

AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO – PARMA

Strada Giuseppe Garibaldi 75, I-43121 Parma

(PC-E-809) LAVORI DI RIALZO DELL'ARGINE MAESTRO IN DESTRA DEL FIUME PO NEL II C.I. DI PIACENZA PER L'ADEGUAMENTO DELLA SAGOMA DEFINITIVA PREVISTA DAL PIANO SIMPO NEI COMUNI DI CALENDASCO E ROTTOFRENO (PS45 2001-2002)

**PROGETTO ESECUTIVO
1° lotto funzionale**

R03 – RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

CAPOGRUPPO MANDATARIA
PROGETTAZIONE GENERALE – INGEGNERIA IDRAULICA E STRUTTURALE



DIZETA INGEGNERIA
STUDIO ASSOCIATO
Via Bassini, 19 – 20133 MILANO Tel. 02-70600125
server@dzetaingegneria.it Fax 02-70600014

ING. FULVIO BERNABEI
ING. LAURA GRILLI
ING. GIANLUIGI SEVINI

MANDANTE
GEOLOGIA E GEOTECNICA



EN GEO S.r.l.
ENGINEERING GEOLOGY
www.engeo.it

GEOL. CARLO CALEFFI
GEOL. FRANCESCO CERUTTI

MANDANTE
ASPETTI AMBIENTALI E PAESAGGISTICI

STUDIO PANDAKOVIC

ARCH. ANGELO DAL SASSO

MANDANTE
ARCHEOLOGIA



GIANO S.N.C.

DOTT. DARIA PASINI

MANDANTE
TOPOGRAFIA E PIANO PARTICELLARE ESPROPRI

GEOM. **MARCO SOZZÈ**

PROGETTISTA:
DOTT. ING. **FULVIO BERNABEI**

RUP:
DOTT. ING. **MIRELLA VERGNANI**

DATA **LUGLIO 2019**

COMMESSA N° **2018/005** REDATTO **CANTONI**

CODICE COMMESSA **ESARGINIPIACENZA** CONTROLLATO **CERUTTI**

NOME FILE APPROVATO **CALEFFI**

REV.	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTR.	APPR.

INDICE

1 Introduzione 2

2 Premesse 3

 2.1 Normativa di riferimento 5

 2.2 Parametri di progetto 5

3 Campagna indagini 7

 3.1 Indagini geognostiche 7

 3.2 Indagini sismiche 8

4 Caratteri litostratigrafici 13

 4.1 Terreni costituenti il corpo arginale 13

 4.1.1 Pacchetto stradale 13

 4.1.2 Terreni prevalentemente argilloso-limosi 13

 4.1.3 Terreni prevalentemente limoso-sabbiosi 13

 4.1.4 Terreni prevalentemente sabbiosi 13

 4.2 Depositi di fondazione 13

 4.2.1 Terreni prevalentemente argilloso-limosi 13

 4.2.2 Terreni prevalentemente limoso-sabbiosi 14

 4.2.3 Terreni prevalentemente sabbiosi 14

 4.2.4 Terreni prevalentemente sabbioso-ghiaiosi 14

5 Sismicità 15

 5.1 Storia sismica 15

 5.2 Classificazione sismica del territorio 18

 5.3 Categoria di sottosuolo 19

 5.4 Rischio di liquefazione 21

6 Geotecnica 26

6.1 Analisi di Laboratorio 26

6.2 Elaborazione dei risultati delle indagini in situ 27

 6.2.1 Depositi coesivi 28

 6.2.2 Depositi granulari 29

6.3 Modello Geotecnico 30

 6.3.1 Terreni costituenti il corpo arginale 30

 6.3.2 Depositi di fondazione 32

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	1 di 39

1 INTRODUZIONE

Il presente documento si riferisce al progetto esecutivo del 1° lotto funzionale dei lavori di rialzo dell'argine maestro in destra Fiume Po, all'interno del 2° Comprensorio Idraulico della Provincia di Piacenza, per l'adeguamento della sagoma definitiva, prevista dal Piano Simpo (PS45 2001-2002).

In particolare, il tratto di arginatura oggetto di intervento, dello sviluppo di circa 1.600 m, ricade nei Comuni di Calendasco (PC) e, per una piccola parte, di Rottofreno (PC).

Nelle pagine che seguono viene riportato per esteso lo studio geotecnico e sismico sviluppato a supporto del progetto definitivo per l'intera estensione del rilevato arginale oggetto di intervento, di lunghezza complessiva pari a circa 2.850 metri, che rimane naturalmente valido anche per la tratta interessata dal 1° lotto funzionale.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	2 di 39

2 PREMESSE

La presente relazione descrive lo studio geotecnico e sismico effettuato a supporto della progettazione definitiva dei lavori di rialzo dell'argine maestro in destra Fiume Po, all'interno del 2° Comprensorio Idraulico della Provincia di Piacenza, per l'adeguamento della sagoma definitiva, prevista dal Piano Simpo (PS45 2001-2002).

In particolare, il tratto di arginatura oggetto di interventi, dello sviluppo di circa 2.850 m, ricade nei Comuni di Calendasco (PC) e, per una piccola parte, di Rottofreno (PC).

I lavori di rialzo verranno realizzati con ringrosso della sagoma esistente, parte lato campagna e parte lato golena: laddove possibile, per evitare di rimaneggiare il paramento a fiume dell'argine esistente, considerata anche la sua posizione in frodo al Po, si è privilegiata la soluzione di adeguamento a campagna, prevedendo, viceversa, il ringrosso a fiume nei tratti in cui la presenza di edifici e strade impediva la costruzione di un rilevato di dimensioni adeguate. Va, infatti, considerato che l'impronta arginale è contigua a tre nuclei abitati: Boscone Cusani, Stradone e Soprarivo.

Il tratto in esame è caratterizzato dalla presenza di 7 manufatti chiavicali (Boscone, Riva, Tidoncello di Monte, Gobbi, Galeotto, Torchione e Casati), che consentono il deflusso in Po delle acque di scolo gestite dal Consorzio di Bonifica di Piacenza, evitando contestualmente il rigurgito delle piene nelle campagne circostanti. Il progetto ha, pertanto, dovuto prevedere una serie di interventi di adeguamento di tali opere (chiaviche Boscone, e Casati), la realizzazione di una nuova chiavica, tenuto conto anche dei propositi del Consorzio che ha previsto il riordino del reticolo idrico e la dismissione di 5 di esse (chiaviche Riva, Tidoncello di monte, Galeotto, Gobbi e Torchione).

I lavori oggetto di studio sono da inquadrare all'interno di una lunga serie di interventi di adeguamento, iniziata con i rialzi e ringrossi eseguiti a cura dell'Ufficio del Genio Civile di Piacenza dopo l'evento di piena del maggio 1926 e quello del novembre 1951, e proseguita con gli imbancamenti per ridurre la formazione di fontanazzi, eseguiti sempre a cura dell'Ufficio del Genio Civile di Piacenza (e successivamente dal Magistrato per il Po) nella zona del "Mezzano Vigoleno", in Comune di Calendasco prima degli anni '90.

Più recentemente, l'Ufficio Operativo AIPo di Piacenza ha realizzato lavori di rialzo e ringrosso dell'arginatura maestra in destra del fiume Po, nel 2° comprensorio del circondario idraulico della provincia di Piacenza (PC-E-795), nel territorio del Comune di Rottofreno – Provincia di Piacenza (da autostrada A21 fino a località Barattiera), che hanno determinato la costruzione (zona di rigurgito) di nuovo argine di estesa complessiva di 780 m a monte della località Cantonata e l'adeguamento a quote PAI sino a località Barattiera. Attualmente sono in corso i lavori di rialzo e di ringrosso, progettati dall'Ufficio Operativo AIPo di Piacenza, con intervento (PC-E-796) – "Lavori di rialzo e ringrosso dell'arginatura maestra in destra del fiume Po, nel 2° comprensorio del circondario idraulico della provincia di Piacenza nel territorio dei Comuni di Rottofreno e Calendasco - PC – Provincia di Piacenza (da località Barattiera all'abitato di Boscone Cusani)" che determineranno l'adeguamento alle quote PAI da località Barattiera sino alla rampa dell'abitato di Boscone Cusani, punto di inizio dei lavori oggetto di studio (cfr. Fig. 1).

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	3 di 39



FIG. 1 – PLANIMETRIA CON INDICAZIONE DEI TRATTI DI ARGINATURA OGGETTO DI ADEGUAMENTO

Lo studio è stato effettuato nel rispetto della normativa vigente, richiamata nel successivo paragrafo 2.1, e, in particolare delle “Norme tecniche per le costruzioni”, di cui al Decreto ministeriale 17 gennaio 2018, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 8 del 20 febbraio 2018.

Esso ha comportato lo svolgimento delle seguenti attività:

1. raccolta e analisi critica di tutta la documentazione esistente relativa all'area oggetto d'intervento (carte tematiche, dati stratigrafici, studi geologici precedenti, ecc.);
2. supervisione della campagna geognostica, commissionata da AIPo a Geotecnica Veneta s.r.l. di Martellago (VE), e assistenza alla D.L., dott.ssa Annamaria Belardi;
3. definizione delle caratteristiche litostratimetriche mediante analisi ed elaborazione dei dati provenienti dalla campagna geognostica;
4. correlazione dei dati delle indagini geognostiche con i parametri caratteristici dei terreni ed elaborazione del modello geotecnico relativo all'area d'intervento;
5. microzonazione sismica della porzione di territorio indagata sulla base delle indagini effettuate;

 EN GEO s.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	4 di 39

6. definizione della presenza di caratteri predisponenti alla liquefazione e/o a cedimenti post-sismici con valutazione della possibilità di occorrenza di tale fenomeno;
7. analisi delle problematiche geotecniche e sismiche relative al rilevato arginale oggetto d'intervento;
8. stesura della presente relazione geotecnica e sismica a corredo della quale è stato redatto il seguente modello:
 - All. 3. 1 – Modello geotecnico;

mentre, i risultati delle indagini sismiche in situ sono riportati nel seguente elaborato:

- All. 3. 2 – Indagini sismiche di tipo MASW e SCPTU

2.1 Normativa di riferimento

- Decreto ministeriale 17-01-2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni
- Decreto ministeriale 14-01-2008 – Testo unitario – Norme Tecniche per le Costruzioni Allegati A e B
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n° 36 del 27/07/2007
- Eurocodice 8 (1998) – Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- Eurocodice 7.1 (1997) – Progettazione geotecnica –Parte I: Regole Generali – UNI
- Eurocodice 7.2 (2002) – Progettazione geotecnica –Parte I: Progettazione assistita da prove di laboratorio - UNI
- Eurocodice 7.3 (2002) – Progettazione geotecnica –Parte II: Progettazione assistita da prove in sito - UNI
- O.P.C.M. n° 3274 (2003) - "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"

2.2 Parametri di progetto

Coerentemente con quanto disposto dalle NTC 2018 (Cap. 2.4), in accordo con i progettisti, sono state definiti i seguenti parametri di progetto:

- VITA NOMINALE: “Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica” la cui vita nominale è $V_n \geq 100$ anni (come definito dalla Tab. 2.4.I delle N.T.C. 01/2018);
- CLASSE D’USO: Classe IV: “Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l’ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”, e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica” (come definito dal paragrafo 2.4.2 delle N.T.C. 01/2018);

 EN GEO s.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	5 di 39

<i>PROGETTO</i>	<i>LIVELLO</i>
(PC-E-809) Lavori di rialzo dell'argine maestro in destra Fiume Po nel II° C.I. di Piacenza per l'adeguamento della sagoma definitiva prevista dal Piano Simpo in Comune di Calendasco e Rottofreno (PS45 2001-2002)	<i>Progetto esecutivo 1° lotto funzionale</i>

- PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA: Considerata la classe d'uso IV, il coefficiente d'uso risulta $C_u=2.0$ (cfr. Tab. 2.4.II delle N.T.C. 01/2018), e di conseguenza il periodo di riferimento del rilevato arginale oggetto d'intervento è $V_R=V_N \cdot C_u= 200$ anni.

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	6 di 39

3 CAMPAGNA INDAGINI

Per ricostruire le caratteristiche geotecniche e sismiche (oltre che litostratigrafiche) dei terreni dell'area in esame, su incarico diretto di AIPo, è stata realizzata, da parte di Geotecnica Veneta s.r.l., una specifica campagna d'indagini, la cui ubicazione è raffigurata nell'allegato 2.3 - Planimetria con ubicazione delle indagini dell'elaborato R02 – Relazione geologica.

3.1 Indagini geognostiche

La campagna indagini ha previsto, innanzitutto, la realizzazione di 15 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono, di cui 10 ubicate sulla sommità arginale, tutte spinte fino a 20 m o a rifiuto, 2 ubicate in golena, al piede dell'argine, anch'esse approfondite fino a rifiuto e 3 prove penetrometriche con piezocono sismico, ubicate al piede dell'argine sul lato campagna, per determinare, oltre alle caratteristiche geotecniche dei terreni, la velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio.

Oltre alle prove penetrometriche, sono stati effettuati 2 sondaggi a carotaggio continuo, a partire dalla sommità arginale, denominati S1 ed S2, entrambi spinti alla profondità di 30 m da piano campagna.

Nel corso dell'esecuzione dei sondaggi, sono stati prelevati 4 campioni indisturbati da sottoporre alle seguenti prove di laboratorio:

- Determinazione delle caratteristiche fisiche del campione;
- Analisi granulometrica mediante vagliatura;
- Analisi granulometrica per sedimentazione;
- Determinazione dei limiti di Atterberg;
- Prova di compressibilità edometrica;
- Prova di taglio diretta consolidata drenata;
- Prova triassiale non consolidata non drenata.

Inoltre, nei fori di sondaggio sono state eseguite delle prove *Standard Penetration Test* (S.P.T.) i cui risultati sono riportati nella seguente Tab. 1.

Sondaggio	Campione	Profondità		Numero colpi			NSPT
		da m	a m	N1	N2	N3	
1	1	9	9,45	3	4	5	9
	2	12	12,45	11	11	13	24
2	1	9	9,45	1	2	2	4
	2	18	18,45	13	16	17	33

TAB. 1 – PROVE SPT EFFETTUATE NEL CORSO DEI SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO

Nel corso di queste prove sono stati prelevati anche dei campioni rimaneggiati, poi caratterizzati granulometricamente, mediante vagliatura.

 EN GEO s.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	7 di 39

Per i report delle prove penetrometriche e dei carotaggi, con le descrizioni delle stratigrafie incontrate, si faccia riferimento all'allegato 2.5 dell'elaborato R02 – Relazione geologica, mentre quelli delle indagini di laboratorio, effettuate sui campioni prelevati dai sondaggi sono riportati nell'allegato 2.6 del medesimo elaborato.

La campagna geognostica non si è limitata a indagare l'area oggetto dell'intervento di rialzo arginale, ma ha riguardato anche un'area demaniale, ubicata alcuni chilometri più a valle, al fine di valutare la possibilità di utilizzarla come area di escavazione di pubblico interesse, ove potranno essere prelevati i materiali necessari per l'adeguamento della sagoma del rilevato.

Allo scopo sono stati eseguiti n° 6 pozzetti tutti approfonditi fino a 2,5 m da piano campagna e prelevati dei campioni rimaneggiati, sia relativi ai singoli strati, che rappresentativi dell'intero spessore indagato.

Anche questi campioni sono stati trasferiti in laboratorio per essere sottoposti alle seguenti prove:

- Determinazione delle caratteristiche fisiche del campione;
- Analisi granulometrica mediante vagliatura;
- Analisi granulometrica per sedimentazione;
- Determinazione dei limiti di Atterberg;
- Prova di costipamento AASHTO;
- Analisi chimica per la caratterizzazione ambientale dei terreni di scavo.

In allegato 2.5 dell'elaborato R02 – Relazione geologica, sono riportate le stratigrafie dei 6 pozzetti, mentre in allegato 2.7 del medesimo elaborato, sono riportate le indagini di laboratorio effettuate sui campioni prelevati nella cava di prestito.

3.2 Indagini sismiche

La campagna d'indagini ha previsto anche l'esecuzione di prove volte a caratterizzare il territorio oggetto di studio dal punto di vista sismico.

In particolare sono state previste 2 prospezioni sismiche con il metodo MASW (*multichannel analysis of surface waves*), procedura che si basa sulla determinazione della velocità delle onde di superficie.

Inoltre, come già indicato, nel corso delle prove penetrometriche SCPTU1, SCPTU2 e SCPTU3 sono stati acquisiti oltre ai normali parametri di resistenza alla punta (R_p), attrito laterale (f_s) e pressione neutra (U) anche le velocità delle onde sismiche di taglio (Onde S) generate da una massa battente e registrate grazie alla presenza di un geofono triassiale situato all'interno del piezocono sismico.

La tecnica MASW è una tecnica di prospezione sismica che, attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (*Rayleigh*), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro V_{S30} (velocità media delle onde S nei primi 30 m).

In un mezzo stratificato le onde di superficie (*Rayleigh*) danno vita al fenomeno della dispersione, cioè lunghezze d'onda diverse si propagano con diverse velocità di fase e gruppo: le componenti ad alta frequenza (con piccola lunghezza

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	8 di 39

d'onda) “sentono” solamente gli strati più superficiali del suolo, mentre le componenti a più bassa frequenza “sentono” anche gli strati più profondi consentendo quindi di determinarne le caratteristiche.

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

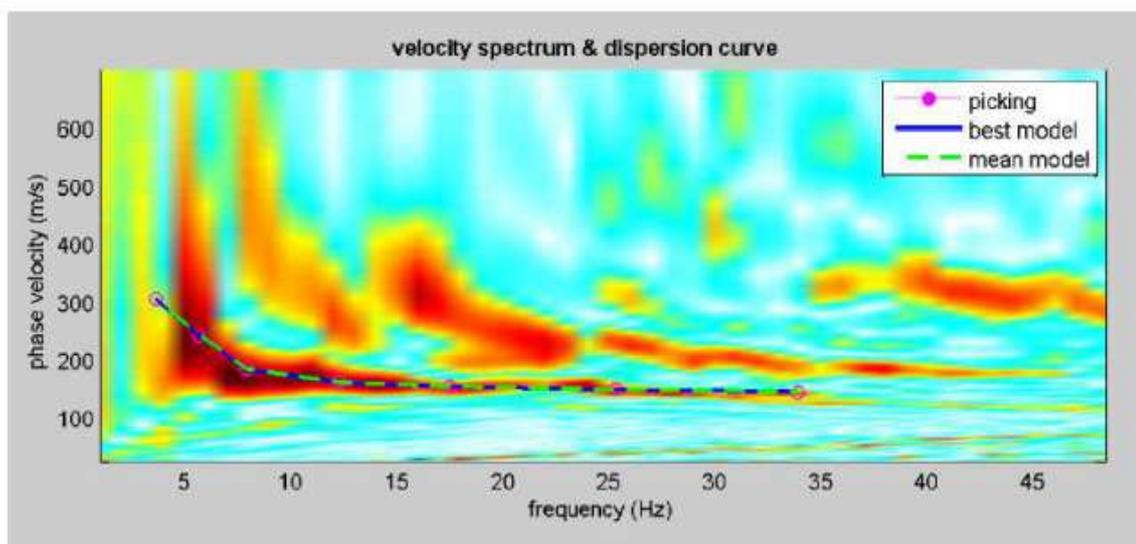
Le misure di campagna sono state eseguite mediante sismografo digitale ECHO 12-24-2002 – AMBROGEO, caratterizzato da 24 canali di acquisizione digitale con dinamica a 16 bit e campionamento del segnale ad intervalli di 130 microsecondi e filtro analogico Low Pass a 50 Hz.

Per lo stendimento sono stati utilizzati 24 geofoni con frequenza propria di 4.5 Hz e distanza geofonica di 1 m, per una lunghezza dei profili di 56 m. Come sorgente si è utilizzata una mazza battente di 10 kg con trigger.

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

- 1) Calcolo dello spettro di velocità;
- 2) Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori;
- 3) *Picking* della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere a un determinato modo;
- 4) Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs.

