



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

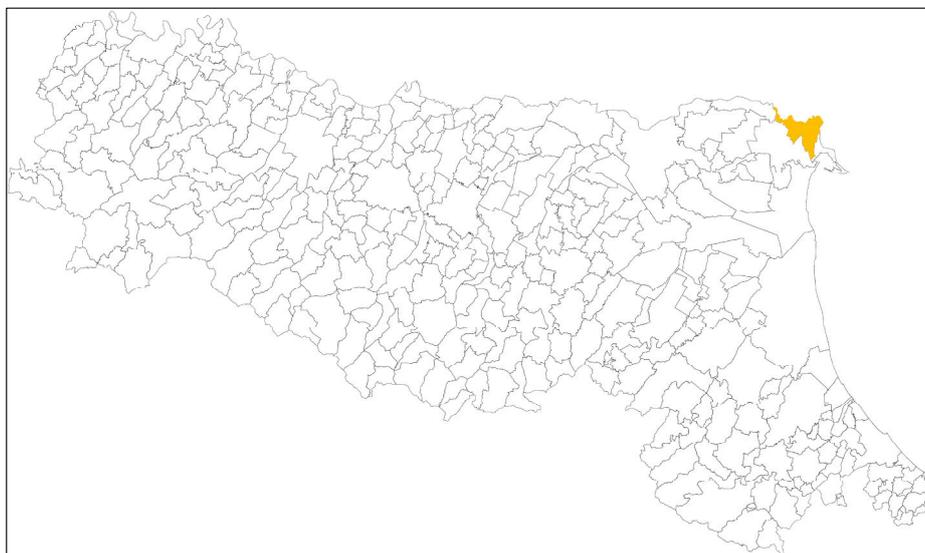
Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

Terzo Livello di approfondimento

Relazione Illustrativa

Regione Emilia-Romagna
Comune di Mesola (Fe)



Regione: Emilia Romagna	Soggetto realizzatore Dott. Geol. Thomas Veronese Collaboratori: Dott. Geol. Luca Lunghi Dott.ssa Geol. Sara Franciosi Indagini geofisiche: Prof. Nasser Abu Zeid Cartografia: Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli	Data: Febbraio 2022
--	---	--

Gruppo di lavoro:

Microzonazione sismica di III livello:

Dott. Geol. Thomas Veronese

Indagini geofisiche e interpretazione dati geofisici

Dott. geol. Nasser Abu Zeid

Indagini geologiche in situ:

Dott. Geol. Thomas Veronese

Cartografia e progetto GIS:

Dott. geol. Claudia Tomassoli

Collaboratori

Dott. Geol. Sara Franciosi

Dott. Geol. Luca Lunghi

INDICE:

1.	INTRODUZIONE.....	3
1.1.	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	5
1.2.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
2.	NUOVA PERIMETRAZIONE DELLE AREE IN CUI EFFETTUARE LA MS: AMBITI DI INTERESSE DEL PUG	7
3.	ELEMENTI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE PIÙ APPROFONDATA DELLA RSL.....	11
3.1.	INDAGINI GEOLOGICHE E MODELLI STRATIGRAFICI	13
3.1.1.	<i>ELENCO INDAGINI ESISTENTI.....</i>	<i>13</i>
3.1.2.	<i>ELENCO NUOVE INDAGINI.....</i>	<i>14</i>
3.1.3.	<i>MODELLO GEOLOGICO PROFONDO DI RIFERIMENTO.....</i>	<i>32</i>
3.1.4.	<i>AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE INDAGINI.....</i>	<i>33</i>
3.1.5.	<i>AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S (Vs).....</i>	<i>35</i>
	<i>Misure dirette mediante sismocono.....</i>	<i>35</i>
	<i>Indagini geofisiche.....</i>	<i>36</i>
3.2.	SEGNALI DI INPUT PER ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE	38
4.	ANALISI DELLA RSL PER AMBITI DI STUDIO – MODELLI DI INPUT	46
4.1.	ARIANO FERRARESE	56
4.2.	ITALBA-MASSENZATICA	58
4.3.	MONTICELLI	60
4.4.	MESOLA.....	62
4.5.	BOSCO MESOLA.....	64
4.6.	SANTA GIUSTINA-ALBERAZZO	66
5.	SINTESI DEI RISULTATI – MODELLI DI OUTPUT.....	68
5.1.	ARIANO FERRARESE	68
5.2.	ITALBA MASSENZATICA	70
5.3.	MONTICELLI	72
5.4.	MESOLA.....	74
5.5.	BOSCO MESOLA.....	76
5.6.	SANTA GIUSTINA – ALBERAZZO	78
5.7.	CALCOLO DEGLI HSM E SINTESI RISULTATI.....	79
6.	CARTE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE	83
6.1.	CARTA IN TERMINI DI F.P.G.A.....	84
6.2.	CARTE IN TERMINI DI F.A.....	85
6.3.	CARTE IN TERMINI DI F.H.	86
6.4.	CARTE DELLA DISTRIBUZIONE SUL TERRITORIO DEI VALORI DI HSM	87
7.	ANALISI DELLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE E CALCOLO INDICE DI LIQUEFAZIONE .	90
7.1.	METODO DI ANALISI	91
7.2.	CARTA DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE.....	99
8.	CALCOLO DEI CEDIMENTI POSTSISMICI NEI TERRENI COESIVI SOFFICI.....	101

1. INTRODUZIONE

Su incarico dell'amministrazione comunale di Mesola si redige lo studio di Microzonazione sismica di terzo livello, di cui all'O.C.D.P.C. 293/2015 e D.C.D.P.C. del 14 dicembre 2015 (Determinazione N°1153 Registro Generale del 12/10/2021 Registro del Settore N°331 del 12/10/2021 – CIG: ZCC33481D2 e CUP: F42C21000200002).

Le attività di microzonazione sismica nel territorio regionale sono regolate da specifici indirizzi approvati con Delibera di Assemblea Legislativa n. 112/2007 e aggiornati con Delibera di Giunta Regionale n. 2193/2015 e Delibera di Giunta Regionale n. 630/2019 (Allegato 4).

In particolare per i comuni caratterizzati da una pericolosità sismica a_g inferiore a 0,125g, come il comune di Mesola, si fa riferimento alla Delibera Num. 2245 del 27/12/2018 Approvazione dei criteri per la realizzazione di studi di micro zonazione sismica nei comuni caratterizzati da una pericolosità sismica a_g inferiore a 0,125g, in attuazione dell'Art. 8 della L.R. n. 19/2008. Approvazione Allegati A1 e A2.

Questo studio di Microzonazione sismica di terzo livello viene realizzato con i fondi attribuiti con la Delibera della Giunta Regionale del 26 aprile 2021, N. 566 “Approvazione dei criteri per l'attribuzione, la concessione e la liquidazione di contributi per studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza nei comuni caratterizzati da una pericolosità sismica a_g inferiore a 0,125g”.

Il lavoro è basato sulla Microzonazione **sismica di 2 livello e analisi della Condizione Limite per l'emergenza (CLE)**, di cui all'O.C.D.P.C. 293/2015 e D.C.D.P.C. del 14 dicembre 2015, con Determinazione N°806 Registro Generale del 18/07/2019 Registro del Settore N°271 del 18/07/2019 e **validata in data 14 ottobre 2020**.

Gli studi di microzonazione sismica hanno l'obiettivo di provare a prevedere le alterazioni che lo scuotimento sismico può indurre in superficie, restituendo informazioni utili per il governo del territorio, per la progettazione, per la pianificazione per l'emergenza e per la ricostruzione post sisma. Nella pianificazione territoriale, in funzione delle varie scale e dei vari livelli di intervento, gli studi di microzonazione sismica sono condotti su quelle aree per le quali il quadro normativo consente o prevede l'uso a scopo edificatorio o per infrastrutture, la loro potenziale trasformazione a tali fini, o ne preveda l'uso ai fini di protezione civile.

Gli studi di microzonazione sismica sono di fondamentale importanza nella pianificazione al fine di:

- orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti;
- definire gli interventi ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento;
- stabilire orientamenti e modalità di intervento nelle aree urbanizzate;
- definire priorità di intervento.

Tutto ciò è oggetto degli studi di microzonazione sismica, attraverso i quali è possibile individuare e caratterizzare le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale e le zone soggette a instabilità, quali frane, rotture della superficie per faglie e liquefazioni dinamiche del terreno.

Nella pianificazione d'emergenza, sia di livello comunale che provinciale, gli studi di microzonazione sismica consentono una migliore e consapevole individuazione degli elementi strategici di un piano di emergenza ed in generale delle risorse di protezione civile.

La conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

- scegliere aree e strutture di emergenza ed edifici strategici in zone stabili;
- individuare, in caso di collasso, i tratti “critici” delle infrastrutture viarie e di servizio e le opere rilevanti per le quali potrebbero essere necessarie specifiche valutazioni di sicurezza.

Nella fase della ricostruzione la microzonazione sismica:

- contribuisce a scegliere le aree per le abitazioni temporanee;
- fornisce elementi ai tecnici e amministratori, sull'opportunità di ricostruire gli edifici non agibili;
- contribuisce a scegliere nuove aree edificabili.

Nella progettazione di nuove opere o di interventi su opere esistenti, gli studi di microzonazione sismica evidenziano la presenza di fenomeni di possibile amplificazione dello scuotimento legati alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area e di fenomeni di instabilità e deformazione permanente attivati dal sisma. Gli studi di microzonazione sismica, quindi, possono offrire elementi conoscitivi utili per la progettazione di opere, con differente incisività in funzione del livello di approfondimento e delle caratteristiche delle opere stesse, indirizzando alla scelta delle indagini di dettaglio.

Lo studio di microzonazione sismica è uno strumento conoscitivo dalle diverse potenzialità, che ha costi differenti in funzione del livello di approfondimento che si vuole raggiungere:

PRIMO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO:

- Individua le aree suscettibili di effetti locali in cui effettuare le successive indagini.
- Definisce il tipo di effetti attesi.
- Indica, per ogni area, il livello di approfondimento necessario.
- Descrive le caratteristiche delle unità geologiche del sottosuolo, in termini di litologia, stratigrafia, tettonica e geometria per definire il modello geologico di base per la MS.

SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO:

- Conferma delle condizioni di pericolosità indicate dal precedente livello di approfondimento o eventuale nuova perimetrazione delle aree in cui effettuare la MS.
- Suddivisione dettagliata del territorio in base all'amplificazione attesa.
- Conferma o migliore definizione delle aree, indicate dal livello di approfondimento precedente, in cui si ritengono necessari approfondimenti di terzo livello e indicazione delle indagini e analisi da effettuare.

TERZO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO:

- Conferma delle condizioni di pericolosità indicate dai precedenti livelli di approfondimento ed eventuale nuova perimetrazione delle aree in cui effettuare la MS.
- Valutazione più approfondita della RSL, in termini di amplificazione e/o stima degli indici di rischio, nelle seguenti situazioni:
 - a) aree soggette a liquefazione e densificazione;
 - b) aree instabili e potenzialmente instabili;
 - c) aree in cui le coperture hanno spessore fortemente variabile, come ad esempio nelle aree pedemontane e di fondovalle a ridosso dei versanti; in tali condizioni sono raccomandate analisi bidimensionali;
 - d) aree suscettibili di effetti differenziali (zone di contatto laterale tra litotipi con caratteristiche fisico – meccaniche molto diverse, zone di faglia attiva e capace, zone con cavità sepolte).

Questo livello di analisi è finalizzato a valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale delle aree instabili e potenzialmente instabili, di quelle soggette a liquefazione e densificazione sempre ai fini della redazione della carta di microzonazione.

Le modalità tecniche di esecuzione e di applicazione della microzonazione sismica sul territorio italiano sono definite dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica", approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome.

1.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il comune di Mesola è compreso nella seguente cartografia:

- Scala 1: 50.000: Foglio 187 Codigoro.

- Scala 1: 25.000: Foglio 187 SE Goro, Foglio 187 SO Codigoro, Foglio 187 NO Serravalle,.

Il comune di Mesola confina a nord con il Po di Goro, ad est con il Comune di Goro, a sud e sud ovest con il Comune di Codigoro, a nord ovest con il comune di Jolanda di Savoia.

In **FIGURA 1.1** si riporta il confino territoriale del comune di Mesola, in provincia di Ferrara.



Figura 1-1 perimetro del territorio comunale di Mesola

1.2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- “Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2”, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), da qui in avanti “Standard MS 4.2”.
- “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”, approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008) e successive modifiche e integrazioni (AA.VV., 2011), da qui in avanti “ICMS”.
- Delibera Assemblea Legislativa n°112/2007 della Regione Emilia Romagna “Atto di Indirizzo e coordinamento tecnico” per gli studi di microzonizzazione sismica.
- Deliberazione della Giunta della Regione Emilia Romagna n. 2193/2015 "Approvazione aggiornamento dell'atto di 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. 112.
- Deliberazione della Giunta della Regione Emilia Romagna n. 630/2019 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017).
- Deliberazione della Giunta Regionale 12 aprile 2021, N. 476 Aggiornamento dell' "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)" di cui alla deliberazione della Giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630
- Deliberazione della Giunta Regionale 26 aprile 2021, N. 566 “Approvazione dei criteri per l'attribuzione, la concessione e la liquidazione di contributi per studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza nei comuni caratterizzati da una pericolosità sismica a_g inferiore a 0,125g”.
- Deliberazione della Giunta della Regione Emilia Romagna n. 2245/2018 “Approvazione dei criteri per la realizzazione di studi di microzonazione sismica nei comuni caratterizzati da una pericolosità sismica A_g inferiore a 0,125g in attuazione dell'art. 8 della L.R. N. 19/2008, approvazione allegati A1 e A2.”
- L.R. 30/10/2008 n. 19 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”
- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 14 gennaio 2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”, pubblicato sulla G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, suppl. ord. n. 30, che entrano in vigore il 6 marzo 2008.
- Decreto del Ministero e dei Trasporti 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni”, pubblicato sulla G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018, suppl. ord. n. 8.

2. NUOVA PERIMETRAZIONE DELLE AREE IN CUI EFFETTUARE LA MS: AMBITI DI INTERESSE DEL PUG

La microzonazione sismica (MS) viene richiesta nelle aree urbanizzate, negli agglomerati in territorio rurale di dimensioni significative, nelle aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche e lungo le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali di nuova previsione. Le aree in cui realizzare la microzonazione sismica sono state fornite dall'amministrazione comunale. I nuovi perimetri degli ambiti di interesse sui quali verrà realizzata la Microzonazione sismica di III Livello sono dunque gli stessi sui quali si svilupperà il PUG del comune di Mesola, chiamati "aree di interesse per il PUG".

I nuovi ambiti dunque sono stati modificati rispetto a quelli forniti per la realizzazione del II Livello di approfondimento e sono stati ridotti.

Gli ambiti denominati "aree di interesse per il PUG" sui quali verrà sviluppata la Microzonazione Sismica di terzo livello sono riportate nelle seguenti immagini di **FIGURA 2.1, 2.2., 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7.**

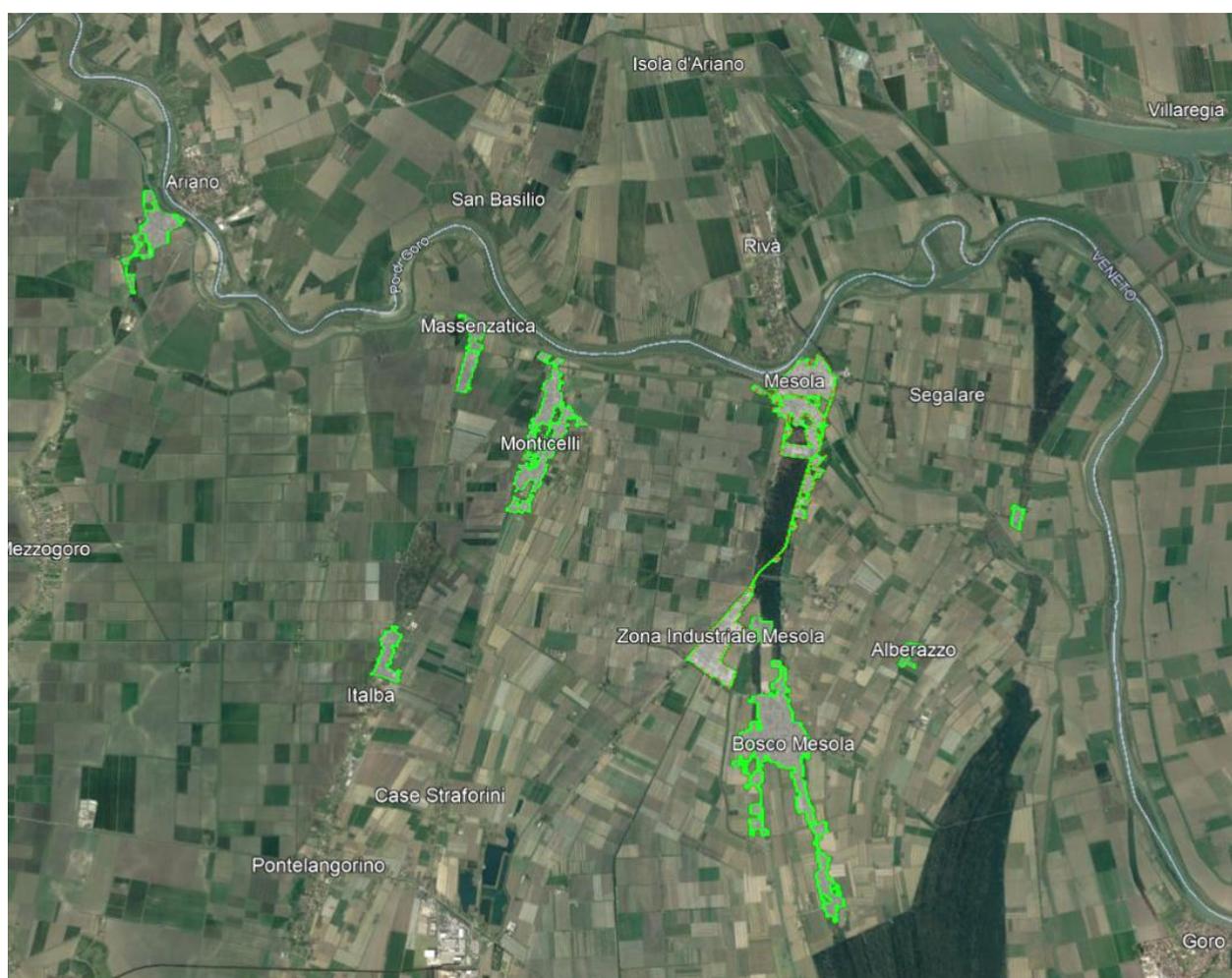


Figura 2-1 *distribuzione degli ambiti di interesse del PUG nel territorio comunale*



Figura 2-2 ARIANO FERRARESE



Figura 2-3 ITALBA



Figura 2-4 MASSENZATICA E MONTICELLI



Figura 2-5 BOSCO MESOLA



Figura 2-6 MESOLA



Figura 2-7 ALBERAZZO E SANTA GIUSTINA

3. ELEMENTI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE PIÙ APPROFONDIRITA DELLA RSL

La finalità del terzo livello di approfondimento deve confermare o meno, le condizioni di pericolosità indicate dai precedenti livelli di approfondimento.

Questa valutazione deve avvenire mediante uno studio di risposta sismica locale, in modo da pervenire ad una più approfondita determinazione dei fattori di amplificazione, con cui poi procedere alla stima degli indici di rischio, che nel comune di Mesola interessano, sulla base dei precedenti livelli di micro zonazione sismica, le aree soggette a liquefazione e densificazione.

Negli studi precedenti era emerso la presenza diffusa dei caratteri predisponenti alla liquefazione delle sabbie, in quanto presenti in affioramento quasi ovunque sabbie limose di battigia sciolte, di deposizione recente, tardo olocenica, sature di acqua di falda, quasi sempre sub affiorante.

Questo livello di analisi è quindi finalizzato a valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale delle aree potenzialmente soggette a liquefazione, andando ad approfondire gli studi sulle cause scatenanti l'effetto di sito della liquefazione delle sabbie sature

Gli ambiti in cui sono presenti criticità geologiche che richiedono il terzo livello di approfondimento erano già state individuate attraverso il primo livello di analisi, nella Carta delle aree suscettibili di effetti locali o delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).

Per ogni ambito o macroarea di interesse per il PUG si svilupperà un calcolo della funzione di amplificazione attraverso l'analisi della risposta sismica locale RSL.

La funzione di amplificazione di un sito fornisce una chiara ed efficace rappresentazione dell'effetto "filtrante" di un deposito di terreno sulle onde sismiche. Essa mette in evidenza in quale campo di frequenze la presenza del terreno può indurre effetti significativi di amplificazione del moto sismico incidente o, viceversa, se tali effetti possano addirittura tradursi in un'attenuazione delle ampiezze in superficie.

La conoscenza della sola funzione di amplificazione non è comunque sufficiente per determinare le caratteristiche del moto sismico alla superficie di un deposito. In termini applicativi, scopo finale di un'analisi di risposta sismica locale è infatti quello di disporre di uno spettro di risposta dell'accelerazione (associato ad un terremoto presunto ed ad un dato fattore di smorzamento strutturale), che includa realisticamente l'effetto di amplificazione del sottosuolo. Ciò premesso la funzione di amplificazione (o meglio la funzione di trasferimento) rappresenta comunque un indispensabile elemento per determinare il moto in superficie. Si riporta in **FIGURA 3.1**. lo schema del processo che porta alla determinazione del moto sismico alla superficie di un deposito di terreno su basamento roccioso, a cui è applicata l'eccitazione sismica rappresentata, anziché da un'onda armonica stazionaria, da un moto irregolare come nel caso di un sisma reale.

