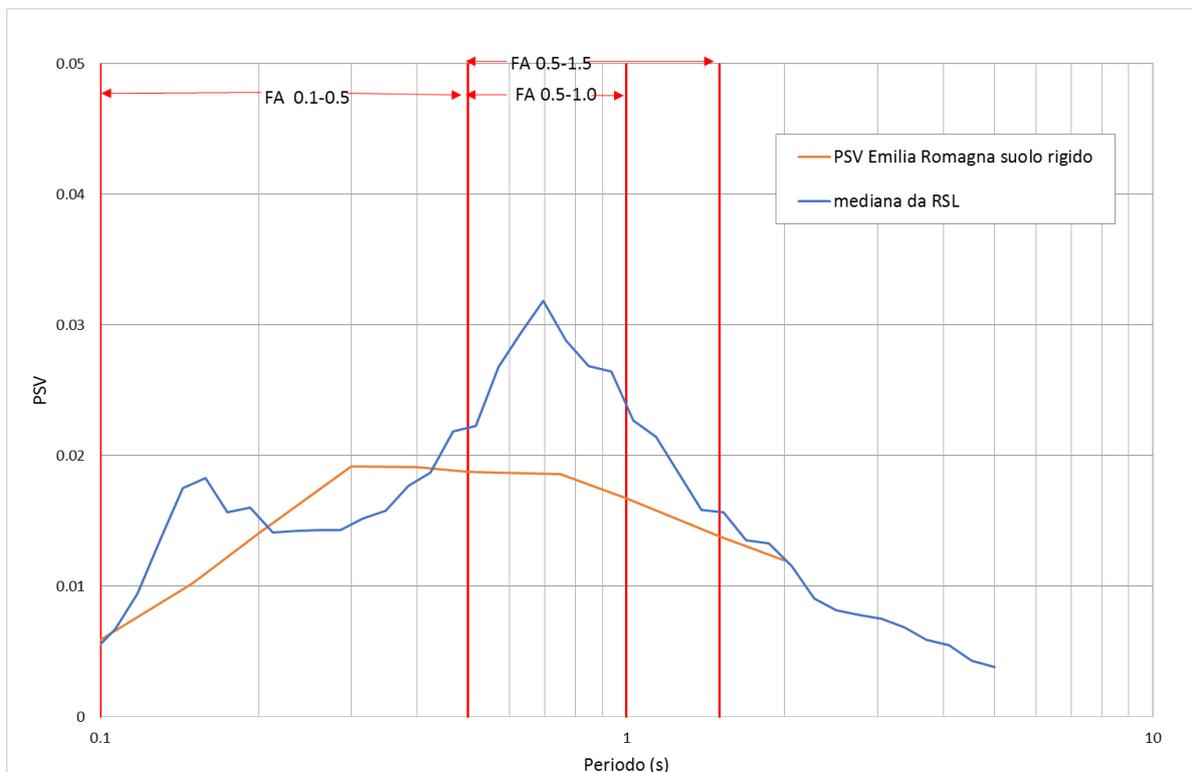


Fig. 30 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	39 di 79

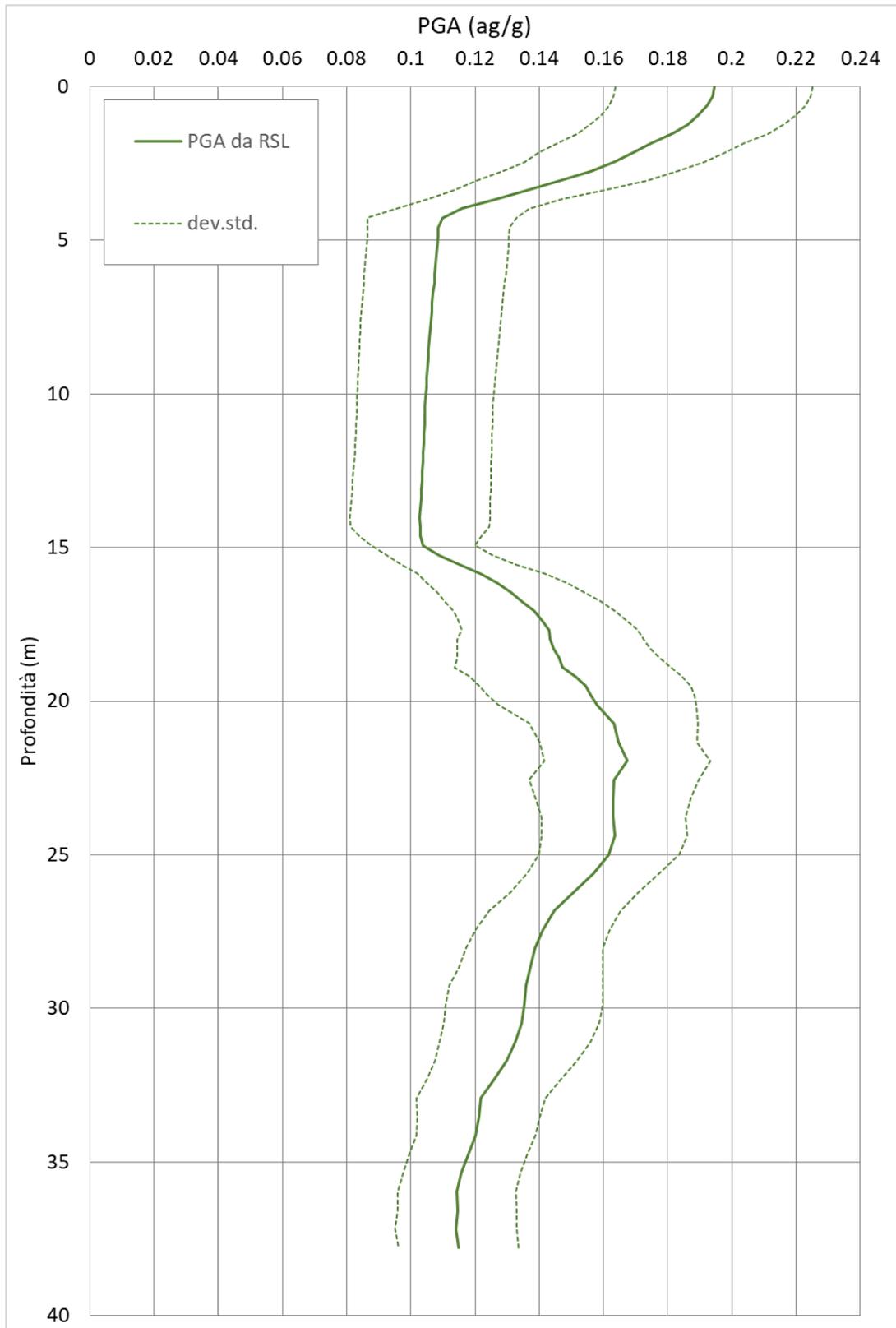


Fig. 31 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

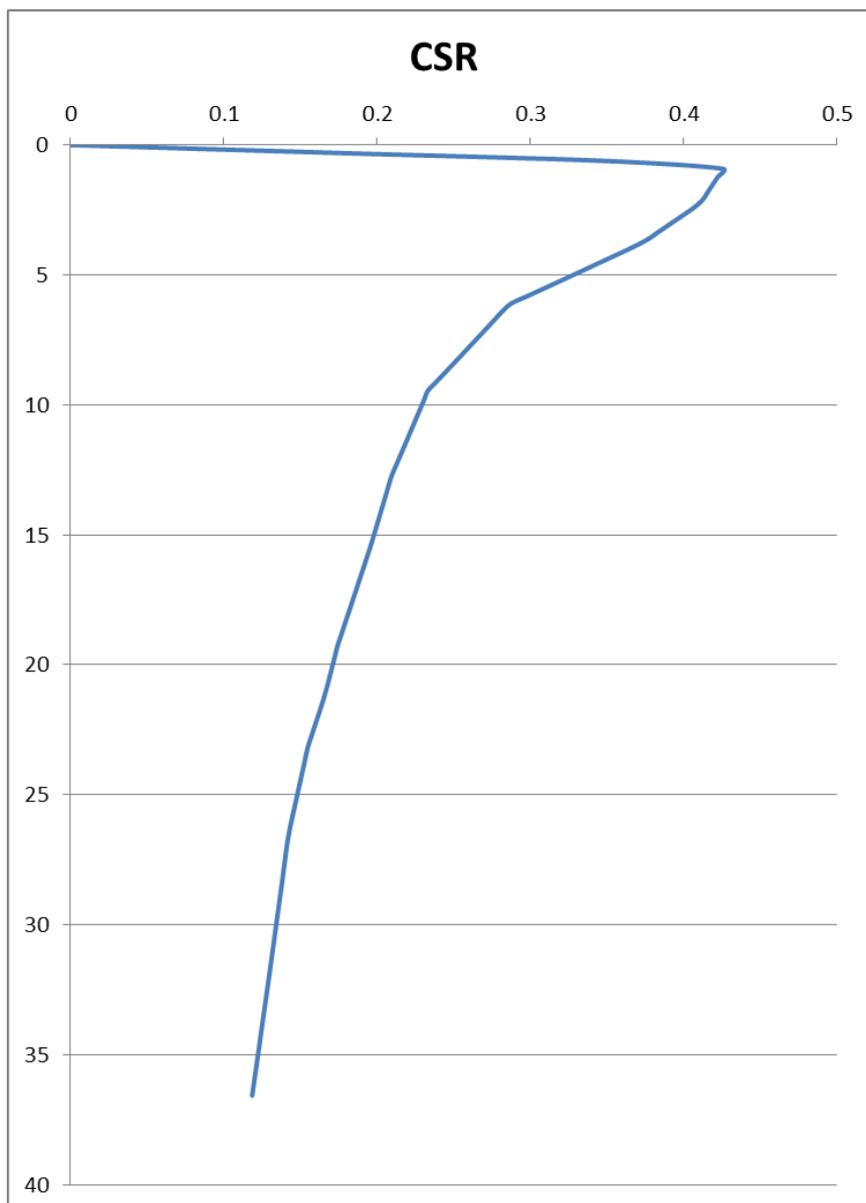


Fig. 32 - Variazione del Cyclic Stress Ratio con la profondità

	RSL
FA_{PGA}	1.20
$FA_{IS\ 0.1-0.5}$	1.07
$FA_{IS\ 0.5-1.0}$	1.52
$FA_{IS\ 0.5-1.5}$	1.36

Tab. 10 - Fattori di amplificazione



3.6.3 RSL per il sito 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
Argilla superficiale	8.80	0.00	18.00	175.00	23.86	0.97	34.00	3.22
Ghiaia	6.20	8.80	20.00	430.00	21.55	0.80	14.74	3.08
Argilla profonda	5.00	15.00	19.00	210.00	23.86	0.97	34.00	3.22
Bedrock		20.00	22.00	450.00				