In Fig. 2 si riporta, a titolo esemplificativo lo spettro di velocità dell'indagine realizzata con sovrapposto il *picking* della curva di dispersione sintetica (linea tratteggiata), corrispondente al miglior modello ottenuto, e i profili di velocità calcolati (con linea tratteggiata rossa quello che presenta miglior *fit* con la curva di dispersione).



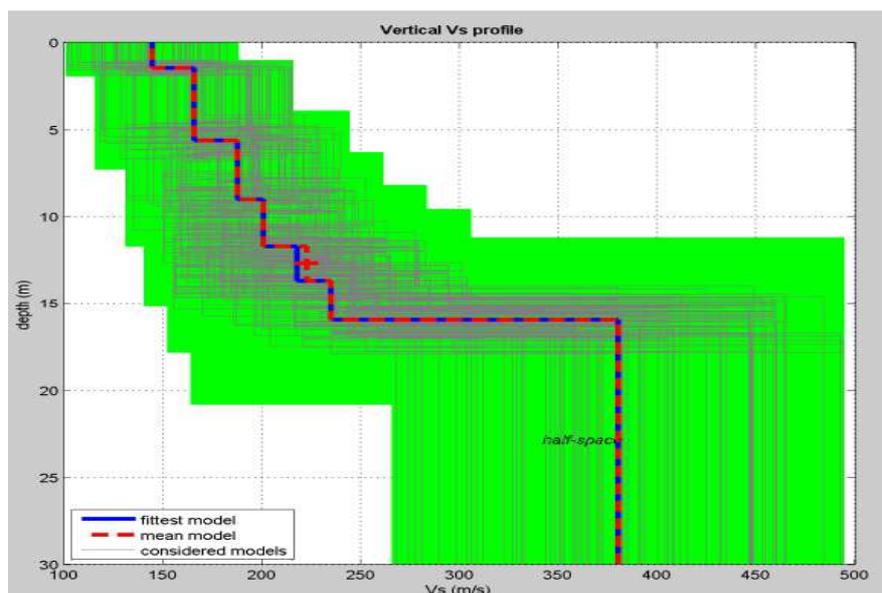


FIG. 2 – MASW1, IMMAGINI RIASSUNTIVE DELL'ELABORAZIONE DELLA PROVA.

Dalle prove MASW ed SCPTU, come anticipato, si possono ottenere i profili della velocità media delle onde di taglio Vs per i diversi sismostrati presenti.

La velocità equivalente delle onde sismiche di taglio, sotto il piano di posa della fondazione e fino al substrato, ($V_{s,eq}$), è definita come:

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

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

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{S30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

In Fig. 3, vengono riportati gli andamenti delle velocità ottenuti dall'elaborazione delle prove effettuate.

 EN GEO s.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	10 di 39

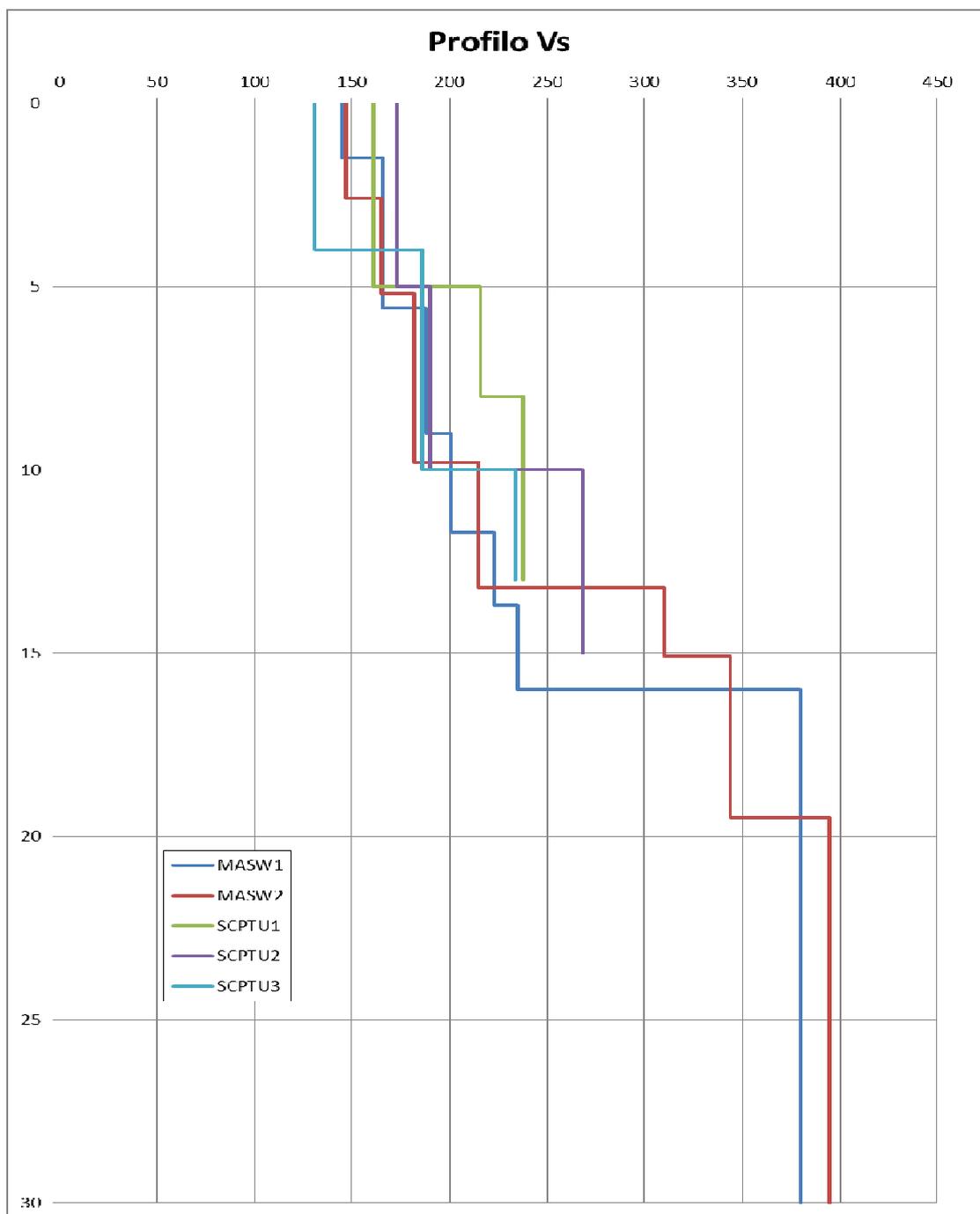


FIG. 3 – ANDAMENTO VELOCITÀ ONDE S DA PROVE MASW E SCPTU

In Fig. 3, vengono riportati gli andamenti delle velocità ottenuti dall'elaborazione delle prove effettuate.

L'interpretazione dei primi 13-15 m delle Vs da prove SCPTU ha lo stesso andamento delle Vs ottenute da prove sismiche di tipo MASW, fattore che permette di utilizzare i valori di V_{S30}

Guardando tale figura, si osserva che, nei primi 13-15 m, le Vs da prove SCPTU hanno andamento simile alle Vs ottenute da prove sismiche di tipo MASW, fatto che rafforza l'utilizzo dei valori ottenuti da quest'ultima tipologia di prove per la determinazione della Vs₃₀.

In Tab. 2 vengono riportati i valori delle Vs₃₀ ottenuti dall'interpretazione delle prove MASW effettuate, valori che classificano i terreni di imposta del tratto di rilevato oggetto di studio in **categoria C**: “*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti*, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”.

Prova	Vs ₃₀ (m/s)
MASW1	246
MASW2	250

Tab. 2 – Valori Vs₃₀ da prove MASW

I dati completi della prova sismica MASW1, della prova MASW2 e dei report delle prove penetrometriche elettriche con cono sismico SCPTU sono riportati in All. 3. 2.

4 CARATTERI LITOSTRATIMETRICI

Le indagini eseguite hanno consentito di ricostruire l'assetto litostratimetrico dell'area in esame.

In particolare, alla luce di quanto emerso nel corso della campagna geognostica, è stato redatto e allegato alla Relazione geologica, l'elaborato grafico 2.4 Sezioni litostratimetriche, in cui sono riportate la sezione longitudinale, sviluppata in asse al rilevato arginale oggetto di rialzo, e due sezioni trasversali, ottenute in corrispondenza delle prove penetrometriche ubicate al piede dell'argine sia sul lato campagna che sul lato a golena.

Guardando le sezioni litostratimetriche si può notare come l'assetto litostratigrafico che caratterizza i depositi di fondazione del rilevato arginale sia molto simile a quello dei depositi presenti al contorno dell'argine.

Le unità litologiche raffigurate nelle sezioni sono le seguenti:

4.1 Terreni costituenti il corpo arginale

4.1.1 Pacchetto stradale

Si tratta dell'unità nella quale sono stati accorpati tutti i livelli del pacchetto che compone la strada sulla sommità dell'argine: sabbia, ghiaia, stabilizzato e asfalto.

4.1.2 Terreni prevalentemente argilloso-limosi

Questa tipologia di terreni è quella dominante all'interno del rilevato arginale, In particolare, del tratto sud-orientale; mentre, verso monte, interessa principalmente i livelli inferiori (mediamente i primi tre metri).

4.1.3 Terreni prevalentemente limoso-sabbiosi

E' la tipologia di terreni che si incontra normalmente subito sotto il pacchetto stradale. Nel settore di monte può avere anche spessore di alcuni metri, mentre, a valle della prova CPTU12, costituisce livelli molto più sottili.

4.1.4 Terreni prevalentemente sabbiosi

Localmente, all'interno dell'arginatura, sono state rilevate lenti di terreni prevalentemente sabbiosi, che, per le loro caratteristiche idrogeologiche, possono rappresentare delle vie di flusso preferenziale e, quindi, degli elementi di vulnerabilità del manufatto. Una prima lente, di alcuni decimetri di spessore, è stata incontrata in corrispondenza della prova CPTU4, tra 3 e 4 m dalla sommità arginale. La prova CPTU5 ha, invece, evidenziato un livello di sabbie di circa 2 m di spessore, a partire da circa 1,5 m di profondità (prendendo sempre come riferimento la sommità arginale).

4.2 Depositi di fondazione

4.2.1 Terreni prevalentemente argilloso-limosi

I terreni prevalentemente argilloso-limosi, dominano nel primo sottosuolo fino a una profondità variabile: massima all'estremità sud-orientale della Sezione litostratimetrica longitudinale, dove si rinvencono fino a quasi 12 m dalla sommità

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
		R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0

dell'argine, e che si riduce nel tratto indagato con le prove CPTU04 e CPTU11, dove questo orizzonte ha uno spessore di $1 \div 2$ m, fino quasi ad azzerarsi in corrispondenza della prova CPTU10.

4.2.2 Terreni prevalentemente limoso-sabbiosi

Questa tipologia di terreni costituisce un livello generalmente interposto tra i terreni prevalentemente limo-argillosi del paragrafo 4.2.1 e quelli sabbioso-ghiaiosi del paragrafo 4.2.4.

Lo spessore massimo, sotto al corpo arginale, di circa 2,5 m, si è osservato in corrispondenza del sondaggio S2; mentre, in alcuni tratti, si assottiglia a pochi decimetri.

Inoltre, si è rilevato che, a margine del rilevato, in golena, in corrispondenza della prova CPTU3, come rappresentato in una delle due sezioni trasversali, questo orizzonte assume una potenza di oltre 5 m.

4.2.3 Terreni prevalentemente sabbiosi

I terreni sabbiosi si rinvennero in 2 lenti, di spessore medio di 1 m: la prima evidenziata dalle prove CPTU1 e CPTU10, al tetto dei terreni prevalentemente limoso-sabbiosi, sopra descritti; la seconda, posta al loro interno, come indicato dalle prove CPTU4 e CPTU11.

4.2.4 Terreni prevalentemente sabbioso-ghiaiosi

Oltre a una profondità compresa tra 9 e 13 m, se si prende come riferimento la sommità arginale, tutte le indagini mostrano la presenza di un potente bancone di depositi prevalentemente sabbioso-ghiaiosi. Il tetto di tale bancone è in generale approfondimento da monte verso valle. Lo spessore è superiore ai 20 m, come testimoniano i sondaggi spinti alle massime profondità indagate.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	14 di 39

5 SISMICITÀ

5.1 Storia sismica

La storia sismica del territorio in esame è stata desunta da "DBMI15, database macrosismico italiano"¹, database realizzato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti che contiene i dati macrosismici provenienti da studi dello stesso GNDT e di altri enti. In particolare, nel presente studio, si è fatto riferimento alla storia sismica di Piacenza, considerata la vasta mole di dati disponibili e la vicinanza con il sito oggetto di studio. Coerentemente a quanto indicato in DBMI15, in Tab. 3 dove sono elencate le osservazioni, aventi la maggiore intensità, disponibili per le località più vicine a Piacenza, indicando per ciascuna di esse, oltre alla stessa intensità al sito (Is), l'anno, la data (comprendente mese, giorno, ora ed, eventualmente, minuto) in cui si è verificato, l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io) e la magnitudo momento (Mw).

(MCS)	Data	Ax	Io	Mw
8	03/01/1117 15 15	Veronese	9	6.52
F	25/12/1222 12 30	Bresciano-Veronese	7-8	5.68
F	29/07/ 1276 18 30	Monferrato	5	4.81
5	23/10/ 1304 00 45	Pianura emiliana		
F	25/01/ 1348	Alpi Giulie	9	6.63
5	11/06/1438 02	Parmense	8	5.56
F	07/05/ 1473 07 45	Milanese	4	3.7
5	26/03/1511 15 30	Friuli-Slovenia	9	6.32
4-5	25/02/1695 05 30	Asolano	10	6.4
F	04/02/ 1732 18 20	Parma	5-6	4.65
7	05/11/ 173800 30	Emilia occidentale	7.5	5.1
5	14/07/1779 19 30	Bolognese		
4	23/11/177918 30	Bolognese	5	4.7
6	07/04/ 178600 15	Pianura lombarda	6-7	5.22
4	12/05/1802 09 30	Valle dell'Oglio	8	5.6
4-5	25/12/1810 00 45	Pianura emiliana	6	5.06
3	09/12/181818 55	Parmense	7	5.24
5	09/10/182802 20	Oltrepò Pavese	8	5.72

¹ Locati M., Camassi R., Rovida A., Ervolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertuliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>

3-4	06/09/182919 30	Cremona	5-6	4.4
F	13/09/1832 03 30	Reggiano	7-8	5.51
4	14/02/1834 13 15	Val di Taro-Lunigiana	9	5.96
3	04/07/1834 00 45	Val di Taro-Lunigiana	6-7	5.08
NF	01/02/1857	Parmense-Reggiano	6-7	5.11
2-3	12/03/1873 20 04	Appennino marchigiano	8	5.85
F	16/05/1873 19 35	Reggiano	6-7	5.01
4	29/06/1873 03 58	Alpago Cansiglio	9-10	6.29
4-5	17/09/1873	Appennino tosco-ligure	6-7	5.26
3	15/05/1882 05	Val Borbera	6	4.77
3	07/03/1883 21 15	Piemonte sud-occidentale	4-5	4.17
NF	12/09/1884 07 23	Pianura lombarda	6	4.7
5	26/02/1885 20 48	Pianura Padana	6	5.01
5-6	23/02/1887 05 21 5	Liguria occidentale	9	6.27
NF	08/03/1889 02 57 0	Bolognese	5	4.53
NF	08/12/1889	Gargano	7	5.47
4	07/06/1891 01 06 1	Valle d'Ilasi	8-9	5.87
NF	01/08/1891 13 32 2	Lugo	4-5	4.36
NF	05/01/1892	Garda occidentale	6-7	4.96
NF	05/03/1892	Valle d'Aosta	7	4.98
3	27/11/ 1894 05 07	Bresciano	6	4.89
NF	18/05/1895 19 55 1	Fiorentino	8	5.5
F	07/08/1895 19 49 3	Appennino tosco-emiliano	5	4.67
NF	09/08/1895 17 38 2	Adriatico centrale	6	5.11
NF	16/01/1898 13 10	Romagna settentrionale	6	4.59
4	04/03/1898 21 05	Parmense	7-8	5.37
6	30/10/1901 14 49 5	Garda occidentale	7-8	5.44
2-3	04/08/1902 22 36 1	Lunigiana	6	4.78
NF	04/12/1902 16 35 0	Lunigiana	5	4.35
3	25/02/1904 18 47 5	Reggiano	6	4.81
2-3	10/06/1904 11 15 2	Frignano	6	4.82
3	25/08/1906 03 11	Parmense	5	4.25
3	25/04/1907 04 52	Veronese	6	4.79
4	13/01/1909 00 45	Emilia Romagna orientale	6-7	5.36
4-5	23/01/1910 01 50	Piacentino	5	4.39
5	01/10/1912 18 10	Piacenza	4	3.7

4	27/03/1913 02 25 4	Val Trebbia	4-5	4.24
4	27/10/1914 09 22	Lucchesia	7	5.63
2	17/05/1916 12 50	Riminese	8	5.82
F	13/01/1918 12	Pianura lombarda	4	4.62
5	07/09/1920 05 55 4	Garfagnana	10	6.53
NF	13/06/1928 08	Carpi	6	4.67
NF	10/04/1929 05 44	Bolognese	6	5.05
3	20/04/1929 01 10	Bolognese	7	5.36
3	11/05/1929 19 23	Bolognese	6-7	5.29
2	26/10/1930 07 31	Modenese	4	4.12
6	15/05/1951 22 54	Lodigiano	6-7	5.17
2	23/03/1960 23 10	Vallese	7	5
NF	03/04/1967 16 36 1	Reggiano	5	4.44
4	15/07/1971 01 33 2	Parmense	8	5.51
4	25/10/ 1972 21 56 1	Appennino settentrionale	5	4.87
3-4	13/11/1975 19 55 1	Appennino piacentino	5-6	4.36
4	09/02/1979 14 44	Bergamasco	6	4.78
NF	23/11/1980 18 34 5	Irpinia-Basilicata	10	6.81
5-6	23/12/1980 12 01 0	Piacentino	6-7	4.57
5	09/11/1983 16 29 5	Parmense	6-7	5.04
NF	06/12/ 1986 17 07 1	Ferrarese	6	4.43
3	31/10/1991 09 31 1	Emilia occidentale	5	4.33
NF	21/08/2000 17 14	Monferrato	6	4.94
4	11/04/2003 09 26 5	Valle Scrivia	6-7	4.81
F	24/11/2004 22 59 3	Garda occidentale	7-8	4.99
2	18/04/2005 10 59 1	Valle del Trebbia	4	3.97
F	23/12/2008 15 24 2	Parmense	6-7	5.36
3	17/07/2011 18 30 2	Pianura lombardo-veneta	5	4.79

TAB. 3 – PRINCIPALI EVENTI SISMICI I CUI EFFETTI SI SONO RISENTITI A PIACENZA

Dalla lettura di Tab. 3 si evidenzia che il massimo evento censito a Piacenza si è verificato il 3 gennaio 1117 con un'intensità del VIII grado della scala MCS.

5.2 Classificazione sismica del territorio

L'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, suddivide il territorio italiano in 4 zone sismiche con diversi livelli di accelerazione sismica di progetto.

La delibera della giunta regionale 23 luglio 2018 n.1164, aggiorna la classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia Romagna, riclassificando il territorio. Secondo tale aggiornamento, come indicato in Fig. 4, i comuni di Calendasco e Rottofreno, all'interno dei cui confini ricade l'area oggetto di studio, sono stati identificati in zona 3 (a sismicità bassa), cui corrispondono valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g), con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, inferiori a $0,15 \cdot g$ (dove g è l'accelerazione di gravità).