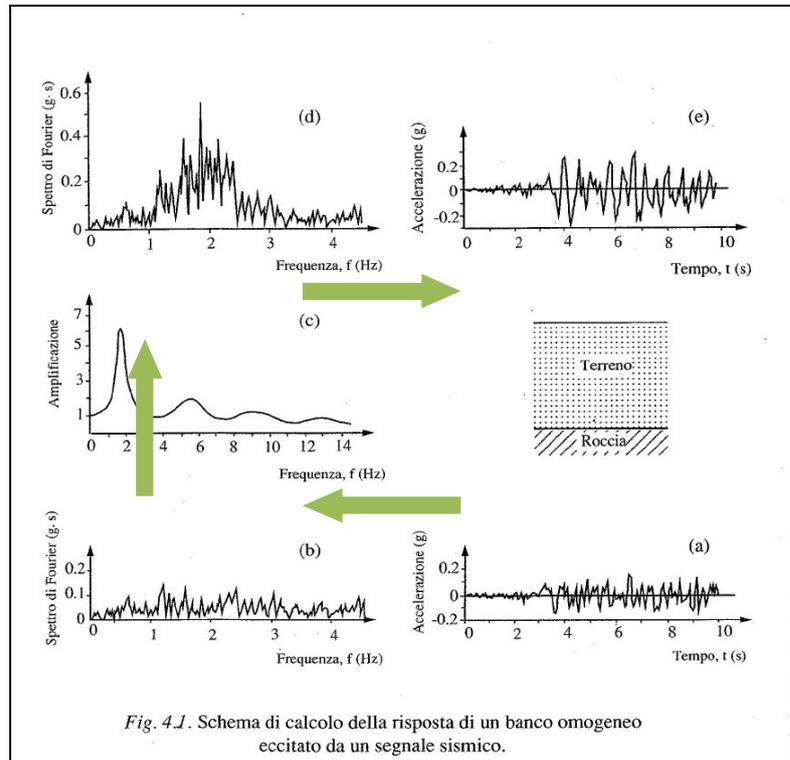


Figura 3-1

Per procedere a questo tipo di studio serve:

- modello geologico stratigrafico di dettaglio dei primi 30m/40m di terreno;
- profilo di V_s di dettaglio dei primi 30m/40m;
- profilo di V_s profondo fino al bedrock sismico;
- modello geologico stratigrafico di dettaglio fino al bedrock sismico;
- curve sitespecifiche di decadimento del modulo G_0 , espresse attraverso il rapporto G/G_0 , e curve di smorzamento D ricavati da prove di colonna risonante, o prove triassiali cicliche, per i terreni campionati nei primi 30m/40m;
- curve bibliografiche idonee di G_0 e D , da attribuire ai terreni profondi fino al bedrock sismico.
- gruppo di 7 accelerogrammi spettro compatibili per la definizione del moto sismico al bedrock.

I dati da ricercare sono evidenziati nei paragrafi successivi.

3.1. INDAGINI GEOLOGICHE E MODELLI STRATIGRAFICI

Nel territorio comunale di Mesola sono presenti numerose tipologie di indagini geognostiche, prese in considerazione ed analizzate, per le finalità del presente lavoro di microzonazione sismica. Esse sono raccolte e archiviate nel database prodotto per la micro zonazione sismica di II livello approvata nel 2020; la loro ubicazione è riportata nella carta delle indagini.

Le diverse indagini presenti sul territorio comunale sono costituite dunque da sondaggi a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo, per l'eventuale perforazione di pozzi sia per acqua che per idrocarburi, da penetrometrie statiche sia a punta meccanica (CPT) sia a punta elettrica con piezocono ed eventualmente con sismocono (CPTU e SCPTU) e da prove geofisiche da superficie con stendimenti sismici (MASW, Re.Mi., ESAC) e prove a stazione singola (HVSr).

Per la redazione del Terzo livello di approfondimento, si è reso necessario eseguire ulteriori indagini ad integrazione di quelle esistenti, per redigere in modo più completo ed efficaci, le analisi della risposta sismica locale.

3.1.1. ELENCO INDAGINI ESISTENTI

Sono state prese in considerazione ed analizzate tutte le indagini geognostiche della Microzonazione sismica di II Livello del comune di Mesola, consegnata ed approvata nel 2020; tale banca dati è stata poi implementata con le indagini eseguite dallo scrivente dal 2020 fino ad oggi, all'interno del comune e con le apposite indagini eseguite per questo studio di Microzonazione sismica di III livello.

Nella **Tabella 3.1** che segue è indicato il numero delle indagini reperite per la Microzonazione sismica di II Livello del comune di Mesola. Per la loro descrizione si rimanda agli studi di MS di II livello.

	Tipologia di indagine	Numero indagini Banca dati Veronese	Numero indagini bibliografiche	Numero Totale di indagini
PENETROMETRIE E SONDAGGI	CPT	119	155	274
	CPTU	22	32	54
	SCPTU	3	-	3
	SPT	-	20	20
	Sondaggio continuo	-	85	85
	Sondaggio a distruzione	-	17	17
	Pozzi acqua	-	7	7
	Pozzi idrocarburi	-	10	10
	TOTALE	144	326	470

INDAGINI GEOFISICHE	E.S.A.C.	1	-	1
	HVSr	5	6	11
	RE.MI.	-	-	-
	M.A.S.W.	-	-	-
	S.E.V.	-	36	36
	TOTALE	6	42	48

TOTALE INDAGINI MICROZONAZIONE SISMICA II LIVELLO	518
---	-----

Tabella 3-1 N. 518 indagini complessive reperite in banca dati allegate allo studio di MS II livello

Dall'implementazione di questa banca dati per gli studi di MZ di II livello, ad oggi, lo scrivente ha eseguito altre indagini per committenti privati nel territorio comunale. Queste indagini sono state aggiunte alla banca dati costruita nel II livello.

In questi due anni c'è stata una relativa stasi nell'edilizia e nelle opere pubbliche, per cui non risultano essere state fatte altre indagini significative all'interno del territorio comunale.

INDAGINI DAL 2019 AD OGGI	SCPTU	2
	CPTU	6
	TOTALE	8

Tabella 3-2 *indagini bibliografiche aggiunte alla banca dati*

3.1.2. ELENCO NUOVE INDAGINI

Dopo aver raccolto e messo a sistema tutte le indagini geologiche presenti nel territorio comunale, per lo studio di Microzonazione sismica di terzo livello, in particolare per poter procedere allo svolgimento dell'Analisi di risposta Sismica Locale (RSL) per le diverse località, è emersa l'opportunità di procedere alla realizzazione di ulteriori indagini, laddove abbiamo ravvisato esserci una certa lacuna di informazioni.

Gli ambiti di interesse per il PUG sono stati suddivisi in queste porzioni di territorio pseudomogenee per risposta sismica attesa:

- Ariano Ferrarese
- Italba-Massenzatica
- Monticelli
- Mesola
- Bosco Mesola
- Santa Giustina-Alberazzo.

A Bosco Mesola e a Mesola erano già disponibili delle prove SCPTU a 30m, eseguite per gli studi di MZ di II livello. Nelle altre quattro località non erano mai state fatte queste tipologie di indagini.

Per questo nuovo studio sono dunque state realizzate le seguenti nuove indagini: N. 4 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono sismico SCPTU, spinte fino alla profondità di -30,0 m da p.c., eseguite nelle località di Ariano Ferrarese, Massenzatica, Monticelli e Santa Giustina, ove mancavano profili di Vs di dettaglio. Nella località di Ariano Ferrarese è stata realizzata una prova geofisica di superficie ESAC per avere il profilo profondo di velocità delle onde di taglio Vs. Inoltre, nella medesima località, è stato prelevato, in corrispondenza della prova SCPTU, un campione indisturbato di fanghi molli a -3,00 m di profondità da sottoporre ad analisi di laboratorio geotecnico, quali Colonna Risonante, Limiti di Atterberg e aerometria. In **Tabella 3.3** si riportano le prove di nuova realizzazione eseguite per la Microzonazione sismica di terzo livello con il codice di riferimento della prova, la data di esecuzione, le rispettive coordinate geografiche e la località in cui sono state eseguite.

NUOVE INDAGINI III LIVELLO	SCPTU	4
	E.S.A.C.	1
	TOTALE	5

N° indagine	Riferimento	Data	Lat.	Long.	Località
SCPTU1 <i>U186-21</i>	038014P5	17/12/2020	4980230	272344	Via M. Buonarroto, Ariano Ferrarese
SCPTU2 <i>U186-21</i>	038014P5	17/12/2020	4978690	276946	Via Indipendenza, Massenzatica
SCPTU3 <i>U186-21</i>	038014P5	17/12/2020	4977670	277774	Via Rocca, Monticelli
SCPTU4 <i>U186-21</i>	038014P5	17/12/2020	4975910	284368	Piazza Bruno Rossi, Santa Giustina
ESAC	038014P5	15/01/2022	4980290	272353	Via M. Buonarroto, Ariano Ferrarese
Colonna Risonante e prove laboratorio		28/01/2022	4980230	272344	Via M. Buonarroto, Ariano Ferrarese

Tabella 3-3– Penetrometrie, WGS84 fuso 33N

Si riportano di seguito i diagrammi delle resistenze ed i profili di Vs delle quattro nuove prove SCPTU eseguite, che si aggiungono a quelle già disponibili (**FIGURA 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9**).

PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA
DIAGRAMMI DI RESISTENZA

RIF. PROVA:	CPTU n°:
U186-21	CPTU1

COMMITTENTE: Comune di Mesola
CANTIERE: via M. Buonarroti, Ariano Ferrarese (Fe)
DATA: 14/12/2021

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,80
PREFORO (m da p.c.): 0,50

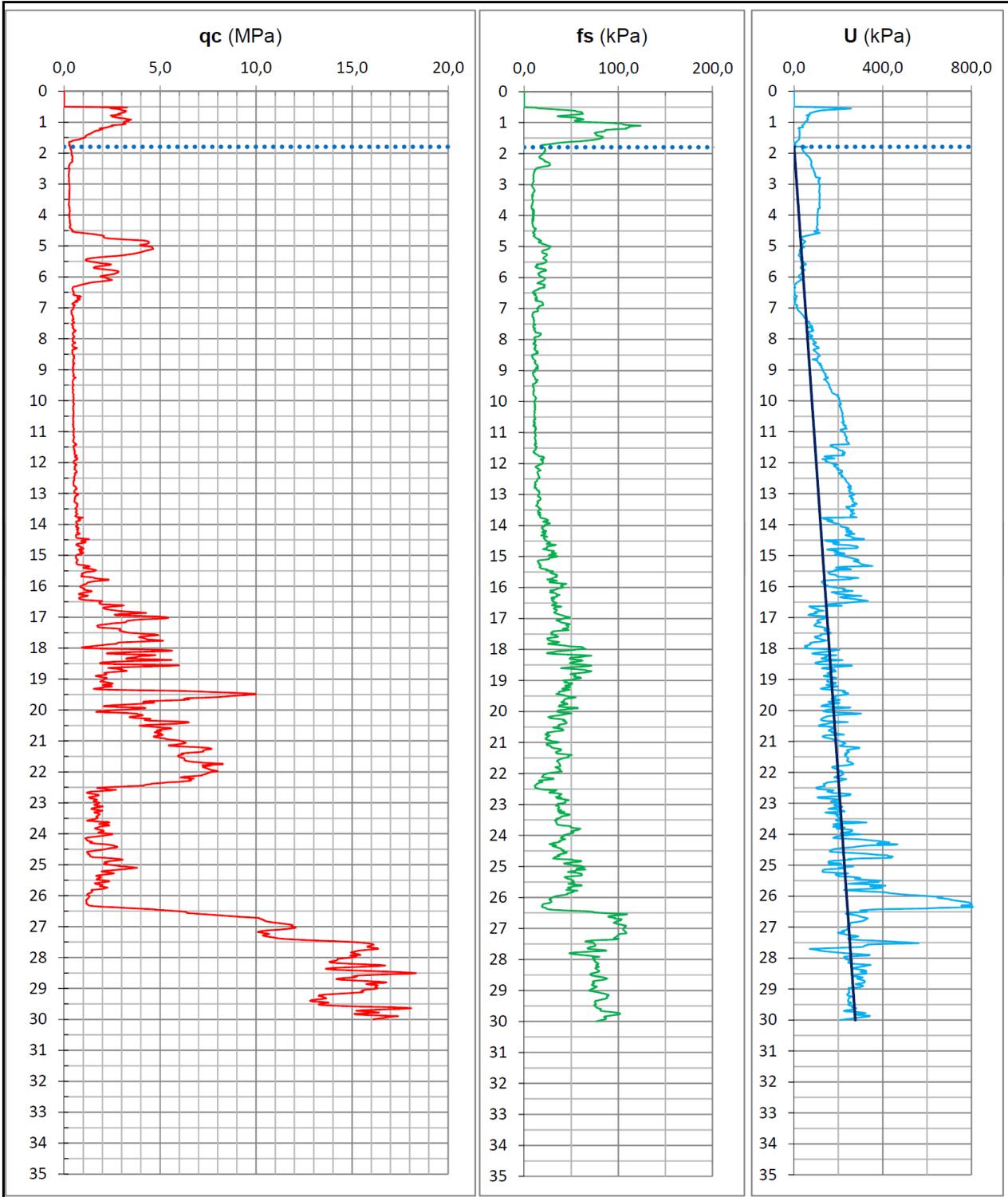


Figura 3-2

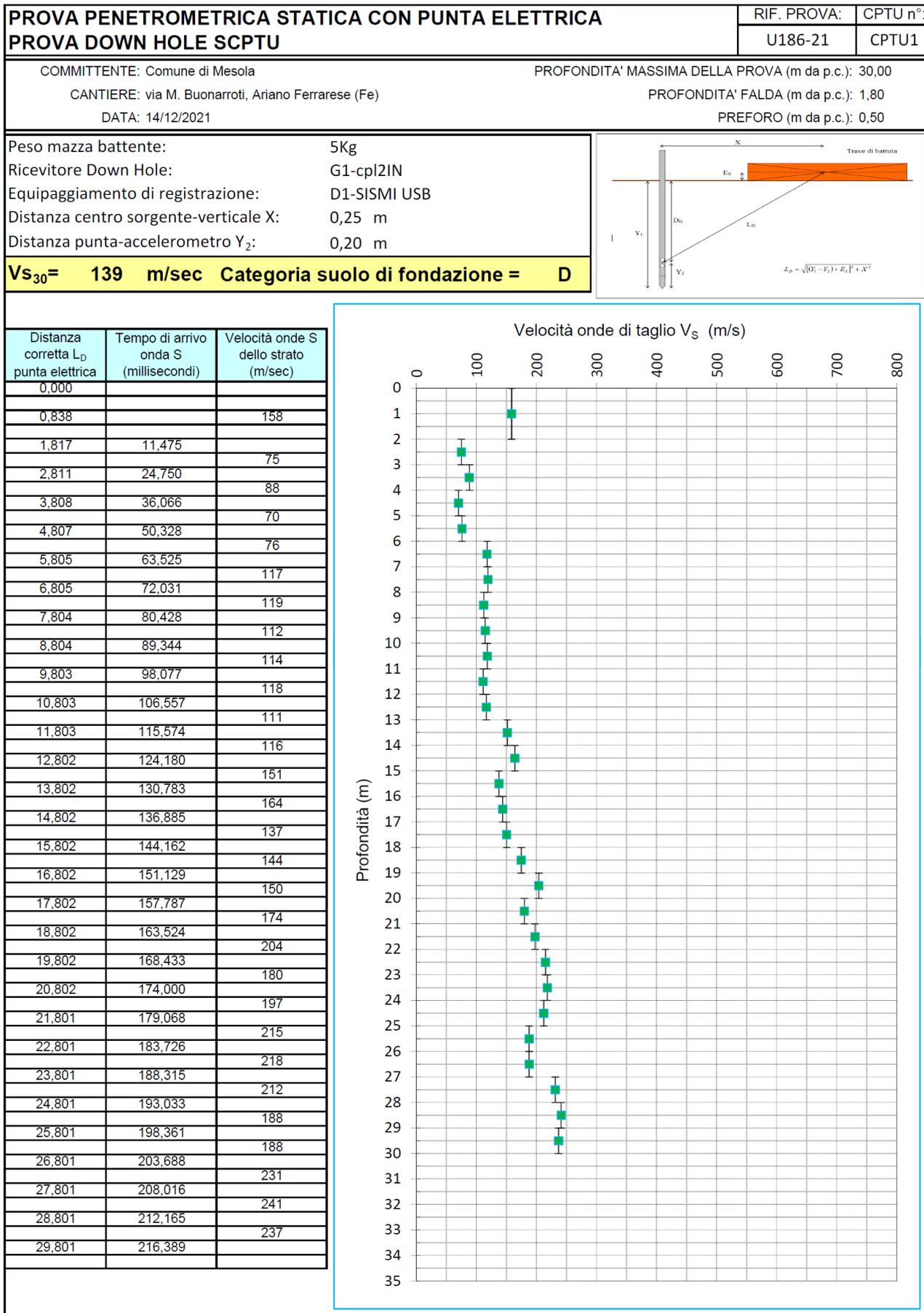


Figura 3-3

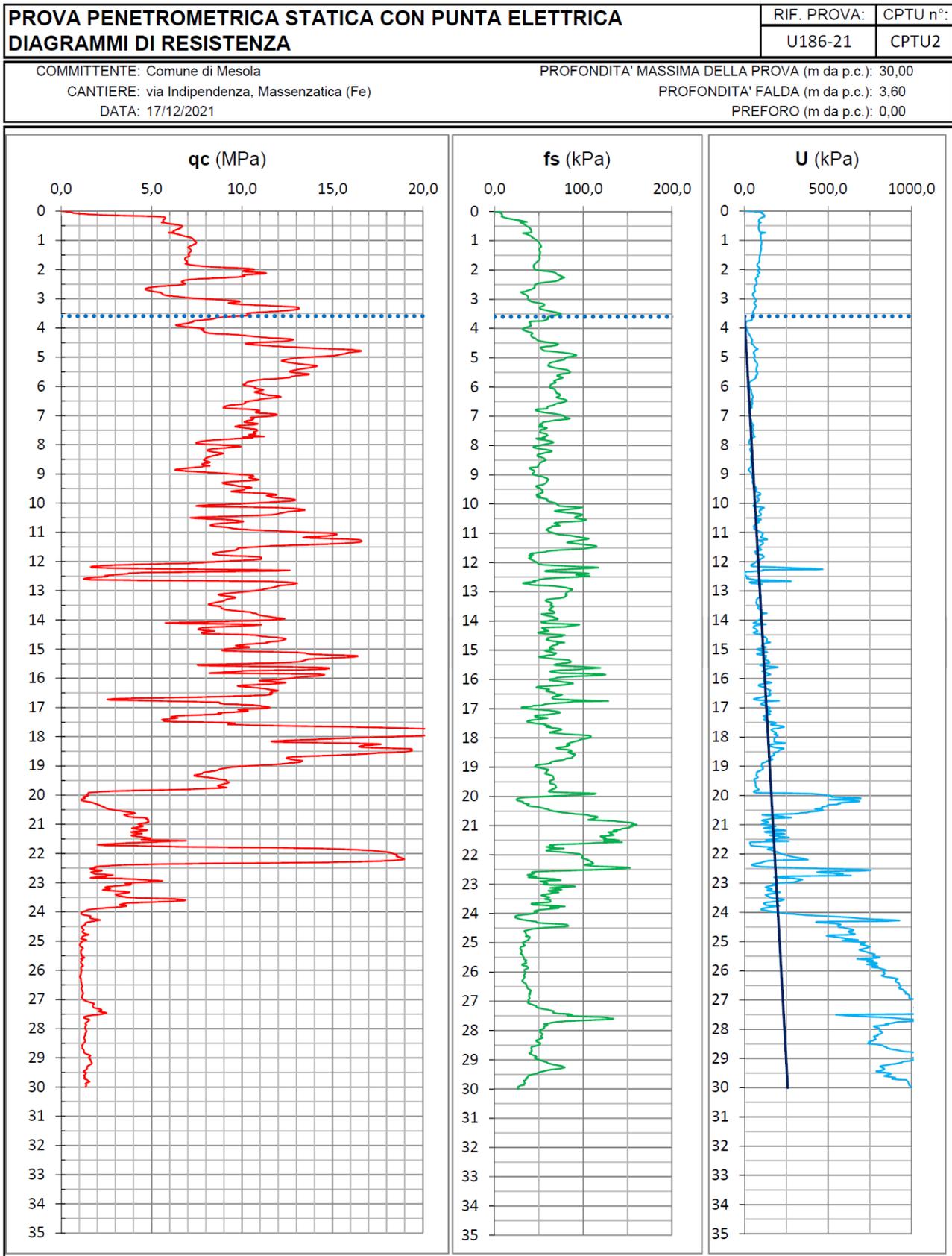


Figura 3-4

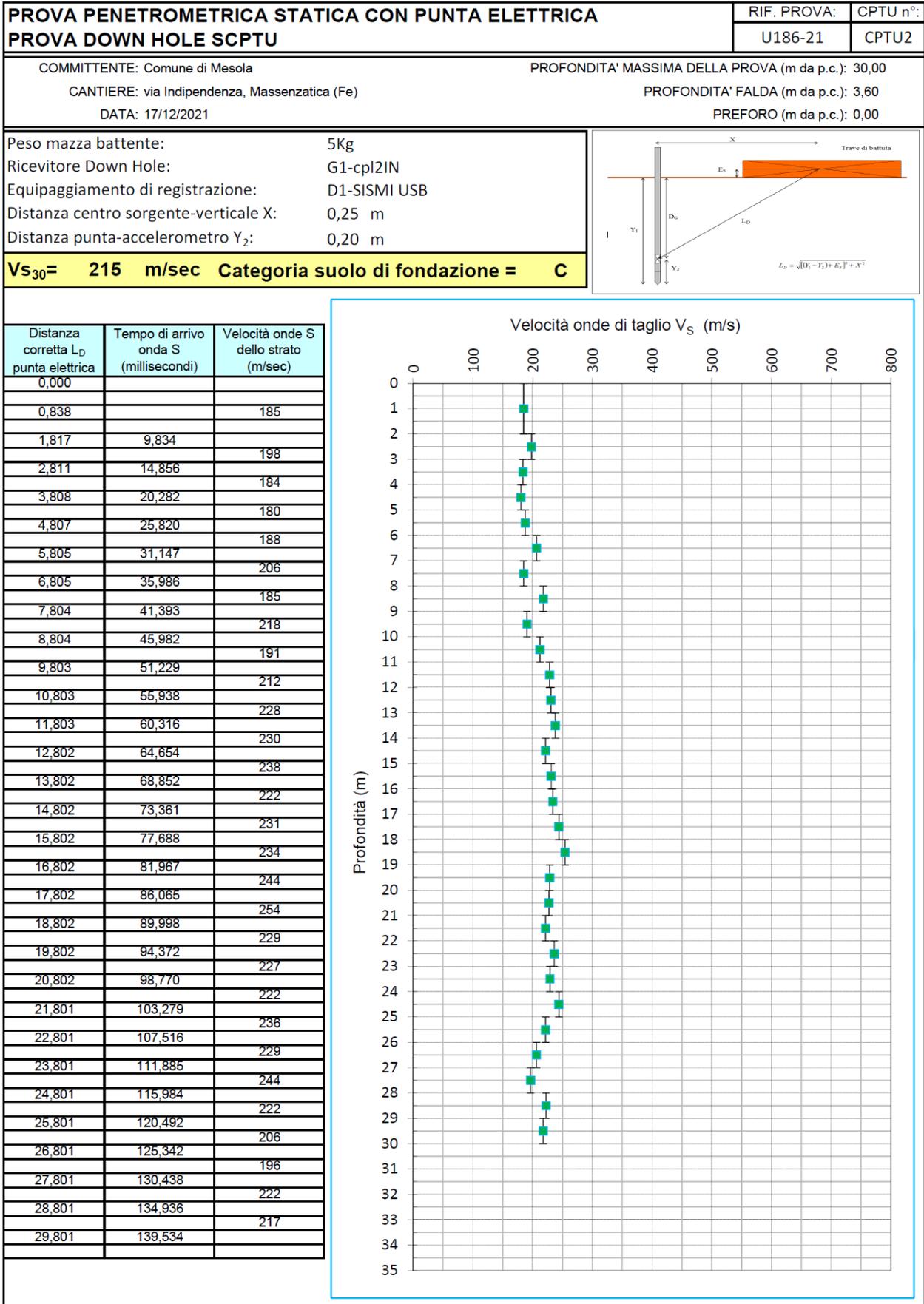


Figura 3-5

PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA
DIAGRAMMI DI RESISTENZA

RIF. PROVA:	CPTU n°:
U186-21	CPTU3

COMMITTENTE: Comune di Mesola
CANTIERE: via Rocca, Monticelli (Fe)
DATA: 17/12/2021