Tab. 11 - Modello geofisico

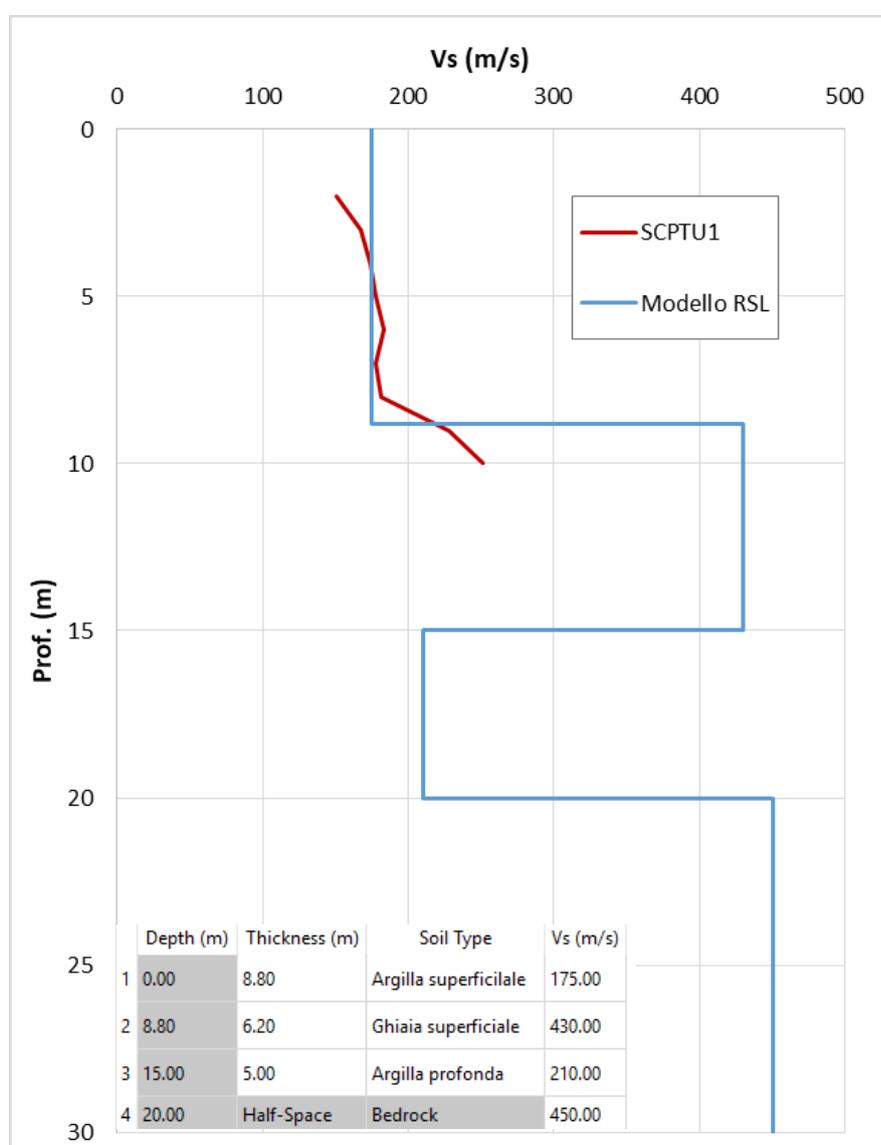


Fig. 33 - Discretizzazione della Vs e modello geofisico del codice di calcolo

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	42 di 79

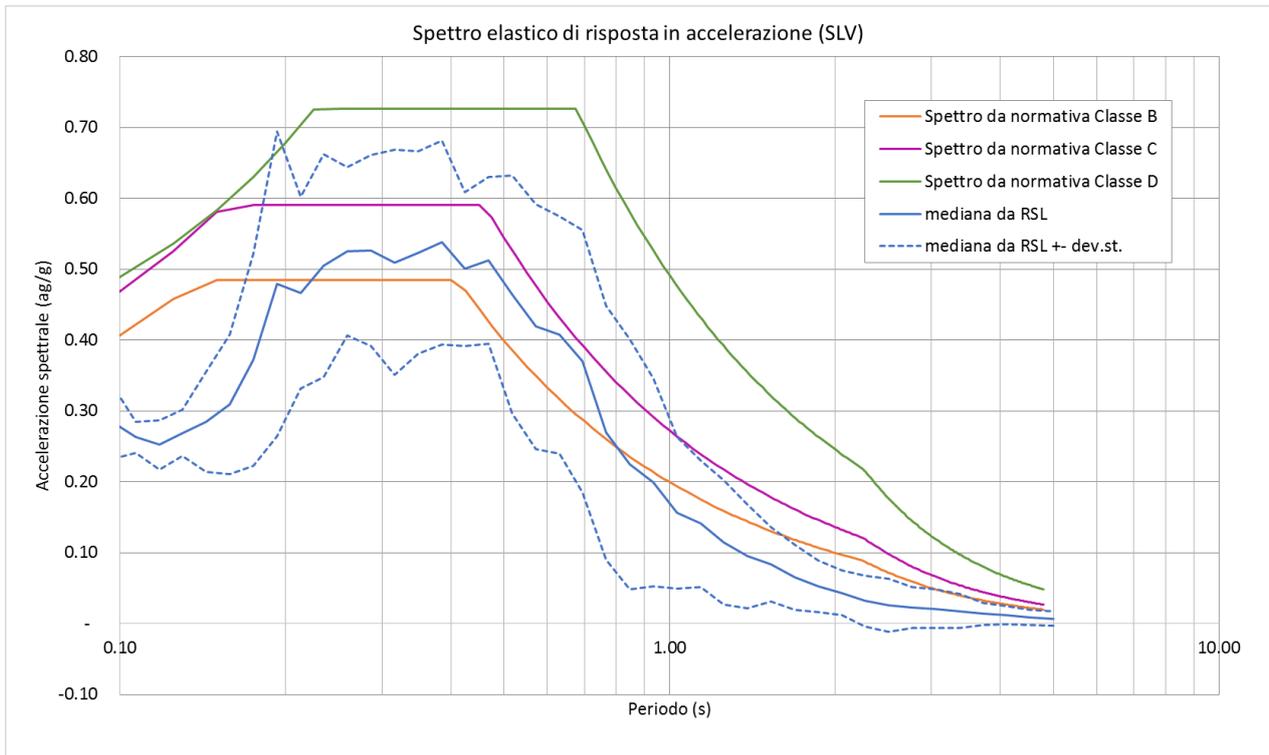


Fig. 34 -Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

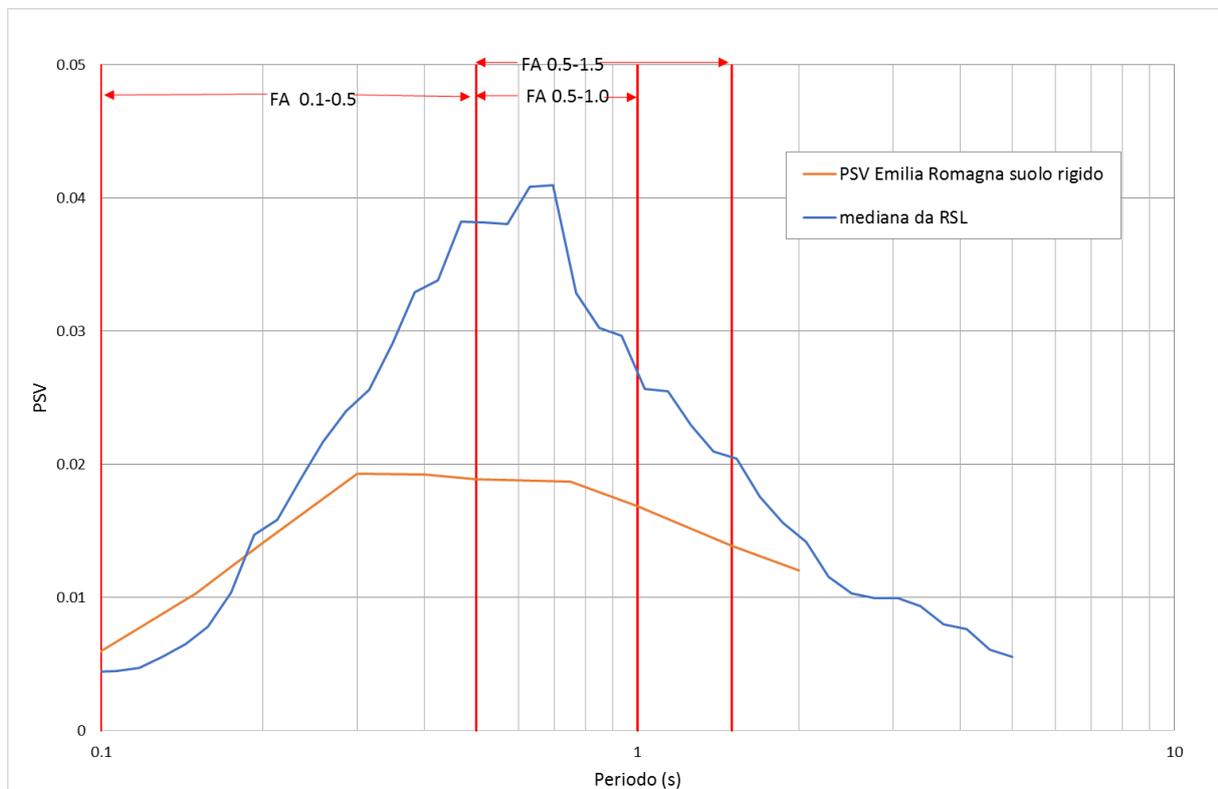


Fig. 35 -Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	43 di 79

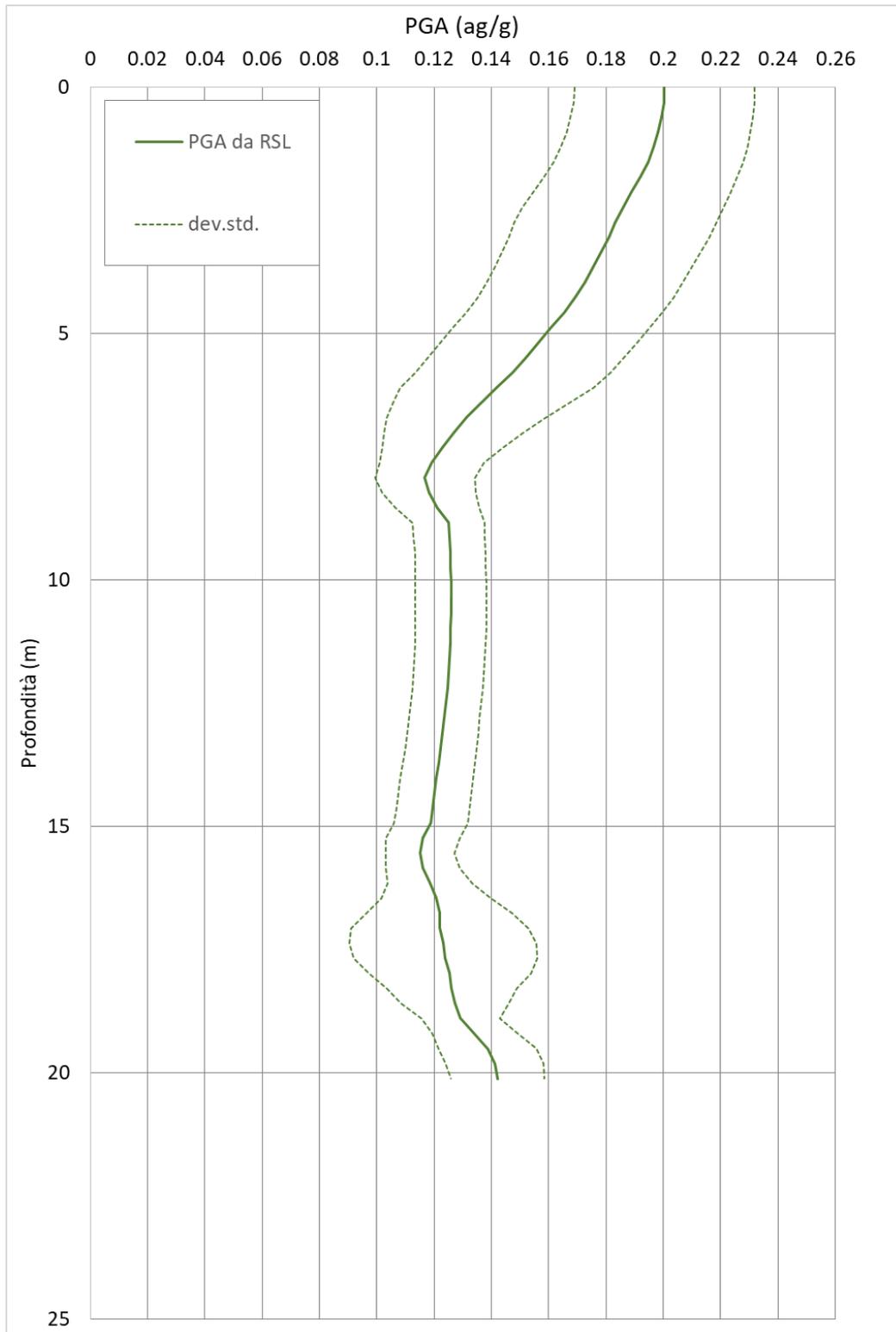


Fig. 36 -Variazione dell'accelerazione con la profondità

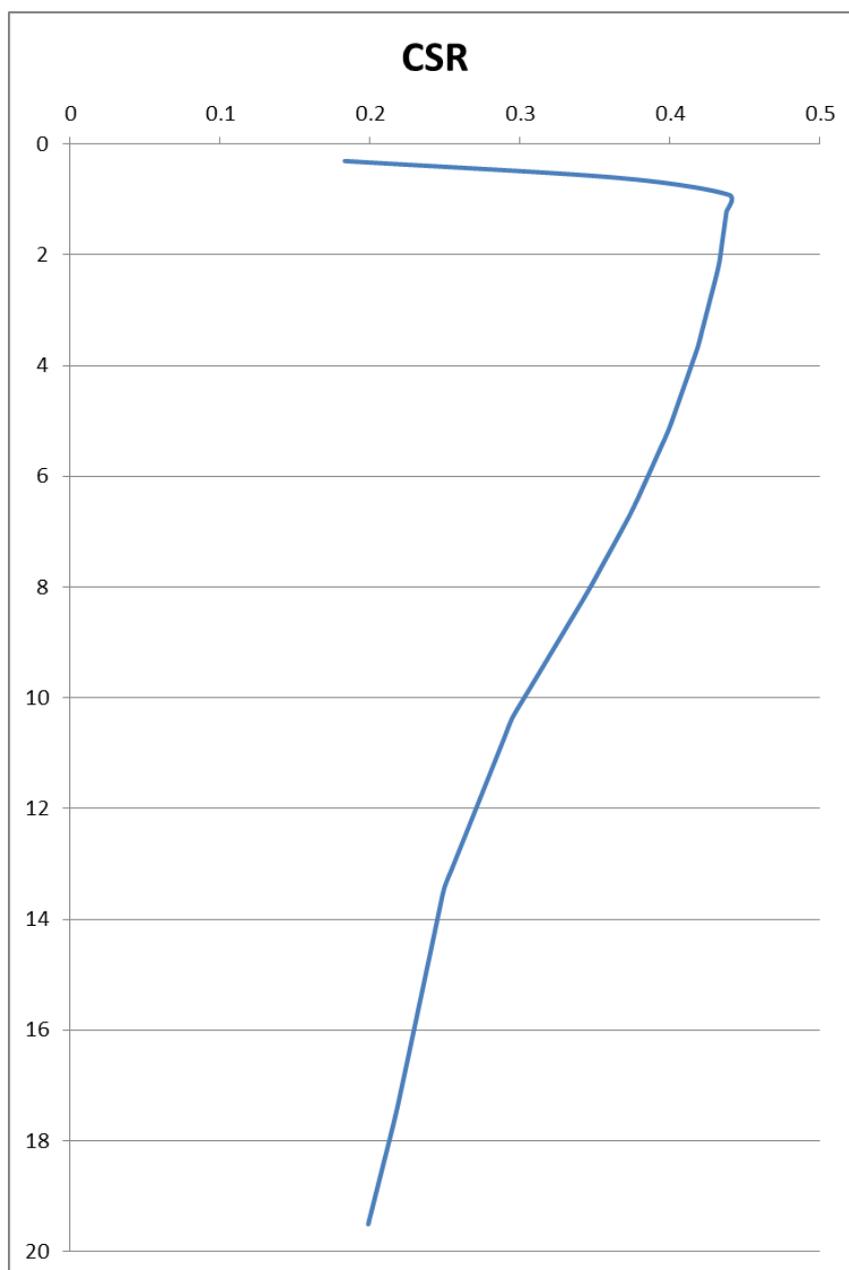


Fig. 37 -Variazione del Cyclic Stress Ratio con la profondità

	RSL
FA_{PGA}	1.23
$FA_{IS\ 0.1-0.5}$	1.42
$FA_{IS\ 0.5-1.0}$	1.83
$FA_{IS\ 0.5-1.5}$	1.66

Tab. 12 - Fattori di amplificazione



3.6.4 RSL per il sito 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
Argilla superficiale	28.00	0.00	18.00	210.00	5.12	0.81	30.24	3.06
Sabbia e ghiaia	6.00	28.00	20.00	430.00	58.56	1.26	24.15	3.36
Bedrock		34.00	22.00	450.00				