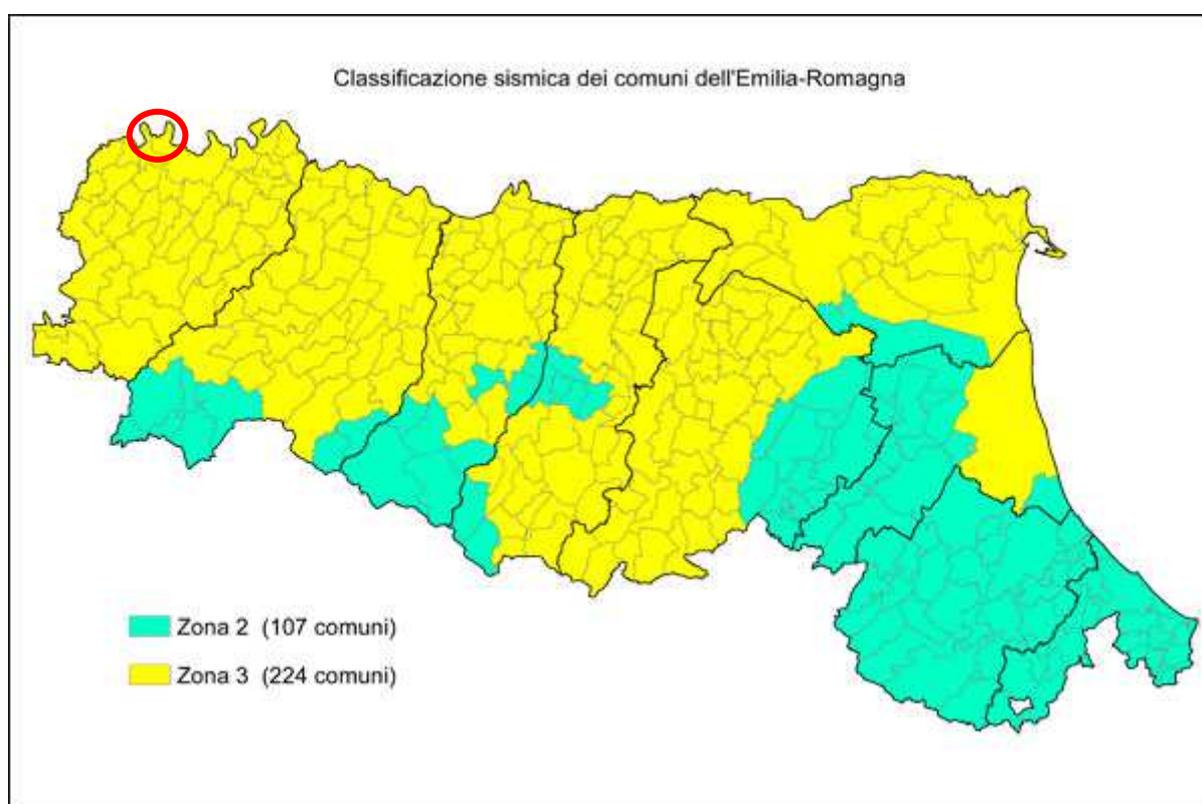


FIG. 4 - CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI COMUNI DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Tale classificazione ha tuttavia valore esclusivamente a fini amministrativi; alle Norme Tecniche per le costruzioni del D.M. 14-01-2008, è infatti allegato un documento sulla pericolosità sismica (Allegato A), nel quale l'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire dalla pericolosità sismica di base, più semplicemente chiamata pericolosità sismica che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

Le azioni di progetto si ricavano, ai sensi delle N.T.C., dalle accelerazioni a_g e dalle relative forme spettrali. Le forme spettrali previste sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima del terreno;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_C^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

 EN GEO s.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	18 di 39

Questi tre parametri sono definiti in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento), i cui nodi non distano fra loro più di 10 km, per diverse probabilità di superamento in 50 anni e per diversi periodi di ritorno (variabili tra 30 e 682 anni).

Per determinare il tempo di ritorno (T_R) si utilizza l'espressione:

$$T_R = \frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

dove V_R è il periodo di riferimento della costruzione, mentre P_{V_R} è la probabilità di superamento nel periodo di riferimento definito, per il rilevato arginale in esame, nel precedente paragrafo 2.2.

Quanto alle probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} , sono stati assunti i valori indicati nelle N.T.C. 01/2008 (vedi Tab. 3.2.I del Paragrafo 3.2.1): in particolare, probabilità pari al 10%, per lo stato limite ultimo di Salvaguardia della Vita (SLV) e pari al 63%, per lo stato limite di esercizio di Danno (SLD).

Dato che il sito in esame (lon. 9.568723, lat. 45.104410) non ricade nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* possono essere ricavati come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

Alla luce di quanto sopradescritto i valori dei tre parametri necessari per la determinazione delle azioni sismiche sono riportati nella seguente

Stato Limite	Tempo di ritorno T_R (anni)	a_g (g)	F_0	T_C^* (s)
SLO	120	0.052	2.533	0.260
SLD	201	0.063	2.534	0.275
SLV	1898	0.147	2.475	0.293
SLC	2475	0.161	2.476	0.293

TAB. 4 – VALORI DEI PARAMETRI A_g , F_0 E T_C^* PER I TEMPI DI RITORNO ASSOCIATI A CIASCUN STATO LIMITE

5.3 Categoria di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, il D.M. 17-01-2018 definisce 7 categorie in cui suddividere i terreni d'imposta in base ai valori di velocità delle onde sismiche trasversali nei primi 30 m sotto il piano di posa della fondazione (V_{S30}), definita come:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,n} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove h_i e V_i sono lo spessore e la velocità delle onde delle strato i -esimo entro i 30 m dal piano di fondazione.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	19 di 39

Come riportato nel paragrafo 3.2, i terreni d'imposta del tratto di rilevato in esame, sono stati attribuiti alla categoria C: "Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s".

Sulla base della categoria di appartenenza del terreno il D.M. 17-01-2018 introduce i coefficienti S_s (coefficiente di amplificazione stratigrafica) e C_c (coefficiente funzione della categoria di sottosuolo) per tener conto dell'amplificazione stratigrafica del valore dell'azione sismica di progetto. Per la categoria C questi due parametri possono essere calcolati attraverso le espressioni riportate in Tab. 5, dove i valori di F_0 e T_c^* sono relativi al sottosuolo di categoria A, g è l'accelerazione di gravità ed il tempo è espresso in secondi.

Categoria	S_s	C_c
A	1.00	1.00
B	$1.00 \leq 1.40 - 0.40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.20$	$1.10 \cdot (T_c^*)^{-0.20}$
C	$1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.50$	$1.05 \cdot (T_c^*)^{-0.33}$
D	$0.90 \leq 2.40 - 1.50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.80$	$1.25 \cdot (T_c^*)^{-0.50}$
E	$1.00 \leq 2.00 - 1.10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.60$	$1.15 \cdot (T_c^*)^{-0.40}$

TAB. 5 - VALORI DEI PARAMETRI S_s E C_c

Con i valori dei parametri a_g , F_0 , T_c^* riportati in Tab. 4 per lo stato limite ultimo di Salvaguardia della Vita (SLV), si ottengono i seguenti valori dei due parametri di amplificazione stratigrafica $S_s=1.48$ e $C_c=1.58$, mentre per lo stato limite di esercizio di Danno (SLD), si ottengono i seguenti valori $S_s=1.50$ e $C_c=1.61$.

L'analisi della superficie topografica ha, invece, consentito di escludere la presenza di effetti locali legati ad elementi morfologici.

5.4 Rischio di liquefazione

Vista la presenza di livelli sabbiosi sotto falda nel primo sottosuolo, si è ritenuto necessario valutarne il rischio di liquefazione, prendendo in considerazione tutte le 15 verticali indagate con le prove penetrometriche.

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 CPT e CPTU (SCPTU) 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 LPI² 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 nella seguente Tab. 6.

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

TAB. 6 – 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. 7:

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. 7 – VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE SECONDO SONMEZ

² LPI = Liquefaction Potential Index è tradotto con IL = Indice di Liquefazione nella cartografia di MS

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 = rapporto di tensione ciclica (*Cyclic Stress Ratio*)

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. 5 viene presentata, in forma di *flow-chart*, la procedura di calcolo di CRR utilizzata dal programma per la verifica con il metodo NCEER.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	22 di 39

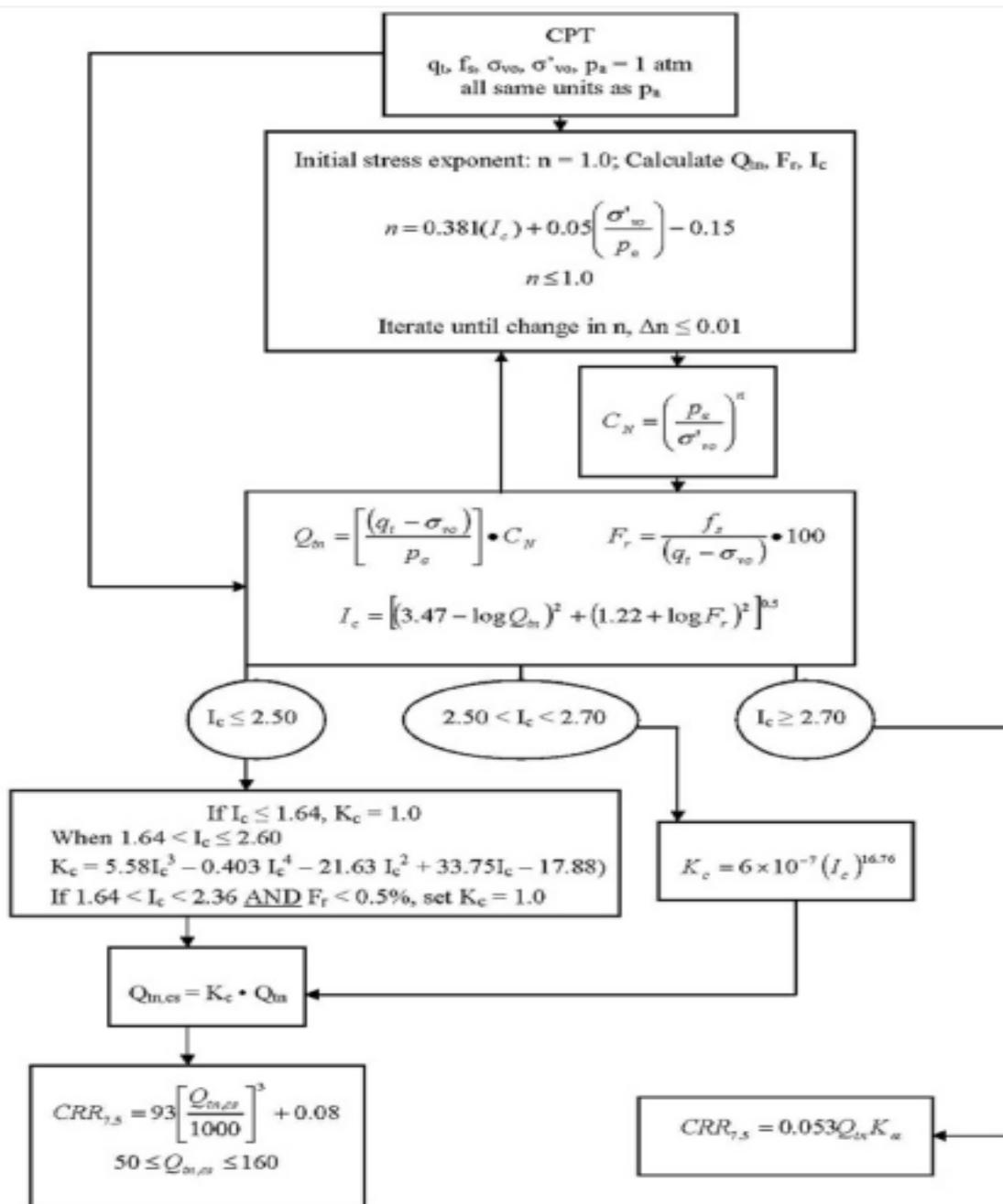


FIG. 5 - FLOW CHART DELLA PROCEDURA DI VERIFICA NCEER MODIFICATA DA ROBERTSON (2009)

In tali verifiche, come valori di CSR, sono stati utilizzati quelli calcolati dal programma CLIQ.

Inoltre, per la verifica, oltre ai dati delle prove CPTU ed SCPTU, è necessario fornire al programma la magnitudo attesa al sito che, nel caso in esame, è stata assunta pari a 6,14, massimo valore definito dalla zonazione sismogenetica ZS9 per la zona 911, cui appartiene il territorio oggetto di studio.

Le verifiche effettuate hanno consentito di calcolare, mediante il metodo di Robertson (2009), per ciascuna verticale indagata, i valori di LPI e dei cedimenti verticali, come sinteticamente riportato in Fig. 6 e in Fig. 7

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	23 di 39

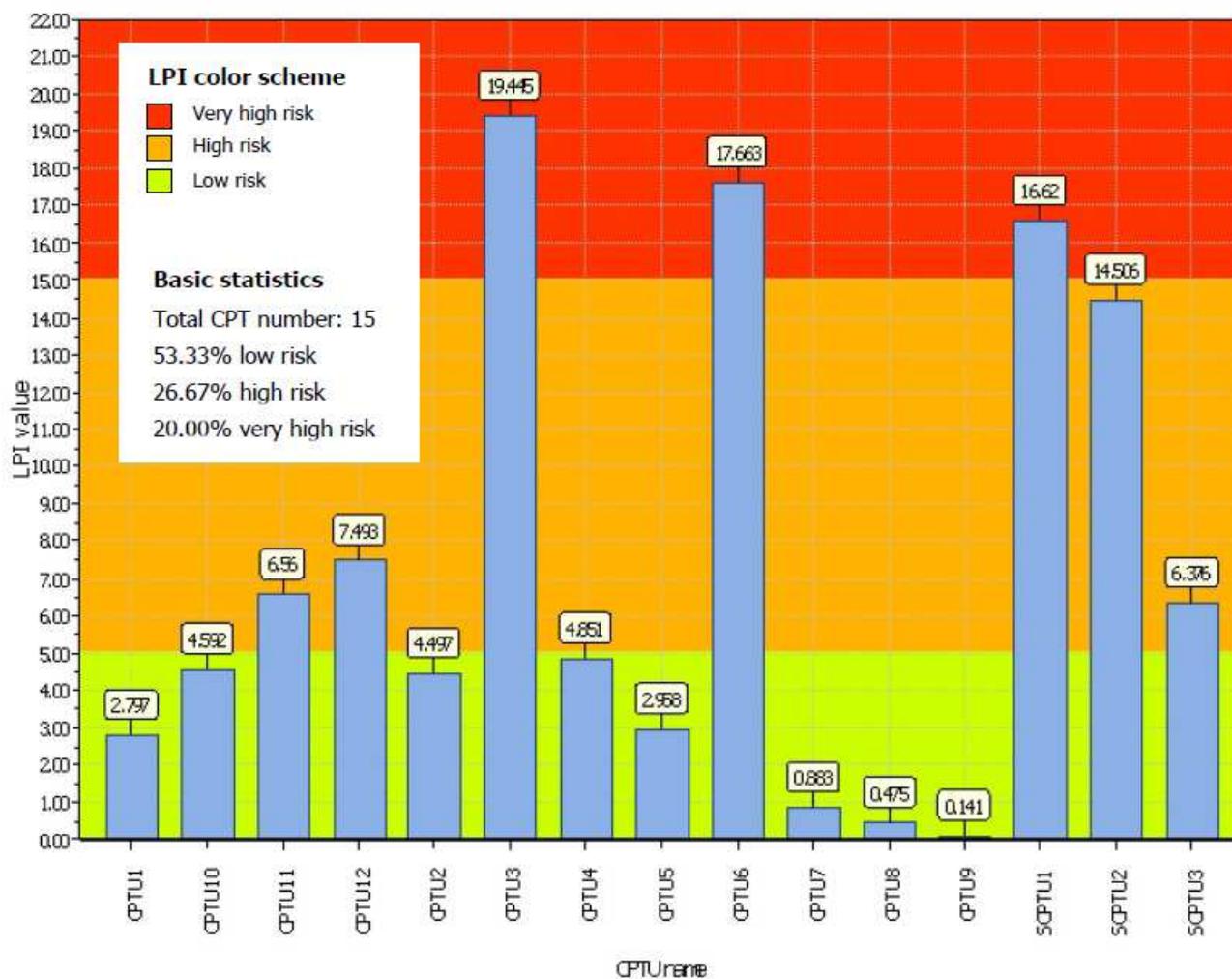


FIG. 6 – GRAFICO RIEPILOGATIVO DEI VALORI DI LPI CALCOLATI

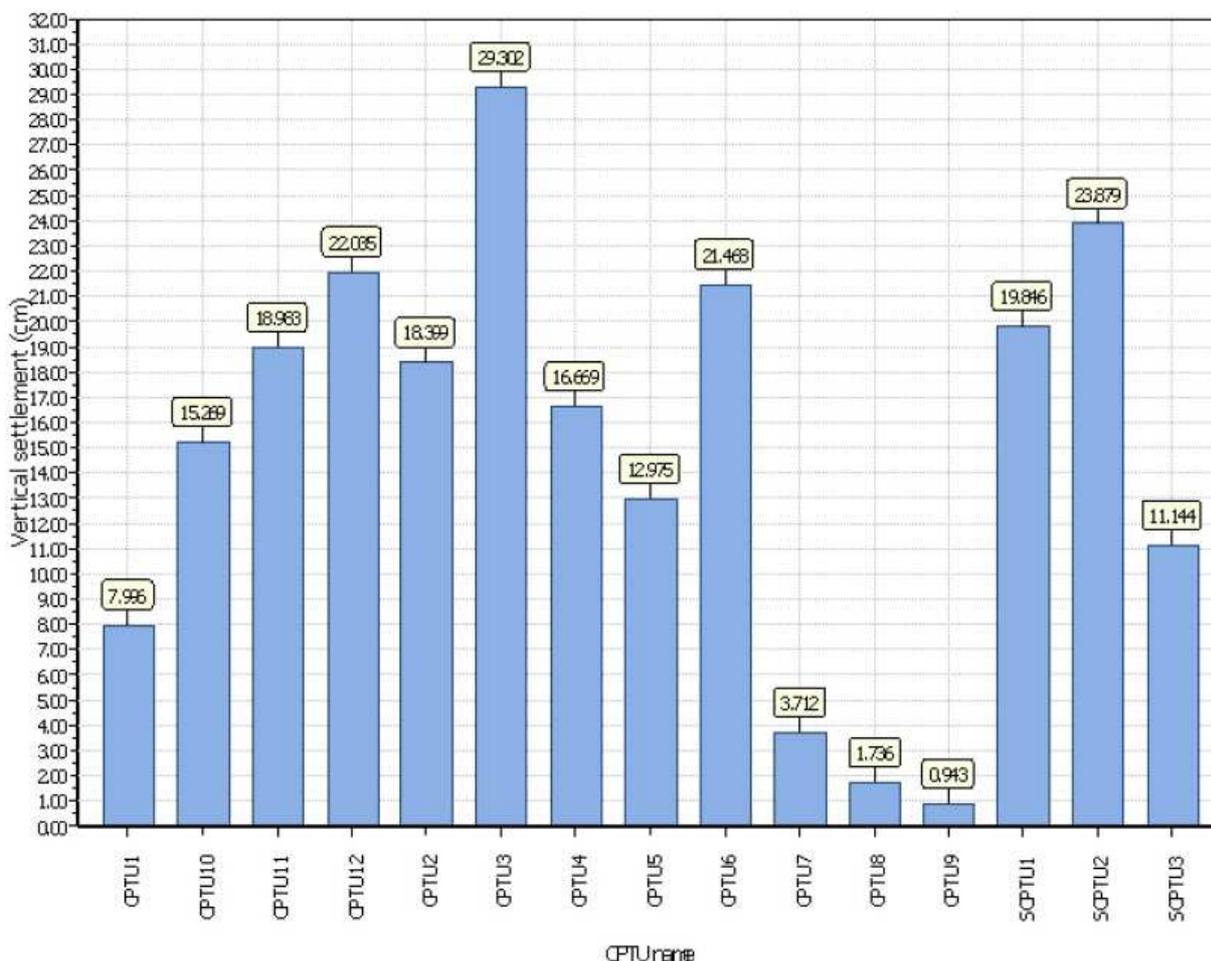


FIG. 7 – GRAFICO RIEPILOGATIVO DEI CEDIMENTI ATTESI

Tali figure evidenziano che ben 7 verticali su 15 evidenziano che il rischio di liquefazione si presenta alto o molto alto, con cedimenti attesi, in vari casi, nell'ordine dei 20÷30 cm.