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,60
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,70
PREFORO (m da p.c.): 0,00

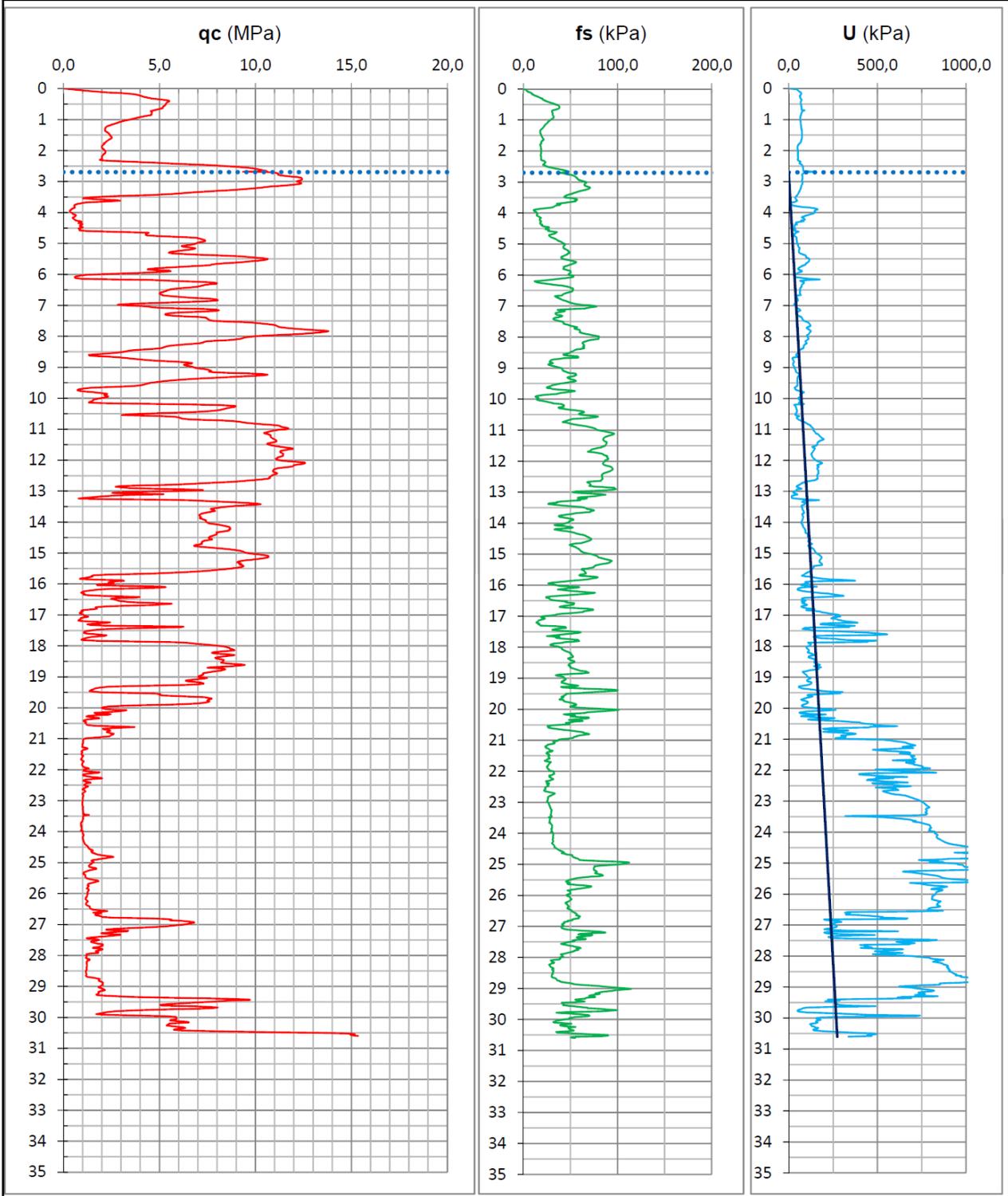


Figura 3-6

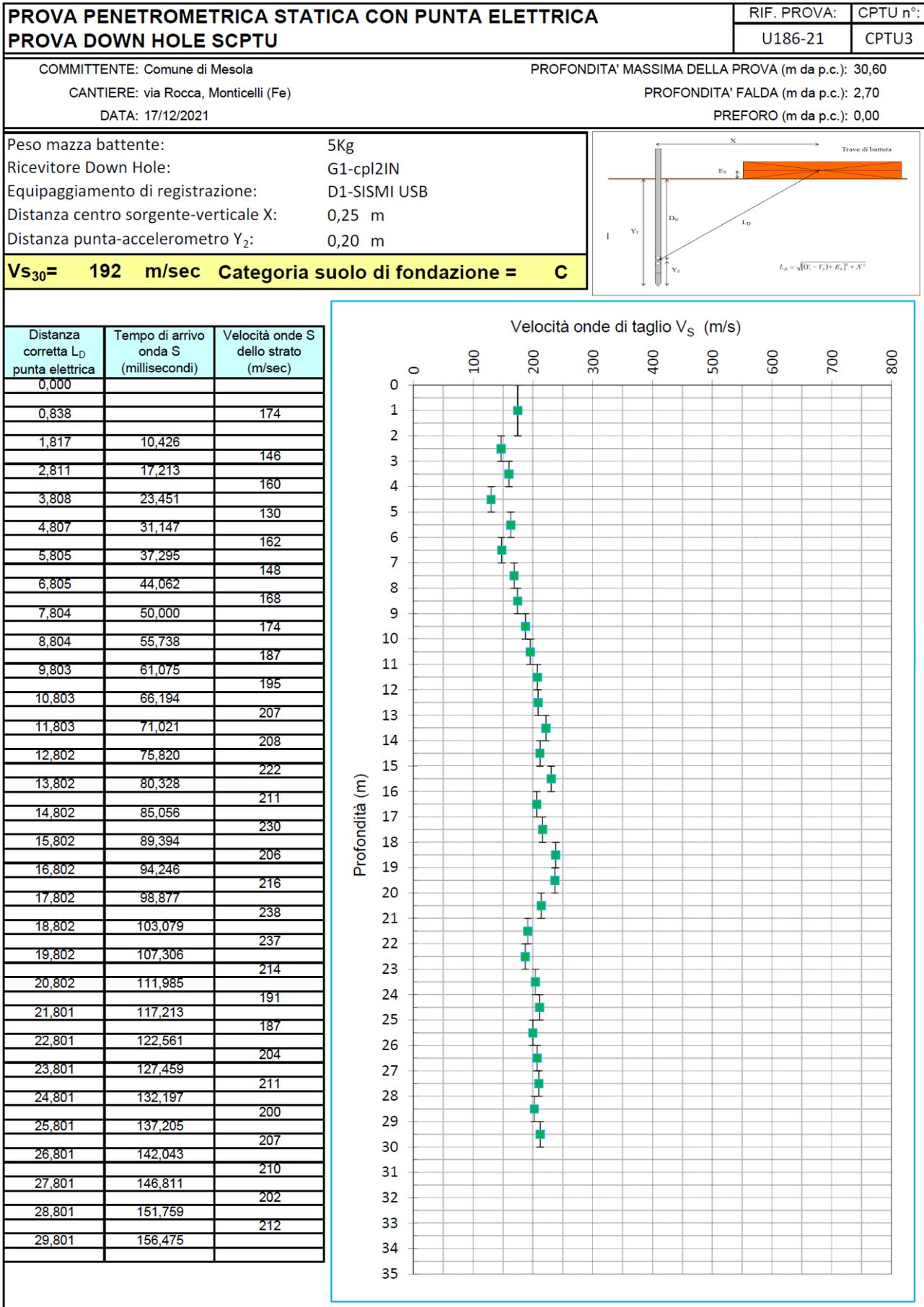


Figura 3-7

PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA
DIAGRAMMI DI RESISTENZA

RIF. PROVA:	CPTU n°:
U186-21	CPTU4

COMMITTENTE: Comune di Mesola
CANTIERE: Piazza Bruno Rossi, Santa Giustina (Fe)
DATA: 17/12/2021

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,30
PREFORO (m da p.c.): 0,00

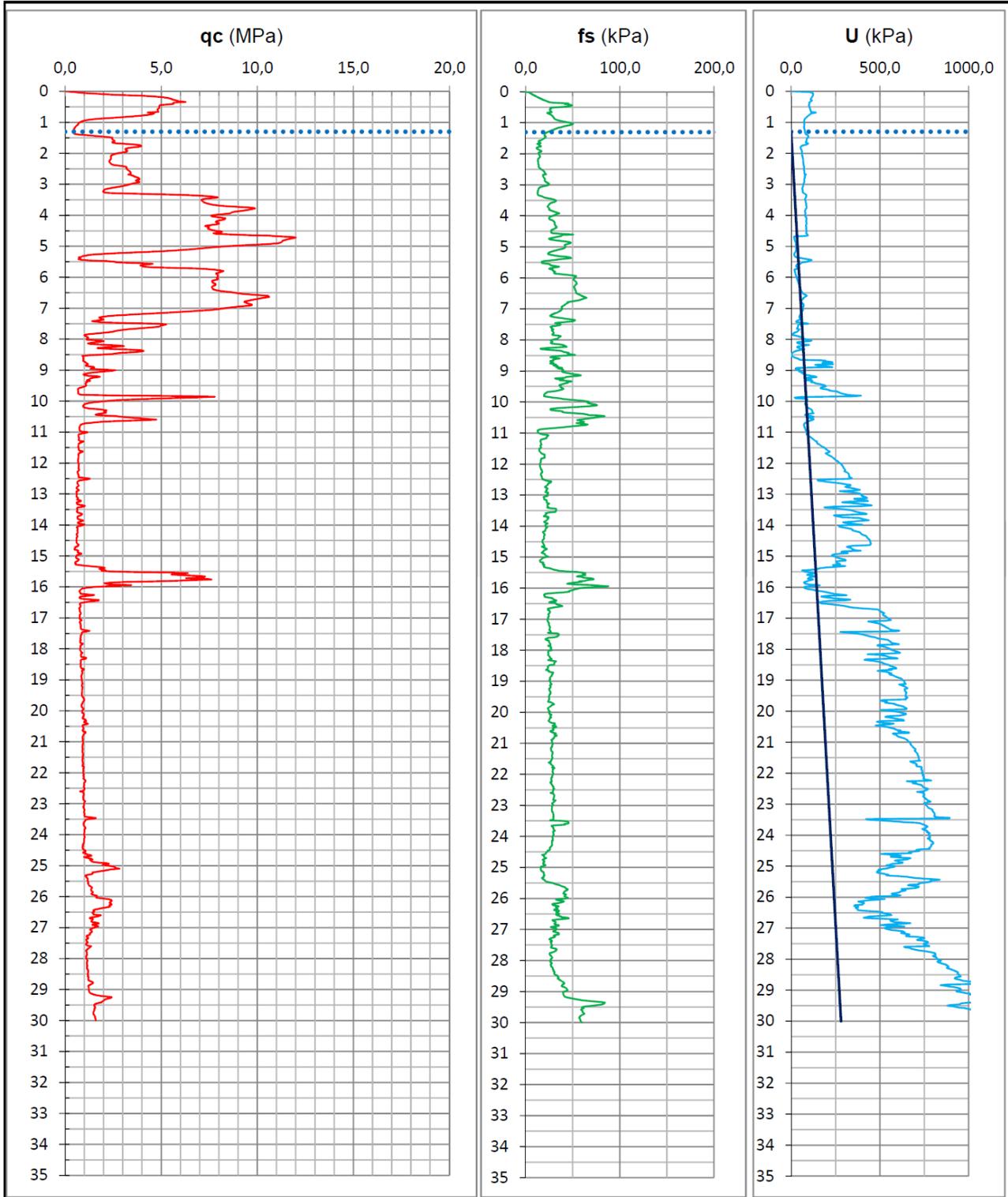


Figura 3-8

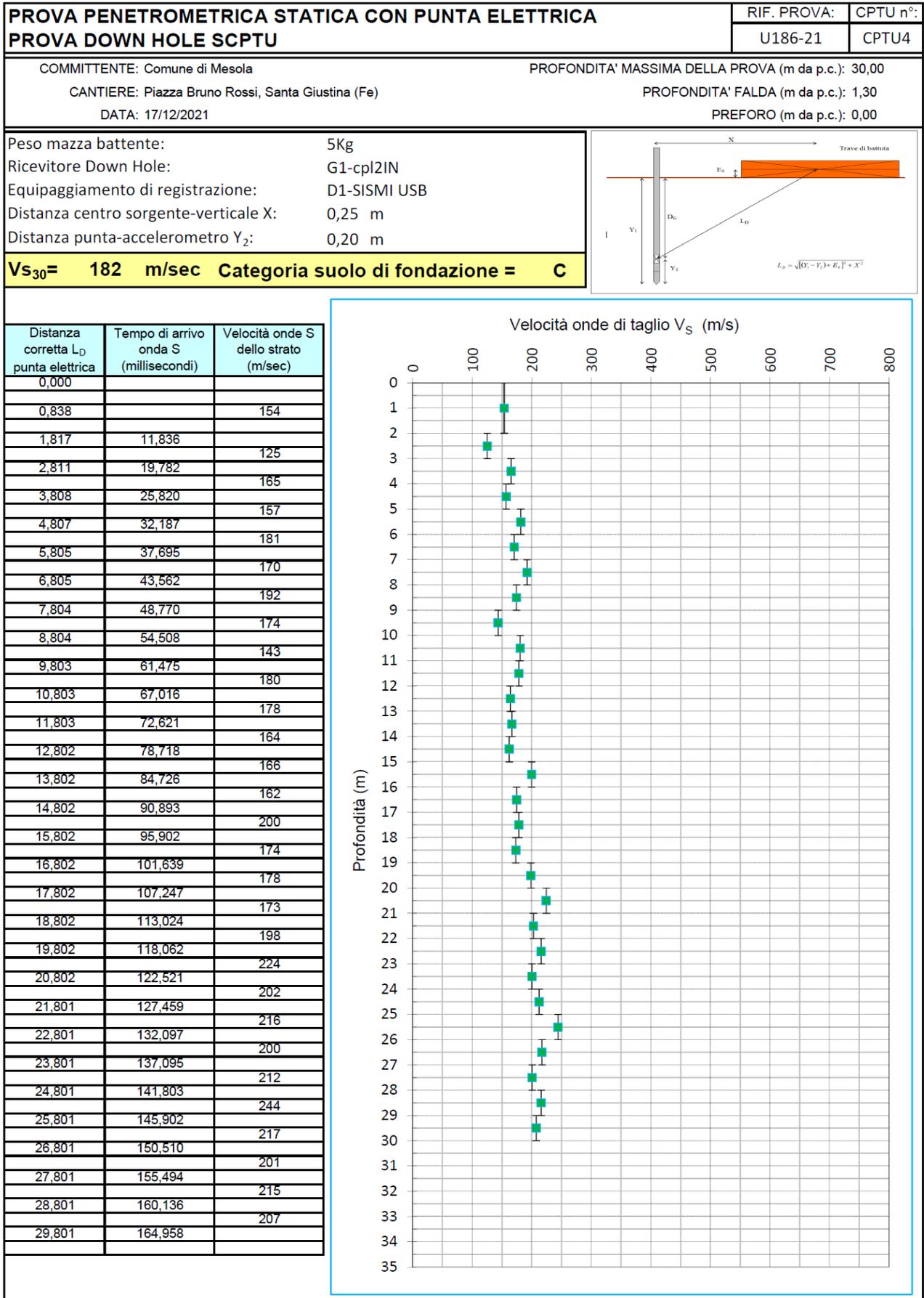


Figura 3-9

In **FIGURA 3.10** si riporta l'ubicazione delle 6 prove SCPTU compressive, tra preesistenti e di nuova realizzazione, utilizzate per le RSL.

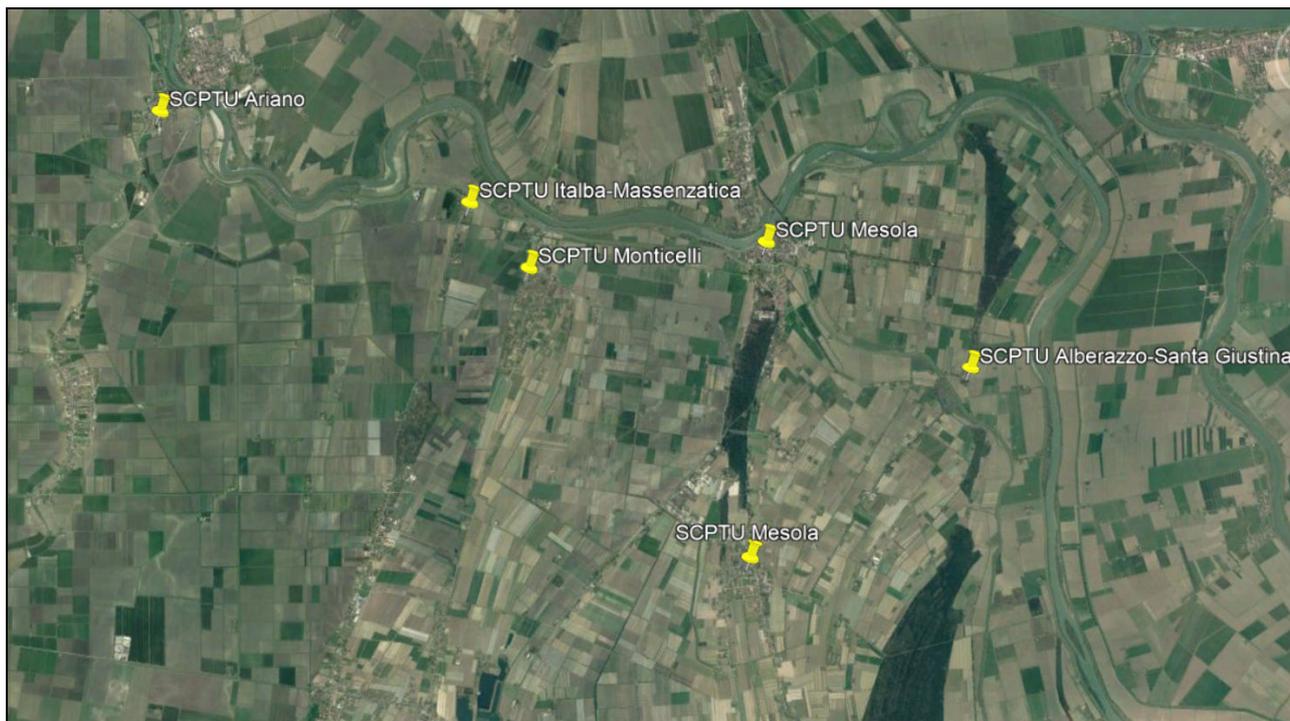


Figura 3-10 – Prove SCPTU nel territorio comunale di Mesola utilizzate per le RSL

In **FIGURA 3.11** si riporta il profilo di Vs della nuova prova ESAC fatta eseguire a Teamgeofisica.ceg del dott. Nasser Abu Zeid ad Ariano Ferrarese.

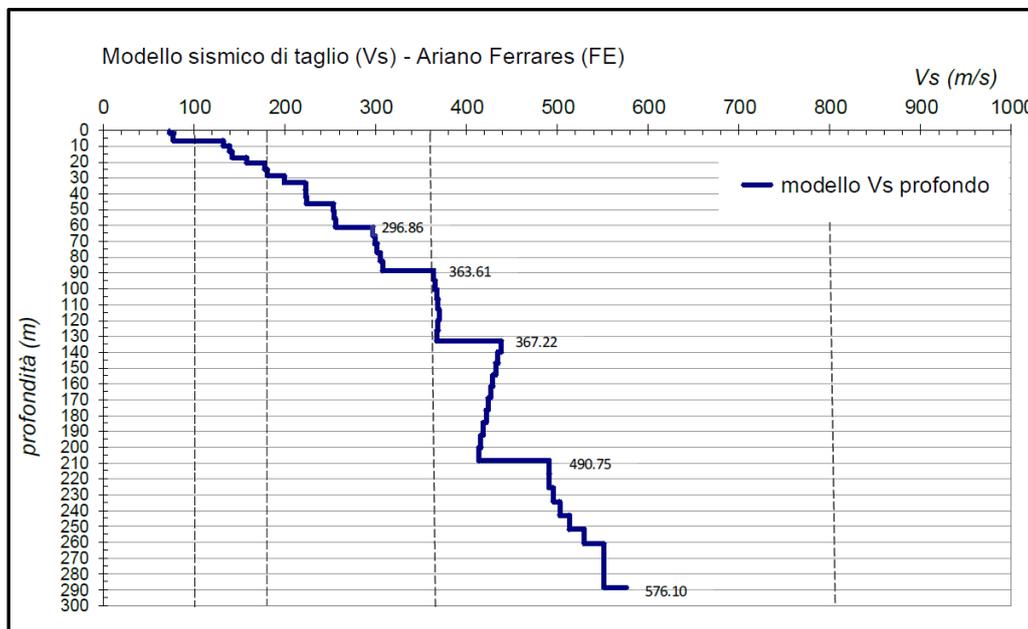


Figura 3-11 – Prova E.S.A.C. eseguita dalla ditta Teamgeofisica.ceg del dott. Nasse Abu Zeid

In **FIGURA 3.12** si riporta l'ubicazione delle prove geofisiche ESAC per il profilo di Vs profondo, sia preesistenti che di nuova realizzazione, utilizzate per le RSL.