Tab. 13 - Modello geofisico

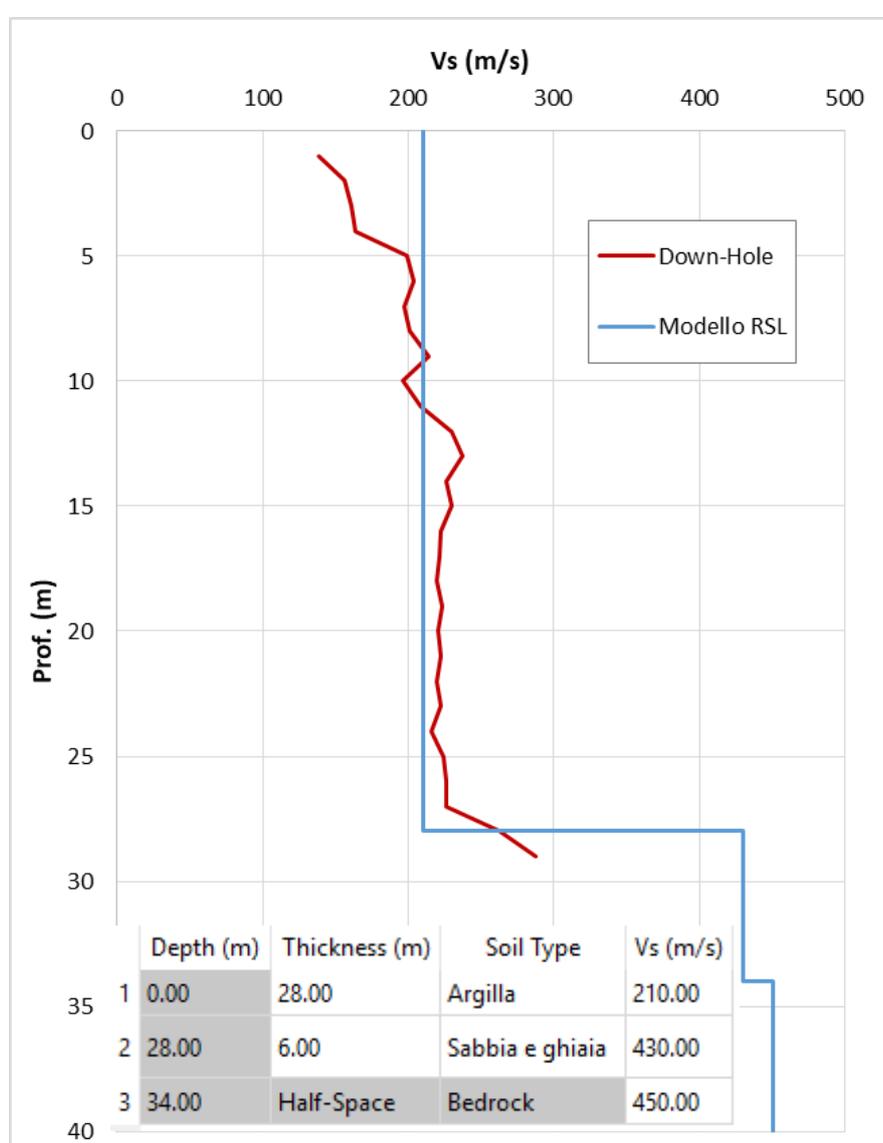


Fig. 38 - Discretizzazione della Vs e modello geofisico del codice di calcolo

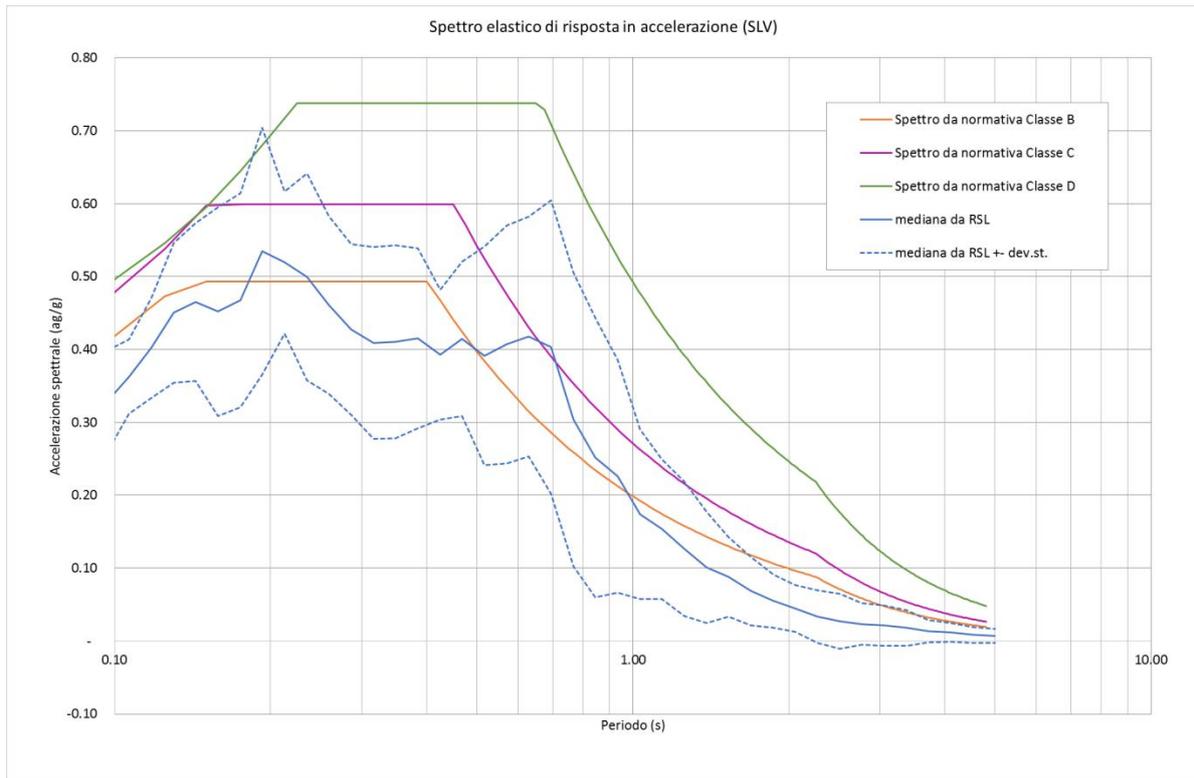


Fig. 39 - Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

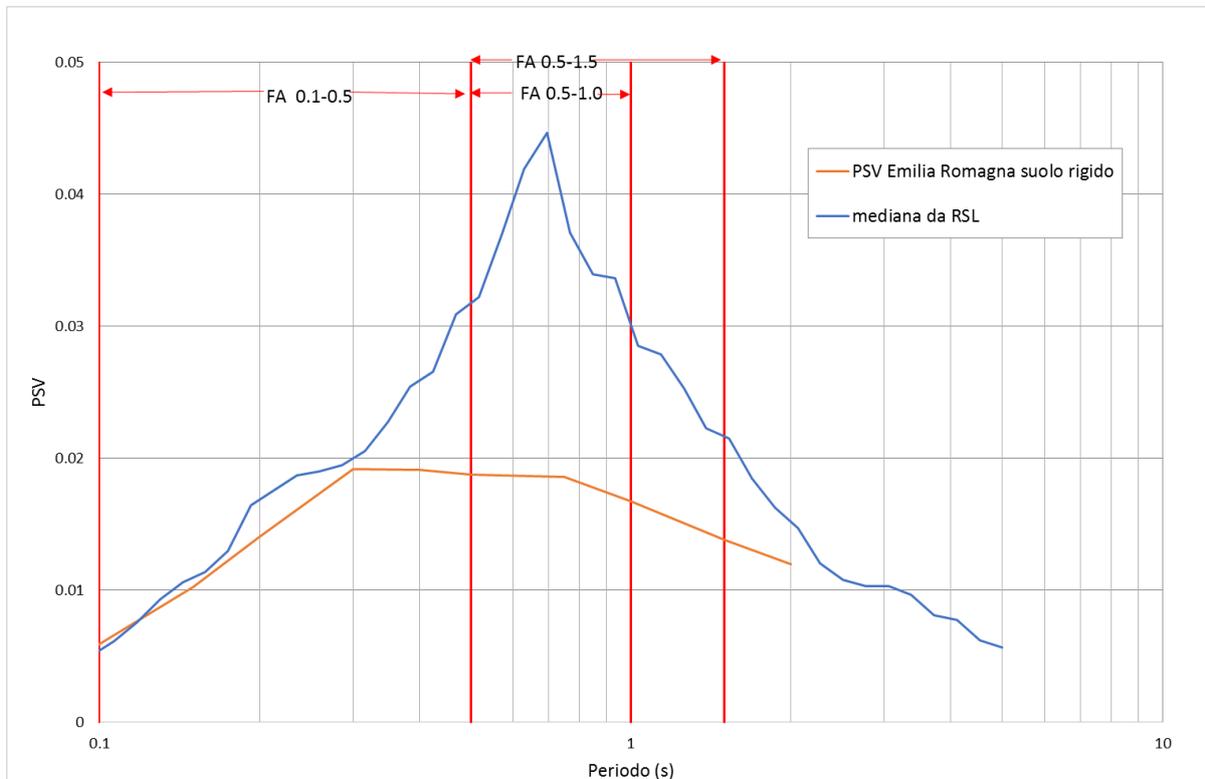


Fig. 40 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	47 di 79

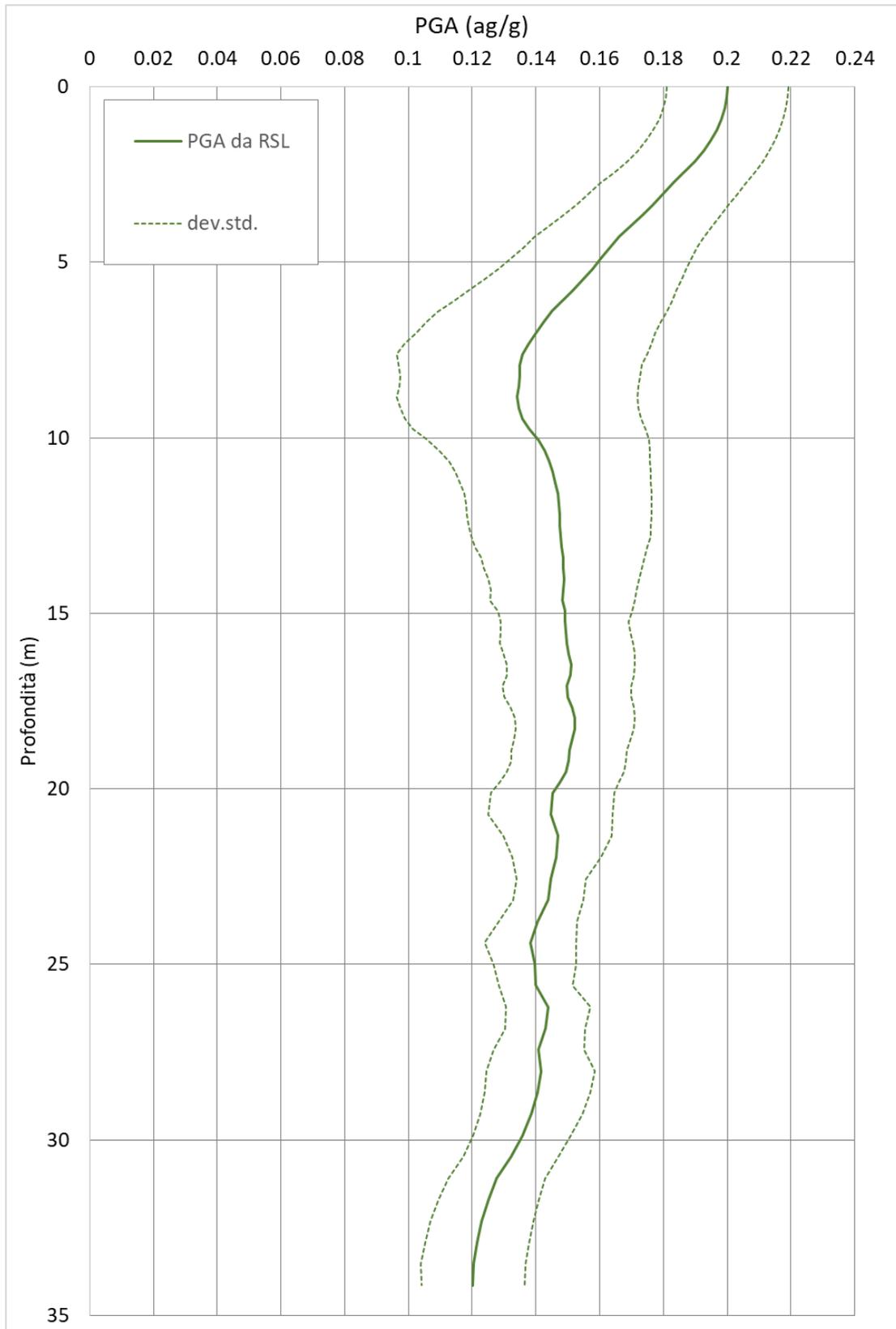


Fig. 41 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

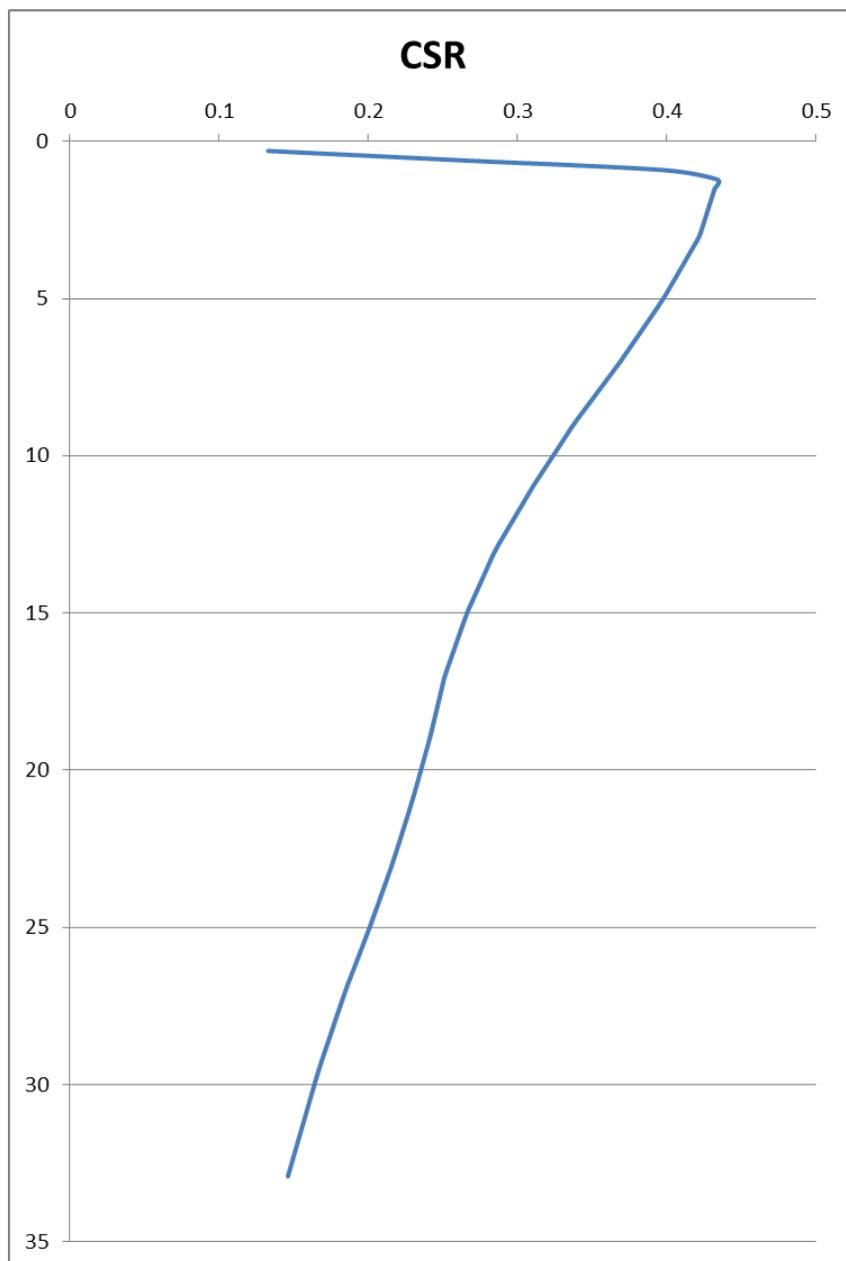


Fig. 42 - Variazione del Cyclic Stress Ratio con la profondità

	RSL
FA_{PGA}	1.23
$FA_{IS\ 0.1-0.5}$	1.28
$FA_{IS\ 0.5-1.0}$	2.00
$FA_{IS\ 0.5-1.5}$	1.82

Tab. 14 - Fattori di amplificazione



3.6.5 RSL per il sito SCPTU3

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
Argilla	21.50	0.00	18.00	220.00	24.68	1.30	37.00	3.06
Bedrock		21.50	22.00	435.00				