Questa criticità è da collegare all'elevata accelerazione attesa nel sito d'indagine, funzione dei parametri di progetto definiti nel paragrafo 2.2.

In ogni caso, si concorda con i progettisti nell'affermare che non è il caso di prevedere un incremento della quota di ritenuta del rilevato arginale in progetto, tale da far fronte ai cedimenti attesi in caso di sisma, considerato che, anche in questa situazione estrema, il franco minimo rispetto alle quote di piena rimarrebbe comunque maggiore di 75 cm. Si ritiene infatti che, da un punto di vista "costi-benefici", sia più opportuno attendere l'eventuale accadimento sismico, che procedere ad una preventiva maggiorazione dell'opera.

6 GEOTECNICA

6.1 ANALISI DI LABORATORIO

Come anticipato precedentemente (cfr. paragrafo 3.1), nel corso dei sondaggi S1 e S2, sono stati prelevati campioni sia rimaneggiati che di tipo indisturbato che sono stati sottoposti ad analisi di laboratorio.

I risultati di tali analisi sono riportati in allegato 2.6 dell'elaborato R02 – Relazione geologica e più sinteticamente nelle seguenti tabelle:

- in Tab. 8 i risultati delle prove di classificazione e di quelle per la determinazione dei pesi di volume
- in Tab. 9 i risultati delle prove per la determinazione dei contenuti d'acqua e delle analisi granulometriche.
- in Tab. 10 i risultati delle prove triassiali e di taglio diretto

Sondaggio	Campione	Prof. (m)	Descrizione	Classificazione terre				Peso di volume	
				LL	LP	IP	CNR-UNI 10006	γ_{nat}	γ_{sec}
				%	%	%		(kN/m ³)	(kN/m ³)
S1	C1	3.00-3.40	Sabbia fine con limo nocciola					17.93	27.57
S1	C2	6.00-6.50	Limo con argilla debolmente sabbioso	55	29	26	A7-6	19.27	27.15
S1	CA	9.00-9.45	Limo con sabbia fine argilloso						
S1	CB	12.00-12.45	Sabbia medio-grossa debolmente limosa						
S2	C1	3.00-3.50	Limo con argilla sabbiosa	38	21	17	A6	18.66	26.16
S2	C2	6.60-7.00	Limo con argilla	45	23	22	A7-6	19.68	26.54
S2	CA	9.00-9.45	Limo con argilla debolmente sabbioso						
S2	CB	18.00-18.45	Ghiaia con sabbia debolmente limosa						

TAB. 8 – RISULTATI DELLE PROVE DI CLASSIFICAZIONE E DI QUELLE PER LA DETERMINAZIONE DEI PESI DI VOLUME

Sondaggio	Campione	Prof. (m)	Umidità	Analisi granulometrica
-----------	----------	-----------	---------	------------------------

			W	Ciottoli	Ghiate	Sabbie	Limo	Argilla
			%	%	%	%	%	%
S1	C1	3.00-3.40	19.0	0.0	2.0	55.0	39.0	4.0
S1	C2	6.00-6.50	29.6	0.0	0.0	6.0	64.0	30.0
S1	CA	9.00-9.45		0.0	0.0	26.0	62.0	12.0
S1	CB	12.00-12.45		0.0	2.0	88.0	10.0	
S2	C1	3.00-3.50	32.9	0.0	0.0	14.0	57.0	29.0
S2	C2	6.60-7.00	23.6	0.0	2.0	5.0	54.0	39.0
S2	CA	9.00-9.45		0.0	2.0	6.0	62.0	30.0
S2	CB	18.00-18.45		0.0	63.0	33.0	4.0	

TAB. 9 – RISULTATI DELLE PROVE PER LA DETERMINAZIONE DEI CONTENUTI D'ACQUA E DELLE ANALISI GRANULOMETRICHE

Sondaggio	Campione	Prof. (m)	Prova triassiale UU	Prove di taglio		Prova edometrica	
			Cu (KPa)	ϕ' (°)	c' (KPa)	Cc	Cv (m ² /s)
S1	C1	3.00-3.40		33.0	2.0		
S1	C2	6.00-6.50	41.50	26.2	20.0	0.281	2.42E-07 1.76E-07
S1	CA	9.00-9.45					
S1	CB	12.00-12.45					
S2	C1	3.00-3.50	49.96	25.0	26.0	0.287	4.05E-07 1.89E-07
S2	C2	6.60-7.00	114.29	27.0	30.0	0.214	6.38E-07 1.12E-07
S2	CA	9.00-9.45					
S2	CB	18.00-18.45					

TAB. 10 – RISULTATI DELLE PROVE TRIASSIALI, DI TAGLIO DIRETTO ED EDOMETRICHE

6.2 ELABORAZIONE DEI RISULTATI DELLE INDAGINI IN SITU

La indagini effettuate, descritte nel capitolo 4, oltre a consentire di determinare la successione litostratimetrica dei terreni costituenti il corpo arginale e di fondazione, come riportato nell'elaborato R02 – Relazione geologica, hanno inoltre permesso l'elaborazione dei parametri geotecnici.

A riguardo si sono utilizzati principalmente i dati delle prove CPTU (e SCPTU), tarate, per quanto possibile, con i risultati delle analisi di laboratorio trattate nel paragrafo precedente (cfr. paragrafo 6.1).

Di seguito vengono descritte le correlazioni semi-empiriche utilizzate, che gli scriventi hanno individuato come più affidabili nel contesto geologico in esame.

 EN GEO s.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	27 di 39

6.2.1 Depositi coesivi

6.2.1.1 Coesione in condizioni non drenate

La resistenza al taglio non drenata (c_u) è stata determinata dall'interpretazione delle prove penetrometriche statiche CPTU mediante la seguente equazione (*Baligh e Campanella, 1975*):

$$c_u = \frac{q_c}{N_k}$$

Assumendo, normalmente, $N_k=18$, valore comunemente accettato in bibliografia per terreni simili, ad eccezione che per l'orizzonte costituito da terreni prevalentemente argilloso-limosi del corpo arginale (cfr. paragrafo 4.1.2), per i quali è stato utilizzato un N_k pari a 25.25, al fine di ottenere una buona correlazione con i valori di c_u ottenuti dalle analisi di laboratorio effettuate sui campioni indisturbati prelevati dai sondaggi a carotaggio continuo.

6.2.1.2 Coesione in condizioni drenate

La resistenza al taglio in condizioni drenate, o coesione efficace c' , è stata determinata facendo riferimento a quanto proposto da *Cherubini (2000)*, (*Reliability evaluation of shallow foundation bearing capacity on c' , ϕ' soils, Canadian Geotechnical Journal, 37, 264–269*), applicando la correlazione più cautelativa:

$$c' = -0.1793 \cdot \phi' + 15.21$$

6.2.1.3 Angolo di resistenza al taglio

L'angolo di resistenza al taglio (ϕ') è stato stimato in base alla correlazione di *De Mello (1971)* mediante la formula proposta da *Shioi e Fukuni (1982)*:

$$\Phi' = \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} + 15$$

dove il valore di N_{SPT} viene ricavato utilizzando la correlazione di *Robertson (1983)* che lo mette in relazione alla resistenza alla punta (R_p) del penetrometro statico:

$$N_{SPT} = \frac{R_p}{4.5}$$

6.2.1.4 Modulo edometrico

In accordo alla correlazione di *Mitchell e Gardner (1975)* il modulo edometrico, partendo dai valori di resistenza alla punta R_p , si ottiene utilizzando la seguente espressione:

$$E_{ed} = \alpha R_p$$

dove i valori di α sono riportati nella Tab. 11 (w_n = umidità naturale espressa in percentuale).

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	28 di 39

Argille di bassa plasticità (CL)	Rp<0.7 (MPa)	3<α<8
	0,7<Rp<2 (MPa)	2<α<5
	Rp>2 (MPa)	1<α<2,5
Limi di bassa plasticità (ML)	Rp<2 (MPa)	1<α<3
	Rp>2 (MPa)	3<α<6
Limi e argille di alta plasticità (MH, CH)	Rp<2 (MPa)	2<α<6
Limi organici (OL)	Rp<1,2 (MPa)	2<α<8
Torba e argilla organica (Pt, OH)	50<wn<100	1,5<α<4
	100<wn<200	1<α<1,5
	wn>200	0,4<α<1

TAB. 11 – CORRELAZIONE DI MITCHELL E GARDNER (1975)

6.2.2 Depositi granulari

6.2.2.1 Angolo di resistenza al taglio

Anche per i depositi granulari l'angolo di resistenza al taglio (φ') è stato stimato in base alla correlazione di De Mello (1971) mediante la formule proposta da Shioi e Fukuni in Japanese Railway (1982):

$$\Phi' = 27 + 0.3 * N_{SPT}$$

dove il valore di N_{spt} viene ricavato utilizzando la correlazione di Robertson (1983) che lo mette in relazione alla resistenza alla punta (Rp) del penetrometro statico:

$$N_{SPT} = \frac{Rp}{4.5}$$

6.2.2.2 Modulo elastico

Il valore del modulo elastico E è stato ricavato mediante la relazione di Robertson:

$$E_s = \alpha_E \times (q_t - s_{v0})$$

$$\alpha_E = 0.015 \times \left[10^{(0.55 \times I_c + 1.6 \Phi)} \right]$$

dove:

q_t = resistenza alla punta penetrometrica

S_{v0} = pressione litostatica efficace

I_c = indice di comportamento del terreno

6.3 MODELLO GEOTECNICO

L'individuazione del modello geotecnico del corpo arginale e dei terreni di fondazione, rappresentato graficamente nell'All. 3. 1 – Modello geotecnico, è basato sull'interpretazione della stratigrafia dei terreni effettuata mediante la ricostruzione delle sezioni litostratimetriche allegate all'elaborato R02.

Le diverse unità litologiche sono state correlate alle caratteristiche geotecniche dei terreni determinate con i metodi descritti nel paragrafo 6.2, considerando le sole prove eseguite sulla sommità arginale, ma avendo verificato che quelle ubicate al piede dell'argine, sia lato campagna che a golena, presentano resistenze penetrometriche molto simili.

Nel modello geotecnico i parametri relativi a ciascun orizzonte, sono espressi sia indicandone dei *range* rappresentativi (valori di mediana \pm deviazione standard) sia i valori caratteristici (da utilizzare per valutazioni semiprobabilistiche, in ottemperanza alle N.T.C. 2018).

In particolare, il valore caratteristico della coesione non drenata, della coesione efficace e dei parametri di deformabilità, è stato valutato come il valore corrispondente al 5° percentile della distribuzione della media, utilizzando una distribuzione log-normale.

Per l'angolo di attrito interno il valore caratteristico è sempre riferito al 5° percentile della distribuzione del campione, utilizzando però una distribuzione gaussiana (normale).

La modellazione geotecnica effettuata nel presente studio ha previsto la distinzione dei seguenti orizzonti:

6.3.1 Terreni costituenti il corpo arginale

6.3.1.1 Materiale di riporto di tipo A = Terreni prevalentemente argilloso-limosi

- Comportamento: coesivo
- Parametri geotecnici:
 - peso specifico $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$
 - coesione non drenata:
 - valore caratteristico $Cu_k = 51.02 \text{ kPa}$
 - range rappresentativo $Cu_m = 48.32 \pm 19.75 \text{ kPa}$
 - coesione efficace:
 - valore caratteristico $c'_k = 11.36 \text{ kPa}$
 - range rappresentativo $c'_m = 11.37 \pm 0.22 \text{ kPa}$
 - angolo d'attrito:
 - valore caratteristico $\varphi'_k = 21.6^\circ$
 - range rappresentativo $\varphi'_m = 21.5^\circ \pm 1.32^\circ$
 - modulo edometrico:
 - valore caratteristico: $Eed_k = 4.39 \text{ MPa}$

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
		R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0

range rappresentativo: $E_{ed,m} = 4.27 \pm 1.17$ MPa

Va, inoltre, segnalato che questi terreni, dal punto di vista geotecnico, risultano simili a quelli che saranno utilizzati per il rialzo e ringrosso dell'arginatura. Infatti, le prove proctor e di classificazione eseguite sui campioni di terreni prelevati dall'area d'escavazione per pubblica utilità (cfr. paragrafo 3.1), mostrano che, una volta compattati, questi avranno un indice di consistenza sempre maggiore di 1,5, cui può essere associata una resistenza alla compressione semplice almeno pari a 100 kPa. Motivo per cui i parametri sopraindicati sono stati attribuiti anche a tali materiali.

6.3.1.2 Materiale di riporto di tipo B: terreni prevalentemente limoso-sabbiosi

- Comportamento: coesivo
- Parametri geotecnici:
 - peso specifico $\gamma = 19$ kN/m³
 - coesione non drenata:
 - valore caratteristico $C_{u,k} = 87.67$ kPa
 - range rappresentativo $C_{u,m} = 87.50 \pm 26.96$ kPa
 - coesione efficace:
 - valore caratteristico $c'_k = 11.21$ kPa
 - range rappresentativo $c'_m = 11.21 \pm 0.23$ kPa
 - angolo d'attrito:
 - valore caratteristico $\varphi'_k = 23.8^\circ$
 - range rappresentativo $\varphi'_m = 23.6^\circ \pm 1.81^\circ$
 - modulo edometrico:
 - valore caratteristico: $E_{ed,k} = 5.45$ MPa
 - range rappresentativo: $E_{ed,m} = 5.36 \pm 1.41$ MPa

6.3.1.3 Materiale di riporto di tipo C: terreni prevalentemente sabbiosi

- Comportamento: granulare
- Parametri geotecnici:
 - peso specifico $\gamma = 20.00$ kN/m³
 - angolo d'attrito:
 - valore caratteristico $\varphi'_k = 30.0^\circ$
 - range rappresentativo $\varphi'_m = 30.1^\circ \pm 1.25^\circ$
 - modulo elastico:
 - valore caratteristico: $E_k = 42.39$ MPa

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	31 di 39

range rappresentativo: $E_m = 40.54 \pm 12.54$ MPa

6.3.1.4 Materiale di riporto di tipo D: pacchetto stradale

- Parametri geotecnici non significativi (nelle verifiche vanno accorpati agli orizzonti adiacenti)

6.3.2 Depositi di fondazione

6.3.2.1 Orizzonte 1 = depositi prevalentemente argilloso-limosi

- Comportamento: coesivo
- Parametri geotecnici:
 - peso specifico $\gamma = 18.5$ kN/m³
 - coesione non drenata:
valore caratteristico $C_{u_k} = 70.54$ kPa
range rappresentativo $C_{u_m} = 73.89 \pm 18.37$ kPa
 - coesione efficace:
valore caratteristico $c'_k = 11.35$ kPa
range rappresentativo $c'_m = 11.32 \pm 0.15$ kPa
 - angolo d'attrito:
valore caratteristico $\varphi'_k = 21.8^\circ$
range rappresentativo $\varphi'_m = 21.8^\circ \pm 0.93^\circ$
 - modulo edometrico:
valore caratteristico: $E_{ed_k} = 4.44$ MPa
range rappresentativo: $E_{ed_m} = 4.66 \pm 1.00$ MPa

L'orizzonte 1 al suo interno presenta 2 lenti, denominate lente 1A e lente 1B.

Lente 1A: depositi prevalentemente sabbiosi

- Comportamento: granulare
- Parametri geotecnici:
 - peso specifico $\gamma = 20.0$ kN/m³
 - angolo d'attrito:
valore caratteristico $\varphi'_k = 31.0^\circ$
range rappresentativo $\varphi'_m = 31.4^\circ \pm 1.28^\circ$
 - modulo elastico:
valore caratteristico: $E_k = 49.21$ MPa
range rappresentativo: $E_m = 51.54 \pm 6.35$ MPa

 EN GEO s.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	32 di 39

Lente 1B: depositi prevalentemente limoso-sabbiosi

- Comportamento: coesivo
- Parametri geotecnici:
 - peso specifico $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
 - coesione non drenata:
 - valore caratteristico $C_{u_k} = 76.78 \text{ kPa}$
 - range rappresentativo $C_{u_m} = 86.11 \pm 21.86 \text{ kPa}$
 - coesione efficace:
 - valore caratteristico $c'_k = 11.19 \text{ kPa}$
 - range rappresentativo $c'_m = 11.23 \pm 0.17 \text{ kPa}$
 - angolo d'attrito:
 - valore caratteristico $\varphi'_k = 24.7^\circ$
 - range rappresentativo $\varphi'_m = 24.9^\circ \pm 2.19^\circ$
 - modulo edometrico:
 - valore caratteristico: $E_{ed_k} = 4.71 \text{ MPa}$
 - range rappresentativo: $E_{ed_m} = 5.18 \pm 1.23 \text{ MPa}$

6.3.2.2 *Orizzonte 2 = depositi prevalentemente limoso-sabbiosi*

- Comportamento: coesivo
- Parametri geotecnici:
 - peso specifico $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
 - coesione non drenata:
 - valore caratteristico $C_{u_k} = 88.66 \text{ kPa}$
 - range rappresentativo $C_{u_m} = 89.44 \pm 26.74 \text{ kPa}$
 - coesione efficace:
 - valore caratteristico $c'_k = 11.18 \text{ kPa}$
 - range rappresentativo $c'_m = 11.20 \pm 0.20 \text{ kPa}$
 - angolo d'attrito:
 - valore caratteristico $\varphi'_k = 25.9^\circ$
 - range rappresentativo $\varphi'_m = 25.8^\circ \pm 3.15^\circ$
 - modulo edometrico:
 - valore caratteristico: $E_{ed_k} = 4.44 \text{ MPa}$

 EN GEO s.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	33 di 39

- range rappresentativo: $E_{ed,m} = 4.66 \pm 1.00$ MPa

6.3.2.3 Orizzonte 3 = depositi prevalentemente sabbioso-ghiaiosi

- Comportamento: granulare
- Parametri geotecnici:
 - peso specifico $\gamma = 20.5$ kN/m³
 - angolo d'attrito:
 - valore caratteristico $\varphi'_k = 36.0^\circ$
 - valore medio $\varphi'_m = 34.8^\circ \pm 4.28^\circ$
 - modulo elastico:
 - valore caratteristico: $E_k = 66.81$ MPa
 - valore medio: $E_m = 65.93 \pm 15.70$ MPa

Nelle figure di seguito, vengono riportati i grafici ottenuti dai valori dei parametri c_u , c' , E_{ed} , ϕ ed E di ogni prova CPTU realizzata sul corpo arginale.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	34 di 39