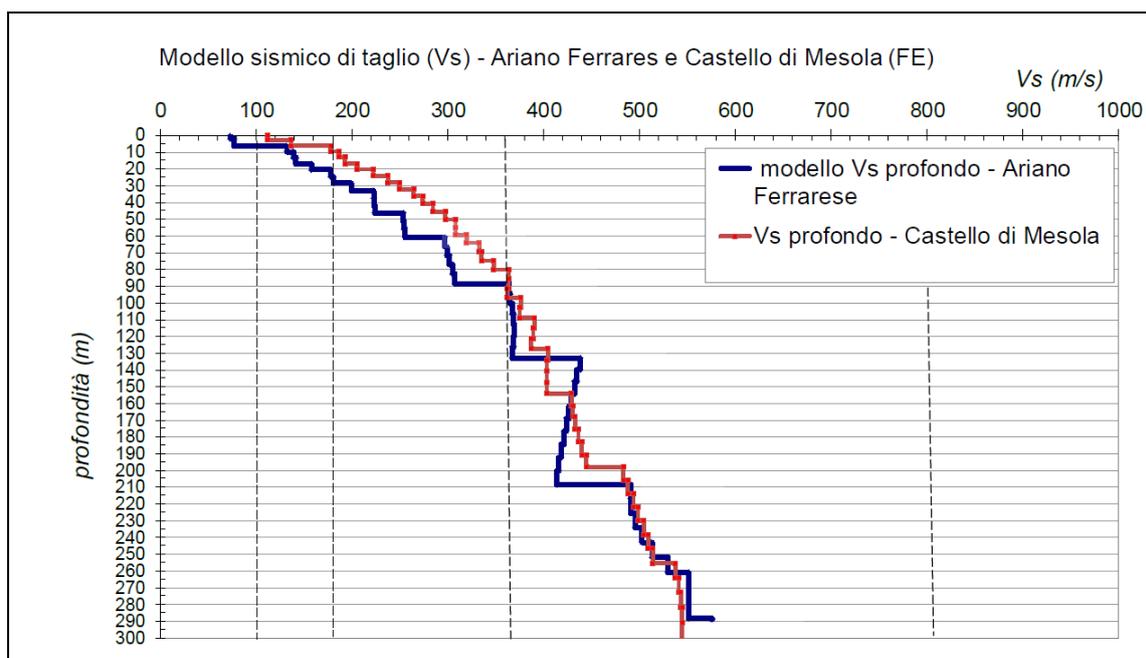
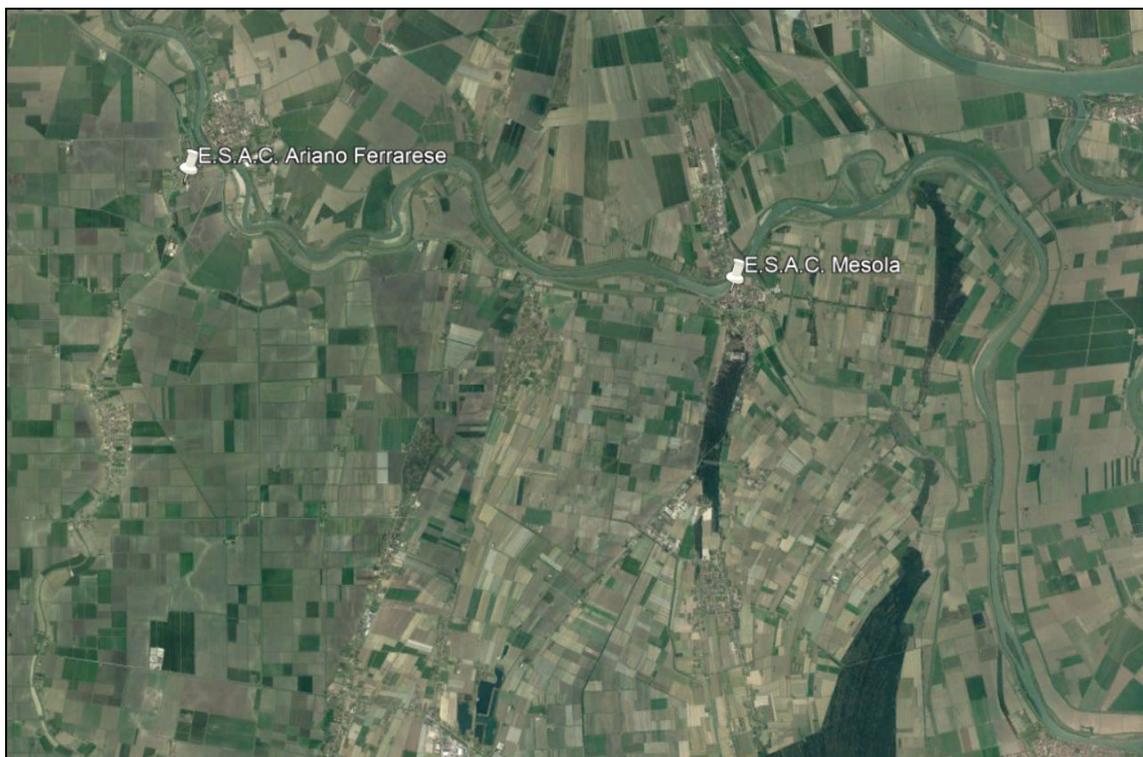


Figura 3-12 – Ubicazione delle prove ESAC utilizzate per i modelli profondi di velocità delle onde di taglio Vs nel territorio comunale di Mesola utilizzate per le RSL e loro sovrapposizione per il confronto.

Nelle **FIGURE 3.13, 3.14, 3.15, 3.16** si riportano anche i certificati del laboratorio geotecnico ISMGEO, per le indagini eseguite un campione indisturbato di terreno prelevato ad Ariano Ferrarese, nei fanghi presenti intorno ai 3 metri di profondità, di cui non si avevano curve bibliografiche che descrivessero il decadimento del modulo G_0 e lo smorzamento D , con l'aumentare delle deformazioni indotte durante la prova di colonna risonante. E' stata eseguita anche la determinazione dei limiti di Atterberg. Si tratta di terreni con un indice di plasticità di circa il 30%. L'umidità naturale è di circa il 60%, molto vicino la limite liquido di questa terra.

Nella **Foto 3.1** e **Foto 3.2** sono testimoniate le fase di prelievo dei campioni indisturbati, analizzati poi in laboratorio.



Foto 3-1.



Foto 3-2.

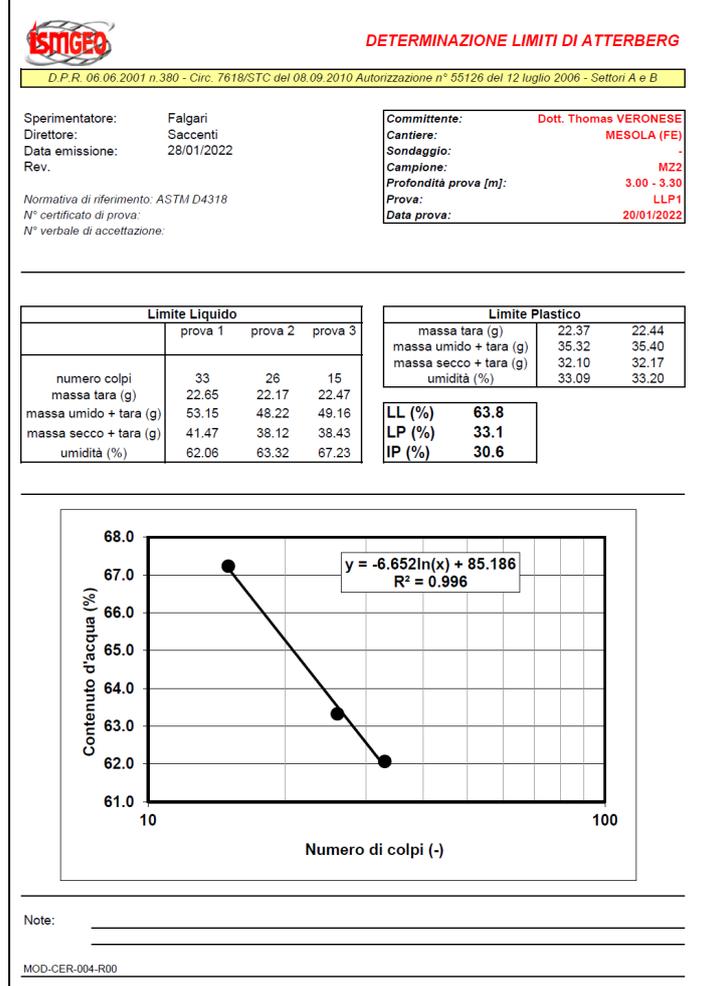
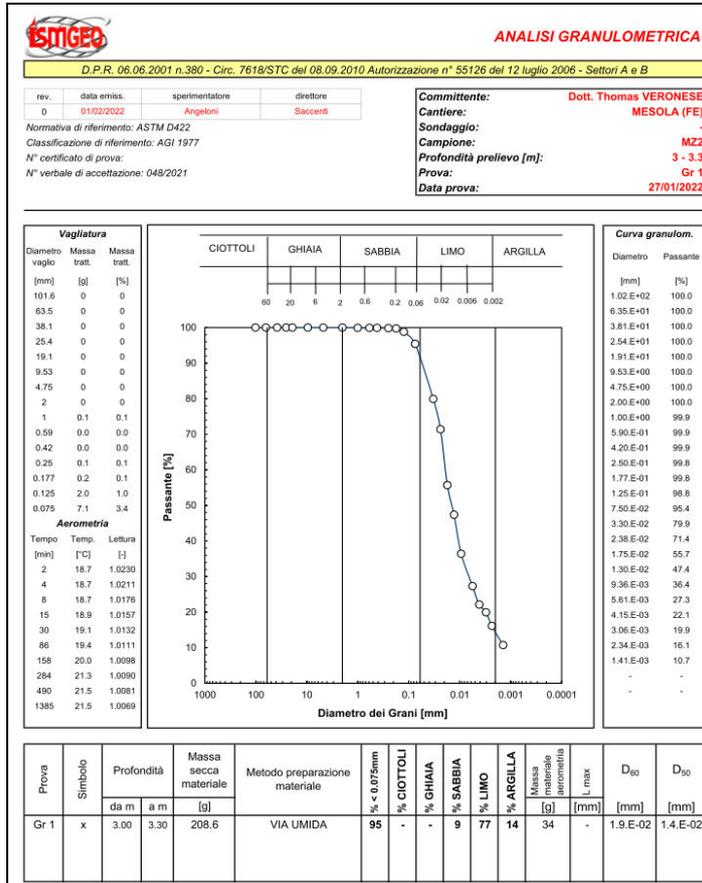


Figura 3-13



Via Pastrengo, 9 - 24068 Seriate (Bg) -
tel. 035 303120 - fax 035 290388 -
Email: ismgeo@ismgeo.it

PROVA DI COLONNA RISONANTE
Foglio 1

Concessione Ministeriale Decreto n° 55126 del 12 luglio 2006 - Settori A, B e C

rev.	data emiss.	sperimentatore	direttore
0	28/01/2022	Angeloni	Saccenti

Normativa di riferimento: ASTM D4015/95

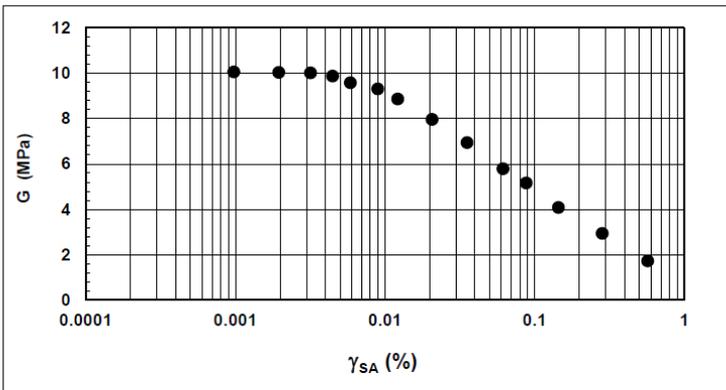
N° certificato di prova:

N° verbale di accettazione: 091/2021

Committente:	Dott Thomas VERONESE
Cantiere:	MESOLA (FE)
Sondaggio:	-
Campione:	MZ2
Profondità prova [m]:	3.18 - 3.28
Prova:	RC
Provino:	1
Data prova:	20/01/2022

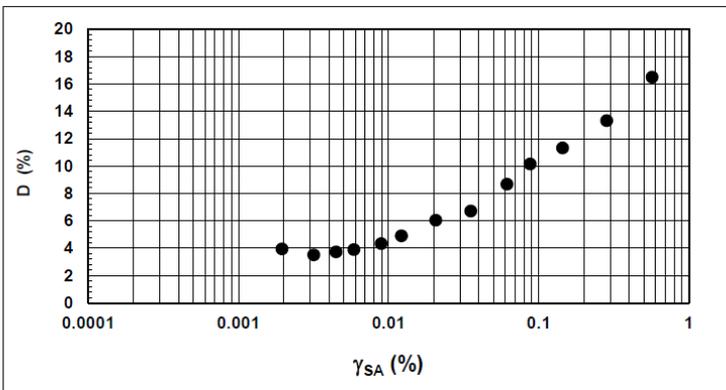
Dati generali dei provini

Dati iniziali				Dati a fine consolidazione										Informazioni generali			
Φ	H	γ_w	w	e	σ'_a	σ'_r	K	B.P.	B	D	H	γ_w	w	e	S	tipo di provino	
mm	mm	kN/m ³	%	-	kPa	kPa	-	kPa	-	mm	mm	kN/m ³	%	-	%	metodo di preparazione	
50.00	102.0	15.34	59.9	1.762	38	38	1.0	300.0	0.93	48.9	100.0	15.90	55.2	1.585	94	INDISTURBATO	
																superficie di appoggio	PIETRA POROSA
																eccitazione	TORSIONALE
																peso specifico (-)	2.700



Legenda:

- Φ = diametro del provino
- H = altezza del provino
- γ_w = peso di volume umido
- w = contenuto d'acqua
- e = indice dei vuoti
- σ' = tensioni efficaci
- K = σ'_r / σ'_a
- B.P. = back pressure
- B = coefficiente di Skempton
- G = Modulo di taglio
- γ_{SA} = def. di taglio in singola ampiezza
- D = Rapporto di smorzamento di taglio
- Subscritto 'a' = assiale
- Subscritto 'r' = radiale
- S = grado di saturazione



Note:

Figura 3-14



Via Pastrengo, 9 - 24068 Seriate (Bg) -
tel. 035 303120 - fax 035 290388 -
Email: ismgeo@ismgeo.it

PROVA DI COLONNA RISONANTE
Foglio 2

Concessione Ministeriale Decreto n° 55126 del 12 luglio 2006 - Settori A, B e C

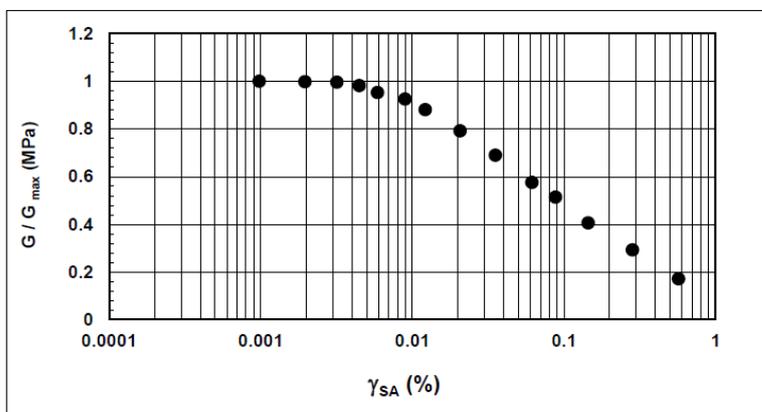
rev.	data emiss.	sperimentatore	direttore
0	28/01/2022	Angeloni	Saccenti

Normativa di riferimento: ASTM D4015/95
N° certificato di prova:
N° verbale di accettazione: 091/2021

Committente: Dott Thomas VERONESE
Cantiere: MESOLA (FE)
Sondaggio: -
Campione: M22
Profondità prova [m]: 3.18 - 3.28
Prova: RC
Provino: 1
Data prova: 20/01/2022

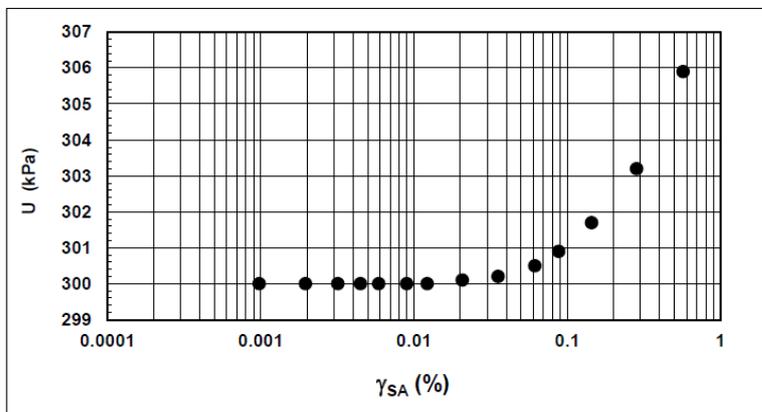
Dati generali dei provini

Dati iniziali				Dati a fine consolidazione											Informazioni generali		
Φ	H	γ_w	w	e	σ'_a	σ'_r	K	B.P.	B	D	H	γ_w	w	e	S	tipo di provino	
mm	mm	kN/m ³	%	-	kPa	kPa	-	kPa	-	mm	mm	kN/m ³	%	-	%	metodo di preparazione	FUSTELLAZIONE
50.00	102.00	15.34	59.9	1.762	38	38	1.0	300.0	0.93	48.9	100.0	15.90	55.2	1.6	94	superficie di appoggio	PIETRA POROSA
																eccitazione	TORSIONALE
																peso specifico	2.700



Legenda:

- Φ = diametro del provino
- H = altezza del provino
- γ_w = peso di volume umido
- w = contenuto d'acqua
- e = indice dei vuoti
- σ' = tensioni efficaci
- K = σ'_r / σ'_a
- B.P. = back pressure
- B = coefficiente di Skempton
- G = Modulo di taglio
- γ_{SA} = def. di taglio in singola ampiezza
- D = Rapporto di smorzamento di taglio
- Subscritto 'a' = assiale
- Subscritto 'r' = radiale
- S = grado di saturazione



Note:

Figura 3-15



Via Pastrengo, 9 - 24068 Seriate (Bg) -
tel. 035 303120 - fax 035 290388 - Email:
ismgeo@ismgeo.it

PROVA DI COLONNA RISONANTE
Foglio 3

Concessione Ministeriale Decreto n° 55126 del 12 luglio 2006 - Settori A, B e C.

rev.	data emiss.	sperimentatore	direttore
0	28/01/2022	Angeloni	Saccenti

Normativa di riferimento: ASTM D4015/95

N° certificato di prova:

N° verbale di accettazione: 091/2021

Committente:	Dott Thomas VERONESE
Cantiere:	MESOLA (FE)
Sondaggio:	-
Campione:	MZ2
Profondità prova [m]:	3.18 - 3.28
Prova:	RC
Provino:	1
Data prova:	20/01/2022

Dati generali dei provini

Dati iniziali					Dati di prova										Informazioni generali	
Φ	H	γ_w	w	e	σ'_a	σ'_r	K	B.P.	B	D	H	γ_w	w	e	tipo di provino	
mm	mm	kN/m ³	%	-	kPa	kPa	-	kPa	-	mm	mm	kN/m ³	%	-	metodo di preparazione	
50.00	102.00	15.34	59.9	1.762	38	38	1.0	300.0	0.93	48.9	100.0	15.90	55.2	1.585	superficie di appoggio	INDISTURBATO
															eccitazione	PIETRA POROSA
																TORSIONALE

Valori numerici

G	G/G _{MAX}	γ	D	U
(MPa)	(-)	(%)	(%)	(kPa)
10.05	1.000	0.00098		300.0
10.03	0.998	0.00196	3.95	300.0
10.01	0.996	0.00319	3.51	300.0
9.88	0.983	0.00448	3.73	300.0
9.58	0.953	0.00590	3.90	300.0
9.31	0.926	0.00897	4.34	300.0
8.86	0.881	0.01220	4.91	300.0
7.96	0.792	0.02067	6.04	300.1
6.94	0.690	0.03540	6.71	300.2
5.79	0.576	0.06152	8.68	300.5
5.16	0.514	0.08796	10.15	300.9
4.08	0.406	0.14448	11.32	301.7
2.94	0.293	0.28371	13.31	303.2
1.72	0.171	0.57078	16.48	305.9

Legenda:

- Φ = diametro del provino
- H = altezza del provino
- γ_w = peso di volume umido
- w = contenuto d'acqua
- e = indice dei vuoti
- σ' = tensioni efficaci
- K = σ_r / σ_a
- B.P. = back pressure
- B = coefficiente di Skempton
- G = Modulo di taglio
- γ_{SA} = def.di taglio in singola ampiezza
- D = Rapporto di smorzamento di taglio
- Subscritto 'a' = assiale
- Subscritto 'r' = radiale

Note:	
-------	--

Figura 3-16

Con tutti i dati in nostro possesso e con le nuove indagini proposte è possibile fare uno studio specifico di analisi di risposta sismica locale per ogni località del territorio comunale.

In **Tabella 3.4.** si riportano tutte le indagini che ora compongono la banca dati allegata agli studi di Microzona Sismica di III livello del comune di Mesola.

	Tipologia di indagine	Numero indagini Banca dati Veronese	Numero indagini bibliografiche	Numero Totale di indagini
PENETROMETRIE E SONDAGGI	CPT	119	155	274
	CPTU	28	32	60
	SCPTU	9	-	9
	SPT	-	20	20
	Sondaggio continuo	-	85	85
	Sondaggio a distruzione	-	17	17
	Pozzi acqua	-	7	7
	Pozzi idrocarburi	-	10	10
	TOTALE	156	326	482

INDAGINI GEOFISICHE	E.S.A.C.	2	-	2
	HVSR	5	6	11
	RE.MI.	-	-	-
	M.A.S.W.	-	-	-
	S.E.V.	-	36	36
	TOTALE	7	42	49

	Stratigrafia Zona MS (Teorica)	25
--	--------------------------------	----

	TOTALE INDAGINI MICROZONAZIONE SISMICA III LIVELLO	556
--	--	-----

Tabella 3-4- *Indagini complessive reperite in banca dati e analizzate in questo studio*

3.1.3. MODELLO GEOLOGICO PROFONDO DI RIFERIMENTO

Il modello geologico profondo è stato ricostruito principalmente attraverso la sezione 069 reperita in banca dati regionale. Essa è molto dettagliata e di indubbia utilità. Di particolare interesse è la porzione più orientale della stessa (FIGURA 3.17).