Tab. 15 - Modello geofisico

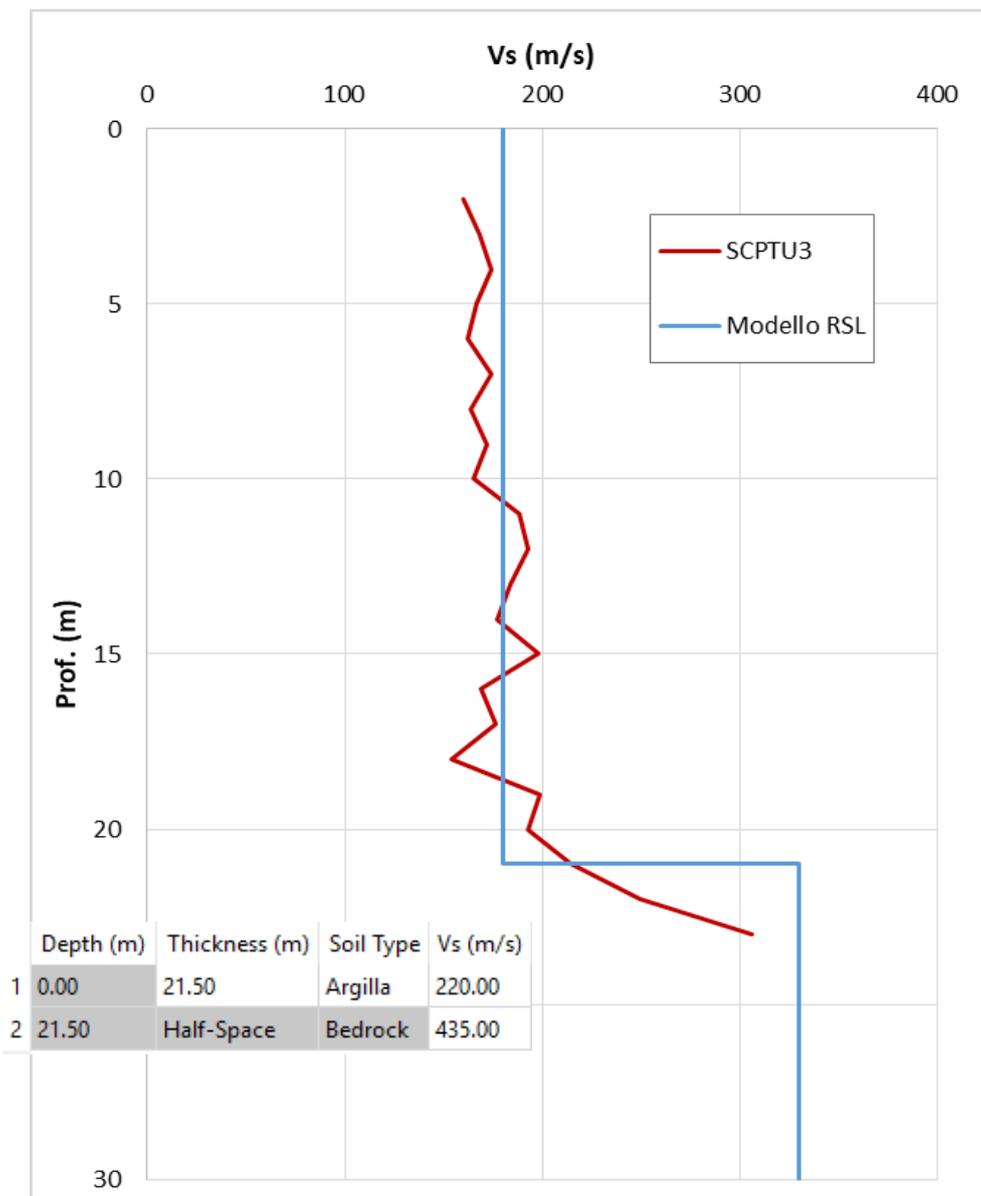


Fig. 43 - Discretizzazione della Vs e modello geofisico del codice di calcolo

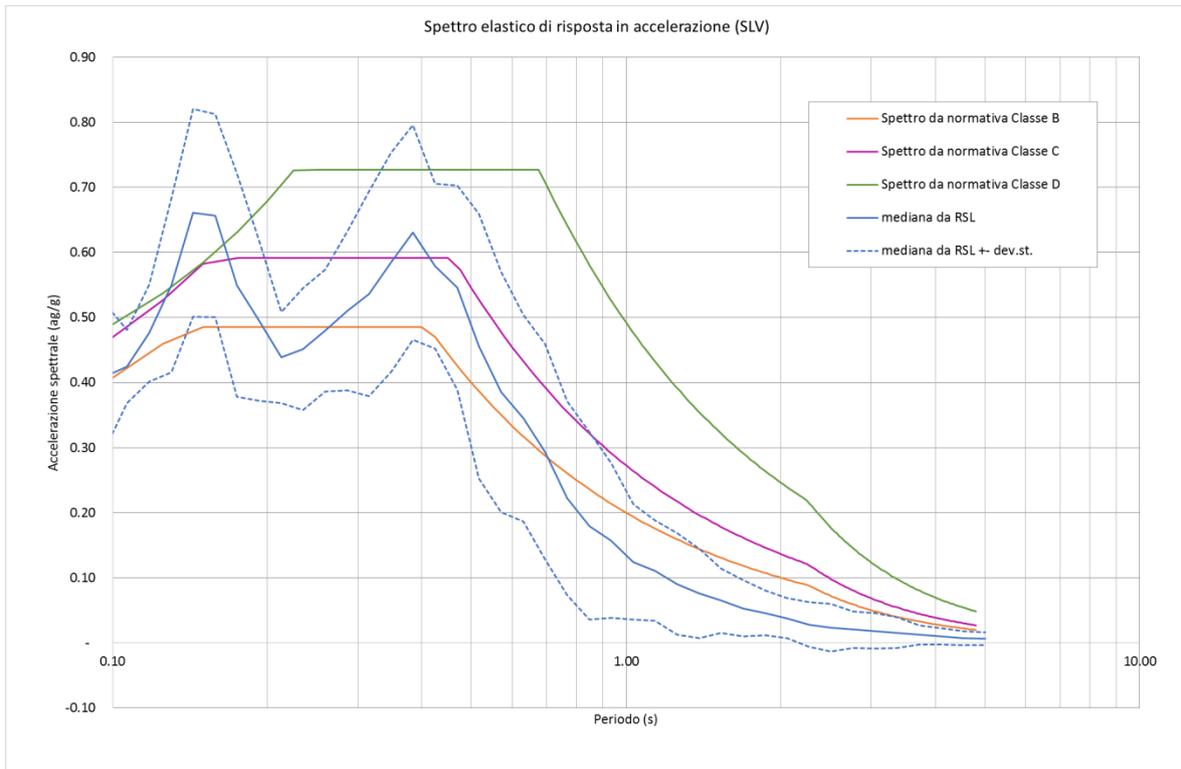


Fig. 44 - 034027P933- Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

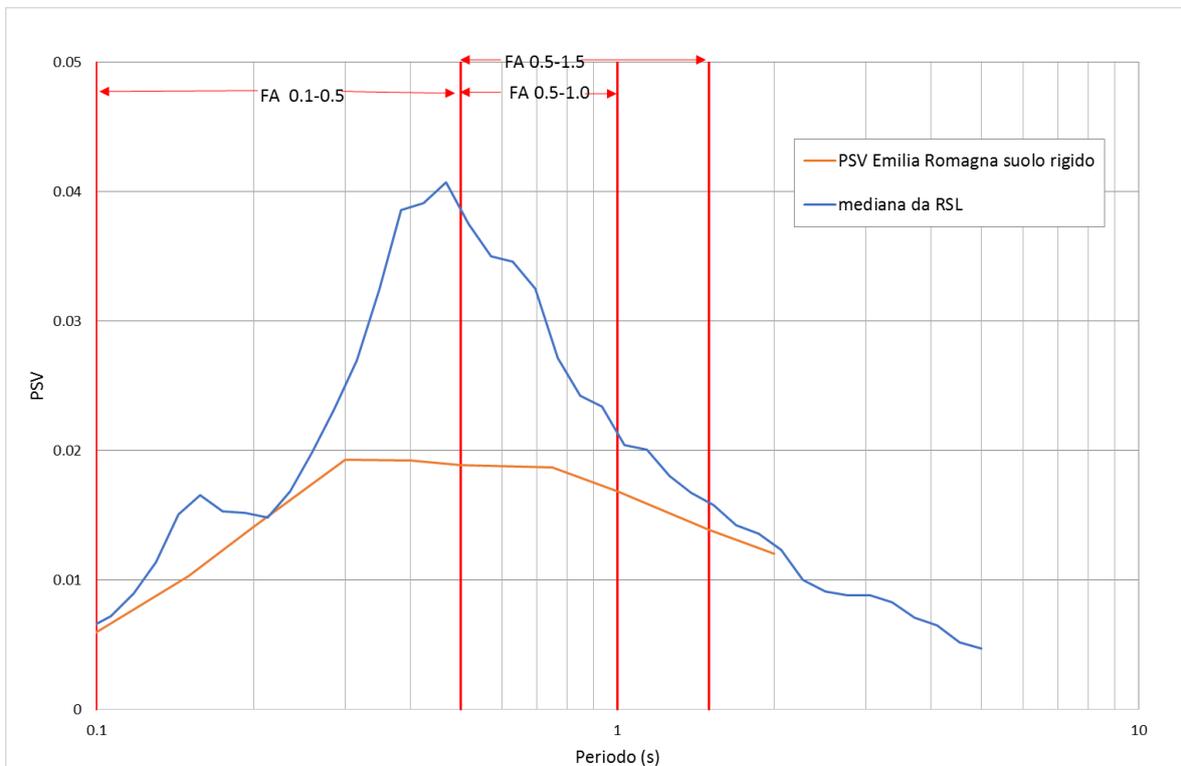


Fig. 45 - 034027P933 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	51 di 79

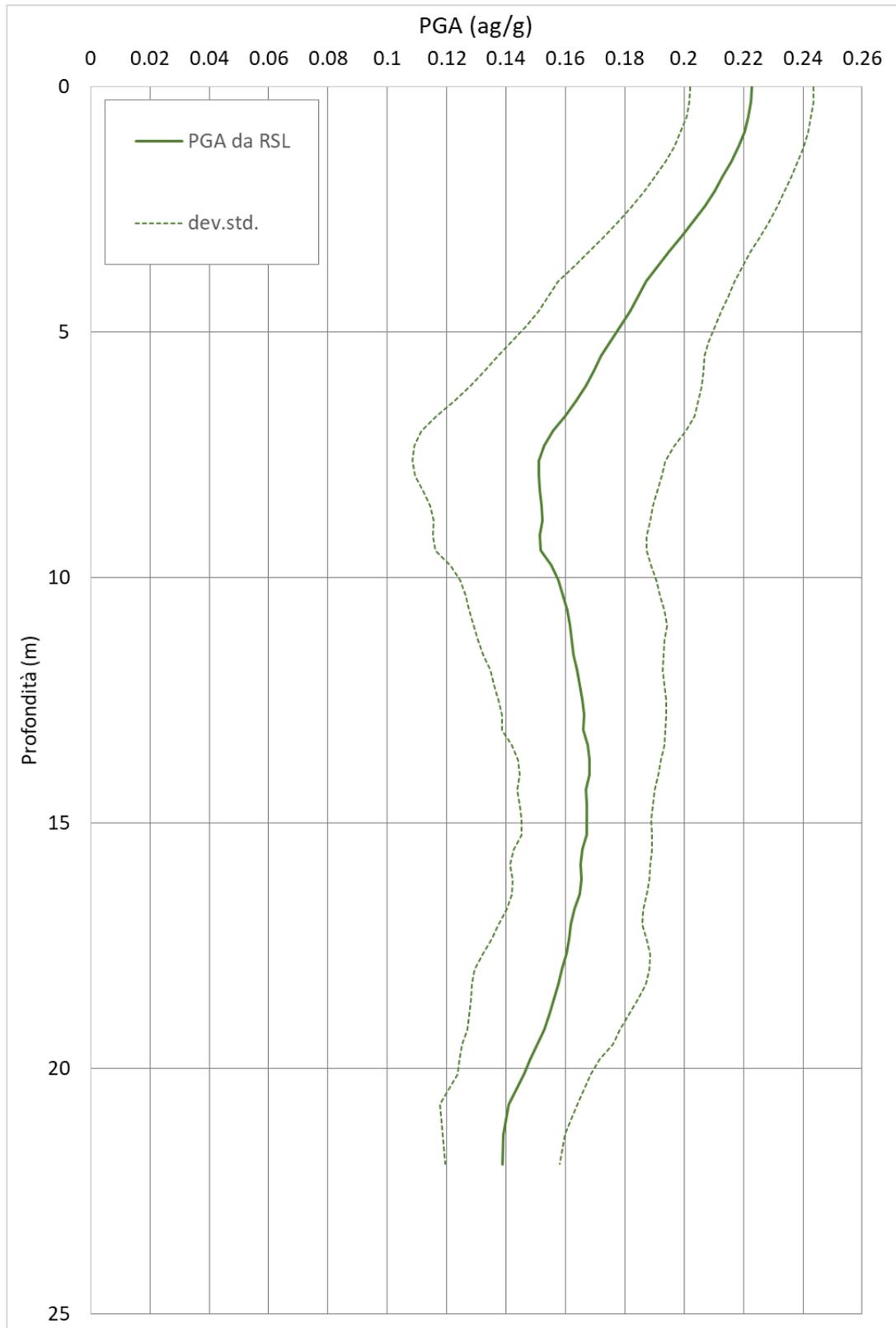


Fig. 46 - 034027P933 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	52 di 79