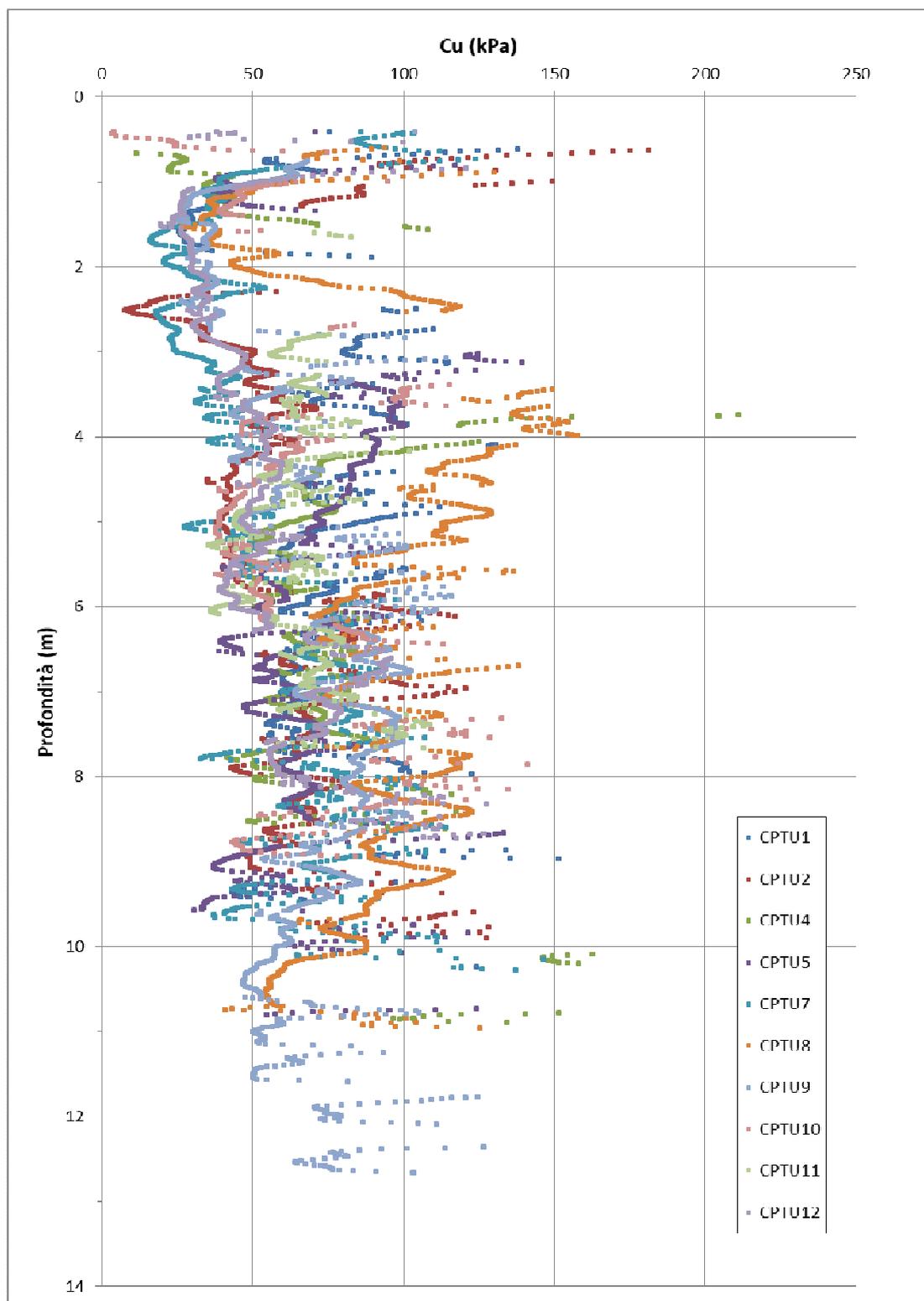


FIG. 8 – VALORI DI COESIONE NON DRENATA RICAVATI DALLE PROVE CPTU

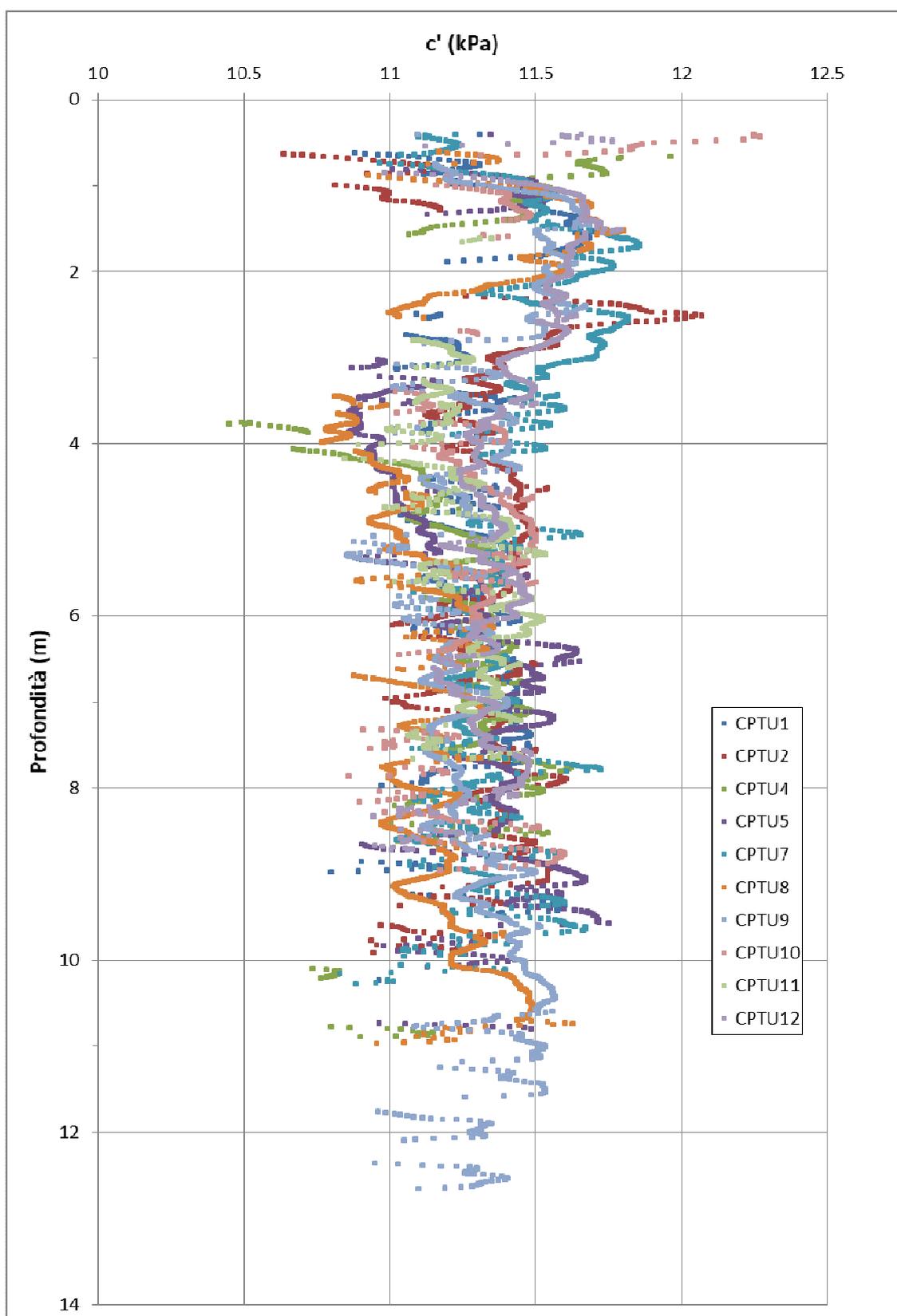


FIG. 9 – VALORI DI COESIONE DRENATA RICAVATI DALLE PROVE CPTU

 EN GEO s.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	36 di 39

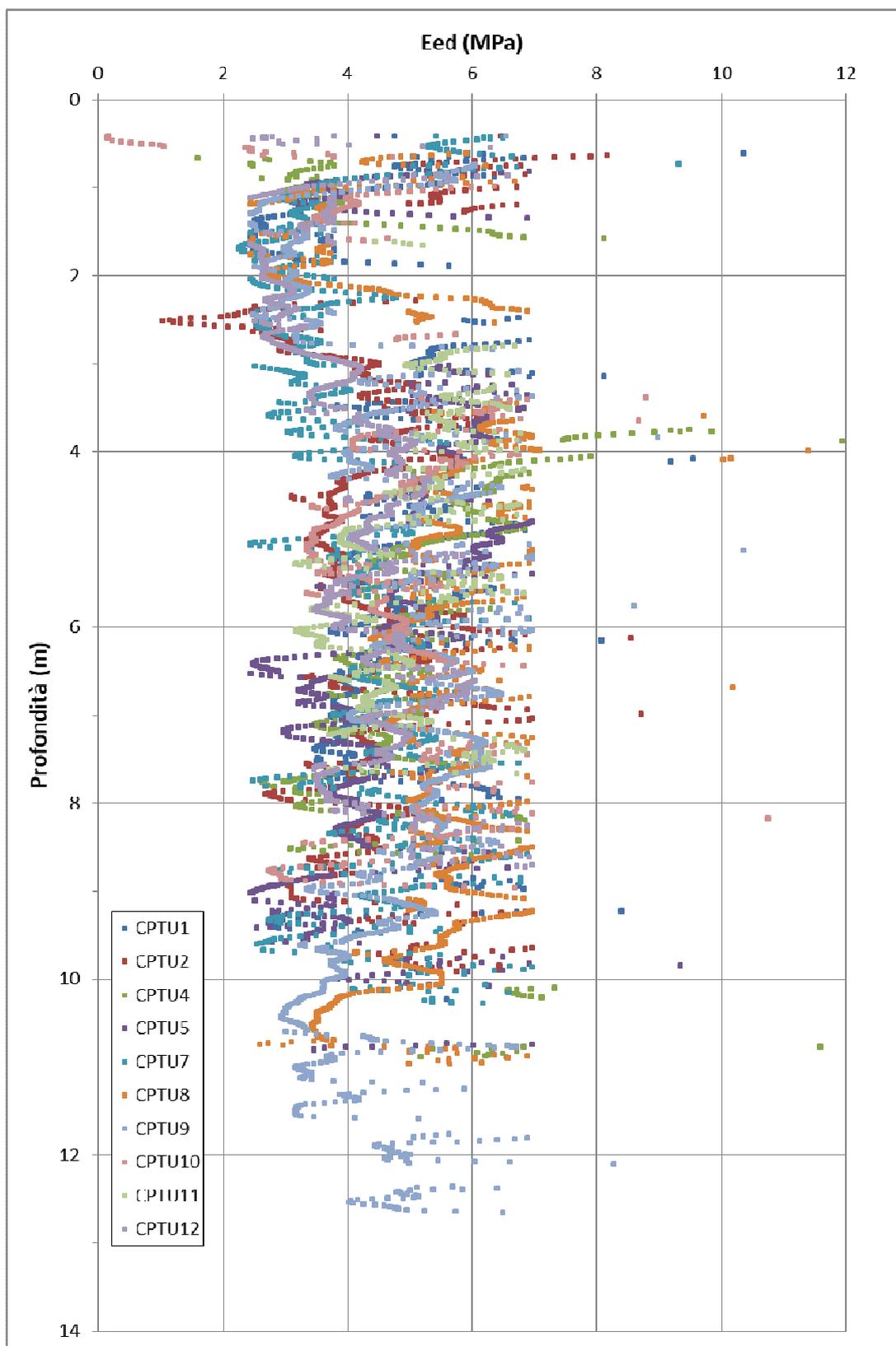


FIG. 10 – VALORI DI MODULO EDOMETRICO RICAVATI DALLE PROVE CPTU

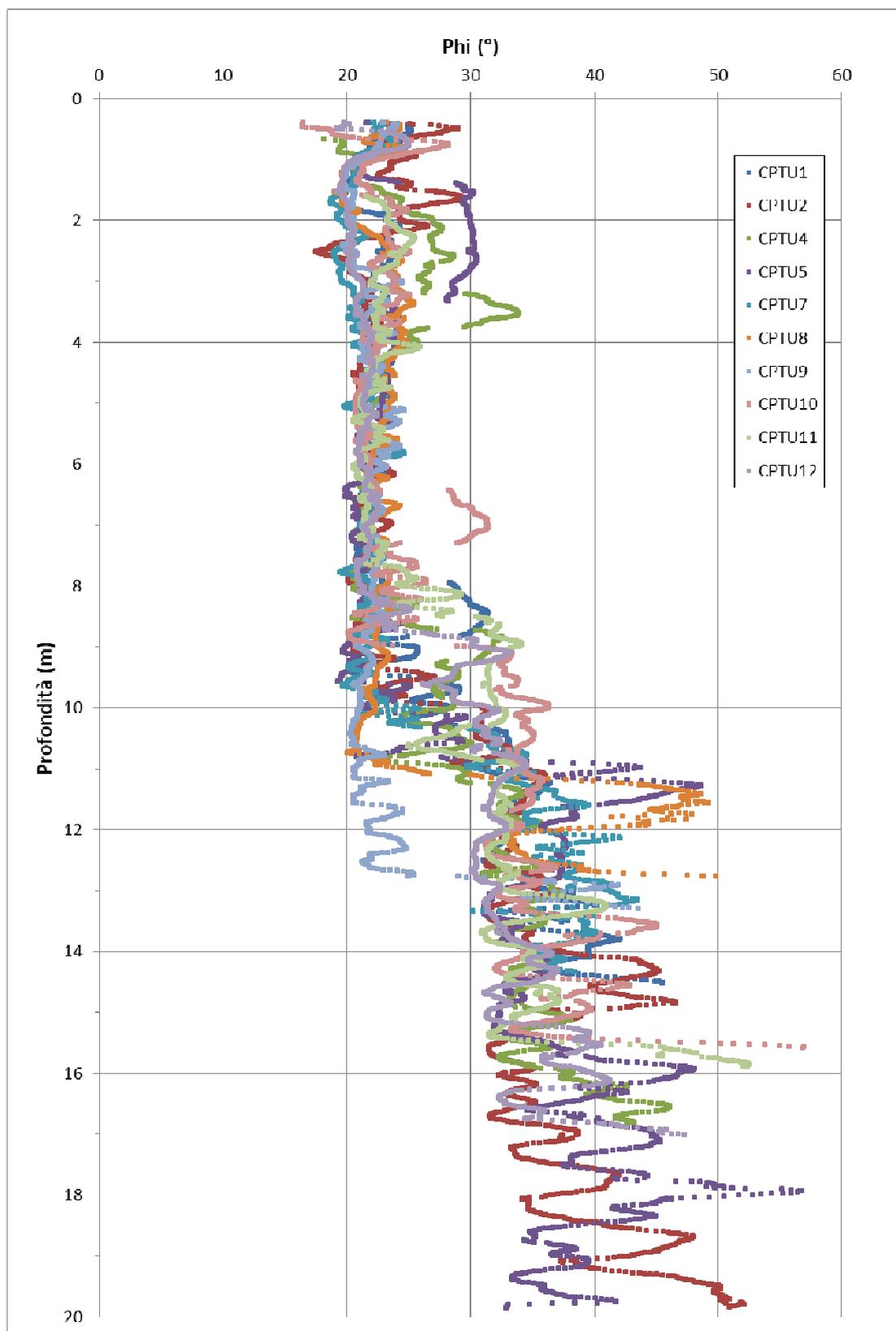


Fig. 11 – Valori dell'angolo di attrito interno ricavati dalle prove CPTU

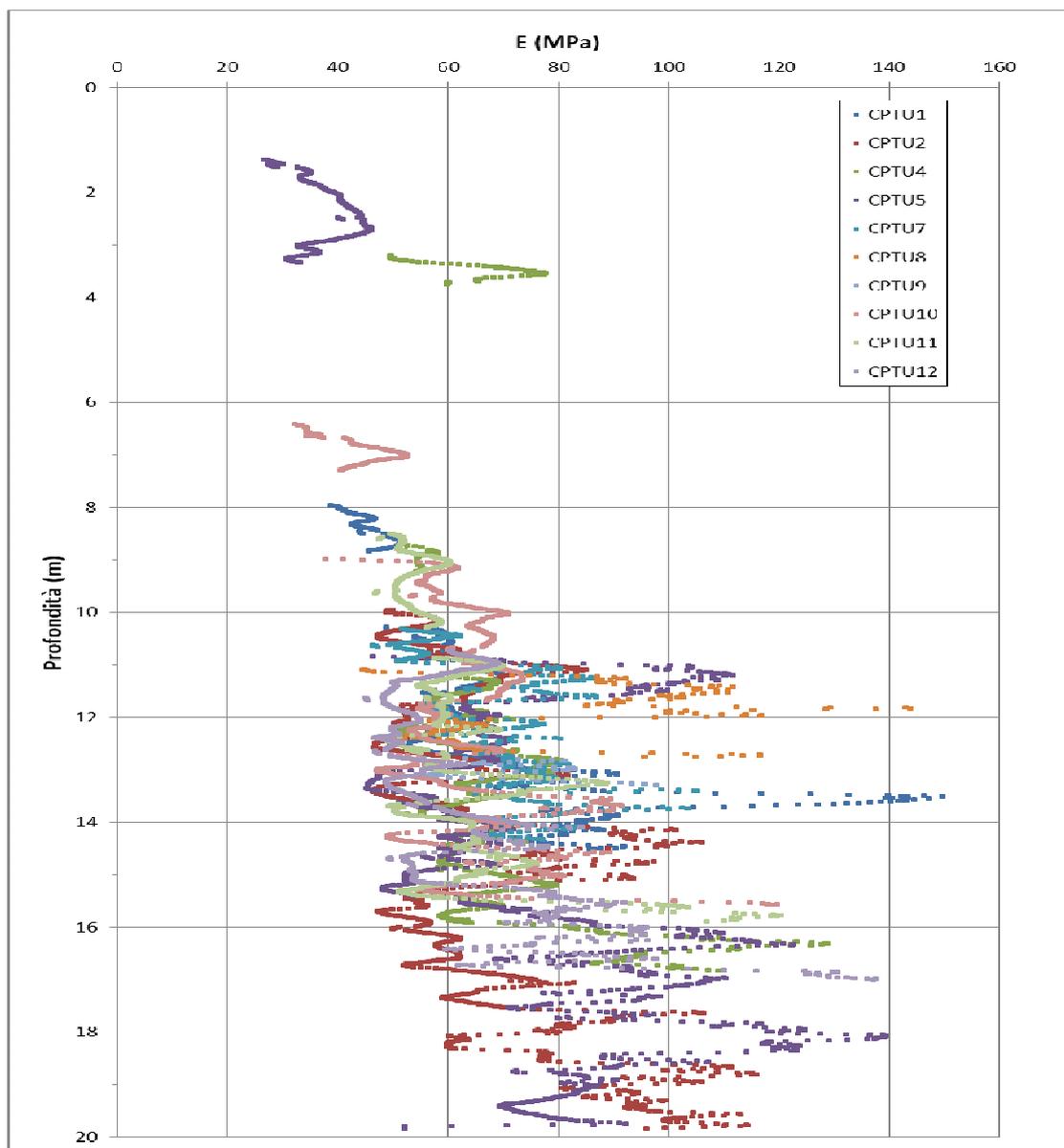


Fig. 12 – Valori del modulo elastico ricavati dalle prove CPTU

Parma, luglio 2019

Dott. Geol. Carlo Caleffi

Dott. Geol. Francesco Cerutti



 EN GEO s.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	R03 - Relazione geotecnica e sismica	Luglio 2019	0	39 di 39

RELAZIONE GEOTECNICA E SISMICA
MODELLO GEOTECNICO

TAV. N°
ALL. 3.1

SCALA INDICATA

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

CAPOGRUPPO MANDATARIA
PROGETTAZIONE GENERALE - INGEGNERIA IDRAULICA E STRUTTURALE
PIZZALI INGEGNERIA ING. FULVIO BERNABEI
ING. LAURA GRILLI
ING. GIANLUIGI SEVINI

PROGETTISTA:
DOTT. ING. FULVIO BERNABEI

MANDANTE GEOLOGIA E GEOTECNICA
EN GEO s.r.l.
www.engeo.it
GEOL. CARLO CALEFFI
GEOL. FRANCESCO CERUTTI

MANDANTE ASPETTI AMBIENTALI E PAESAGGISTICI
STUDIO PANDAKOVIC
ARCH. ANGELO DAL SASSO

RUP:
DOTT. ING. MIRELLA VERGNANI

MANDANTE ARCHEOLOGIA
GIANO S.N.C.
DOTT. DARIA PASINI

MANDANTE TOPOGRAFIA E PIANO PARTICELLARE ESPROPRI
GEOM. MARCO SOZZÈ

DATA
LUGLIO 2019

COMMISSIONE IV 2018/005	REDAZIONE CANTONI
CODICE COMMESSA ESARGIN/PIACENZA	CONTROLLATO CERUTTI
NOME FILE	APPROVATO CALEFFI

DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTR.	APPR.