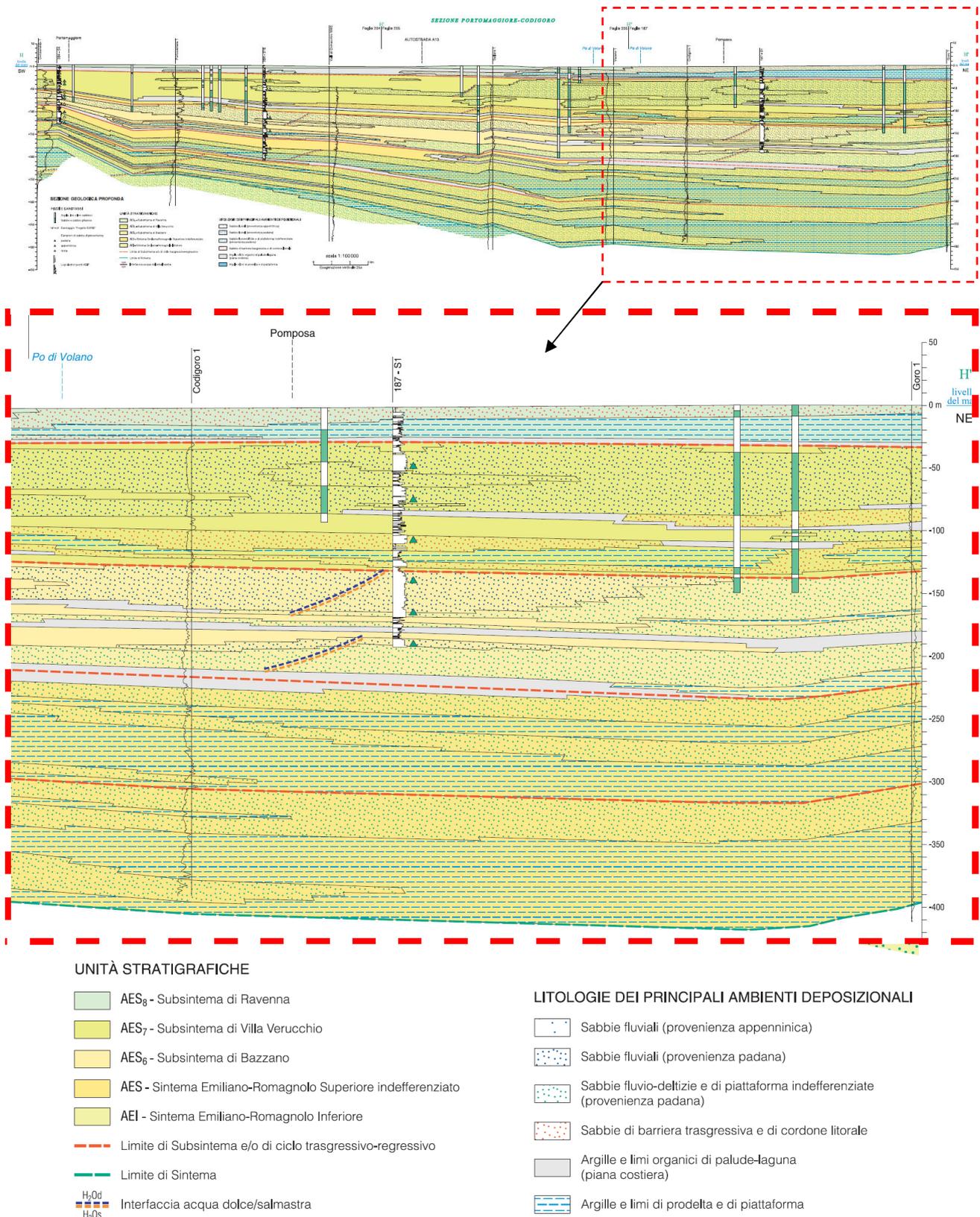


Figura 3-17

https://geo.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss/user/visual.jsp?service=sezioni_geo

Per i dettagli su queste sezioni geologiche si faccia riferimento a quanto contenuto negli studi di MS di II livello.

Sono state consultate e analizzate tutte le colonne stratigrafiche dei sondaggi per ricerca idrocarburi che sono presenti in banca dati, di cui questo territorio è ricco, essendo stato in passato, interessato ad estrazione di gas metano anche da modeste profondità (circa 300m dal p.c.).

3.1.4. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE INDAGINI

La Carta delle indagini è stata aggiornata e viene riprodotta in scala 1:10.000 suddivisa in 2 tavole A e B ed interessa tutto il territorio comunale; in essa sono ubicate e classificate tutte le indagini contenute nel database creato per questo lavoro con il software MS del Dipartimento di Protezione Civile Nazionale.

In questa carta sono rappresentate tutte le indagini presenti nel territorio comunale di Mesola, sia quelle della Microzonazione sismica di secondo livello approvata nel 2020, sia quelle della banca dati dello scrivente eseguite da quel momento fino ad oggi.

In aggiunta alle indagini reperite, sono state realizzate nuove indagini geognostiche e geofisiche in aree che necessitavano di informazioni. Le nuove indagini sono nello specifico n. 4 prove penetrometriche statiche a punta elettrica e piezocono sismico SCPTU spinte tutte fino alla profondità di -30,0 m da p.c. e n. 1 indagine geofisica a sismica passiva E.S.A.C. profonda, inoltre è stata eseguita una prova di Colonna Risonante, i limiti di Atterberg e l'analisi granulometrica per i terreni particolari, coesivi molli, presenti ad Ariano Ferrarese, di cui non si avevano dati bibliografici sulle curve di decadimento del modulo G_0 con l'aumentare della deformazione γ indotta dal sisma.

Le indagini totali presenti nel territorio risultano essere 556, così suddivise: n. 274 prove penetrometriche statiche CPT, n. 60 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU, n. 9 prove penetrometriche statiche con punta elettrica con piezocono e sismocono SCPTU, n. 20 prove dinamiche SPT, n. 85 sondaggi a carotaggio continuo, n. 17 sondaggi a distruzione di nucleo, n. 7 pozzi per acqua, n. 10 pozzi per idrocarburi, n. 36 sondaggi elettrici verticali S.E.V., n. 2 Array sismici ESAC, n. 11 misure di microtremore a stazione singola HVSR e n. 25 Stratigrafie Zone MS (Teorica), realizzate appositamente per questi studi.

Si possiede dunque una discreta conoscenza del territorio comunale soprattutto dei centri abitati dato che la maggior parte delle indagini si concentra in queste aree.

Per ogni indagine realizzata corrisponde una diversa simbologia di rappresentazione, riportata nella legenda della tavola, come richiesto negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Microzonazione sismica - Versione 4.2.:

Le 556 indagini sono state analizzate ed archiviate in una banca dati informatizzata e georeferenziata con sistema WGS84 fuso 33N (come prescritto negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica del Dipartimento nazionale della Protezione Civile) in ambiente GIS ESRI, la cui struttura risponde alle specifiche per gli studi di microzonazione sismica.

Questo consente l'elaborazione degli studi di microzonazione sismica del comune, finalizzata ad una semplificazione e ad una sintesi dei contenuti principali delle caratteristiche geologiche, morfologiche, lito-stratigrafiche, sismiche e geotecniche e nel contempo ottenere una omogenea rappresentazione dei tematismi da parte dei soggetti realizzatori, facilitandone la lettura ed il confronto dei risultati degli studi di contesti territoriali differenti.

Per l'archiviazione dei dati si è fatto ricorso al software SoftMS versione 4.2, messo a disposizione dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (D.P.C.), attraverso il quale è possibile inserire i dati di tutte le indagini presenti nel territorio ed archivarle in tabelle costituite da un insieme di record, gerarchicamente organizzate in modo da memorizzare in maniera indipendente le informazioni legate al sito di indagine, alle prove in esso realizzate ed ai parametri tecnici di ognuna di queste.

Tutte le indagini reperite e successivamente analizzate ed archiviate presentano una buona affidabilità e sono ubicate in modo abbastanza uniforme all'interno del comune di Mesola offrendo dunque una buona distribuzione e copertura areale del territorio. Per la maggior parte delle indagini, la loro ubicazione è concentrata

in modo particolare nei centri abitati con una buona densità di indagini profonde a 30m da p.c. per la caratterizzazione sismica del territorio e la determinazione del valore di V_{S30} .

In **FIGURA 3.18** è riportata la legenda della carta delle Indagini, aggiornata al III livello di approfondimento degli studi di micro zonazione sismica.

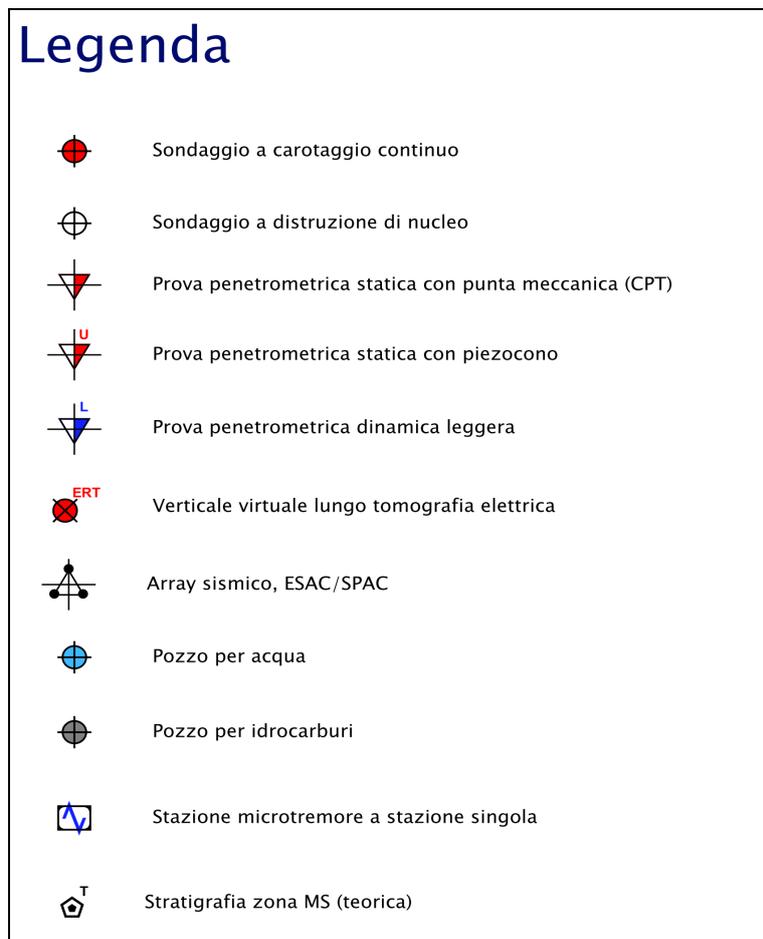


Figura 3-18

3.1.5. AGGIORNAMENTO DELLA CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO

S (Vs)

La Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) è stata aggiornata e viene riprodotta in scala 1:10.000.

Nella carta di microzonazione sismica allegata a questo studio, vengono riportati i valori di Vs30 ricavati attraverso misure dirette tramite prove SCPTU e tramite prove Re.MI. o M.A.S.W., come richiesto dalle linee guida per la loro compilazione dettate dal DPCN.

Per lo studio di microzonazione sismica di III Livello sono stati realizzati 4 con sismici SCPTU negli abitati di Ariano Ferrarese, Massenzatica, Monticelli e Santa Giustina; inoltre nell'abitato di Ariano Ferrarese è stata realizzata una prova geofisica di superficie ESAC.

Il parametro Vs30 rappresenta la media ponderata dei valori delle velocità dell'onda di taglio "S" nei primi 30 m di sottosuolo indagato, matematicamente espressa da (Eq. 3.1):

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{v_i}} \quad \text{Eq. 3-1}$$

dove,

Vs30 : velocità media ponderata delle onde di taglio "S",

hi : spessore dello strato iesimo,

Vi : velocità delle onde di taglio "S" nello strato iesimo.

I valori di Vs30 sono stati calcolati in diversi modi:

- Misure dirette mediante sismocono SCPTU;
- Prove geofisiche

Misure dirette mediante sismocono

La prova consiste nell'inserire sulla punta elettrica della prova penetrometrica statica con punta elettrica dei ricevitori (geofoni) che con opportuna strumentazione e una sorgente di onde in superficie (FIGURA 3.19) possono essere misurati, a profondità diverse (SCPTU), fino alla profondità di -30,00 m da p.c., i tempi di arrivo delle onde sismiche fra la superficie (sorgente) ed i ricevitori (in profondità), analogamente a quanto avviene con il metodo geofisico cosiddetto "downhole".

In base ai tempi di arrivo conoscendo la distanza tra la sorgente ed il ricevitore si può calcolare la velocità delle onde sismiche ed in particolare delle onde di taglio (Vs).

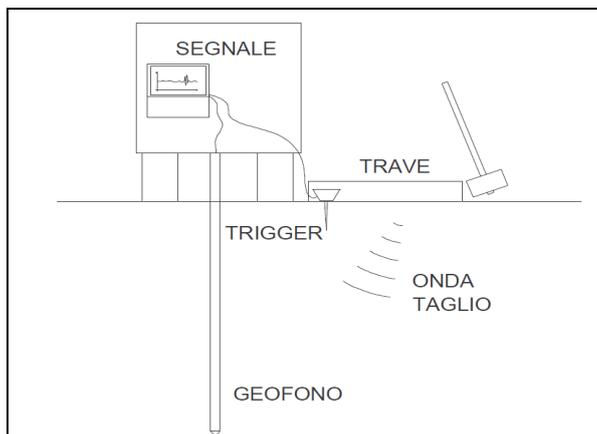


Figura 3-19 Rappresentazione grafica della prova penetrometrica con piezocono sismico

Indagini geofisiche

Le tecniche geofisiche comunemente utilizzate per la determinazione di tale parametro sono essenzialmente di tre tipi:

- prove in foro singolo (Down-Hole) o doppio (Cross-Hole),
- sismica di superficie (rifrazione e riflessione) con energizzazione di onde polarizzate (SH),
- tecniche mediante onde superficiali “R” e “L” (SASW, MASW e Microtremori Re.Mi., SPAC, MSPAC ed ESAC).

Le prime richiedono l'esecuzione di un sondaggio per permettere la determinazione del parametro. Le seconde, più costose, forniscono risultati di elevata qualità ma sono facilmente influenzate da rumori antropici che ne degradano le caratteristiche. Le ultime sono realizzate, ad eccezione della tecnica SASW, con procedure operative simili a quelle impiegate nella sismica a rifrazione.

Le prove geofisiche adottate in questo studio appartengono alla terza categoria e vengono caratterizzate con applicazione della tecnica dei microtremori (Autocorrelazione Spaziale Migliorato “ESAC”) che permette di ottenere con minor costo di processo il profilo verticale della velocità media delle onde di taglio “S” e contemporaneamente di raggiungere profondità superiori a 30 m favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock sismico - così come definito dalla normativa ($V_s > 800$ m/s) - coadiuvando contemporaneamente l'interpretazione delle eventuali variazioni di rigidità sismica ($VS2 \times \rho$) dei terreni investigati.

Attraverso l'analisi delle onde superficiali “tipo Rayleigh R”, che costituiscono un particolare tipo di onde superficiali trasmesse sulla superficie libera di un mezzo omogeneo ed isotropo, si ricava indirettamente la velocità delle onde di taglio “S” secondo l'equazione **Eq 3.2**:

$$V_R = \left(\frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \right) \times V_S \quad \text{Eq. 3-2}$$

Dove:

$$V_R \cong 0.92 V_S$$

V_R: velocità di fase dell'onde Rayleigh

V_S: velocità di propagazione dell'onda di taglio

ρ : rapporto di Poisson

L'analisi delle tracce sismiche registrate è consistita nell'applicazione di una trasformata bi-dimensionale di tipo *p-f* (ρ =slowness “1/velocità”-*f*=frequenza “Hz”/McMechan e Yedlin, 1981) che analizza la variazione nel tempo dell'energia di propagazione del segnale sismico lungo tutte le direzioni rispetto alla linea sismica. Il risultato di tale analisi rappresenta il cosiddetto spettro di potenza da cui si ottiene in prima battuta la curva di dispersione sperimentale delle onde “R” e successivamente, attraverso una procedura di modellazione numerica, la determinazione delle velocità delle onde di taglio “S”.

Le indagini geofisiche utilizzate per la determinazione dei valori di V_{s30} sono caratterizzate da una tecnica chiamata dei microtremori mediante la quale vengono registrate onde passive di sottofondo attraverso uno stendimento di geofoni lineare equidistanziati. Le prove geofisiche realizzate permettono di ottenere con minor costo di processo il profilo verticale della velocità media delle onde di taglio “S” e contemporaneamente di raggiungere profondità superiori a 30 m favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock - così come definito dalla normativa ($V_s > 800$ m/s) - e l'interpretazione delle eventuali variazioni di rigidità sismica (VS_{xp}) dei terreni investigati.

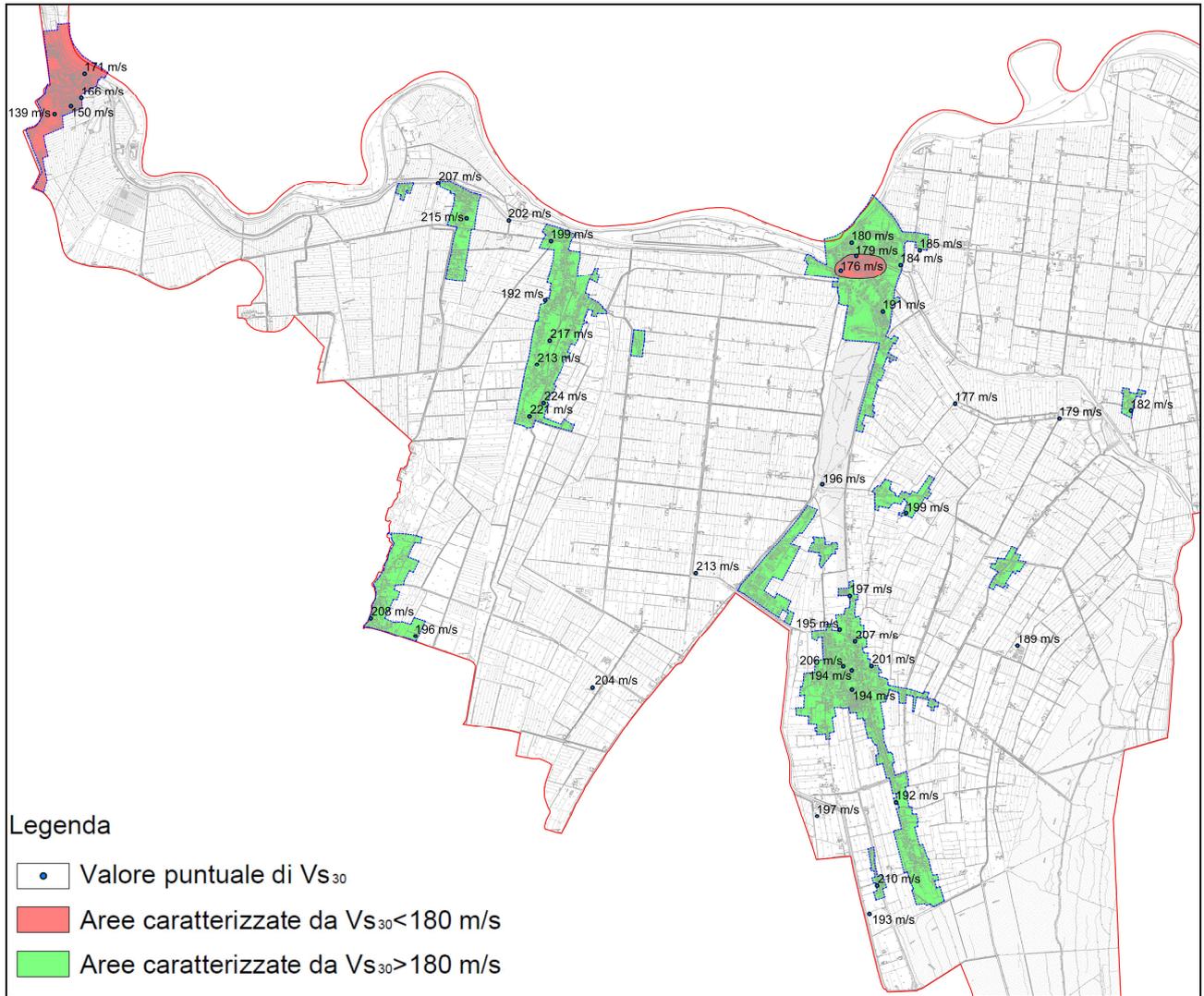


Figura 3-20 Distribuzione dei valori di V_{s30} calcolati su tutto il territorio di Mesola

3.2. SEGNALI DI INPUT PER ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

I segnali di input di riferimento per le analisi di risposta sismica locale sono indicati nell'Allegato A4 degli indirizzi regionali (DGR 476/2021); essi sono scaricabili sul WebGIS: <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html> realizzata da EUCENTRE (**FIGURA 3.21**).