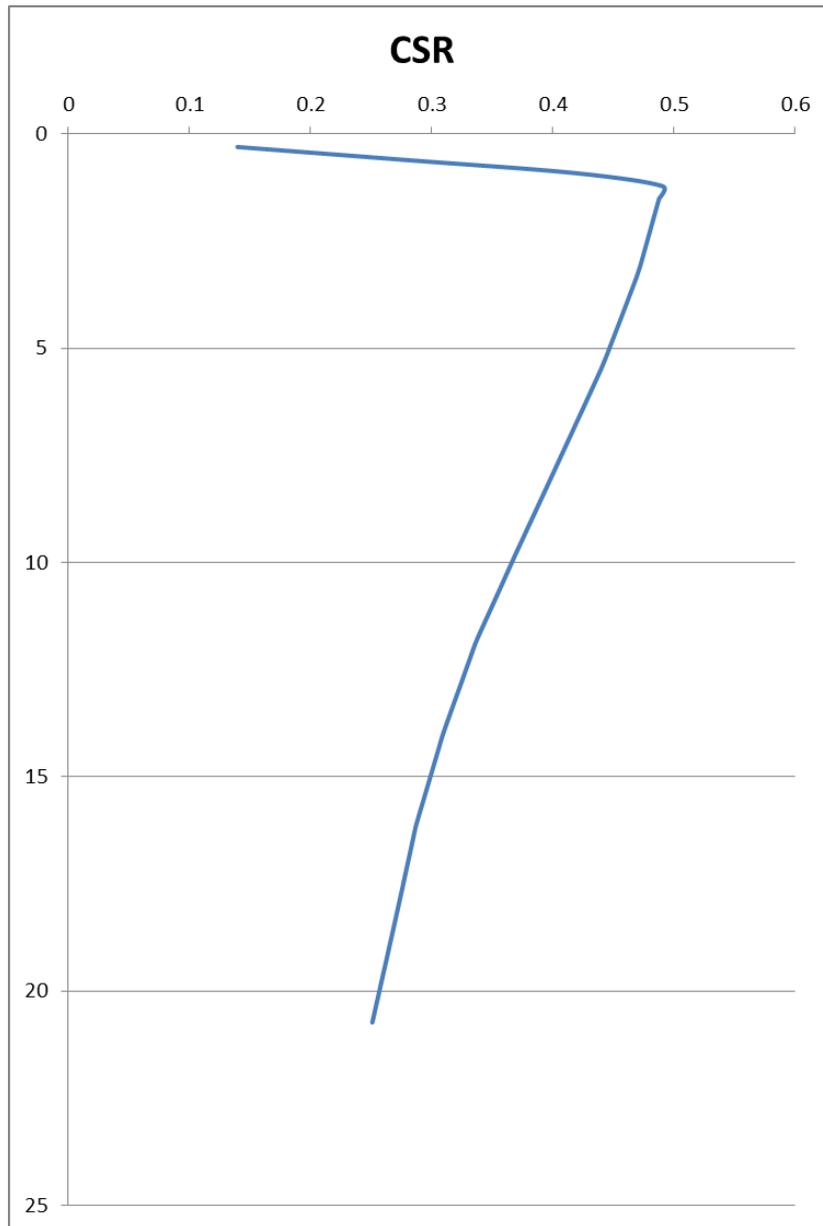


Fig. 47 - Variazione del Cyclic Stress Ratio con la profondità

	RSL
FA_{PGA}	1.39
$FA_{IS\ 0.1-0.5}$	1.60
$FA_{IS\ 0.5-1.0}$	1.50
$FA_{IS\ 0.5-1.5}$	1.34

Tab. 16 - Fattori di amplificazione



3.7 Verifica del rischio di liquefazione

Il rischio di liquefazione è stato valutato prendendo in considerazione le 15 verticali indagate nel presente studio mediante prove CPTU e SCPTU.

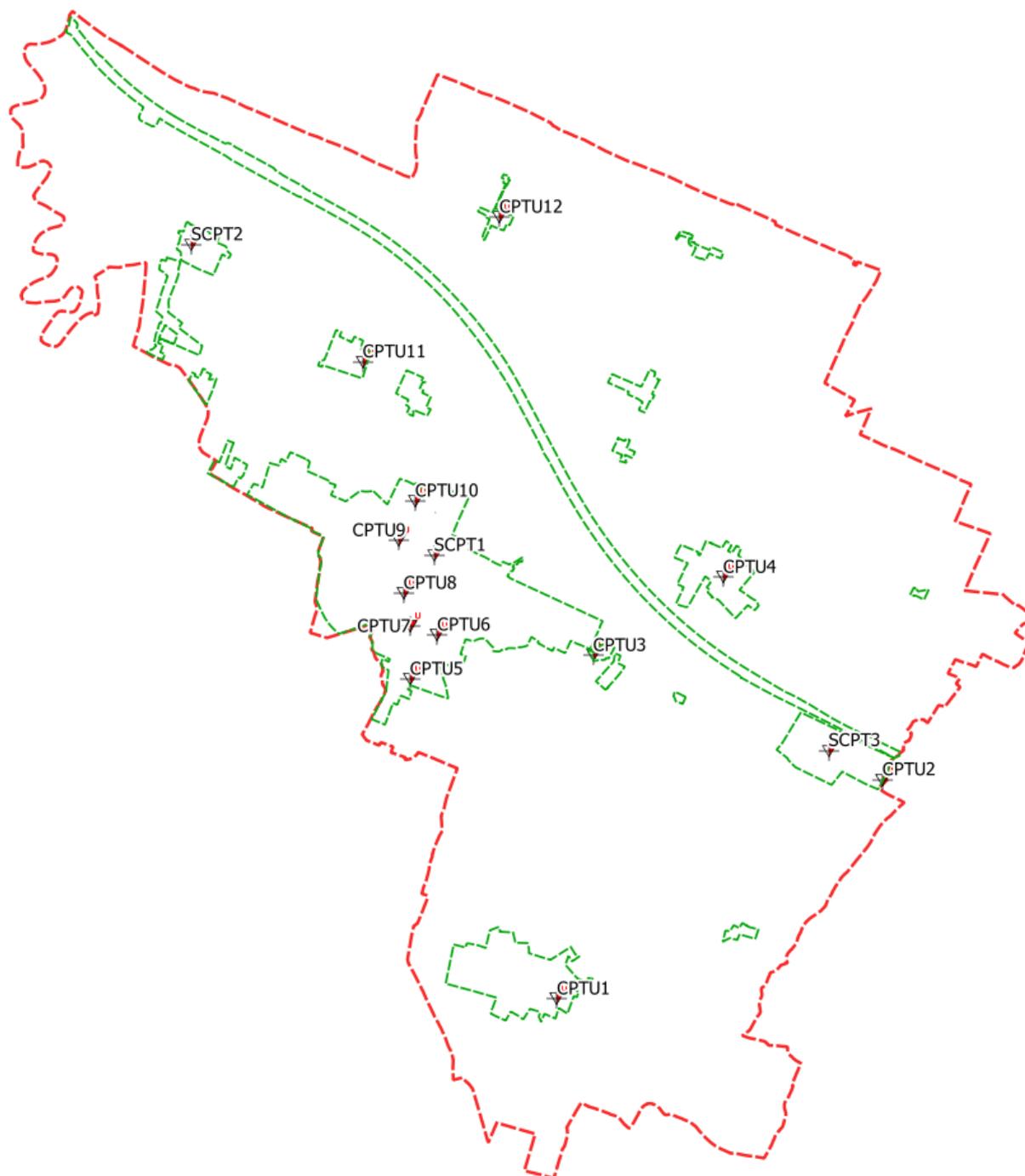


Fig. 48 - Stralcio ubicazione indagini utilizzate per verifica a liquefazione

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	54 di 79



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 LPI⁶ è un parametro di sintesi che, mediante un valore numerico compreso tra 0 e 100, quantifica i possibili effetti della liquefazione in superficie, tenendo conto di severità dell'azione sismica, e di profondità, spessore e valore del fattore di sicurezza degli strati liquefacibili.

Per poter valutare la severità degli effetti *Iwasaki* ha proposto la scala riportata in Tab. 17.

Valori di IL	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. 17 - 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. 18.

⁶ LPI = Liquefaction Potential Index è tradotto con IL = Indice di Liquefazione nella cartografia di MS



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. 18 - Valutazione del rischio di liquefazione secondo *Sonmez*

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

L'indice LPI è definito nel modo seguente:

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

Dove:

- F(z) è una variabile con valori compresi tra 0 e 1, definita ad ogni profondità $0 \leq z \leq 20$ 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^7 = rapporto di tensione ciclica (*Cyclic Stress Ratio*)

⁷ Come illustrato in precedenza (cap. 3.5.1) per il presente studio il valore di CSR è stato ottenuto direttamente dalla RSL.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	56 di 79



Nelle verifiche effettuate nel presente studio, per il calcolo del CRR è stato utilizzato il metodo NCEER (modificato da *Robertson 2009*) implementato dal programma CLIQ della *Geologimiki*. In Fig. 49 viene presentata, in forma di *flow-chart*, la procedura di calcolo di CRR utilizzata dal programma per la verifica con il metodo NCEER.

In tali verifiche, come valori di CSR, sono stati utilizzati quelli calcolati mediante la RSL nelle 5 SCPTU effettuate, come accennato nel paragrafo 3.5.1.

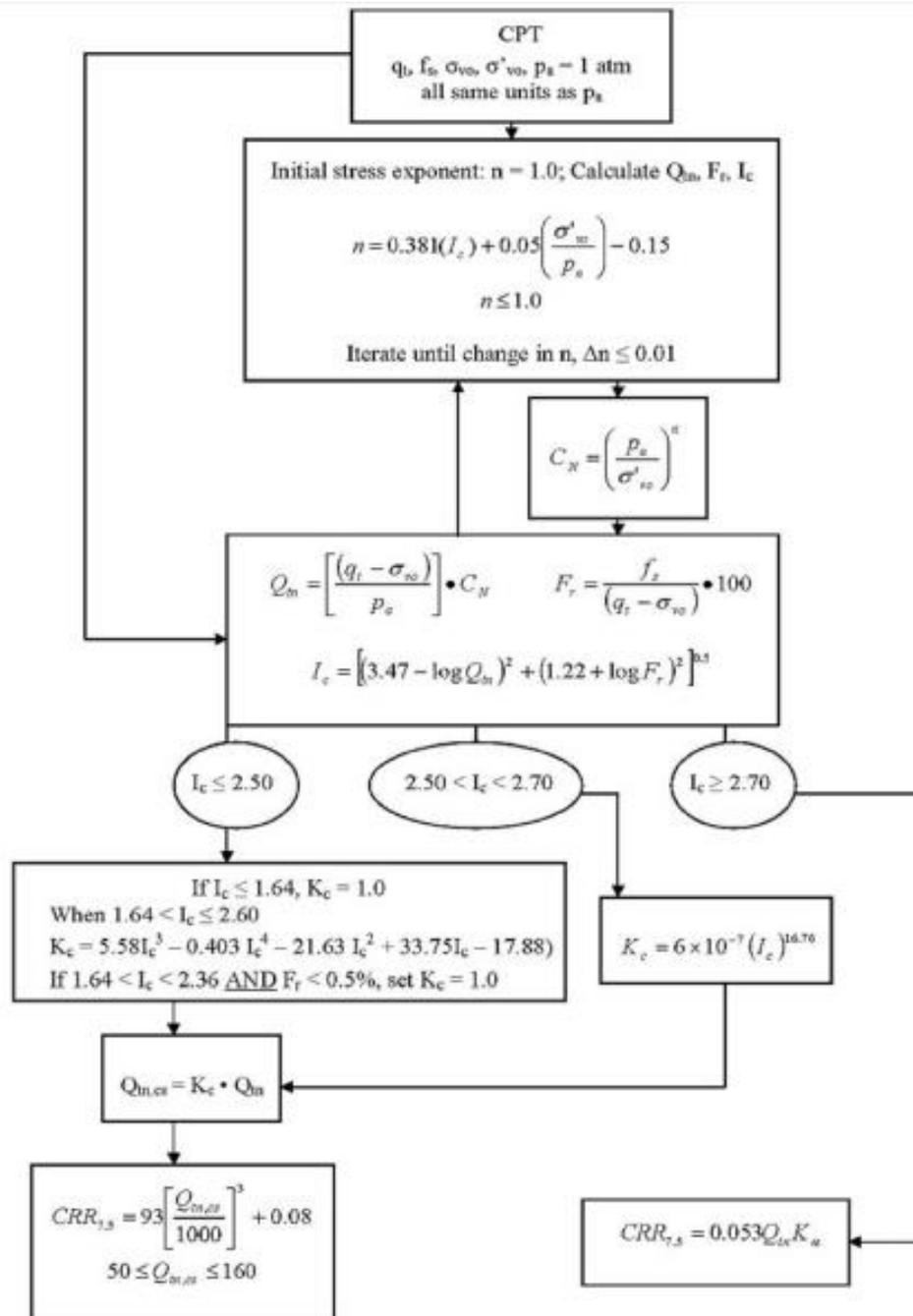


Fig. 49 - Flow chart della procedura di verifica NCEER modificata da *Roberson (2009)*

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	57 di 79



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 è incluso il Comune di Castelfranco Emilia (Zona 912 - Fig. 50) della classificazione ZS9 dell'IMCS, che è pari a $M_w=6.14$.