A TERMINI DI LEGGE CI SI RISERVA LA PROPRIETA' DEL PRESENTE ELABORATO, CHE PERTANTO NON PUO' ESSERE RIPRODOTTO O USATO A TERZI SENZA AUTORIZZAZIONE DELLA **PIZZALI INGEGNERIA**

SEZIONE LONGITUDINALE
Scala orizzontale 1:5.000
Scale verticale 1:200

Nome punto Terreno	Quota Sommità Arginale	Distanze parziali Terreno	Distanze progressive Terreno
20.90	97.4600008	0.00	0.00
50.15	97.4600016	0.15	0.15
51.85	97.4400163	0.30	0.45
44.96	97.4600174	0.45	0.90
140.46	97.5000191	0.60	1.50
166.15	97.5600191	0.75	2.25
182.79	97.6200198	0.90	3.15
206.00	97.6800209	1.05	4.20
237.75	97.7500231	1.20	5.40
266.85	97.8200247	1.35	6.75
304.08	97.9000259	1.50	8.25
334.15	97.9800279	1.65	9.90
359.25	98.0700298	1.80	11.70
386.25	98.1600309	1.95	13.65
411.00	98.2500322	2.10	15.75
437.40	98.3400331	2.25	18.00
467.40	98.4300327	2.40	20.40
501.00	98.5200334	2.55	22.95
531.90	98.6100335	2.70	25.65
564.00	98.7000332	2.85	28.50
591.15	98.7900334	3.00	31.50
617.40	98.8800344	3.15	34.65
647.80	98.9700356	3.30	37.95
681.30	99.0600361	3.45	41.40
711.37	99.1500366	3.60	45.00
744.00	99.2400374	3.75	48.75
779.80	99.3300387	3.90	52.65
818.40	99.4200396	4.05	56.70
859.40	99.5100408	4.20	60.90
902.40	99.6000421	4.35	65.25
947.80	99.6900435	4.50	70.75
995.10	99.7800449	4.65	76.40
1044.60	99.8700464	4.80	82.20
1096.80	99.9600479	4.95	88.15
1151.20	100.0500494	5.10	94.25
1207.40	100.1400509	5.25	100.50
1265.10	100.2300524	5.40	106.90
1324.10	100.3200539	5.55	113.45
1384.20	100.4100554	5.70	120.15
1445.30	100.5000569	5.85	127.00
1507.40	100.5900584	6.00	134.00
1570.40	100.6800599	6.15	141.15
1634.20	100.7700614	6.30	148.45
1698.60	100.8600629	6.45	155.90
1764.40	100.9500644	6.60	163.50
1831.40	101.0400659	6.75	171.25
1899.40	101.1300674	6.90	179.15
1968.40	101.2200689	7.05	187.20
2038.20	101.3100704	7.20	195.40
2108.60	101.4000719	7.35	203.75
2179.40	101.4900734	7.50	212.25
2250.40	101.5800749	7.65	220.90
2321.40	101.6700764	7.80	229.70
2392.40	101.7600779	7.95	238.65
2463.20	101.8500794	8.10	247.75
2534.00	101.9400809	8.25	256.90
2604.60	102.0300824	8.40	266.10
2675.00	102.1200839	8.55	275.45
2745.20	102.2100854	8.70	284.95
2815.20	102.3000869	8.85	294.60
2884.80	102.3900884	9.00	304.40
2954.00	102.4800899	9.15	314.35
3022.80	102.5700914	9.30	324.45
3091.20	102.6600929	9.45	334.70
3159.20	102.7500944	9.60	345.10
3226.80	102.8400959	9.75	355.65
3294.00	102.9300974	9.90	366.35
3360.80	103.0200989	10.05	377.20
3427.20	103.1101004	10.20	388.20
3493.20	103.2001019	10.35	399.35
3558.80	103.2901034	10.50	410.65
3624.00	103.3801049	10.65	422.10
3688.80	103.4701064	10.80	433.70
3753.20	103.5601079	10.95	445.45
3817.20	103.6501094	11.10	457.35
3880.80	103.7401109	11.25	469.40
3944.00	103.8301124	11.40	481.60
4006.80	103.9201139	11.55	493.95
4069.20	104.0101154	11.70	506.45
4131.20	104.1001169	11.85	519.10
4192.80	104.1901184	12.00	531.90
4254.00	104.2801199	12.15	544.85
4314.80	104.3701214	12.30	557.95
4375.20	104.4601229	12.45	571.20
4435.20	104.5501244	12.60	584.60
4494.80	104.6401259	12.75	598.15
4554.00	104.7301274	12.90	611.85
4612.80	104.8201289	13.05	625.70
4671.20	104.9101304	13.20	639.70
4729.20	105.0001319	13.35	653.85
4786.80	105.0901334	13.50	668.15
4844.00	105.1801349	13.65	682.60
4900.80	105.2701364	13.80	697.20
4957.20	105.3601379	13.95	711.95
5013.20	105.4501394	14.10	726.85
5068.80	105.5401409	14.25	741.90
5124.00	105.6301424	14.40	757.10
5178.80	105.7201439	14.55	772.45
5233.20	105.8101454	14.70	787.95
5287.20	105.9001469	14.85	803.60
5340.80	105.9901484	15.00	819.40
5394.00	106.0801499	15.15	835.35
5446.80	106.1701514	15.30	851.45
5499.20	106.2601529	15.45	867.70
5551.20	106.3501544	15.60	884.10
5602.80	106.4401559	15.75	900.65
5654.00	106.5301574	15.90	917.35
5704.80	106.6201589	16.05	934.20
5755.20	106.7101604	16.20	951.20
5805.20	106.8001619	16.35	968.35
5854.80	106.8901634	16.50	985.65
5904.00	106.9801649	16.65	1003.10
5952.80	107.0701664	16.80	1020.70
6001.20	107.1601679	16.95	1038.45
6049.20	107.2501694	17.10	1056.35
6096.80	107.3401709	17.25	1074.40
6144.00	107.4301724	17.40	1092.60
6190.80	107.5201739	17.55	1110.95
6237.20	107.6101754	17.70	1129.45
6283.20	107.7001769	17.85	1148.10
6328.80	107.7901784	18.00	1166.90
6374.00	107.8801799	18.15	1185.85
6418.80	107.9701814	18.30	1204.95
6463.20	108.0601829	18.45	1224.20
6507.20	108.1501844	18.60	1243.60
6550.80	108.2401859	18.75	1263.15
6594.00	108.3301874	18.90	1282.85
6636.80	108.4201889	19.05	1302.70
6679.20	108.5101904	19.20	1322.70
6721.20	108.6001919	19.35	1342.85
6762.80	108.6901934	19.50	1363.15
6804.00	108.7801949	19.65	1383.60
6844.80	108.8701964	19.80	1404.20
6885.20	108.9601979	19.95	1424.95
6925.20	109.0501994	20.10	1445.85
6964.80	109.1402009	20.25	1466.90
7004.00	109.2302024	20.40	1488.10
7042.80	109.3202039	20.55	1509.45
7081.20	109.4102054	20.70	1530.95
7119.20	109.5002069	20.85	1552.60
7156.80	109.5902084	21.00	1574.40
7194.00	109.6802099	21.15	1596.35
7230.80	109.7702114	21.30	1618.45
7267.20	109.8602129	21.45	1640.70
7303.20	109.9502144	21.60	1663.10
7338.80	110.0402159	21.75	1685.65
7374.00	110.1302174	21.90	1708.35
7408.80	110.2202189	22.05	1731.20
7443.20	110.3102204	22.20	1754.20
7477.20	110.4002219	22.35	1777.35
7510.80	110.4902234	22.50	1800.65
7544.00	110.5802249	22.65	1824.10
7576.80	110.6702264	22.80	1847.70
7609.20	110.7602279	22.95	1871.45
7641.20	110.8502294	23.10	1895.35
7672.80	110.9402309	23.25	1919.40
7704.00	111.0302324	23.40	1943.60
7734.80	111.1202339	23.55	1967.95
7765.20	111.2102354	23.70	1992.45
7795.20	111.3002369	23.85	2017.10
7824.80	111.3902384	24.00	2041.90
7854.00	111.4802399	24.15	2066.85
7882.80	111.5702414	24.30	2091.95
7911.20	111.6602429	24.45	2117.20
7939.20	111.7502444	24.60	2142.60
7966.80	111.8402459	24.75	2168.15
7994.00	111.9302474	24.90	2193.85
8020.80	112.0202489	25.05	2219.70
8047.20	112.1102504	25.20	2245.70
8073.20	112.2002519	25.35	2271.85
8098.80	112.2902534	25.50	2298.15
8124.00	112.3802549	25.65	2324.60
8148.80	112.4702564	25.80	2351.20
8173.20	112.5602579	25.95	2377.95
8197.20	112.6502594	26.10	2404.85
8220.80	112.7402609	26.25	2431.90
8244.00	112.8302624	26.40	2459.10
8266.80	112.9202639	26.55	2486.45
8289.20	113.0102654	26.70	2513.95
8311.20	113.1002669	26.85	2541.60
8332.80	113.1902684	27.00	2569.40
8354.00	113.2802699	27.15	2597.35
8374.80	113.3702714	27.30	2625.45
8395.20	113.4602729	27.45	2653.70
8415.20	113.5502744	27.60	2682.10
8434.80	113.6402759	27.75	2710.65
8454.00	113.7302774	27.90	2739.35
8472.80	113.8202789	28.05	2768.20
8491.20	113.9102804	28.20	2797.20
8509.20	114.0002819	28.35	2826.35
8526.80	114.0902834	28.50	2855.65
8544.00	114.1802849	28.65	2885.10
8560.80	114.2702864	28.80	2914.70
8577.20	114.3602879	28.95	2944.45
8593.20	114.4502894	29.10	2974.35
8608.80	114.5402909	29.25	3004.40
8624.00	114.6302924	29.40	3034.60
8638.80	114.7202939	29.55	3064.95
8653.20	114.8102954	29.70	3095.45
8667.20	114.9002969	29.85	3126.10

AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO – PARMA

Strada Giuseppe Garibaldi 75, I-43121 Parma

**(PC-E-809) LAVORI DI RIALZO DELL'ARGINE MAESTRO IN DESTRA DEL
 FIUME PO NEL II C.I. DI PIACENZA PER L'ADEGUAMENTO DELLA
 SAGOMA DEFINITIVA PREVISTA DAL PIANO SIMPO NEI COMUNI
 DI CALENDASCO E ROTTOFRENO (PS45 2001-2002)**

**PROGETTO ESECUTIVO
 1° lotto funzionale**

ALL. 3.2 – INDAGINI SISMICHE DI TIPO MASW E SCPTU

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

CAPOGRUPPO MANDATARIA
 PROGETTAZIONE GENERALE – INGEGNERIA IDRAULICA E STRUTTURALE



DIZETA INGEGNERIA
 STUDIO ASSOCIATO
 Via Bossini, 19 – 20133 MILANO Tel. 02-70600125
 server@dzetaingegneria.it Fax 02-70600014

ING. FULVIO BERNABEI
 ING. LAURA GRILLI
 ING. GIANLUIGI SEVINI

MANDANTE
 GEOLOGIA E GEOTECNICA



EN GEO S.r.l.
 ENGINEERING GEOLOGY
 www.engeo.it

GEOL. CARLO CALEFFI
 GEOL. FRANCESCO CERUTTI

MANDANTE
 ASPETTI AMBIENTALI E PAESAGGISTICI

STUDIO PANDAKOVIC

ARCH. ANGELO DAL SASSO

MANDANTE
 ARCHEOLOGIA



GIANO S.N.C.

DOTT. DARIA PASINI

MANDANTE
 TOPOGRAFIA E PIANO PARTICELLARE ESPROPRI

GEOM. **MARCO SOZZÈ**

PROGETTISTA:
 DOTT. ING. **FULVIO BERNABEI**

RUP:
 DOTT. ING. **MIRELLA VERGNANI**

DATA **LUGLIO 2019**

COMMESSA N° **2018/005** REDATTO **CANTONI**

CODICE COMMESSA **ESARGINIPIACENZA** CONTROLLATO **CERUTTI**

NOME FILE APPROVATO **CALEFFI**

REV.	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTR.	APPR.

PROVA SISMICA MASW

3.4 Interpretazione geofisica con onde Vs tecnica Masw 1 con “VS 30”

Si riportano i grafici ad isolinee sui quali è identificata la curva di dispersione delle onde di Rayleigh (figura 3.4).

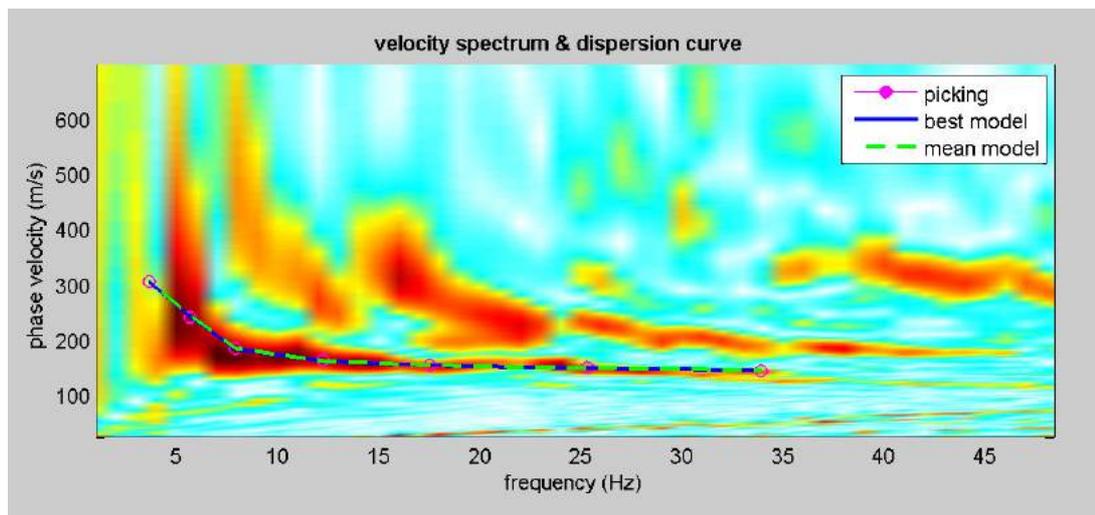


Figura 3.4: Masw1 grafici ad isolinee nel dominio velocità di fase – frequenza.

La modellazione numerica della curva di dispersione prevede che alla base del modello sia posto un semispazio a spessore infinito.

Si riporta:

- 1) in Figura n° 3.5: il confronto tra la curva di dispersione sperimentale modello migliore (celeste) e modello medio (rosso),
- 2) in Figura n° 3.6: il profilo di velocità delle onde S associato alla curva teorica.

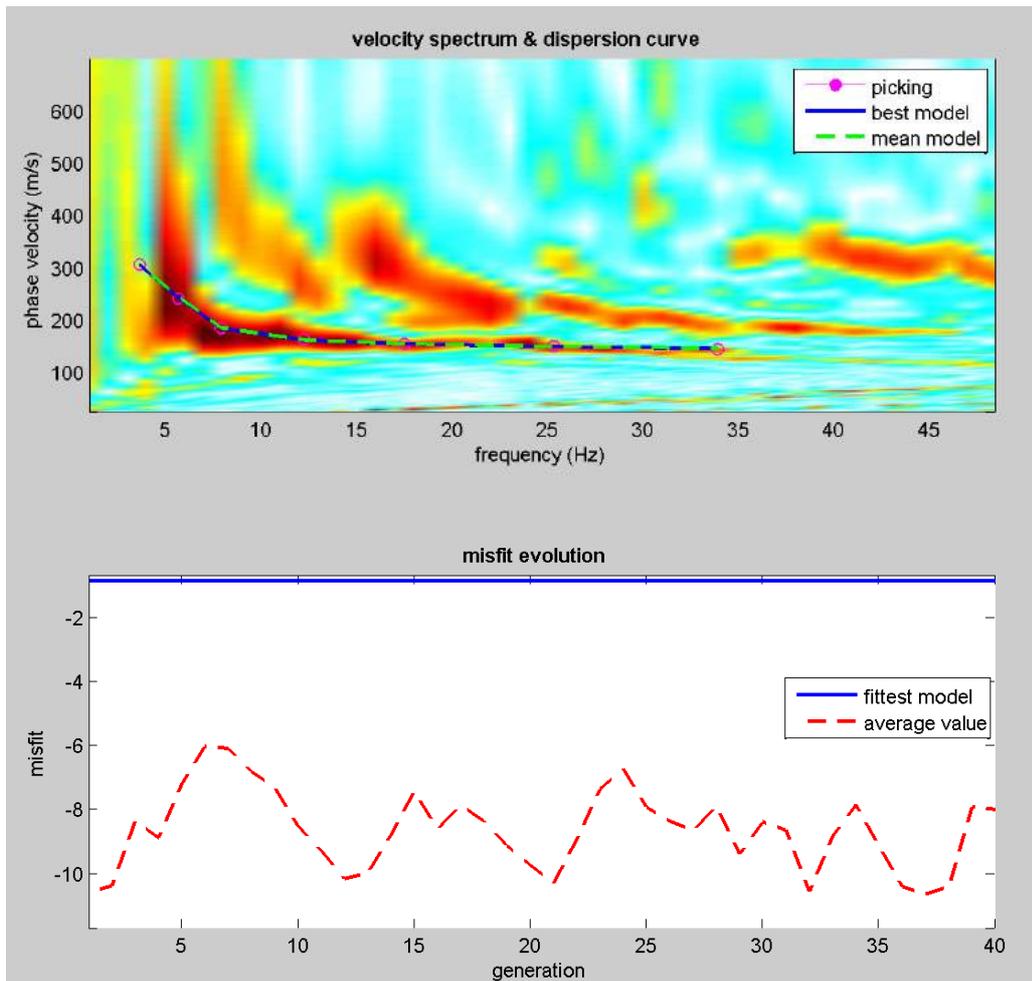


Figura 3.5: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

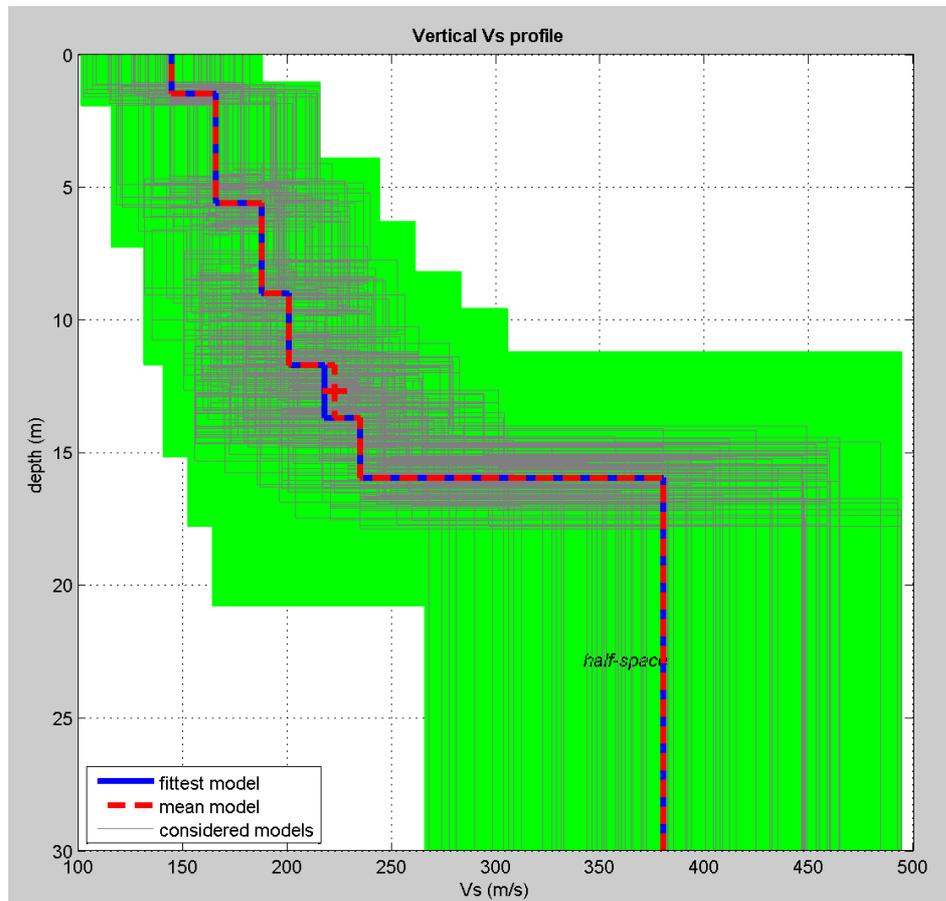


Figura 3.6: Profilo di velocità delle onde S stimato nel sito in esame.