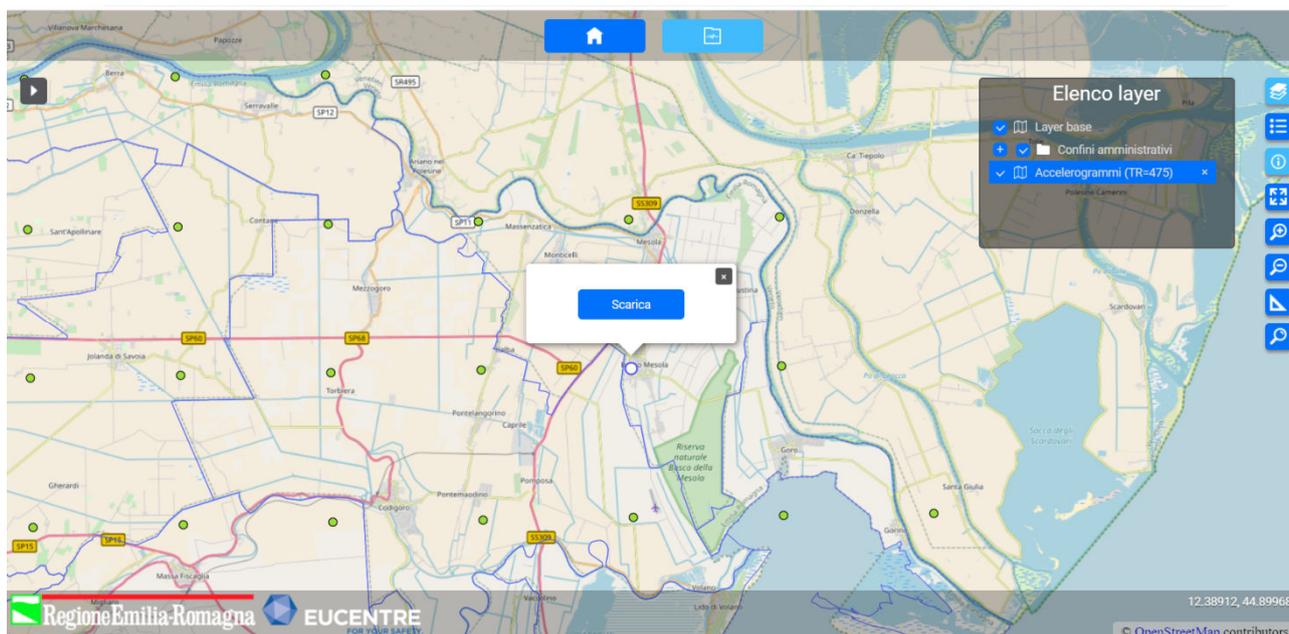


Figura 3-21 Mappa dei nodi su cui scaricare i gruppi di 7 accelerogrammi - <https://rer.eucentre.it/home.html>

Di seguito si riporta l'esempio di Bosco Mesola con la settupla di accelerogrammi estratti:

TR475_ID15189

Si fa presente che alcuni dei 7 accelerogrammi presentano tempi di registrazione molto lunghi, per cui per alleggerire il calcolo, sono stati tagliati, mantenendo le fasi di registrazione ove è più significativo la fase di strong-motions., ove cioè è concentrata la maggior parte dell'energia liberata dal sisma. Quelle riportate nelle **FIGURE 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28** sono già le parti di registrazione selezionata per l'analisi condotta.

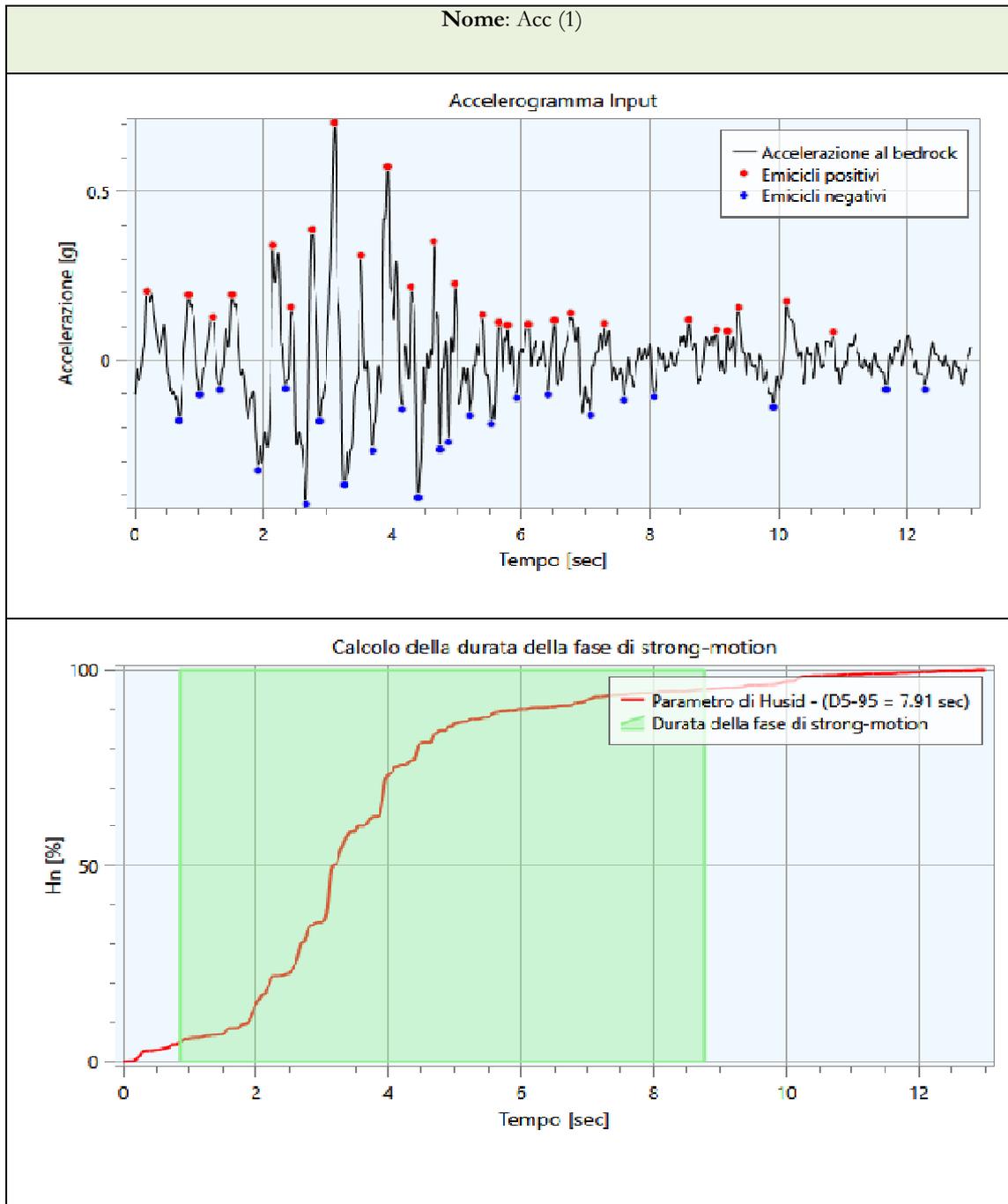
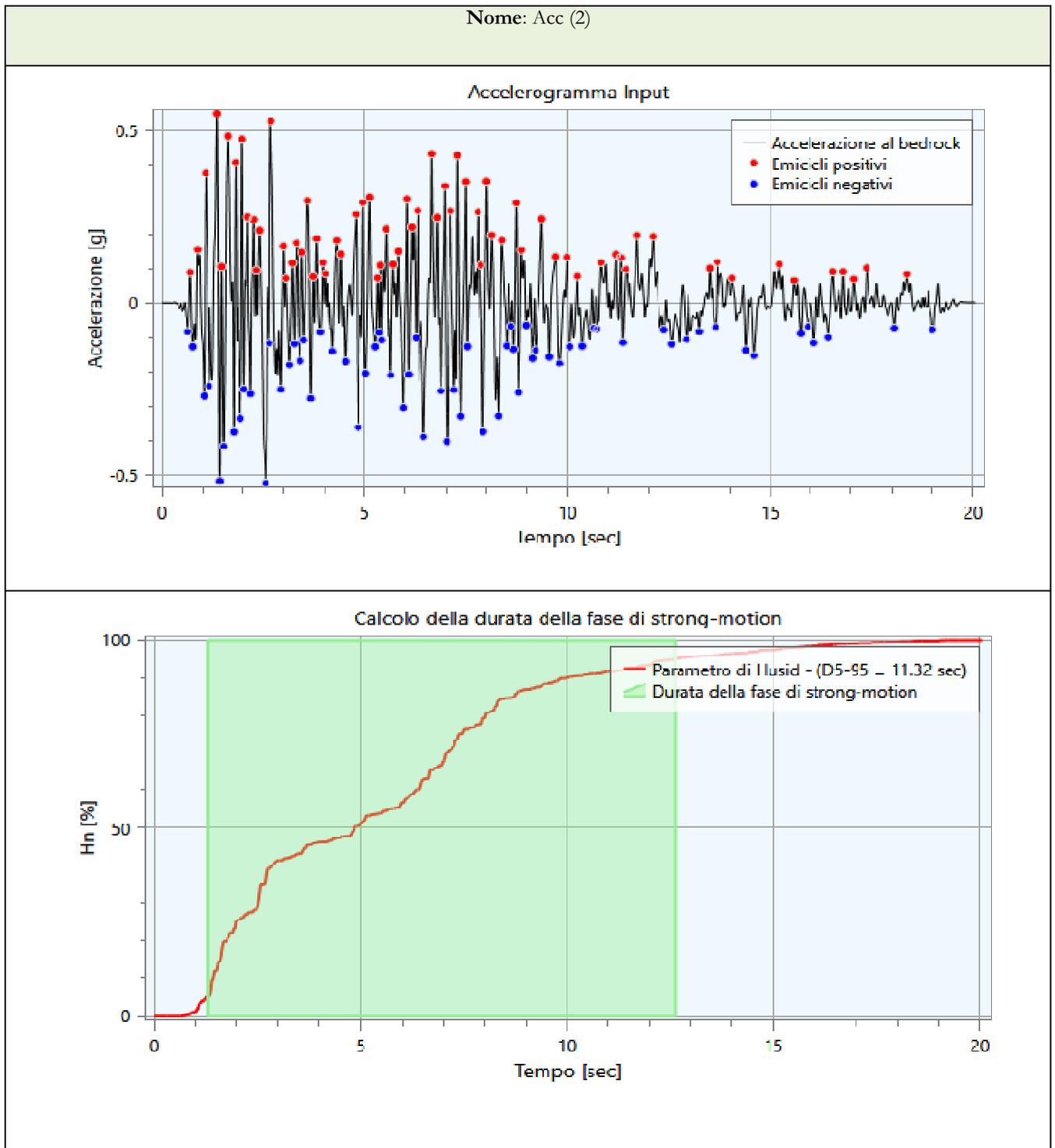