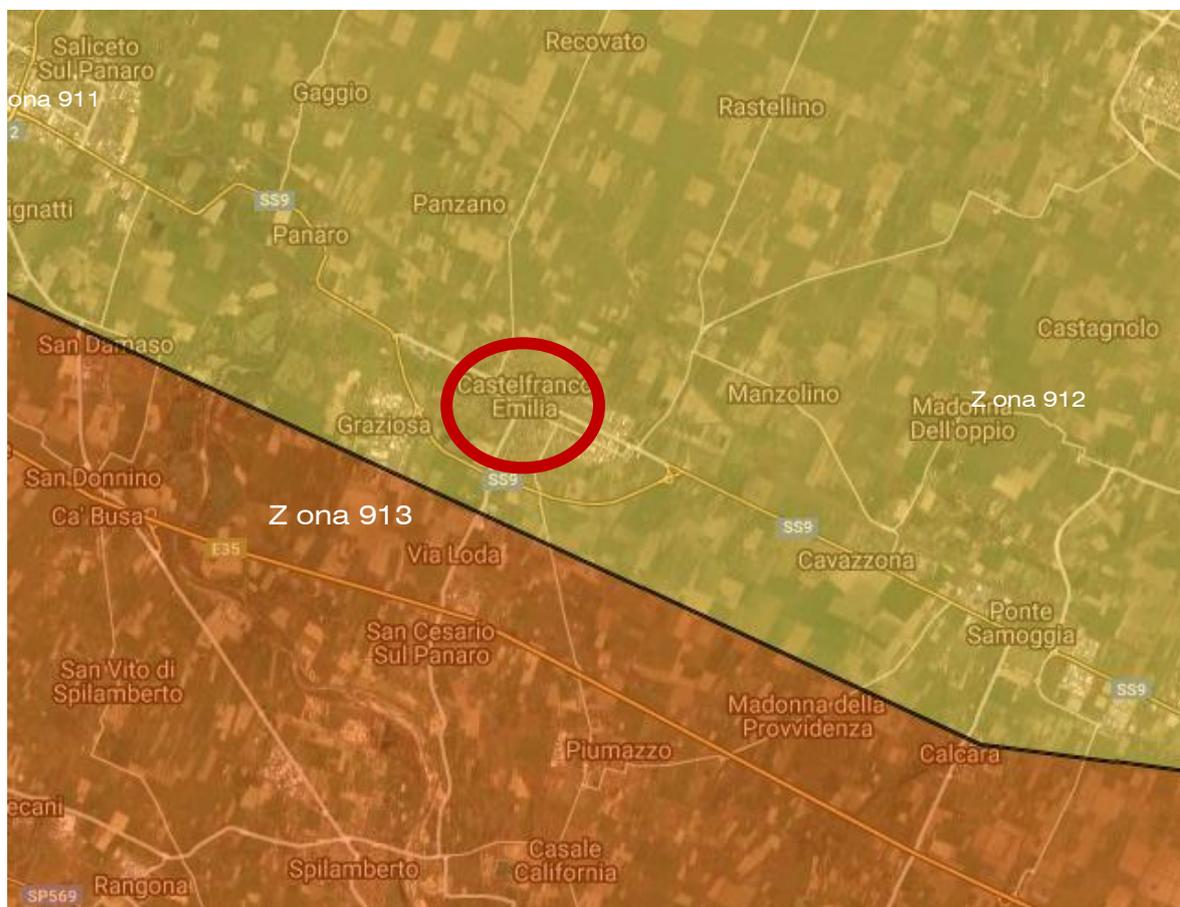


Fig. 50 - Classificazione ZS9

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

3.7.1 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. 51):

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

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	58 di 79

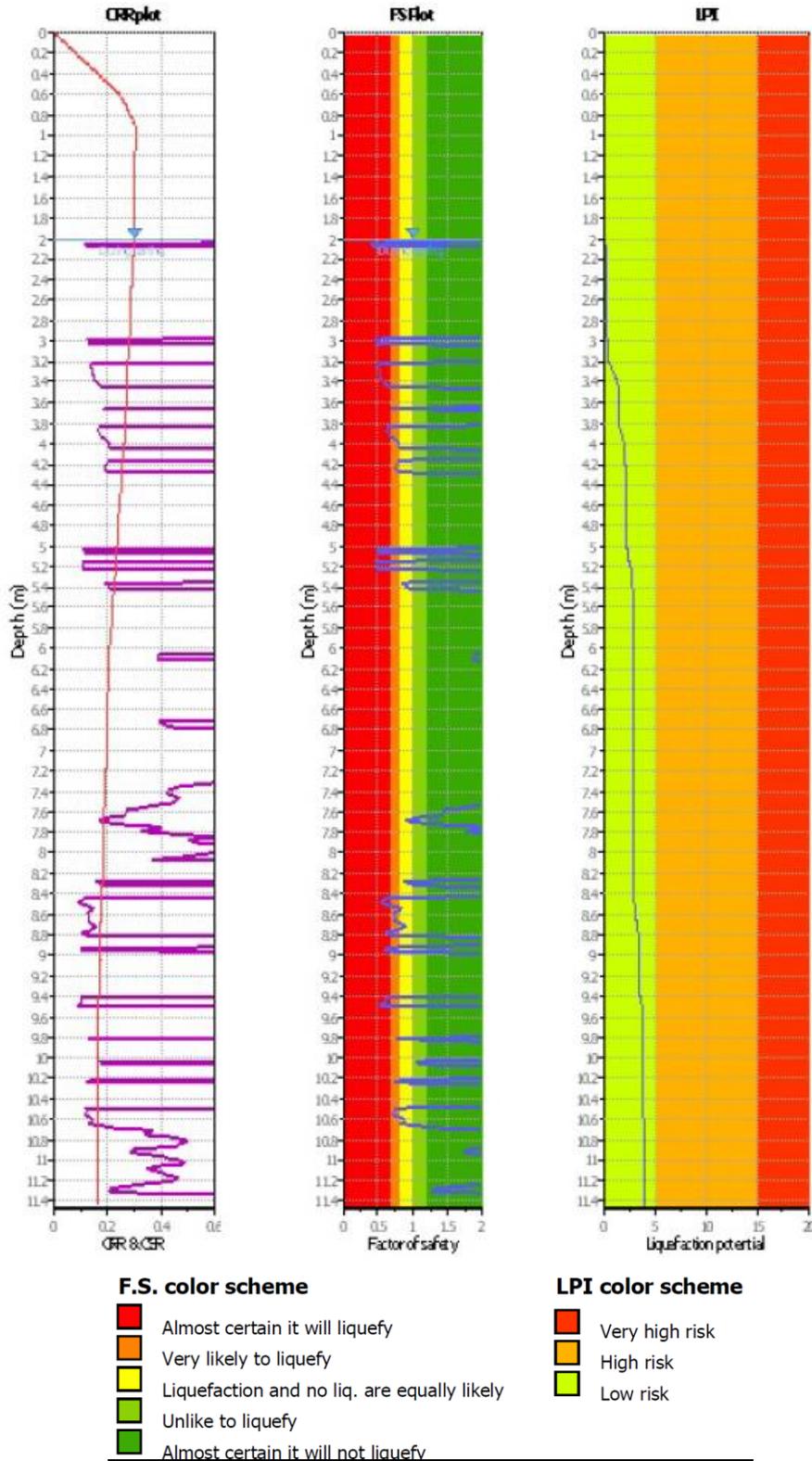


Fig. 51 - Grafici di CSR-CRR, dei fattori di sicurezza FS e dell'indice di liquefazione (LPI), valutati per la prova CPTU1

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	59 di 79



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

In Tab. 19 vengono rappresentati i valori di LPI calcolati mediante il metodo di Robertson; su un totale di 15 prove, utilizzando la classificazione secondo Sonmez (2009), solo 4 presentano un indice minore di 2 a cui corrisponde la categoria “rischio di liquefazione basso”, 4 prove presentano un indice di liquefazione compreso tra 2 e 5 a cui corrisponde la categoria “rischio di liquefazione moderato”, 2 prove presentano un indice di liquefazione compreso tra 5 e 15 a cui corrisponde la categoria “rischio di liquefazione elevato”, ed infine 4 prove hanno valori > di 15 a cui corrisponde la categoria “rischio di liquefazione molto elevato”.

<i>Tipologia prova</i>	<i>Codice prova</i>	<i>LPI</i>
CPTU_1	034027P935	3.89
CPTU_2	034027P957	0.63
CPTU_3	034027P936	2.05
CPTU_4	034027P937	0.76
CPTU_5	034027P938	0.48
CPTU_6	034027P939	4.84
CPTU_7	034027P940	12.84
CPTU_8	034027P941	5.45
CPTU_9	034027P942	1.42
CPTU_10	034027P943	19.39
CPTU_11	034027P944	33.49
CPTU_12	034027P945	5.14
SCPTU_1	034027P946	15.39
SCPTU_2	034027P947	2.40
SCPTU_3	034027P948	20.55

Tab. 19 - Valori di LPI calcolati

I valori dell'indice LPI sono stati riportati nelle cartografie di 3° livello; le schede di dettaglio della liquefazione sono riportati nell'Elaborato 14.



3.8 Criticità del metodo

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

E' importante, tuttavia, precisare che i risultati in termini di amplificazione sismica riportati nei paragrafi precedenti sono riferiti ai soli modelli esposti nel capitolo 3.6, cioè a modelli che tengono conto della sola sismostratigrafia riscontrata nei 5 punti in cui si disponeva di un modello geofisico sufficientemente approfondito.

La considerevole variabilità stratigrafica del territorio non ha consentito di estendere la classificazione di 3° livello a tutti gli areali indagati nel 2° livello.

I risultati in termini di liquefazione, discussi nel paragrafo 3.7, tengono anch'essi conto della stratigrafia riscontrata nel corso delle indagini e mettono in luce come il territorio del Comune sia caratterizzato da rischio di liquefazione variabile, localmente elevato.

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

3.8.1 Considerazioni sul bedrock sismico

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

In letteratura (Martelli et alii⁸, 2013 e Martelli et alii⁹, 2014) è indicato che *“il maggiore contrasto di impedenza si ha in genere tra la base del sistema emiliano-romagnolo superiore (AES), datata tra 350.000 e 450.000 anni, e la base del subsistema AES6, datata circa 230.000-250.000 anni (RER e ENI-Agip, 1998)”*.

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

Questa impostazione è stata adottata anche nello studio di 2° Livello, tanto che, seppur con le dovute cautele, la principale superficie riflettente è stata considerata il tetto delle ghiaie.

⁸ L. Martelli, L. Calabrese, G. Ercolessi, P. Severi, G. Tarabusi, D. Pileggi, S. Rosselli, L. Minarelli, F. Pergalani, M. Compagnoni, G. Vannucchi, C. Madaï, 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

⁹ 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	Ottobre 2018	0	61 di 79



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

Ciò è facilmente comprensibile consultando le sezioni geologiche interpretative redatte dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (Fig. 52), dove è evidente che a Castelfranco (tratto corrispondente alla Via Emilia) la base dell'AES6 è posta ad oltre 100 m di profondità e che la stratigrafia presenta almeno 6 alternanze ghiaie/argille che sarebbero tutte da caratterizzare in termini di velocità e di parametri G/G_0 e D , per poter fornire un risultato di RSL.

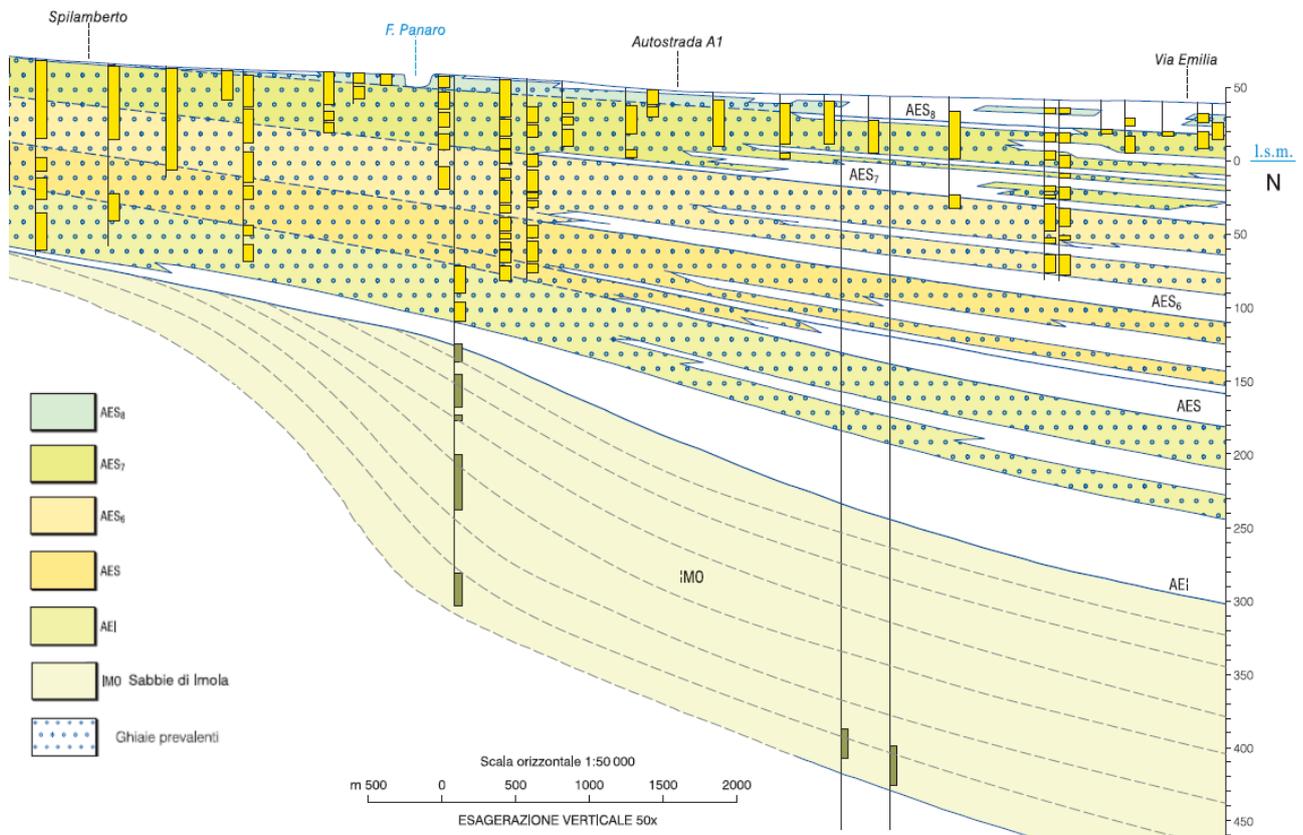


Fig. 52 - Stralcio della Sezione 12 consultabile sul sito del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	62 di 79



4. ELABORATI CARTOGRAFICI

4.1 Carte delle indagini

Nelle Carte delle indagini, alla scala 1:10.000, sono riportate le ubicazioni di tutte le indagini geognostiche e/o sismiche inserite nel database geognostico a corredo dello studio.

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

Le prove sono state distinte in base alla tipologia in:

- sondaggio a carotaggio continuo
- sondaggio da cui sono stati prelevati campioni
- sondaggio a distruzione di nucleo
- sondaggio con piezometro
- pozzo per acqua
- prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- prova penetrometrica statica con punta elettrica
- prova penetrometrica statica con piezocono
- prova penetrometrica statica con cono sismico e piezocono
- prova penetrometrica dinamica pesante
- trincea o pozzetto esplorativo

	Prova penetrometrica statica con punta meccanica		Trincea o pozzetto esplorativo
	Prova penetrometrica statica con punta elettrica		Pozzo per acqua
	Prova penetrometrica statica con piezocono		Sondaggio elettrico verticale
	Prova penetrometrica con cono sismico e piezocono		Profilo sismico a rifrazione
	Prova penetrometrica dinamica pesante		Prova REfractionMIcrotremors
	Sondaggio a carotaggio continuo		MASW
	Sondaggio da cui sono stati prelevati campioni		Stazione microtremore a stazione singola
	Sondaggio a distruzione di nucleo		
	Sondaggio con piezometro		

Fig. 53 - Legenda della Carta delle indagini

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	63 di 79



- sondaggio elettrico verticale
- profilo sismico a rifrazione
- prova REfractionMicrotremors
- MASW
- stazione microtremore a stazione singola

come raffigurato nella legenda riportata in Fig. 53.

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.