Il miglior *fit* tra i dati sperimentali e la curva teorica si ottiene per il modello dato in Tabella 3.1.

Tabella 3.1: Modello di velocità delle onde S per il sito in esame.

Strato	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Spessore
1	298	145	1.5
2	350	166	4.1
3	391	188	3.4
4	418	201	2.7
5	460	223	2.0
6	490	235	2.3
7	716	380	Inf.

VS 30 = 246 m/s Suolo di tipo C

La dicitura “infinito” indica che è stata raggiunta la profondità massima di indagine, mentre con il programma Deepsoil v.3.5 dell’Università dell’Illinois è stato calcolato il bedrock o meglio il bedrock-like (700 m/s).

Esso risulta rilevante ai fini degli effetti di sito, perché tale strato presenta forti contrasti di impedenza rispetto ai terreni sovrastanti, potendo così determinare in questi ultimi l’intrappolamento delle onde sismiche e dunque l’amplificazione del moto del suolo in caso di terremoto.

N.B. Le velocità sismiche V_p sono ottenute da formule empiriche.

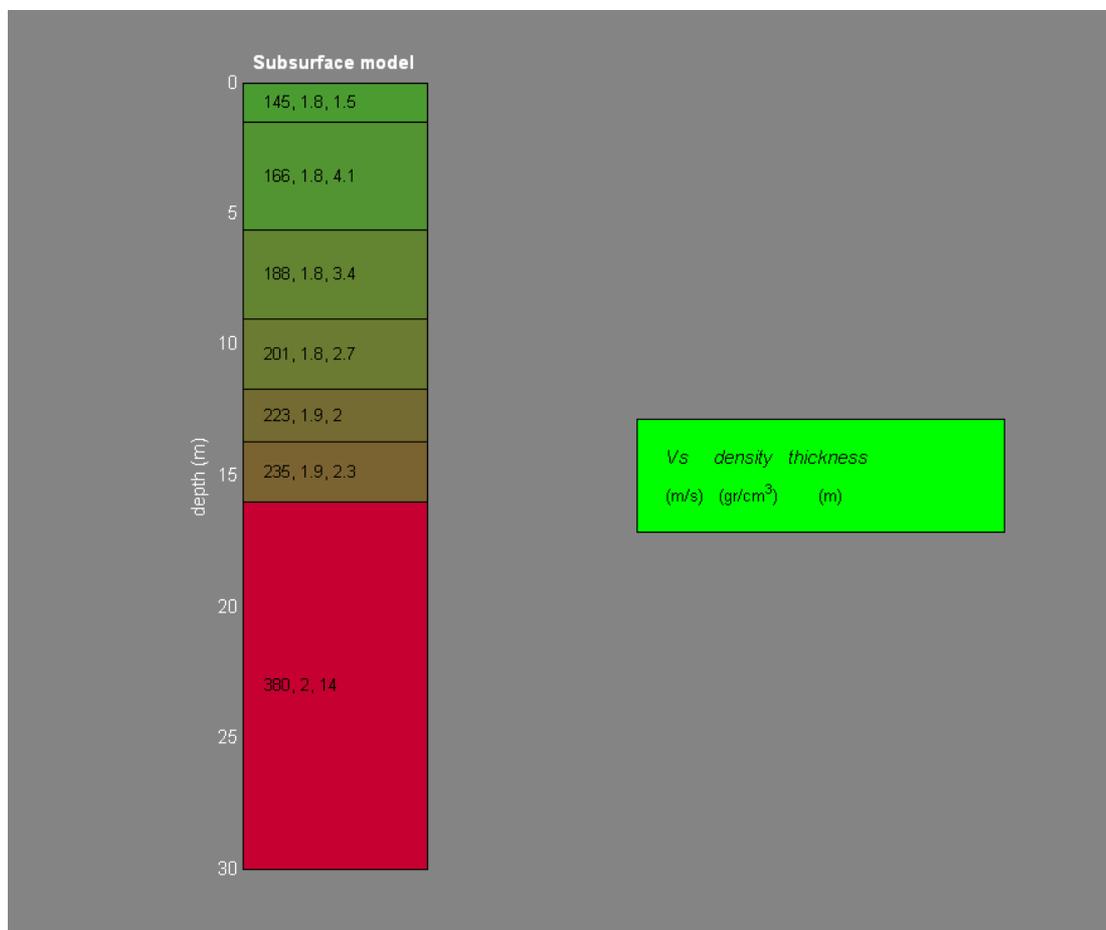


Figura 3.7: Sismostratigrafia dei terreni

Parametri dinamici “Moduli elastici”

VS (m/sec): 145, 166, 188, 201, 223, 235, 380

Spessori (m): 1.5, 4.1, 3.4, 2.7, 2.0, 2.3

Stima VP (m/sec): 298, 350, 391, 418, 460, 490, 716

Stima densità (gr/cm³): 1.76, 1.80, 1.83, 1.84, 1.87, 1.88, 1.97

Stima modulo di Poisson: 0.34, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.35, 0.30

Stima modulo di taglio (MPa): 37, 50, 65, 74, 93, 104, 285

Stima modulo di compressione (MPa): 107, 154, 193, 223, 271, 313, 632

Stima modulo di Young (MPa): 100, 134, 174, 201, 250, 281, 743

Stima modulo di Lamé (MPa): 82, 121, 150, 173, 209, 244, 442

3.5 Interpretazione geofisica con onde Vs tecnica Masw 2 con “VS 30”

Si riportano i grafici ad isolinee sui quali è identificata la curva di dispersione delle onde di Rayleigh (figura 3.8).

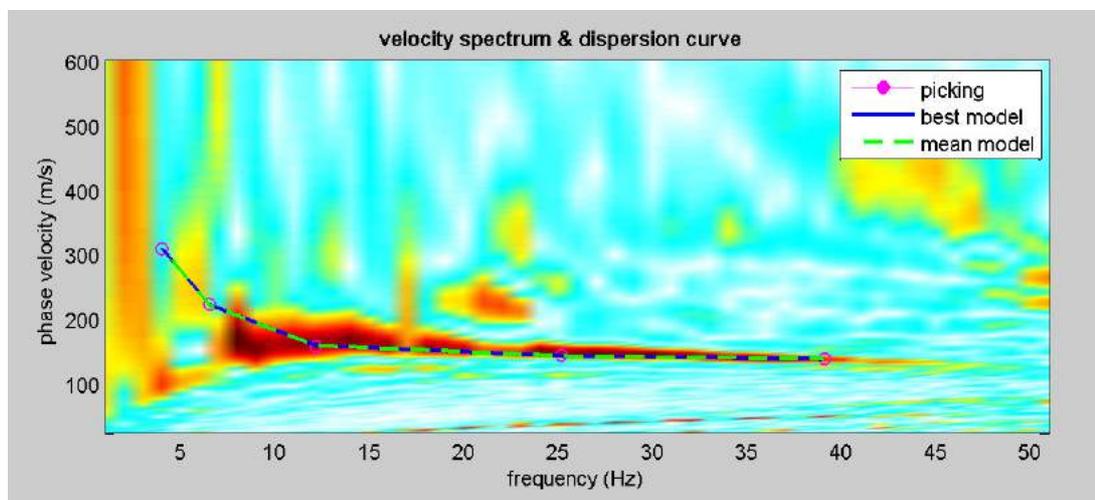


Figura 3.8: Masw2 grafici ad isolinee nel dominio velocità di fase – frequenza.

La modellazione numerica della curva di dispersione prevede che alla base del modello sia posto un semispazio a spessore infinito.

Si riporta:

- 3) in Figura n° 3.9: il confronto tra la curva di dispersione sperimentale modello migliore (celeste) e modello medio (rosso),
- 4) in Figura n° 3.10: il profilo di velocità delle onde S associato alla curva teorica.

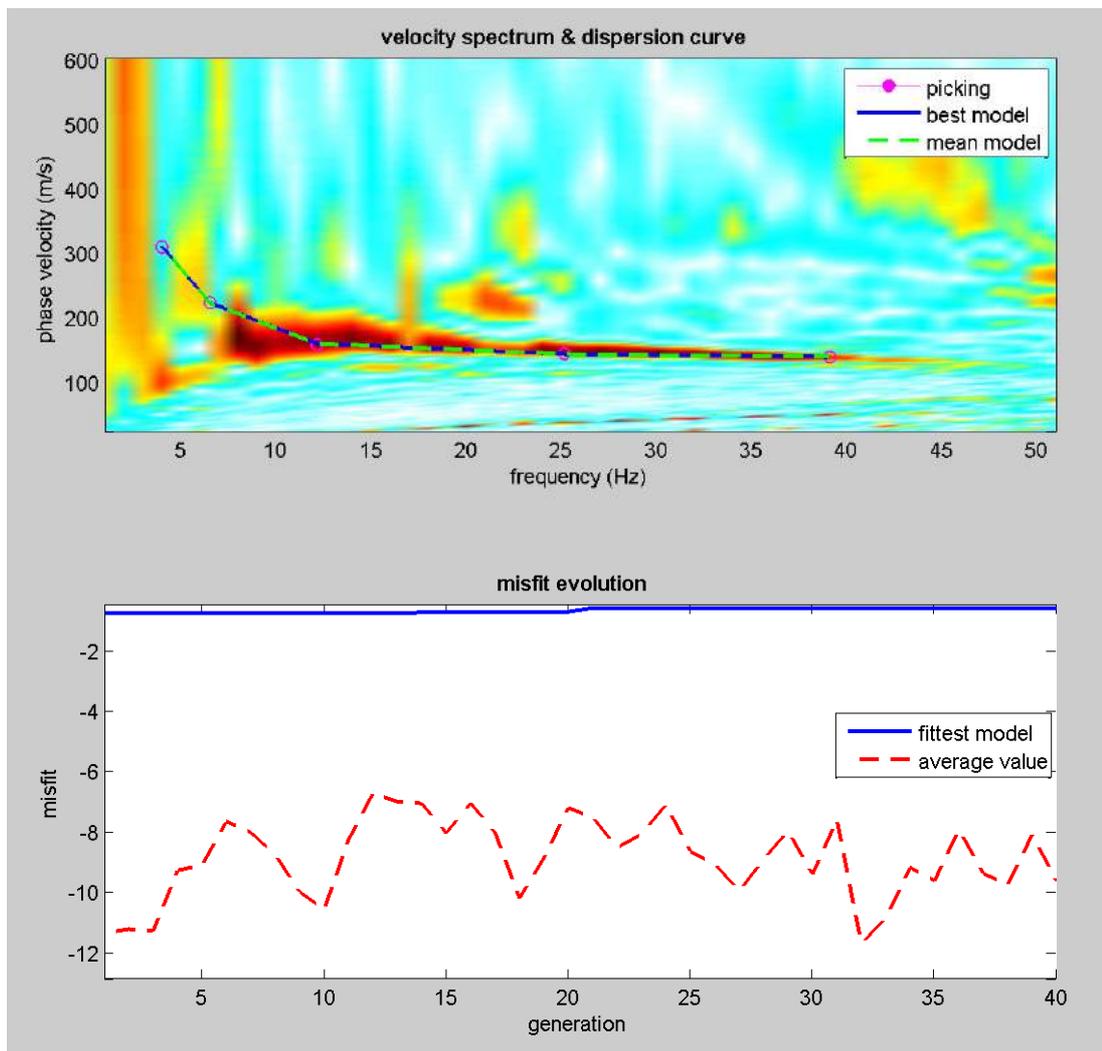


Figura 3.9: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

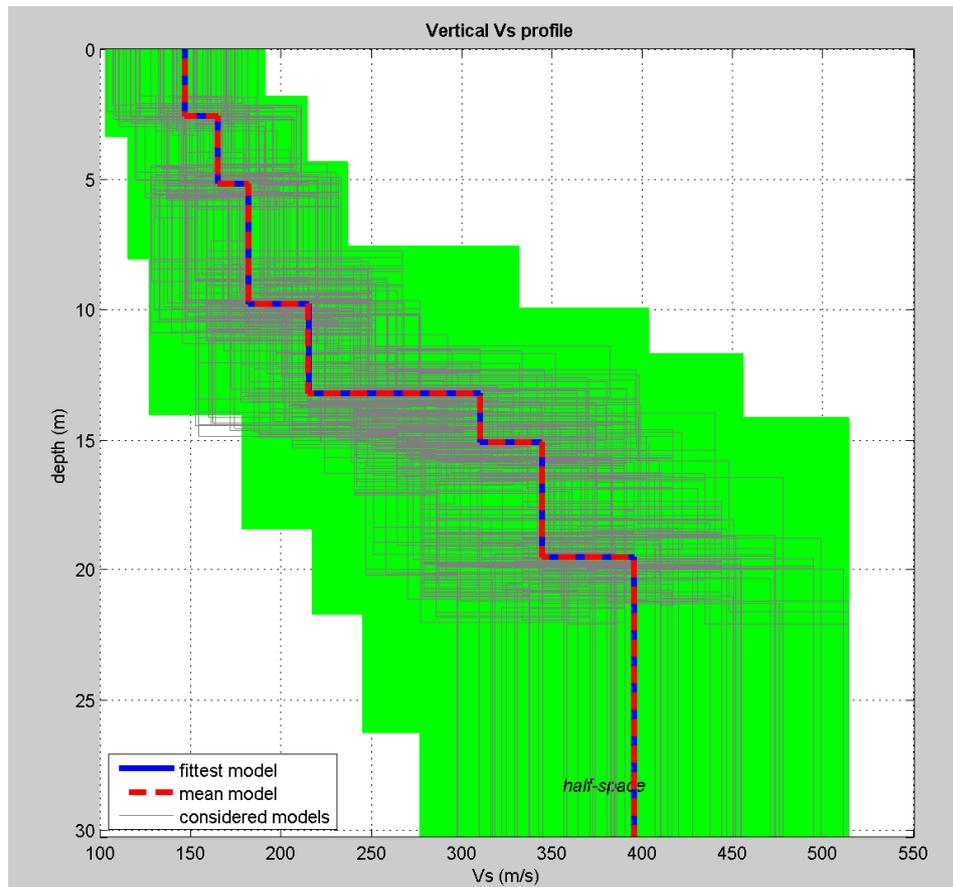


Figura 3.10: Profilo di velocità delle onde S stimato nel sito in esame.

Il miglior *fit* tra i dati sperimentali e la curva teorica si ottiene per il modello dato in Tabella 3.1

Tabella 3.2: Modello di velocità delle onde S per il sito in esame.

Strato	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Spessore
1	311	147	2.6
2	346	165	2.6
3	368	182	4.6
4	452	215	3.4
5	659	310	1.9
6	711	344	4.4
7	734	395	Inf.

VS 30 = 250 m/s

Suolo di tipo C

La dicitura “infinito” indica che è stata raggiunta la profondità massima di indagine, mentre con il programma Deepsoil v.3.5 dell’Università dell’Illinois è stato calcolato il bedrock o meglio il bedrock-like (700 m/s).

Esso risulta rilevante ai fini degli effetti di sito, perché tale strato presenta forti contrasti di impedenza rispetto ai terreni sovrastanti, potendo così determinare in questi ultimi l’intrappolamento delle onde sismiche e dunque l’amplificazione del moto del suolo in caso di terremoto.

N.B. Le velocità sismiche V_p sono ottenute da formule empiriche.

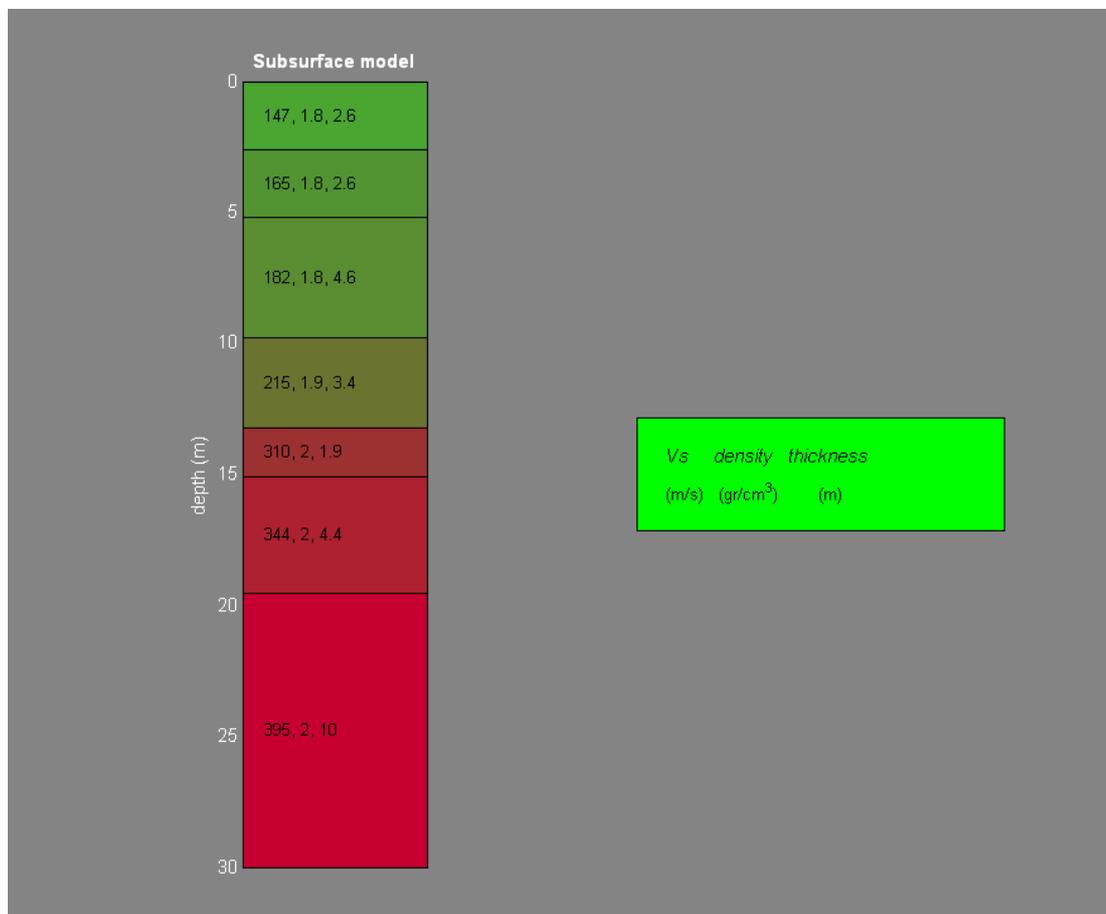


Figura 3.11: Sismostratigrafia dei terreni

Parametri dinamici “Moduli elastici”

VS (m/sec): 147, 165, 182, 215, 310, 344, 395

Spessori (m): 2.6, 2.6, 4.6, 3.4, 1.9, 4.4

Stima VP (m/sec): 311, 346, 368, 452, 659, 711, 734

Stima densità (gr/cm³): 1.77, 1.80, 1.81, 1.86, 1.95, 1.97, 1.98

Stima modulo di Poisson: 0.36, 0.35, 0.34, 0.35, 0.36, 0.35, 0.30

Stima modulo di taglio (MPa): 38, 49, 60, 86, 188, 233, 309

Stima modulo di compressione (MPa): 120, 150, 165, 266, 598, 685, 654

Stima modulo di Young (MPa): 104, 132, 161, 233, 510, 629, 800

Stima modulo di Lamé (MPa): 95, 117, 125, 208, 473, 530, 449

3.6 Fattori di Frequenza

L'andamento della funzione di amplificazione di un sito, è periodica ed assume sempre valori maggiori o uguali all'unità, cioè l'ampiezza dello spostamento alla superficie dello strato è sempre almeno pari a quella in corrispondenza della formazione rocciosa (secondo normativa vigente $V_s > 800$ m/s).