Figura 3-22



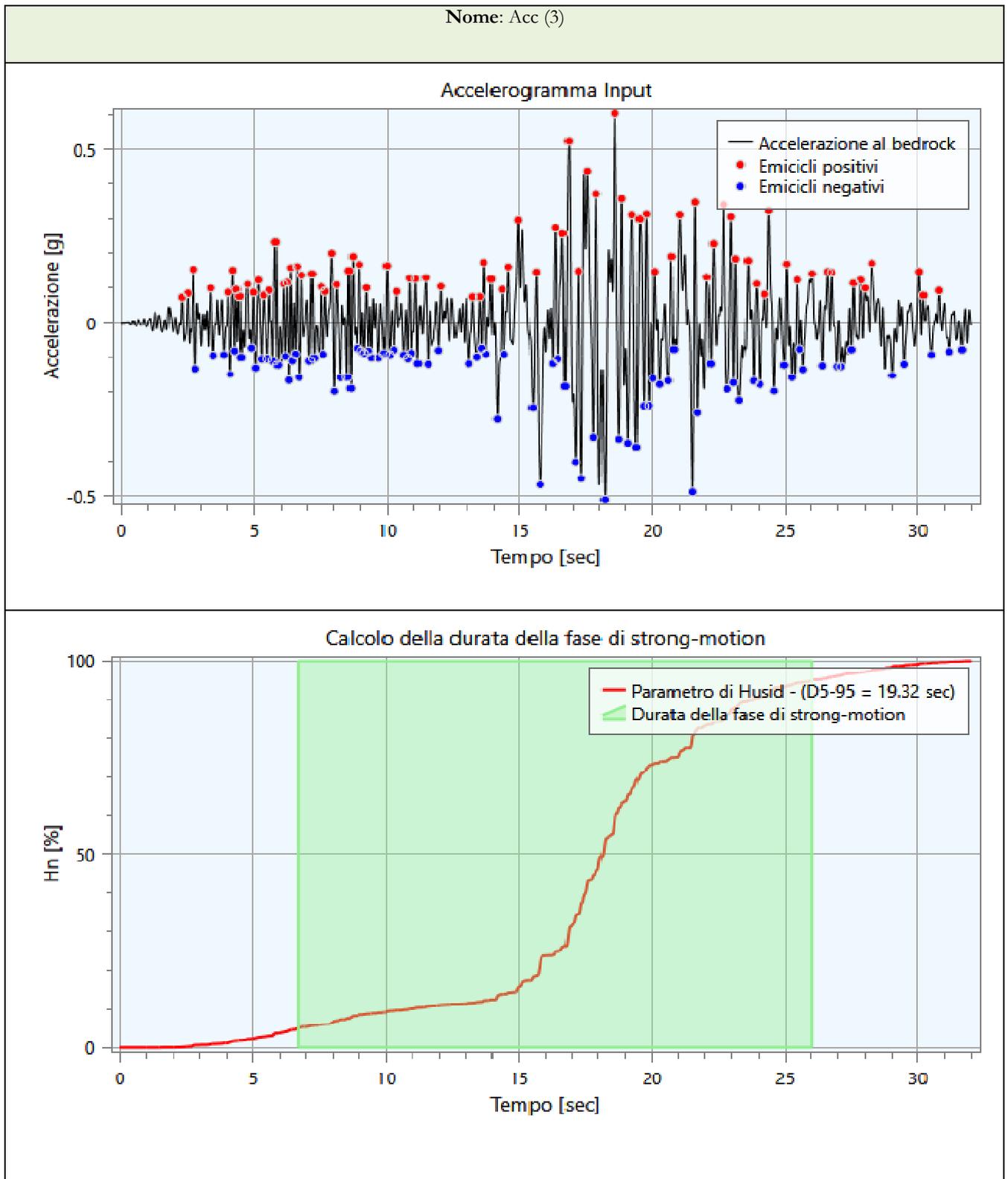


Figura 3-24

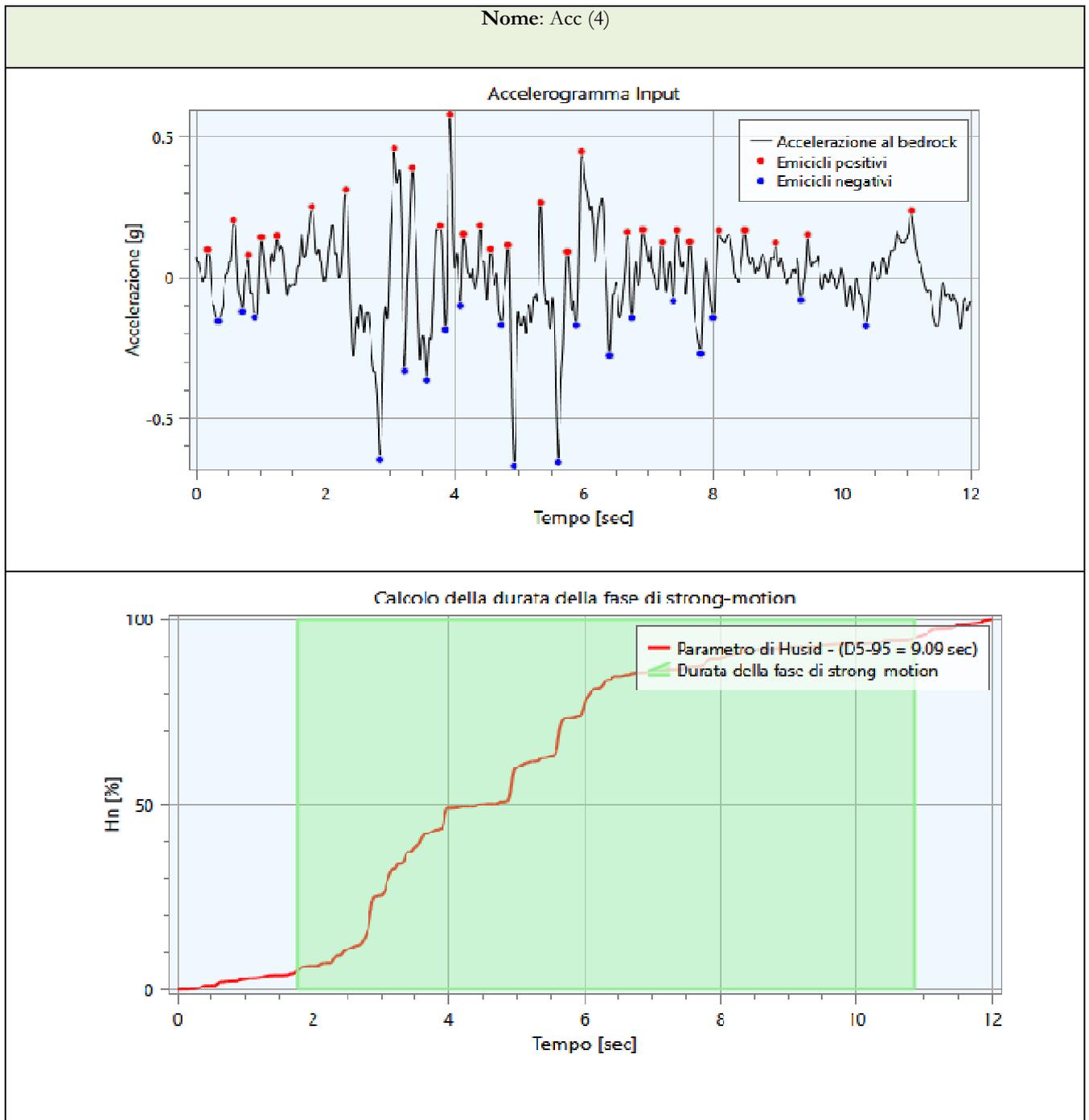


Figura 3-25

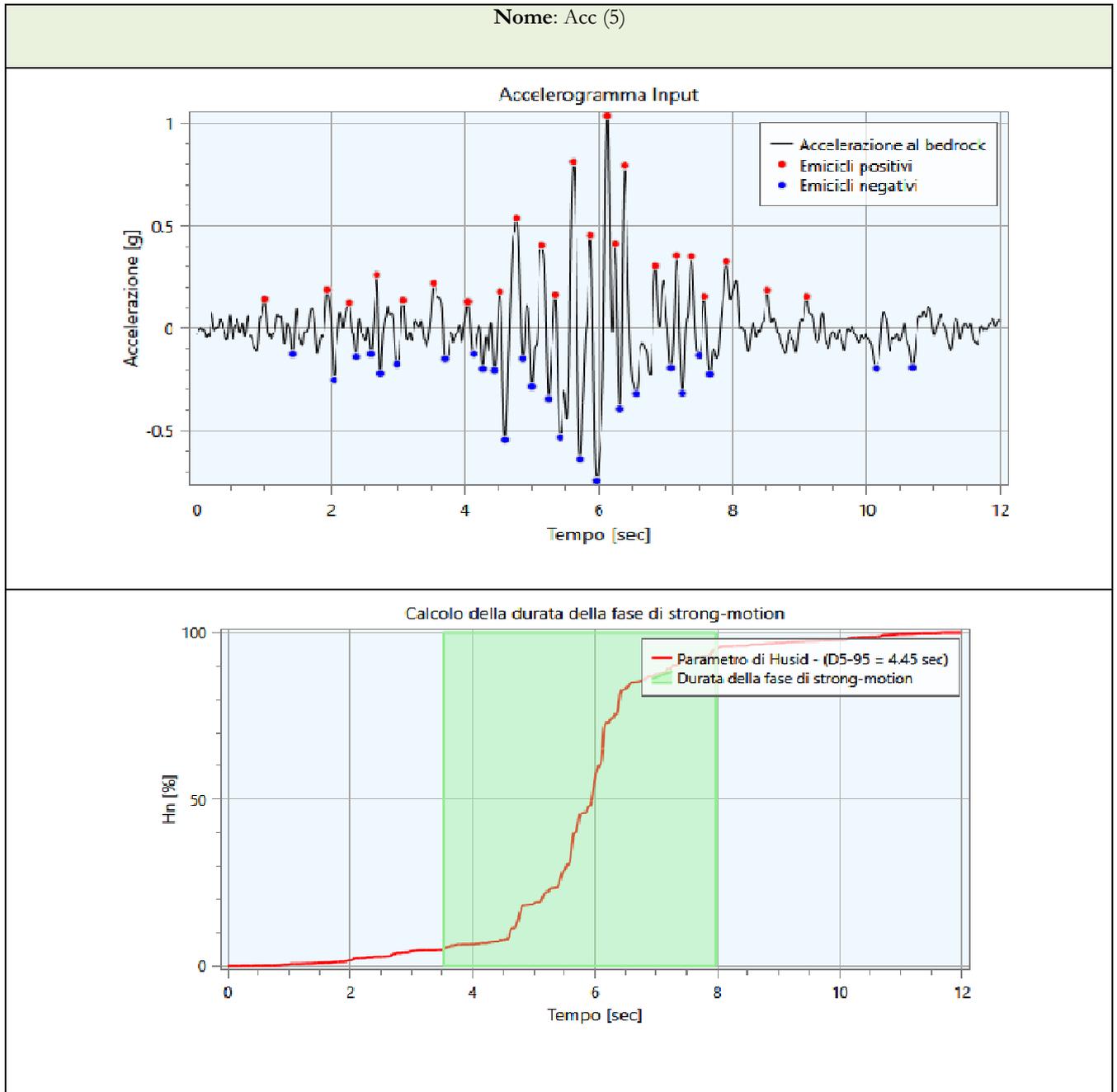


Figura 3-26

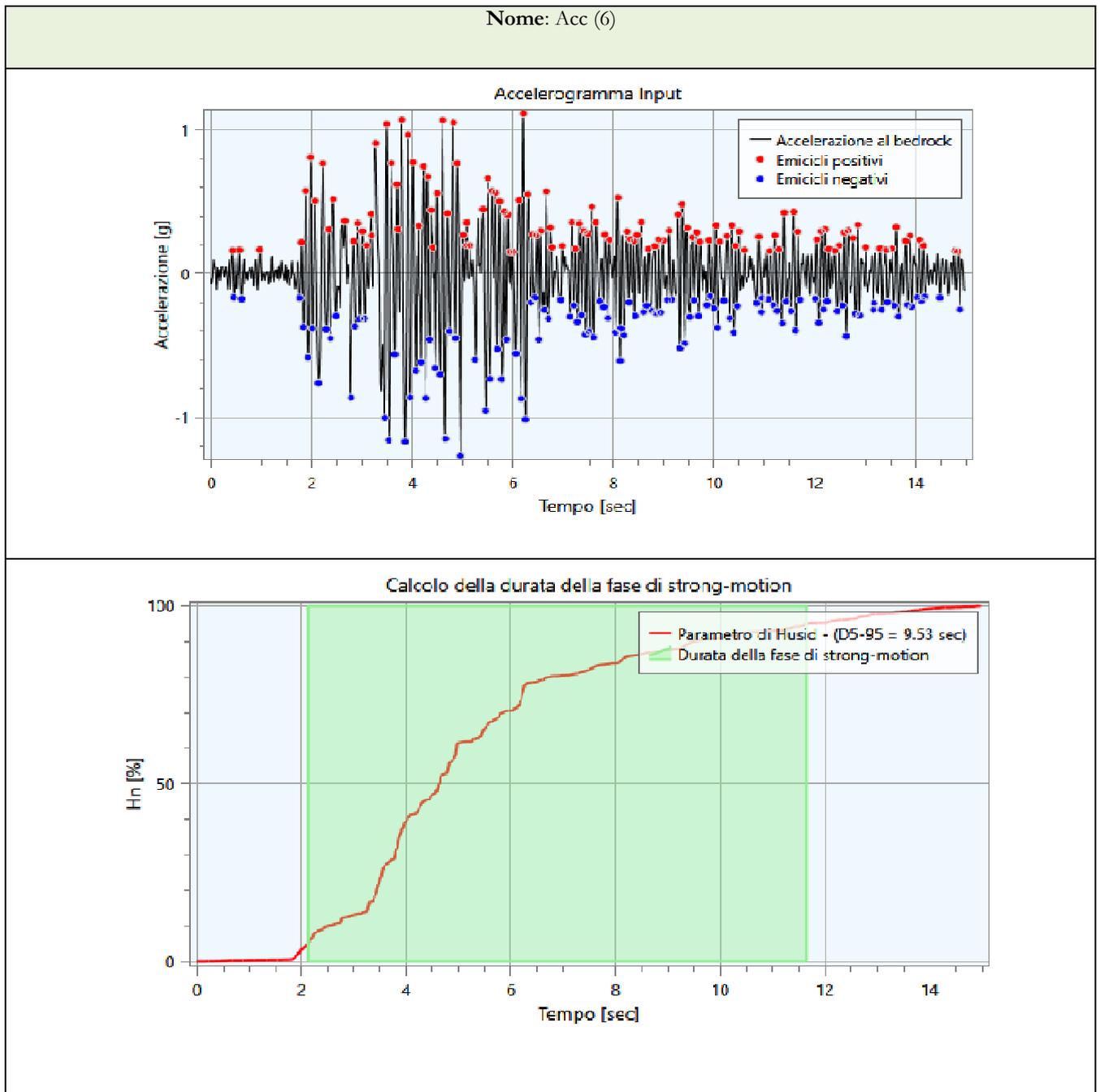


Figura 3-27

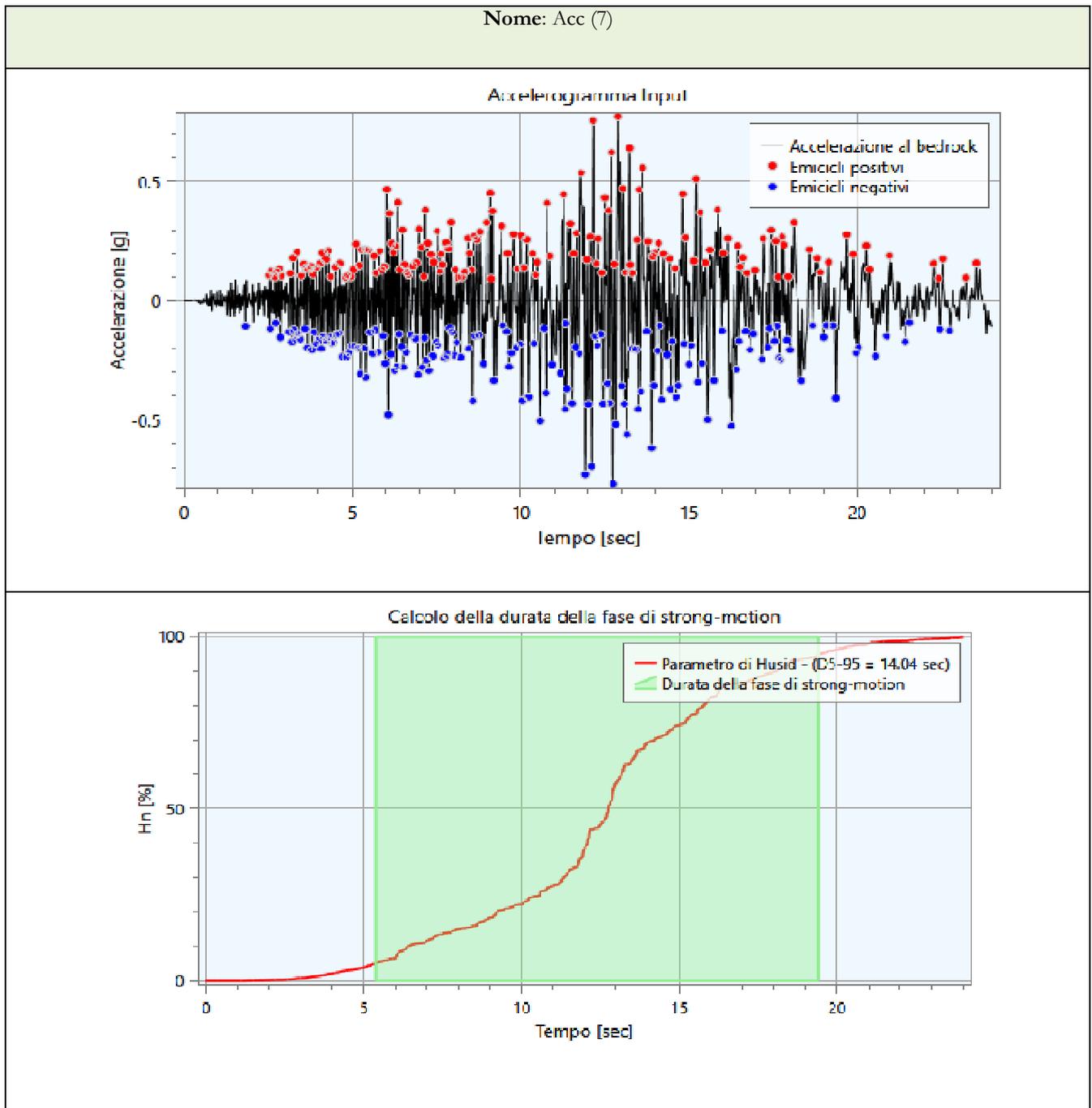


Figura 3-28

4. ANALISI DELLA RSL PER AMBITI DI STUDIO – MODELLI DI INPUT

In questo capitolo si riporta il modello stratigrafico ed il profilo di Vs adottato per ogni ambito di studio. In particolare si riporta la suddivisione in strati pseudomogenei dei primi 30m investigati con il cono sismico, e la suddivisione in strati pseudomogenei della stratigrafia profonda adottata per il rispettivo ambito. Con le indagini ESAC, fatte eseguire alla ditta TeamGeofisica.ceg, del dott. Nasser Abu Zeid, il bedrock sismico non è mai stato raggiunto. Esso è atteso a profondità molto maggiori di 350m.

Il software utilizzato per condurre l'analisi di risposta sismica locale, la cui licenza è di proprietà dello scrivente, è LSR-2D versione 5.0.1. (FIGURA 4.1)

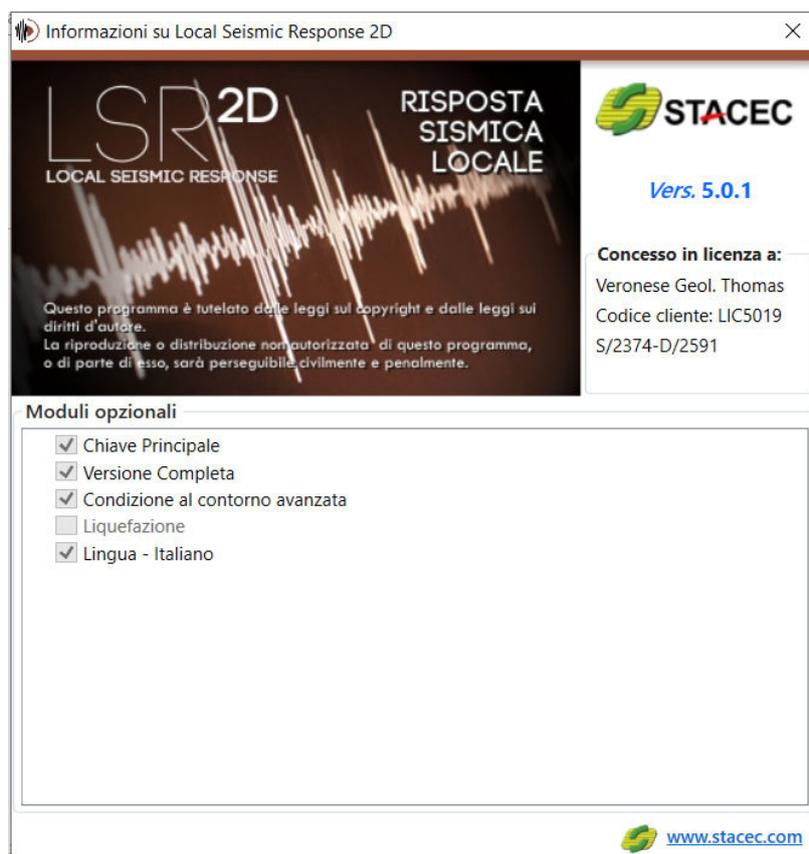


Figura 4-1 Software in licenza dello scrivente per gli studi di Risposta Sismica Locale

L'analisi condotta è di tipo Equivalente Lineare.

I modelli geologici dei primi 40m sono derivati dalle prove SCPTU, che vengono interpretate in funzione del modello geologico tipo, leggibile dalla sezione 074 del progetto CARG (FIGURA 4.2).

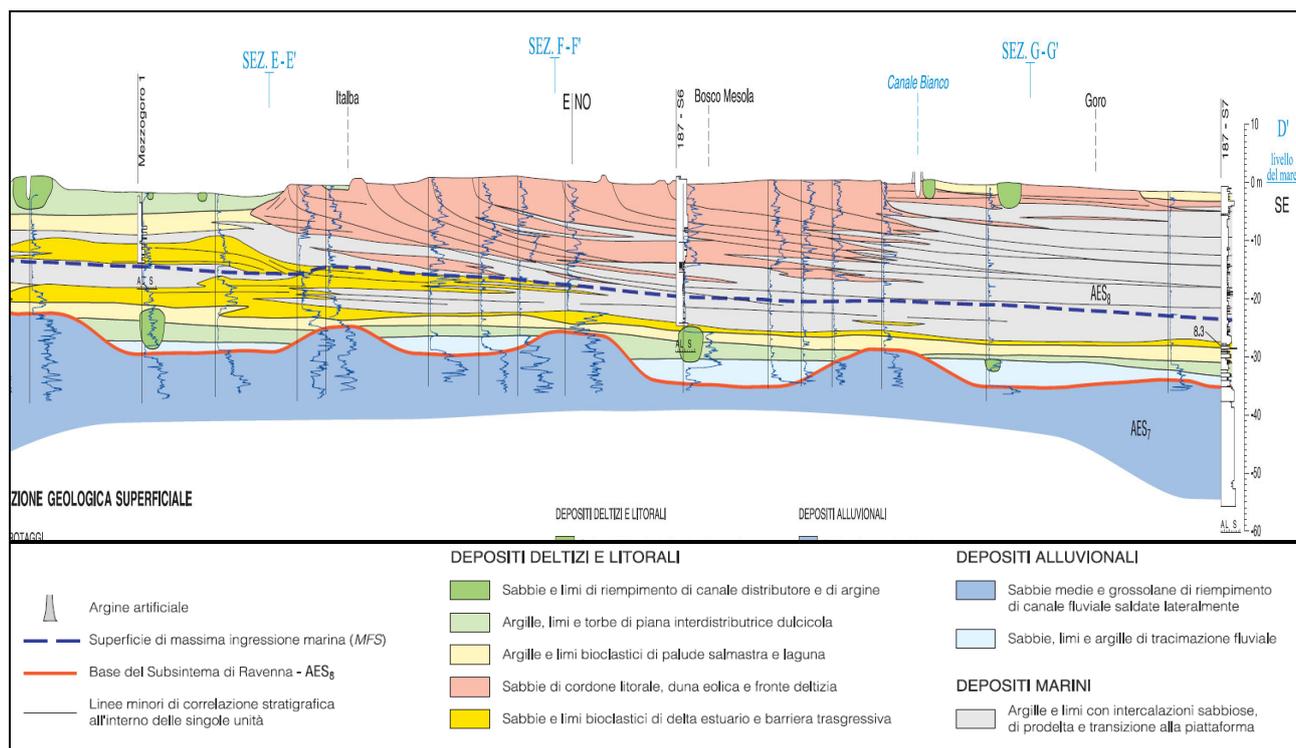


Figura 4-2 Da questa sezione tipo si ricavano le chiare indicazioni sulle suddivisione dei vari orizzonti geologici incontrati durante l'esecuzione delle prove penetrometriche a punta elettrica, piczocono e sismocono

Le curve di decadimento del modulo G_0 e di Dumping utilizzate sono le seguenti:

“**Copertura limoso-argillosa**” riconducibile a sedimenti alluvionali continentali di piana interdistributrice dulcicola.

“**Fanghi molli palustri**” riconducibile a sedimenti alluvionali continenti di piana interdistributrice dulcicola, costituiti da fanghi organici molli depositati in acqua e mai emersi, che non hanno mai subito consolidazione per essiccamento.

“**Sabbie limose di battigia**”, sabbie limose di cordone litorale, duna eolica e fronte deltizia.

“**limi argilloso sabbiosi prodelta**” sono depositi eterogenei fittamente stratificati che testimoniano l'avanzamento dei primi depositi deltizi in on lap sui sottostanti depositi marini.

“**Fanghi marini argille limose oloceniche**”, depositi marini di mare aperto e di prodelta.

“**Sabbie pleistoceniche**” Sabbie di riempimento di canale fluviale.

“**Argille limose pleistocene continentali**” depositi di piana interdistributrice dulcicola.

E' ovvio che uno studio di risposta sismica locale rigoroso necessiterebbe di indagini di laboratorio sui terreni prelevati nelle verticali indagate, in quanto si tratta di valutare il comportamento geotecnico in campo dinamico di sedimenti in sito, sito specifici. Il costo di queste analisi sarebbe troppo oneroso per l'amministrazione pubblica. In ogni caso la banca dati personale dello scrivente, costruita in anni di studi specifici per opere pubbliche, realizzate nel basso ferrarese, consente di adottare curve di decadimento del modulo G_0 abbastanza vicine alla realtà, riducendo i margini di errore, che si avrebbero utilizzando le curve bibliografiche riportate nei codici di calcolo, provenienti da esperienze condotte su sedimenti studiati in giro per il mondo.

Nelle FIGURA 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, si riportano i grafici delle curve utilizzate.