In Tab. 20 vengono riportati il numero e la tipologia di indagini presenti sul territorio studiato, acquisite mediante la ricerca effettuata presso l'archivio dell'Ufficio Tecnico Comunale, riprese dal database del Servizio Geologico regionale o effettuate all'uopo.

<u>TIPO DI INDAGINI</u>	<u>NUMERO PROVE</u>
Sondaggio a carotaggio continuo	85
Sondaggio a distruzione di nucleo	1
Trincea o pozzetto	9
Pozzo per acqua	156
Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)	473
Prova penetrometrica dinamica pesante	44
Prova penetrometrica statica con punta elettrica (CPTE)	25
Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)	61
Prova penetrometrica statica con piezocono (SCPTU)	3
MASW	24
REMI	24
Sismica a rifrazione	2
Sondaggio elettrico verticale (SEV)	1
Stazione microtremore a stazione singola	78

Tab. 20 – Riepilogo delle indagini geognostiche presenti sul territorio comunale

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	64 di 79



4.2 Carte geologico-tecniche

Tale cartografia non è stata modificata, ma viene semplicemente riproposta quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello.

Pertanto, si rimanda alla relativa relazione per la sua descrizione.

4.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

Sulla base di tutti i dati tomografici disponibili, sia contenuti nell'Archivio Comunale, sia di nuova acquisizione, sono state redatte le Carte delle frequenze naturali dei terreni, sempre alla scala 1:10.000.

Tali cartografie costituiscono un aggiornamento di quelle già redatte per gli studi di microzonazione di 2° livello.

In queste carte sono stati riportati tutti i punti di misura (75), con associati i risultati delle singole prove. In particolare, sono stati indicati il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (frequenza principale) e, quando presente, un secondo picco significativo (frequenza secondaria), meno evidente del primo (F_1).

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

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

- $F_0 \leq 1$ 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 dell'ampiezza del picco, in corrispondenza della frequenza principale, distinguendo:

- $3 \leq H/V$
- $2 \leq H/V < 3$
- $1,5 \leq H/V < 2$

Ne consegue che la legenda adottata per la Carta delle frequenze è come quella raffigurata in Fig. 54.

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	65 di 79



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. 54 - Legenda della Carta delle frequenze

4.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), rappresenta il documento fondamentale del primo livello di approfondimento. Nel presente studio viene proposta una revisione di tale cartografia alla luce delle verifiche effettuate per il terzo livello di approfondimento, consistite, in particolare, nella verifica a liquefazione delle zone definite come zone di attenzione per instabilità nel precedente studio.

In questa cartografia il territorio in esame viene distinto a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti 3 categorie:

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

Dalla lettura della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica si osserva che, in corrispondenza delle aree esaminate in Comune di Castelfranco Emilia, non sono mai presenti le categorie 1. Invece, , sono state individuate:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	66 di 79



- N° 4 TIPOLOGIE DI ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI (le cui colonne litostratigrafiche sintetiche sono riportate in Fig. 55)
 - Zona 1 – con successione stratigrafica costituita da depositi prevalentemente fini (limi e argille), talora intercalati da sottili lenti sabbiose e sabbioso-limose, tipica del settore nord-occidentale del territorio comunale
 - Zona 2 – con successione stratigrafica costituita da depositi prevalentemente fini (limi e argille), intercalati da corpi ghiaiosi plurimetrici, a partire da una profondità di circa 20 m da p.c., e talora da sottili lenti sabbiose e sabbioso-limose, tipica del settore nord-orientale del territorio comunale
 - Zona 3 – con successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi prevalentemente limoso-argillosi, al cui interno si possono rinvenire sottili lenti sabbiose e sabbioso-limose, sotto la quale, a partire da circa 5÷10 m da p.c., sono presenti alternanze di orizzonti plurimetrici a tessitura grossolana (ghiaie e, in subordine, sabbie) e fine (limi e argille), tipica del settore più a sud del Capoluogo
 - Zona 4 – con successione stratigrafica costituita da depositi prevalentemente ghiaiosi subaffioranti, tipica dell'estremità meridionale del territorio comunale

- N° 4 TIPOLOGIE DI ZONE DI ATTENZIONE PER INSTABILITÀ (le cui colonne litostratigrafiche sintetiche sono riportate in Fig. 56)
 - ZALQ – Zona di attenzione per liquefazioni – Zona 5 –con successione stratigrafica analoga a quella della Zona 1 e presenza di locali lenti sabbiose riconducibili a paleoalvei fluviali che attraversano la zona
 - ZALQ – Zona di attenzione per liquefazioni – Zona 6 –con successione stratigrafica analoga a quella della Zona 2 e presenza di locali lenti sabbiose riconducibili a paleoalvei fluviali che attraversano la zona
 - ZALQ – Zona di attenzione per liquefazioni – Zona 7 –con successione stratigrafica analoga a quella della Zona 3 e presenza di locali lenti sabbiose riconducibili a paleoalvei fluviali che attraversano la zona
 - ZALQ – Zona di attenzione per liquefazioni – Zona 8 –con successione stratigrafica analoga a quella della Zona 4 e presenza di locali lenti sabbiose riconducibili a paleoalvei fluviali che attraversano la zona

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	67 di 79

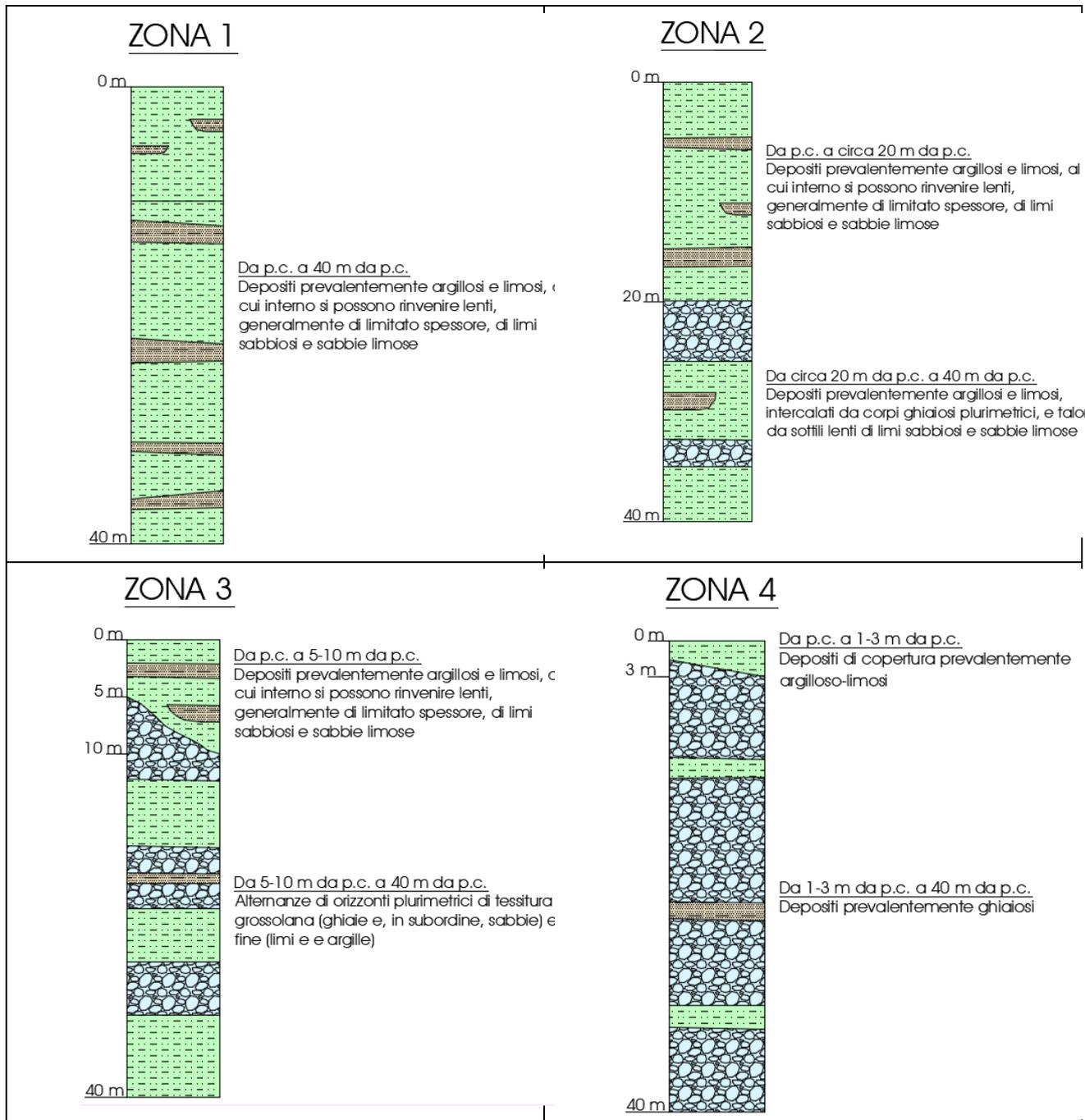


Fig. 55 - Colonne litostratigrafiche sintetiche, rappresentative delle microzone stabili suscettibili di amplificazione locale

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	68 di 79

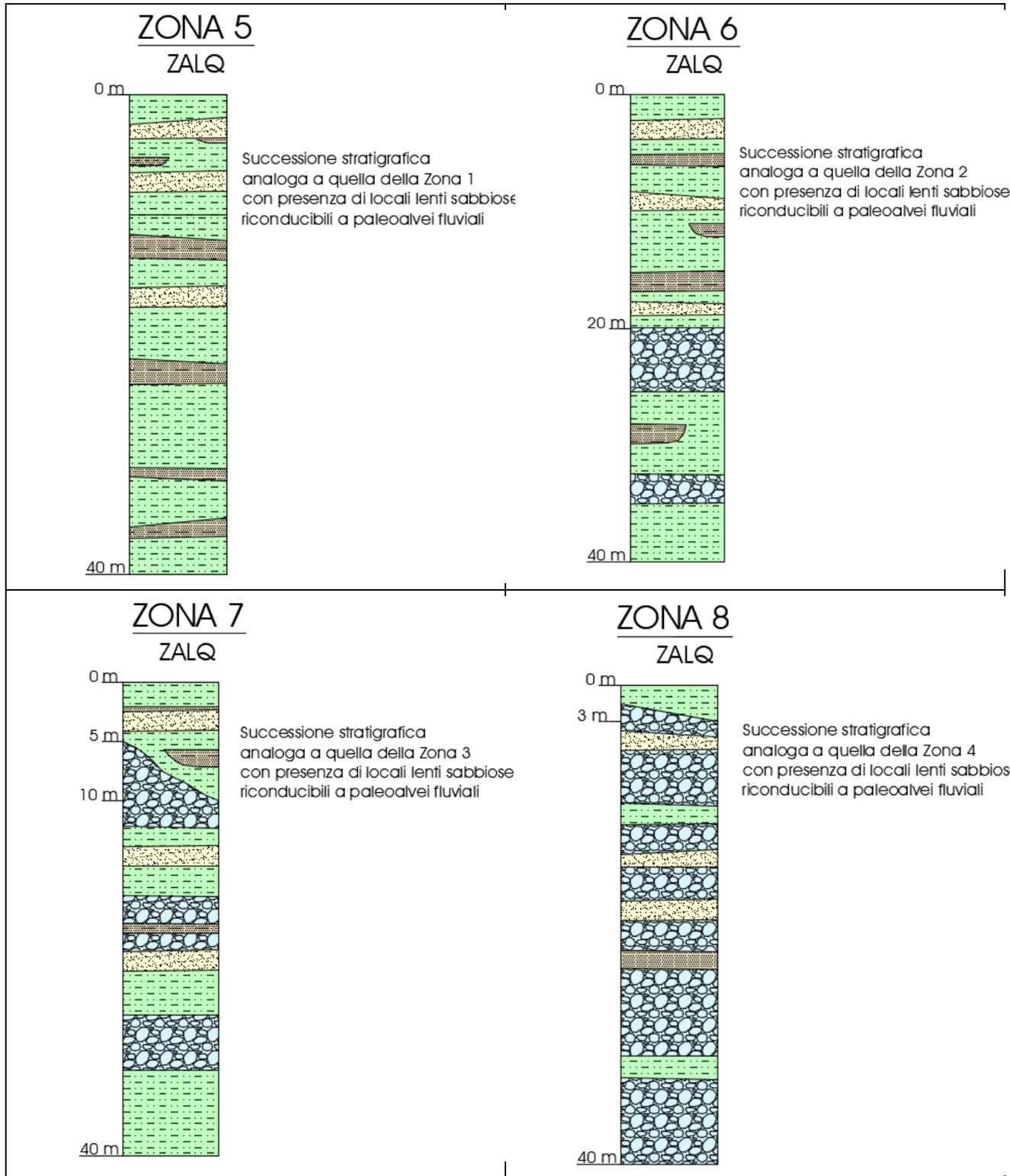


Fig. 56 - Colonne litostratigrafiche sintetiche, rappresentative delle microzone di attenzione per instabilità

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	69 di 79



4.5 Carta della 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 tromografica, Down-Hole, ReMi, profilo sismico a rifrazione, MASW, e prova penetrometrica con cono sismico) e indicando il corrispondente valore di V_{sH} (in m/s), dove:

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

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

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

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

o di $V_{s_{30}}$ (sempre in m/s), dove:

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

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).

In carta si osserva come sia stata utilizzata la $V_{s_{30}}$ alle estremità nord-occidentale e meridionale del territorio comunale, corrispondenti alle Zone 1, 4, 5 e 8 della Carta delle MOPS, mentre si è fatto riferimento alla V_{sH} nel resto del territorio.

4.6 Carte di microzonazione sismica

Le Carte di microzonazione sismica di Livello 3 in scala 1:10.000 rappresentano elaborati grafici conclusivi del presente studio.

Esse sono state realizzate facendo riferimento, dove possibile, alle analisi di risposta sismica locale descritte nel capitolo 3 della presente relazione; mentre, nelle altre zone, con caratteristiche geologico-sismiche differenti, anche se oggetto di verifiche di liquefazione di terzo livello, i fattori di amplificazione sono stati determinati sulla base degli abachi definiti dalla DGR 2193/2015, dunque, con un approfondimento di secondo livello.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	70 di 79



Ovunque, l'amplificazione è stata calcolata sia in termini di rapporto di accelerazione massima orizzontale (PGA/PGA₀), sia di rapporto di Intensità di Housner (SI/SI₀) per prefissati intervalli di periodi.

La cartografia redatta in merito alla Microzonazione sismica di Livello 3 è costituita dai seguenti elaborati:

- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA} (scala 1:10.000);
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{IS 0,1 - 0,5 s} (scala 1:10.000);
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{IS 0,5 - 1,0 s} (scala 1:10.000).
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{IS 0,5 - 1,5 s} (scala 1:10.000).

Nel caso in cui 2 analisi di risposta sismica locale hanno riguardato la medesima zona (cfr. quelle effettuate in corrispondenza di DH1 e di SCPT1) sono stati assunti i valori di amplificazione più cautelativi.