La *frequenza naturale* (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione: $F_n = \omega_n / 2\pi = (V_s / 4H) * (2n-1)$
La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la *risonanza* dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito.

Frequenza risonanza superficie formazione bedrock-like - MW1: 1.30 Hz

Frequenza risonanza superficie formazione bedrock-like - MW2: 1.60 Hz

Nel caso che una sollecitazione si prolunghi nel tempo essa può diventare particolarmente pericolosa per l'edificio, progettato come elastico, quando il terreno trasmette una componente del segnale sismico che abbia la stessa frequenza di oscillazione della struttura:

- Frequenza di oscillazione del terreno $< F_n$ frequenza naturale di oscillazione della struttura → i danni sono "limitati"
- Frequenza di oscillazione del terreno = F_n frequenza naturale di oscillazione della struttura → i danni sono "illimitati".

dott. geologo
Diego Mortillaro



3.1 Interpretazione geofisica in onde Vp e Vs dell'indagine sismica SCPTU1

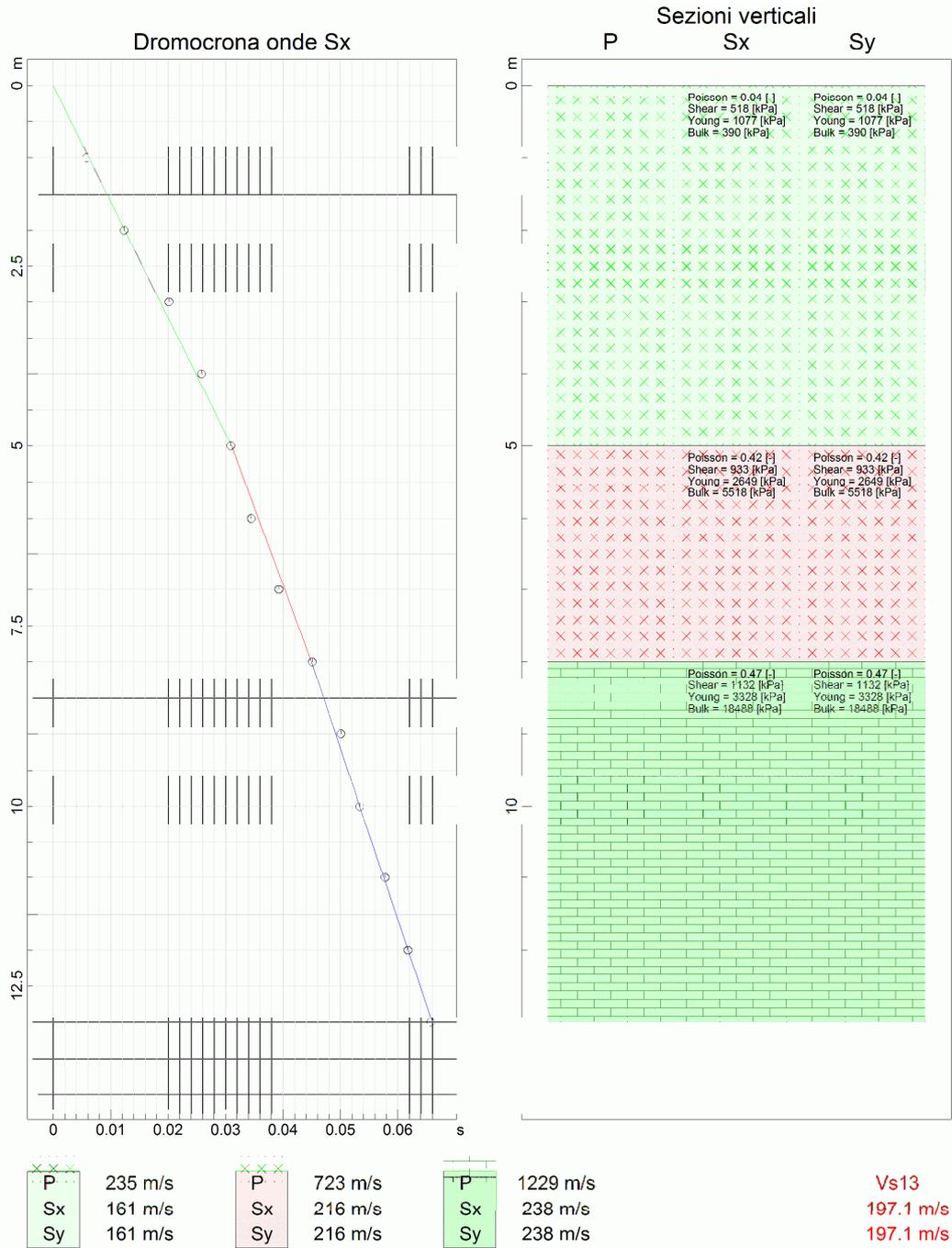


Figura 3.1: interpretazione SCPTU1 metodo a raggio rettilineo Vs30

ANALISI SISMICA PRIMI ARRIVI
DISTANZA DELLO SPARO DA BOCCA FORO = 3.00 [m]

N° Geof.	Profondità [m]	Onde P [ms]	Onde S (X) [ms]	Onde S (Y) [ms]	Onde P (corretti) [ms]	Onde S (X) (corretti) [ms]	Onde S (Y) (corretti) [ms]
1	1.00	13.82	18.16	18.16	4.37	5.74	5.74
2	2.00	17.17	22.20	22.20	9.53	12.31	12.31
3	3.00	18.85	28.48	28.48	13.33	20.14	20.14
4	4.00	21.78	32.25	32.25	17.43	25.80	25.80
5	5.00	24.29	36.02	36.02	20.83	30.89	30.89
6	6.00	25.33	38.54	38.54	22.66	34.47	34.47
7	7.00	25.81	42.73	42.73	23.72	39.27	39.27
8	8.00	27.25	48.17	48.17	25.51	45.10	45.10
9	9.00	27.72	52.78	52.78	26.30	50.07	50.07
10	10.00	28.20	55.71	55.71	27.01	53.36	53.36
11	11.00	29.16	59.90	59.90	28.13	57.79	57.79
12	12.00	29.64	63.67	63.67	28.75	61.77	61.77
13	13.00	30.11	67.44	67.44	29.34	65.71	65.71

VELOCITA' ONDE P e Sx -Sy

Strato	Profondità m	Velocità Vp m/s	Velocità Vsx m/s	Velocità Vsy m/s
1	5	235	161	161
2	8	723	216	216
3	13	1229	238	238

VELOCITA' MEDIE VS13

Geofono	VS30 [m/s]
orizzontale Sx	197.1
orizzontale Sy	197.1

PARAMETRI DINAMICI VS 13

Strato	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Spessore	Vp/Vs	ρ (t/m ³)	Poisson	G modulo di Taglio dinamico (MPa)	G Modulo di Taglio dinamico (MPa)	E Young (MPa)	E Young (MPa)	Lamè λ (kpa)	Bulk k (Mpa)
					ρ		ρ, Vs	E, v	tabella	G, v		
1	235	161	5.00	1.46	1.44	0.06	37	68	143	143	9	54
2	723	216	3.00	3.35	1.78	0.45	83	121	352	352	1116	1197
3	1229	238	5.00	5.16	1.97	0.48	112	147	436	436	3632	3730

3.2 Interpretazione geofisica in onde Vp e Vs dell'indagine sismica SCPTU2

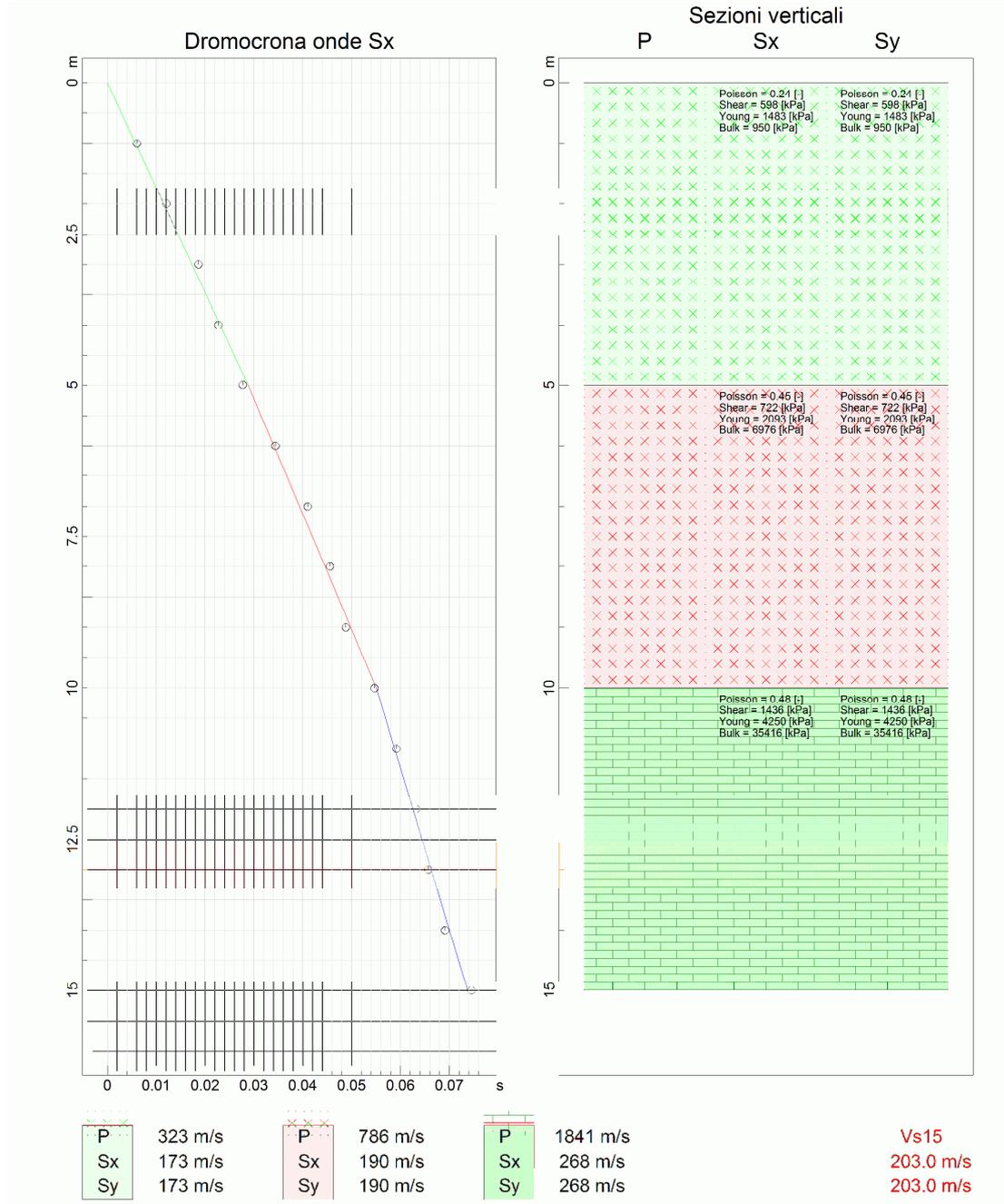


Figura 3.2: interpretazione SCPTU2 metodo a raggio rettilineo Vs30

ANALISI SISMICA PRIMI ARRIVI
 DISTANZA DELLO SPARO DA BOCCA FORO = 2.50 [m]

N° Geof.	Profondità [m]	Onde P [ms]	Onde S (X) [ms]	Onde S (Y) [ms]	Onde P (corretti) [ms]	Onde S (X) (corretti) [ms]	Onde S (Y) (corretti) [ms]
1	1.00	9.63	16.25	16.25	3.58	6.04	6.04
2	2.00	11.31	19.27	19.27	7.07	12.04	12.04
3	3.00	13.40	24.29	24.29	10.30	18.66	18.66
4	4.00	15.08	26.81	26.81	12.79	22.73	22.73
5	5.00	16.76	31.00	31.00	14.99	27.72	27.72
6	6.00	18.01	37.28	37.28	16.63	34.41	34.41
7	7.00	18.85	43.56	43.56	17.75	41.03	41.03
8	8.00	20.11	47.75	47.75	19.19	45.58	45.58
9	9.00	21.36	50.67	50.67	20.58	48.82	48.82
10	10.00	22.47	56.40	56.40	21.80	54.72	54.72
11	11.00	23.42	60.71	60.71	22.84	59.20	59.20
12	12.00	23.42	64.53	64.53	22.93	63.17	63.17
13	13.00	23.90	66.92	66.92	23.47	65.72	65.72
14	14.00	24.38	70.27	70.27	24.00	69.17	69.17
15	15.00	24.86	75.52	75.52	24.52	74.50	74.50

VELOCITA' ONDE P e Sx -Sy

Strato	Profondità m	Velocità Vp m/s	Velocità Vsx m/s	Velocità Vsy m/s
1	5	323	173	173
2	10	786	190	190
3	15	1841	268	268

VELOCITA' MEDIE VS13

Geofono	VS30 [m/s]
orizzontale Sx	203.0
orizzontale Sy	203.0

PARAMETRI DINAMICI VS 13

Strato	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Spessore	Vp/Vs	ρ (t/m ³)	Poisson	G modulo di Taglio dinamico (MPa)	G Modulo di Taglio dinamico (MPa)	E Young (MPa)	E Young (MPa)	Lamè λ (kpa)	Bulk k (Mpa)
					ρ		ρ, V_s	E, v	tabella	G, v		
1	323	173	5.00	1.87	1.53	0.30	46	78	202	202	116	167
2	786	190	5.00	4.14	1.81	0.47	65	94	276	276	1420	1482
3	1841	268	5.00	6.87	2.13	0.49	153	187	556	556	8436	8560

3.3 Interpretazione geofisica in onde Vp e Vs dell'indagine sismica SCPTU3

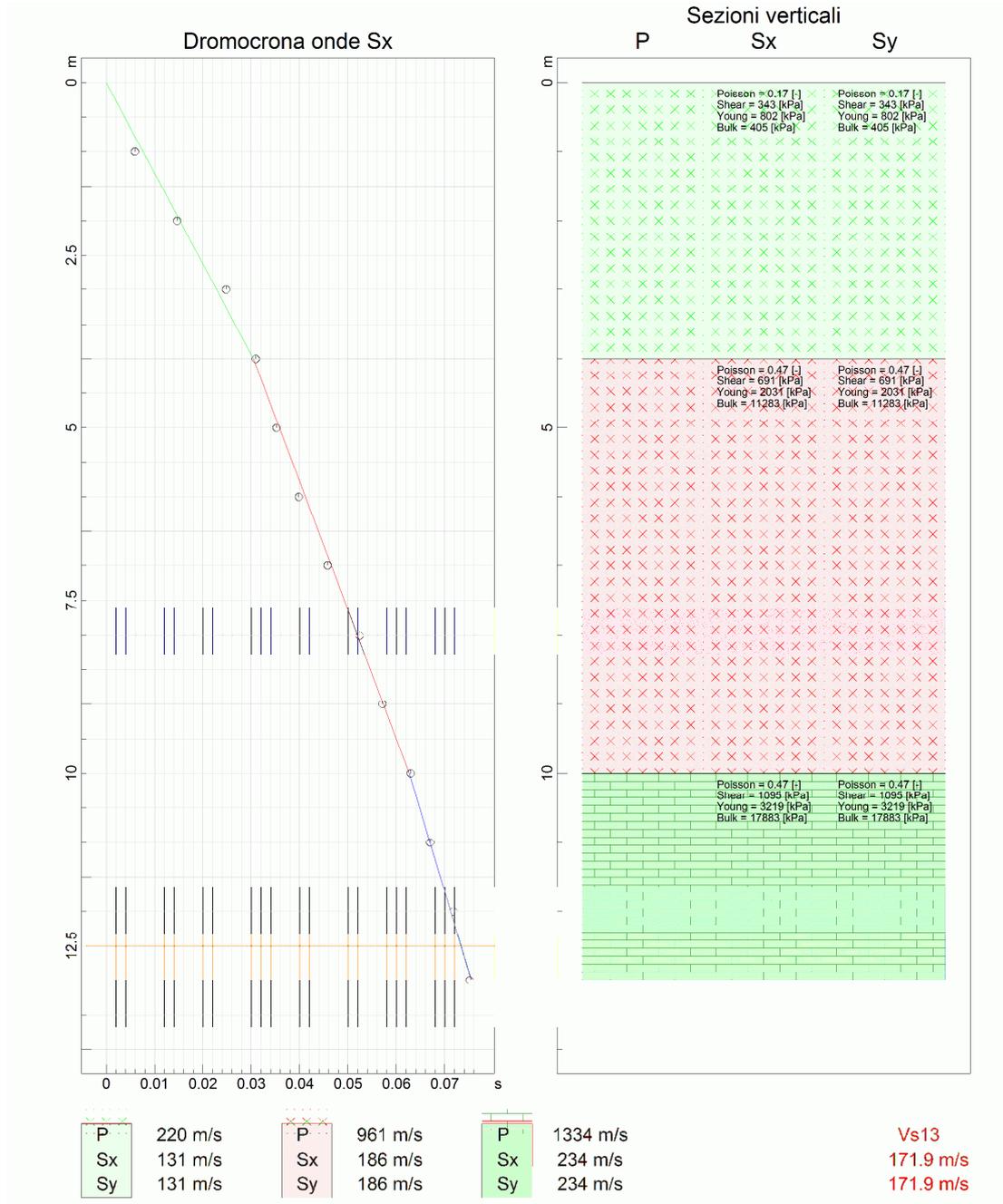


Figura 3.3: interpretazione SCPTU3 metodo a raggio rettilineo Vs30

ANALISI SISMICA PRIMI ARRIVI

DISTANZA DELLO SPARO DA BOCCA FORO = 2.50 [m]

N° Geof.	Profondità [m]	Onde P [ms]	Onde S (X) [ms]	Onde S (Y) [ms]	Onde P (corretti) [ms]	Onde S (X) (corretti) [ms]	Onde S (Y) (corretti) [ms]
1	1.00	12.51	15.92	15.92	4.65	5.91	5.91
2	2.00	17.05	23.46	23.46	10.65	14.65	14.65
3	3.00	19.11	32.25	32.25	14.68	24.78	24.78
4	4.00	20.22	36.44	36.44	17.15	30.90	30.90
5	5.00	21.51	39.37	39.37	19.24	35.22	35.22
6	6.00	21.99	43.14	43.14	20.30	39.83	39.83
7	7.00	22.94	48.59	48.59	21.61	45.76	45.76
8	8.00	23.90	54.87	54.87	22.81	52.37	52.37
9	9.00	24.38	59.27	59.27	23.49	57.11	57.11
10	10.00	24.86	64.93	64.93	24.11	62.99	62.99
11	11.00	25.81	68.70	68.70	25.17	66.99	66.99
12	12.00	26.29	73.30	73.30	25.74	71.76	71.76
13	13.00	27.25	76.48	76.48	26.76	75.10	75.10

VELOCITA' ONDE P e Sx -Sy

Strato	Profondità m	Velocità Vp m/s	Velocità Vsx m/s	Velocità Vsy m/s
1	4	220	131	131
2	10	961	186	186
3	13	1334	234	234

VELOCITA' MEDIE VS13

Geofono	VS30 [m/s]
orizzontale Sx	171.9
orizzontale Sy	171.9

PARAMETRI DINAMICI VS 13

Strato	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Spessore	Vp/Vs	ρ (t/m ³)	Poisson	G modulo di Taglio dinamico (MPa)	G Modulo di Taglio dinamico (MPa)	E Young (MPa)	E Young (MPa)	Lamè λ (kpa)	Bulk k (Mpa)
					ρ		ρ, Vs	E, v	tabella	G, v		
1	220	131	4.00	1.68	1.42	0.23	24	44	109	109	36	66
2	961	186	6.00	5.17	1.88	0.48	65	90	266	266	2218	2278
3	1334	234	3.00	5.70	2.00	0.48	110	143	423	423	4346	4441