Nelle zone in cui non sono stati effettuati approfondimenti di 3° livello la scelta dell'abaco è stata valutata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo.

In Comune di Castelfranco Emilia, si sono usate le seguenti tabelle, proposte nell'Allegato 2 degli indirizzi regionali,

- Tabella riportata in Tab. 21 rappresentativa di aree di MARGINE di tipo B, ossia, caratterizzate da spessore dei terreni fini sovrastanti gli orizzonti grossolani superiore a 30 m, utilizzate per le MOPS 2001 e 2005, ubicate all'estremità nord-occidentale del territorio comunale.
- Tabelle riportate in Tab. 22 rappresentative di aree di MARGINE di tipo A, ossia, caratterizzate da spessore dei terreni fini sovrastanti gli orizzonti grossolani inferiore a 30 m; utilizzate per le MOPS 2002, 2003, 2006, 2007, che interessano gran parte del territorio oggetto di microzonazione.
- Tabella riportata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, relativa ad un profilo stratigrafico tipo APPENNINO, caso di substrato non rigido, cioè caratterizzato da Vs << 800 m/s, affiorante; utilizzata per le MOPS 2004 e 2008, ubicate nel settore meridionale del territorio comunale e caratterizzate da depositi ghiaiosi sub-affioranti.

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5
F.A. SI1	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6
F.A. SI2	2.9	2.8	2.5	2.3	2.1	2.0
F.A. SI3	3.3	3.1	2.7	2.4	2.2	2.0

Tab. 21 – Tabelle utilizzate per la stima di F.A. per MARGINE di tipo B (da Allegato A2 degli indirizzi regionali)

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	71 di 79



	150	200	250	300	350	400
5	2.3	2.1	1.8	1.5		
10	2.3	2.2	2.0	1.8		
15	2.1	2.1	2.0	1.8		
20	2.1	2.1	2.0	1.9		
25	2.0	2.0	2.0	1.9		
30	1.9	1.9	1.9	1.9		

Fattori di Amplificazione **PGA**. Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $V_{sH}(m/s)$

	150	200	250	300	350	400
5	2.2	1.9	1.7	1.6		
10	2.6	2.4	2.0	1.8		
15	2.6	2.5	2.2	1.9		
20	2.5	2.5	2.3	2.0		
25	2.3	2.3	2.2	2.1		
30	2.1	2.1	2.1	2.0		

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$). Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $V_{sH}(m/s)$

	150	200	250	300	350	400
5	1.8	1.7	1.6	1.6		
10	2.3	2.0	1.8	1.7		
15	3.2	2.6	2.1	2.0		
20	3.5	3.1	2.5	2.1		
25	3.7	3.4	2.8	2.4		
30	3.6	3.5	3.0	2.6		

Fattori di Amplificazione **SI2** ($0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$). Colonna 1 $H(m)$, riga 1 $V_{sH}(m/s)$

Tab. 22 - Tabelle utilizzate per la stima di F.A. per MARGINE di tipo A (da Allegato A2 degli indirizzi regionali)

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
F.A. PGA					1.9	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1
F.A. SI1					1.9	1.7	1.6	1.4	1.3	1.2
F.A. SI2					1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3

Tab. 23 - Tabelle utilizzate per la stima di F.A. per APPENNINO caso di substrato non rigido, cioè caratterizzato da $V_s \ll 800$ m/s, affiorante (da Allegato A2 degli indirizzi regionali)



Tenuto conto di quanto emerso nel corso delle indagini, nell'utilizzo delle tabelle sopraccitate sono stati assunti i seguenti valori:

- per le MOPS 2001 e 2005, $V_{s_{30}}=200$ m/s
- per le MOPS 2002 e 2006, $V_{s_{20}}=200$ m/s
- per le MOPS 2003 e 2007, $V_{s_{10}}=200$ m/s
- per le MOPS 2004 e 2008, $V_{s_{30}}=500$ m/s

In Fig. 57 è riportata la legenda utilizzata per accorpare i parametri di amplificazione per le Carte di microzonazione sismica, così come indicato negli standard di rappresentazione SRAI.

Parametro di amplificazione ²⁹	Simbolo
1.1 - 1.2	
1.3 - 1.4	
1.5 - 1.6	
1.7 - 1.8	
1.9 - 2.0	
2.1 - 2.2	
2.3 - 2.4	
2.5 - 3.0	
3.1 - 3.5	
>3.5	

Fig. 57 - Legenda adottata per l'accorpamento dei fattori di amplificazione nelle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Inoltre, all'interno delle Carte di microzonazione sono stati inseriti i risultati delle prove di verifica alla liquefazione secondo la legenda di Fig. 58, descritte nel paragrafo 3.7 e facenti parte dell'*Elaborato 15*.



Verticale di verifica alla liquefazione con indicato il valore di IL

-  $IL \leq 2$
-  $2 < IL \leq 5$
-  $5 < IL \leq 15$
-  $IL > 15$

Fig. 58 - Legenda adottata per la visualizzazione della verifica alla liquefazione



5. BIBLIOGRAFIA

- Albarelo D., Castellaro S. (2011): TECNICHE SISMICHE PASSIVE: INDAGINI A STAZIONE SINGOLA, Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2 – 2011, Appendice I e II, pp 50-62
- Baldi M., Baldini U., Bevivino R., Castagnetti S., Daminelli R., Gianferrari C., Marcellini A., Martelli L. e Tinto A. (2010): UNIONE TERRE DI CASTELLI: VALIDAZIONE DELLA MICROZONAZIONE SISMICA DI II LIVELLO (2010) - 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale Geofisica della Terra Solida, Prato
- Crespellani T., Facciorusso J., Ghinelli A., Madi ai C., Renzi S., Vannucchi G. (2012): RAPPORTO PRELIMINARE SUI DIFFUSI FENOMENI DI LIQUEFAZIONE VERIFICATISI DURANTE IL TERREMOTO IN PIANURA PADANA EMILIANA DEL MAGGIO 2012. Rapporto 31 maggio 2012. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>
- Ellen M. Rathje; Albert Kottke (2010), "Strata," <https://nees.org/resources/strata>.
- Facciorusso J., Madi ai C., Vannucchi G. (2012): RISPOSTA SISMICA LOCALE E PERICOLOSITÀ DI LIQUEFAZIONE A S. CARLO E MIRABELLO. Rapporto 3 ottobre 2012. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>
- Fioravante V. e Giretti D. (2012): IL CASO DI SANT'AGOSTINO-SAN CARLO. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto>
- Franchi V. e Asti S. (2003): RELAZIONE GEOLOGICA E AMBIENTALE, Piano Strutturale Comunale di Castelfranco Emilia (MO), Quadro Conoscitivo Preliminare – Sistema Naturale ed Ambientale
- Franchi V. (2003): VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE E ATTESTAZIONE DI IDONEITÀ ALL'EDIFICAZIONE Quadro Conoscitivo Preliminare – Sistema Naturale ed Ambientale
- 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
- GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION - SESAME European research project, dicembre 2004
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K, and Yasuda, S, (1978), "A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan", 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, pp. 885-896,
- ISIDe Working Group INGV (2015): Italian Seismological Instrumental and parametric Database. <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	75 di 79



- Kottke, Albert R., and Rathje, Ellen M. (2008) Technical Manual for Strata. PEER Report 2008/10. University of California, Berkeley, California
- Locati M., Camassi, R. e Stucchi M. (a cura di) (2011): BDMI11, LA VERSIONE 2011 DEL DATABASE MICROSISMICO ITALIANO. Milano, Bologna
<http://Emidius.mi.ingv.it/DBMI11>
- Marcellini A., Martelli L, Tenta A., Daminelli R. (2009): L'AMPLIFICAZIONE SISMICA NEGLI "INDIRIZZI PER GLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA IN EMILIA-ROMAGNA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA"
- Martelli L., Ercolessi G., Sani F., Bonini M., Corti G., Santulin M., Tamaro A., Rebez A., Slejko D. (2017): Analisi 3D della pericolosità sismica dell'Appennino Settentrionale – Proposta di nuova zonazione sismogenica e analisi della pericolosità sulla base di un modello 3D delle sorgenti sismiche – Rapporto conclusivo
- 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
- 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
- National Center for Earthquake Engineering Research (1998) - Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.
- Pieri M. e Groppi G. (1981). SUBSURFACE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE PO PLAIN. Pubbl.414, PF Geodinamica. C.N.R. pp. 23
- SONMEZ H. (2003) – Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). Environ. Geology 44(7), pp. 862–871
- RER (2013): MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA DELLE AREE EPICENTRALI DEI TERREMOTI DELLA PIANURA EMILIANA DI MAGGIO-GIUGNO 2012 (ORDINANZA DEL COMMISSARIO DELEGATO – PRESIDENTE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA n. 70/2012). A cura di Luca Martelli e Maria Romani, con contributi di Vincenzo Fioravante, Daniela Giretti, Giovanna Laurenzano, Claudia Madaia, Antonella Manicardi, Marco Mucciarelli, Enrico Priolo e Giovanni Vannucchi
- RER & ENI-Agip (1998): RISERVE IDRICHE SOTTERRANEE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione & Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120
- CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA ED AREE LIMITROFE – Scala 1:250.000 (2017) – Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse –Università degli Studi di Firenze – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	76 di 79



- GUIDELINES FOR DETERMINATING DESIGN BASIS GROUND MOTION STR-102293s-V1-V5 EPRI (1993)
- GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION - SESAME European research project, dicembre 2004
- MICROZONAZIONE SISMICA, UNO STRUMENTO CONSOLIDATO PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna (2012) - Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli
- NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA alla scala 1:50.000 - FOGLI 201-"Modena", 202-"San Giovanni in Persiceto" e 220-"Casalecchio di Reno"

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	77 di 79



6. ALLEGATI

Nel corso dello studio sono stati redatti, oltre alla presente relazione Illustrativa, i seguenti elaborati grafici (tutti alla scala 1:10.000):

- ✓ *Elaborati 1*
 - *Tav. 1.1 - Carta delle indagini - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
 - *Tav. 1.2 - Carta delle indagini - Ambito A_2 Gaggio*
 - *Tav. 1.3 - Carta delle indagini - Ambito A_3 Manzolino*
 - *Tav. 1.4 - Carta delle indagini - Ambito A_4 Rastellino*
 - *Tav. 1.5 - Carta delle indagini - Ambito A_5 Piumazzo*
- ✓ *Elaborati 2*
 - *Tav. 2.1 - Carta geologico tecnica - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
 - *Tav. 2.2 - Carta geologico tecnica - Ambito A_2 Gaggio*
 - *Tav. 2.3 - Carta geologico tecnica - Ambito A_3 Manzolino*
 - *Tav. 2.4 - Carta geologico tecnica - Ambito A_4 Rastellino*
 - *Tav. 2.5 - Carta geologico tecnica - Ambito A_5 Piumazzo*
- ✓ *Elaborati 3*
 - *Tav. 3.1 - Carta delle frequenze naturali dei terreni - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
 - *Tav. 3.2 - Carta delle frequenze naturali dei terreni - Ambito A_2 Gaggio*
 - *Tav. 3.3 - Carta delle frequenze naturali dei terreni - Ambito A_3 Manzolino*
 - *Tav. 3.4 - Carta delle frequenze naturali dei terreni - Ambito A_4 Rastellino*
 - *Tav. 3.5 - Carta delle frequenze naturali dei terreni - Ambito A_5 Piumazzo*
- ✓ *Elaborati 4*
 - *Tav. 4.1 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
 - *Tav. 4.2 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica - Ambito A_2 Gaggio*
 - *Tav. 4.3 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica - Ambito A_3 Manzolino*
 - *Tav. 4.4 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica - Ambito A_4 Rastellino*
 - *Tav. 4.5 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica - Ambito A_5 Piumazzo*
- ✓ *Elaborati 5*
 - *Tav. 5.1 - Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
 - *Tav. 5.2 - Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) - Ambito A_2 Gaggio*
 - *Tav. 5.3 - Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) - Ambito A_3 Manzolino*
 - *Tav. 5.4 - Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) - Ambito A_4 Rastellino*
 - *Tav. 5.5 - Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) - Ambito A_5 Piumazzo*
- ✓ *Elaborati 6*
 - *Tav. 6.1 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA} - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
 - *Tav. 6.2 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA} - Ambito A_2 Gaggio*

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
		MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0



- *Tav. 6.3 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA} - Ambito A_3 Manzolino*
- *Tav. 6.4 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA} - Ambito A_4 Rastellino*
- *Tav. 6.5 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA} - Ambito A_5 Piumazzo*
- ✓ *Elaborati 7*
- *Tav. 7.1 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,1 - 0,5 s}$ - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
- *Tav. 7.2 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,1 - 0,5 s}$ - Ambito A_2 Gaggio*
- *Tav. 7.3 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,1 - 0,5 s}$ - Ambito A_3 Manzolino*
- *Tav. 7.4 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,1 - 0,5 s}$ - Ambito A_4 Rastellino*
- *Tav. 7.5 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,1 - 0,5 s}$ - Ambito A_5 Piumazzo*
- ✓ *Elaborati 8*
- *Tav. 8.1 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,5 - 1,0 s}$ - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
- *Tav. 8.2 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,5 - 1,0 s}$ - Ambito A_2 Gaggio*
- *Tav. 8.3 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,5 - 1,0 s}$ - Ambito A_3 Manzolino*
- *Tav. 8.4 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - - $FA_{IS 0,5 - 1,0 s}$ - Ambito A_4 Rastellino*
- *Tav. 8.5 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - - $FA_{IS 0,5 - 1,0 s}$ - Ambito A_5 Piumazzo*
- ✓ *Elaborati 9*
- *Tav. 9.1 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,5 - 1,5 s}$ - Ambito A_1 Castelfranco Emilia*
- *Tav. 9.2 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,5 - 1,5 s}$ - Ambito A_2 Gaggio*
- *Tav. 9.3 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS 0,5 - 1,5 s}$ - Ambito A_3 Manzolino*
- *Tav. 9.4 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - - $FA_{IS 0,5 - 1,5 s}$ - Ambito A_4 Rastellino*
- *Tav. 9.5 - Carta di microzonazione sismica Livello 3 - - $FA_{IS 0,5 - 1,5 s}$ - Ambito A_5 Piumazzo*

Inoltre, alla relazione sono allegati i report delle indagini eseguite a supporto del presente studio, ovvero:

- ✓ *Elaborato 10 - Prove HVSR*
- ✓ *Elaborato 11 - Stratigrafie sondaggi*
- ✓ *Elaborato 12 - Prove Down-Hole*
- ✓ *Elaborato 13 - Analisi di laboratorio*
- ✓ *Elaborato 14 - Prove penetrometriche*
- ✓ *Elaborato 15 - Verifiche liquefazione*

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Ottobre 2018	0	79 di 79