Curva n. 1: Copertura limoso argillosa

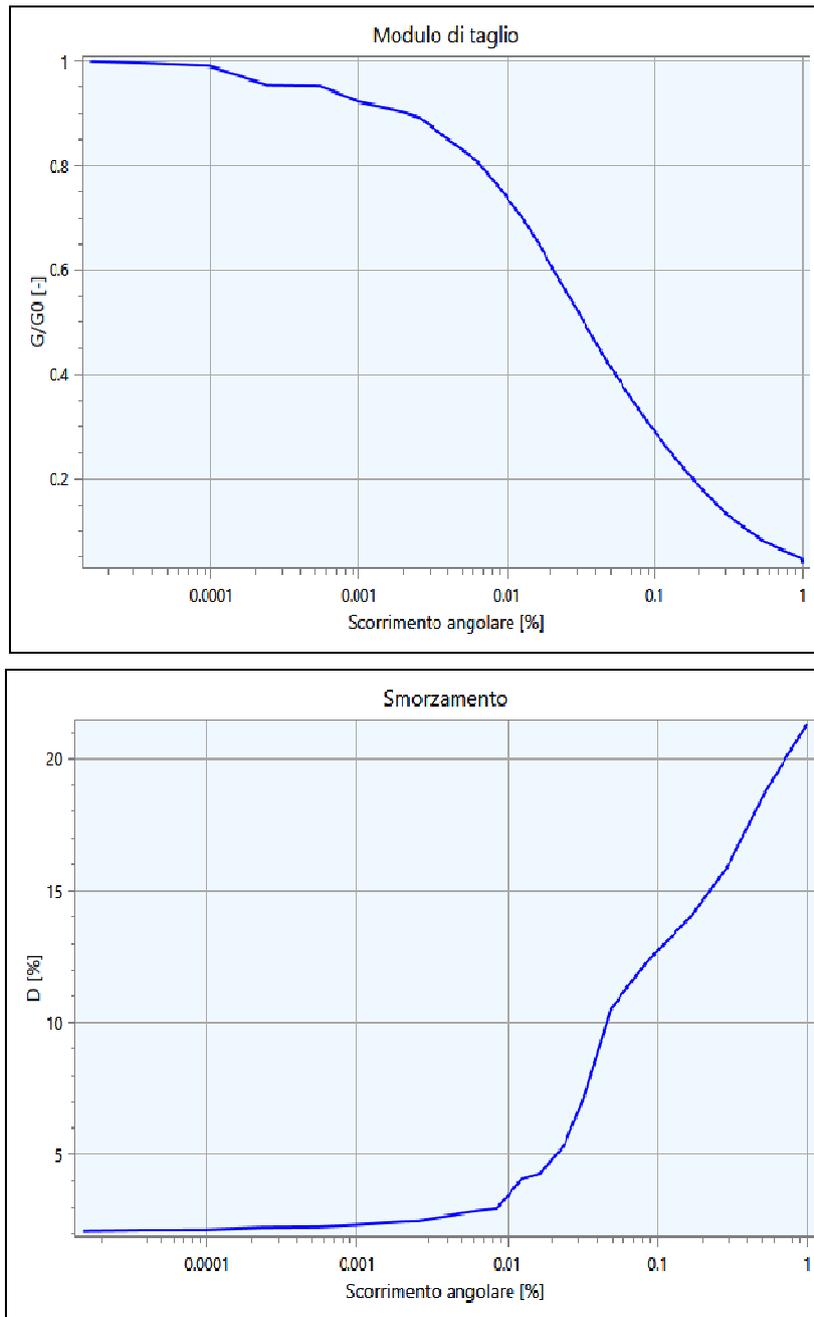


Figura 4-3

Curva n. 2: fanghi molli Ariano

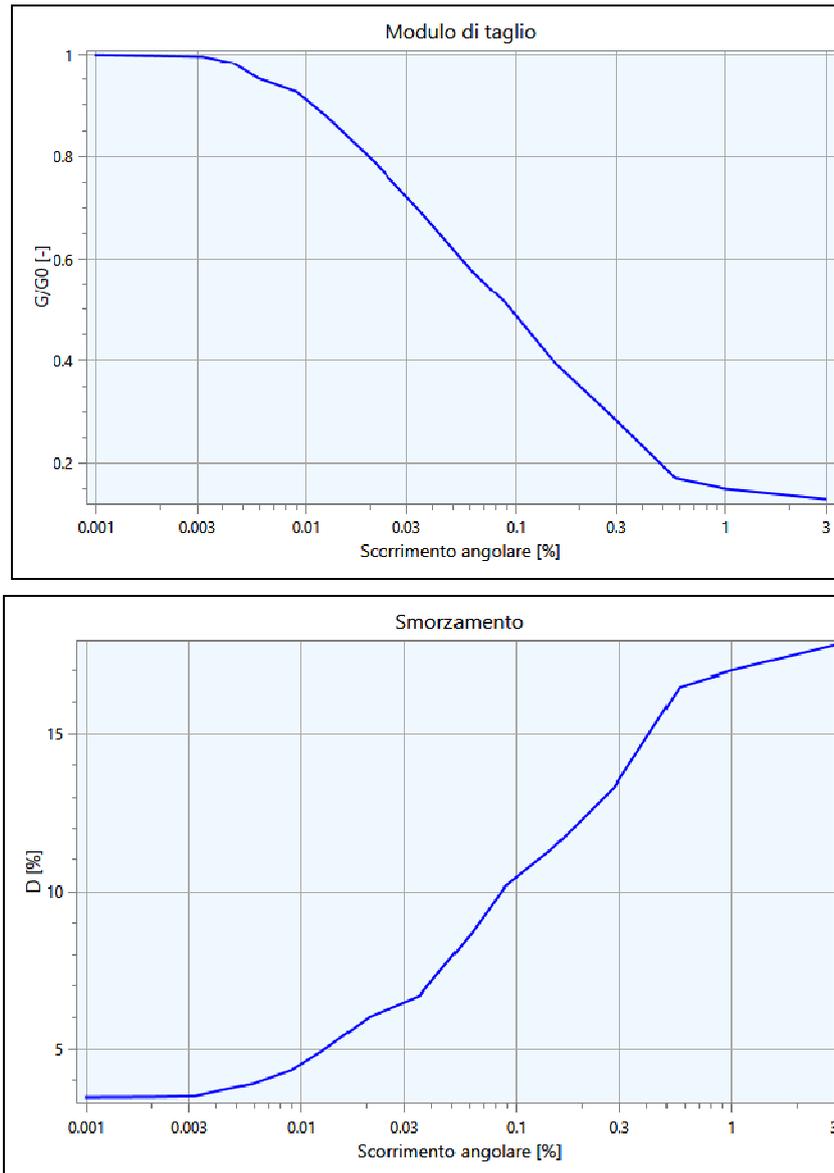


Figura 4-4

Curva n. 3: sabbie limose battigia

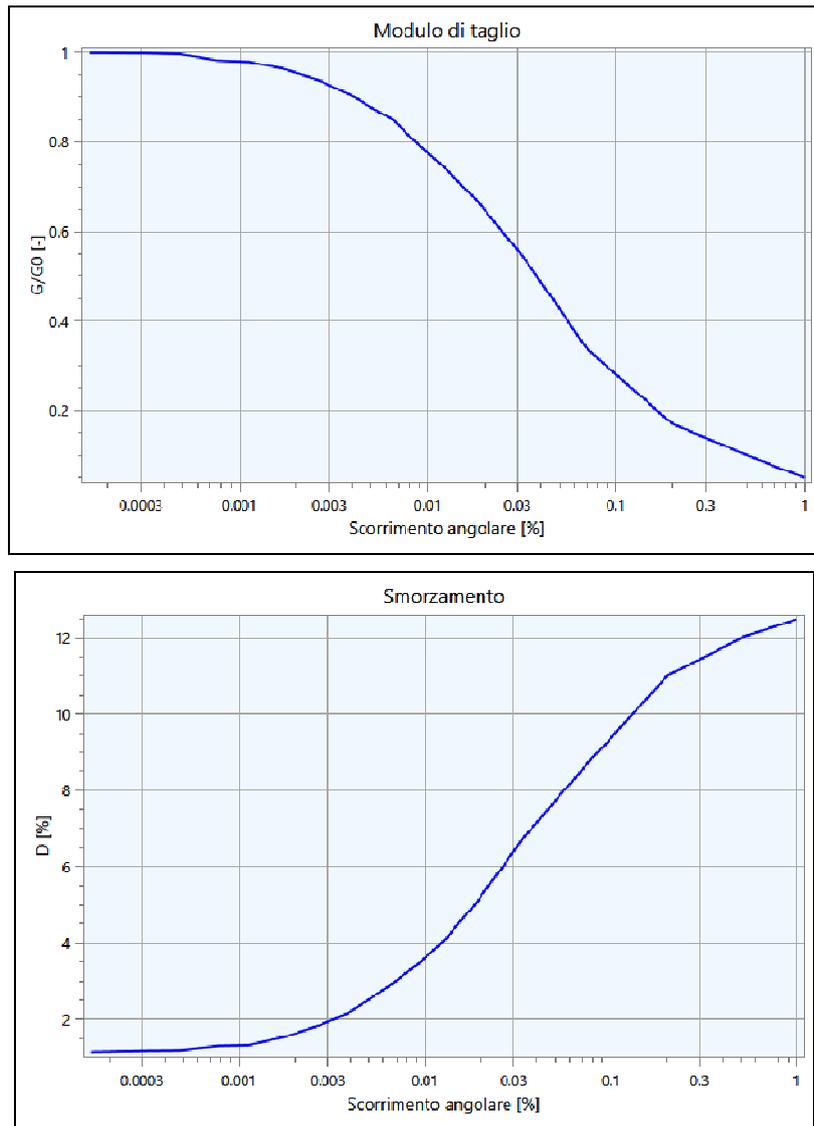


Figura 4-5

Curva n. 4: limi argilloso sabbiosi prodelta

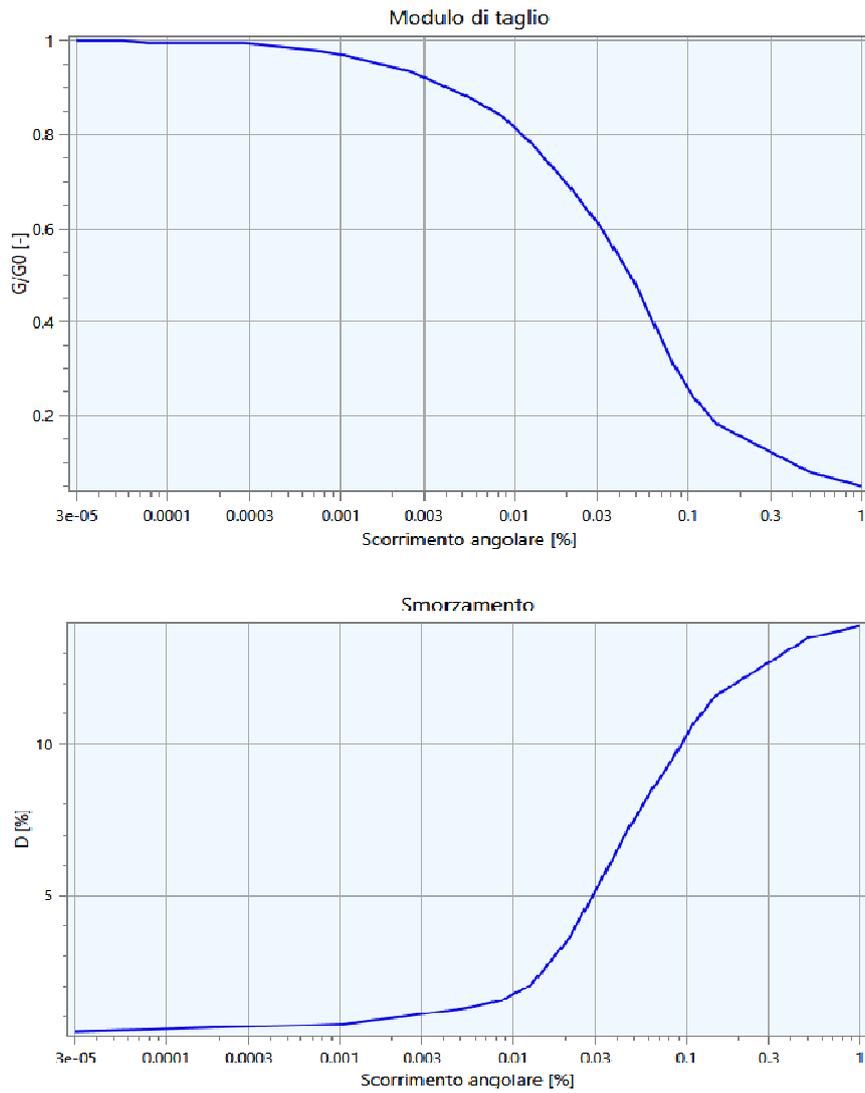


Figura 4-6

Curva n. 5: fanghi marini argille limose oloceniche

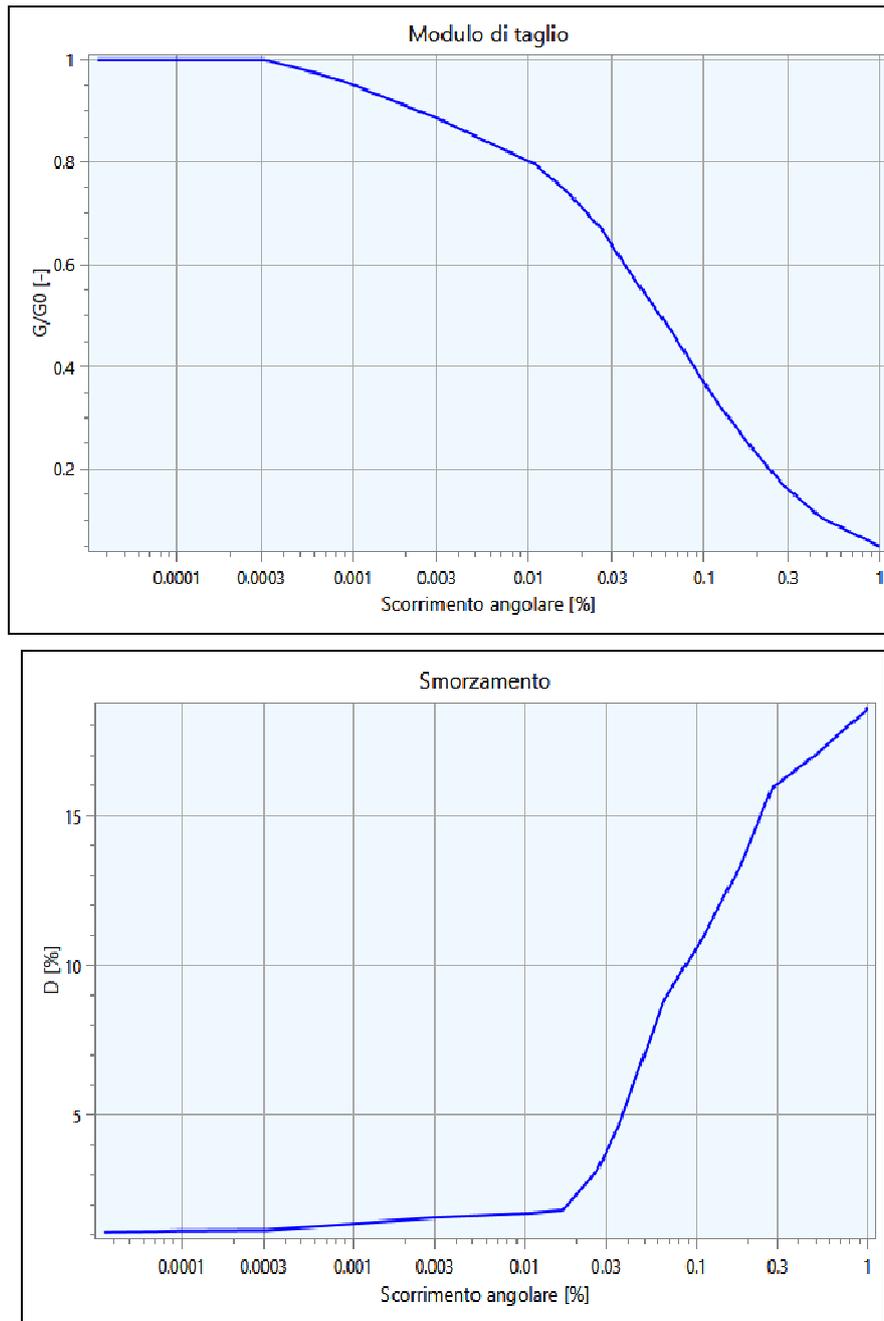


Figura 4-7

Curva n. 6: sabbie pleistoceniche

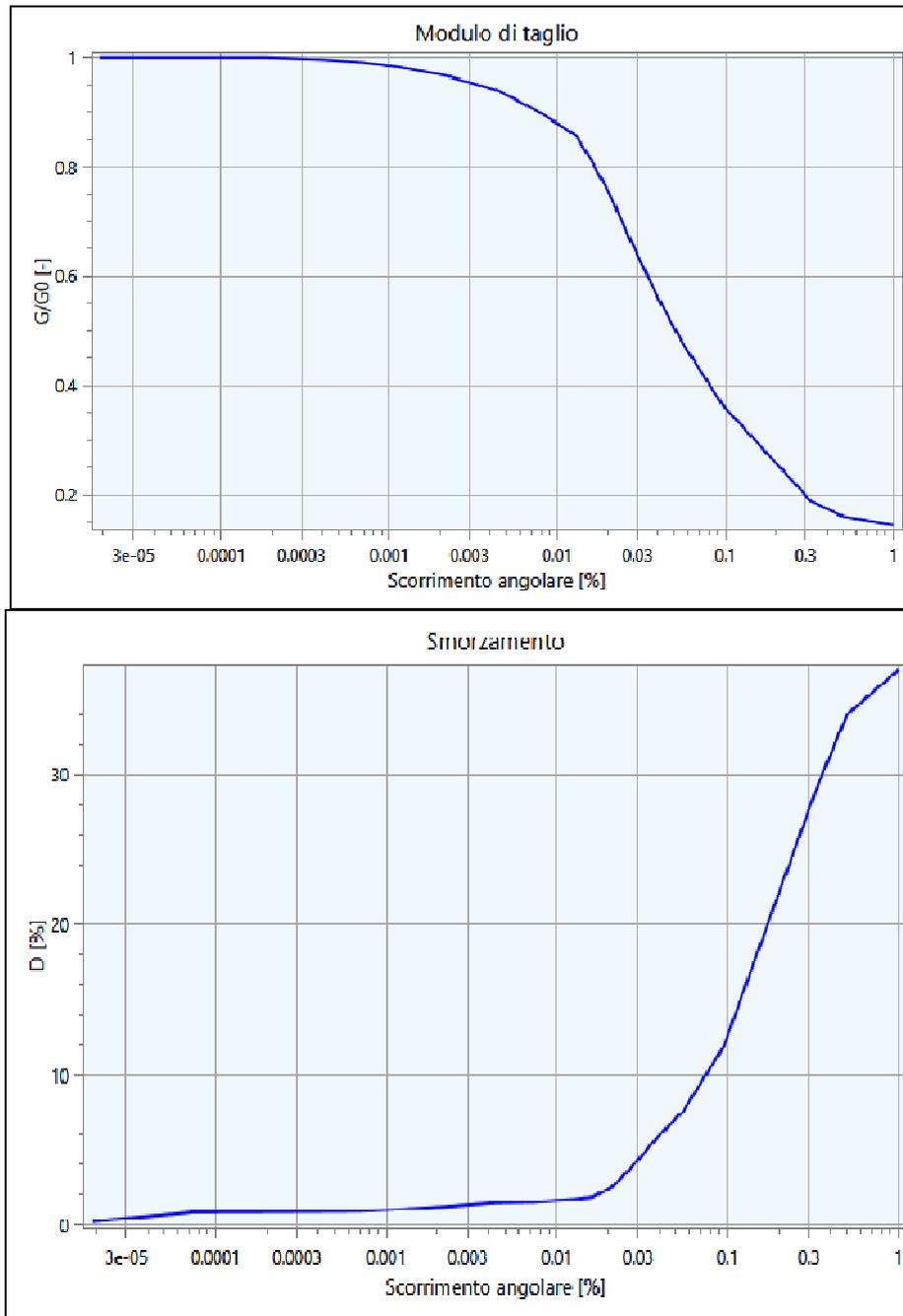


Figura 4-8

Curva n. 7: Argille limose pleistocene continentali

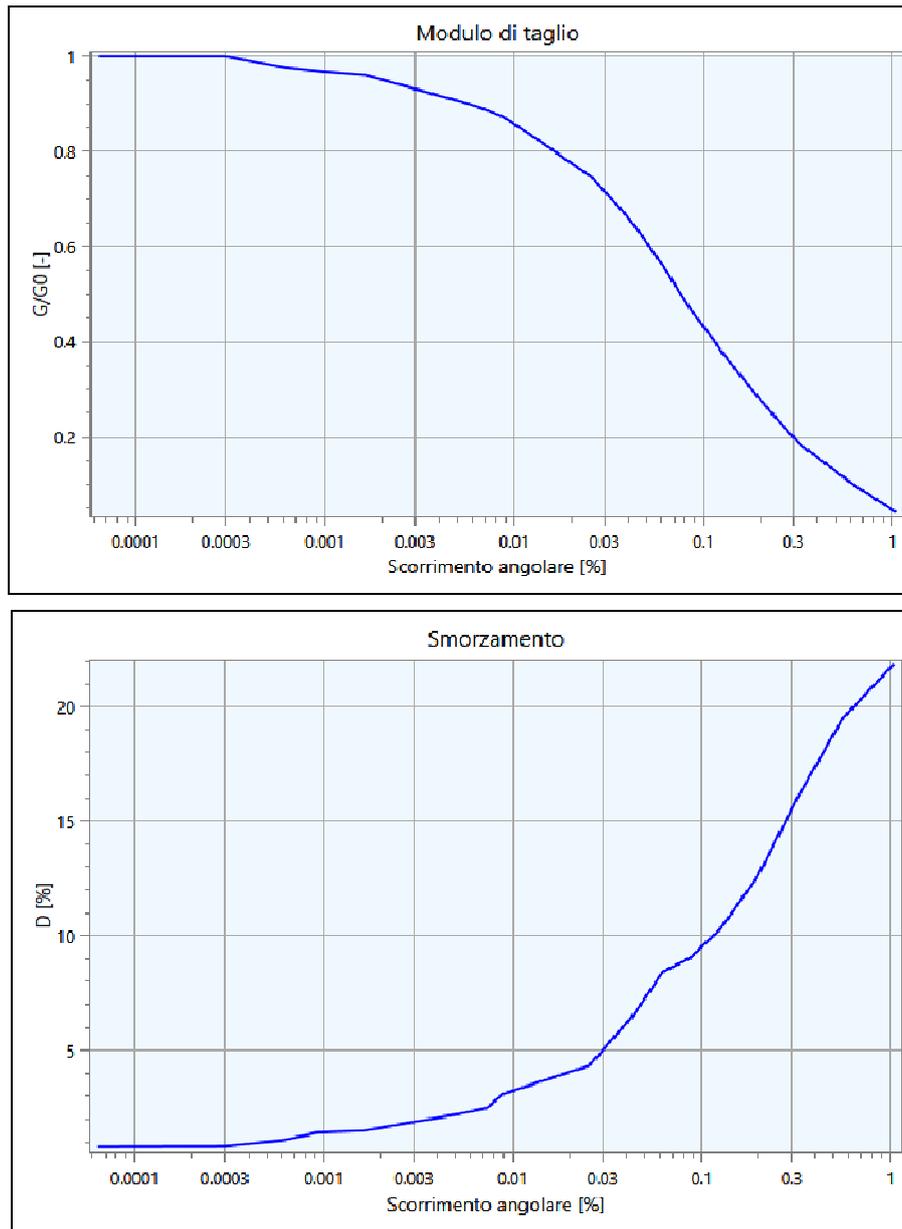


Figura 4-9

Per gli strati profondi granulari si è fatto riferimento alle curve EPRI in funzione dello stato tensionale ovvero della profondità.

Per gli strati coesivi profondi, si dovrebbe quantomeno conoscere il valore dell'indice di plasticità, che è quello che condiziona il decadimento di G_0 con gli sforzi di taglio τ . Non avendo questi dati, si assumono delle curve cautelative con plasticità del 30%. In verità ci si aspetterebbero valori di plasticità più bassi. Ma considerata la bassa pericolosità di base in questo comune, non si va incontro ad errori significativi, facendo queste assunzioni. Lo si è verificato facendo anche diverse simulazioni con indice di plasticità crescente dal 10% fino al 50%.

Di seguito si riportano i modelli stratigrafici e geofisici di dettaglio dei primi 30m e quelli profondi, per ogni località studiata (**FIGURA 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15**).

Dopo ogni figura che rappresenta i modelli geologici, si riportano le tabelle estratte dal software con i modelli numerici di input utilizzati per procedere all'analisi di risposta sismica locale (**Tabella 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6**).

4.1. Ariano Ferrarese

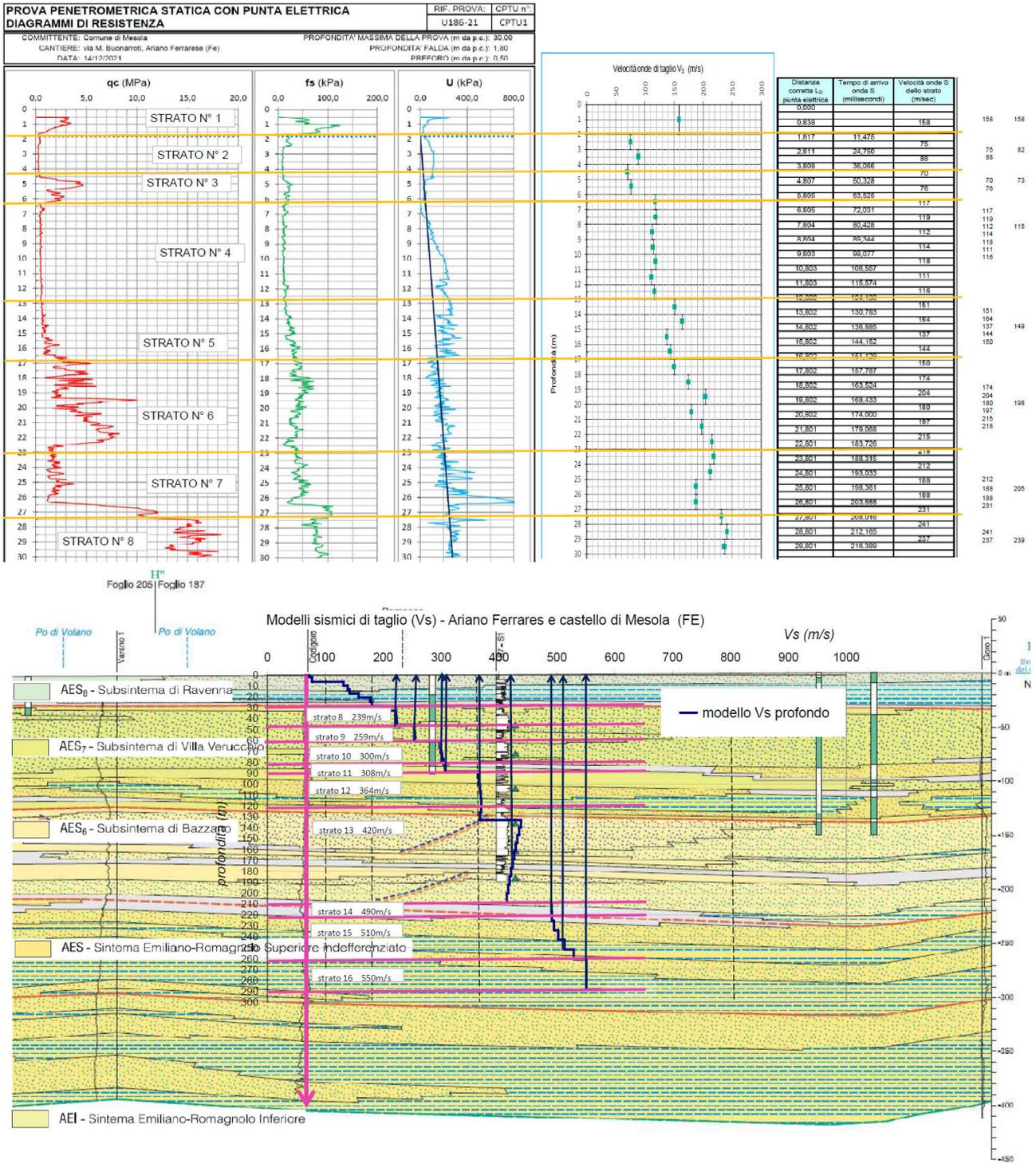


Figura 4-10 Modello Ariano Ferrarese

Ariano Ferrarese – Modello di INPUT

Di seguito i riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

STRATO	S [M]	P [KG/M ³]	VS [M/S]	CURVA DECADIMENTO
STRATO (1)	2.00	1700.00	158.00	COPERTURA LIMOSO ARGILLOSA
STRATO (2)	2.50	1600.00	82.00	FANGHI MOLLI ARIANO
STRATO (3)	2.00	1800.00	73.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (4)	6.50	1600.00	115.00	FANGHI MOLLI ARIANO
STRATO (5)	4.00	1750.00	149.00	FANGHI MARINI
STRATO (6)	6.00	1850.00	198.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (7)	4.50	1800.00	205.00	ARGILLE LIMOSE PLEISTOCENICHE
STRATO (8)	20.50	1900.00	239.00	EPRI (93), 120-250 FT
STRATO (9)	14.00	1950.00	259.00	EPRI (93), 120-250 FT
STRATO (10)	20.00	1950.00	300.00	EPRI (93), 120-250 FT
STRATO (11)	9.00	1900.00	308.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (12)	31.00	2000.00	364.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (13)	88.00	2050.00	420.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (14)	12.00	2050.00	490.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (15)	40.00	2100.00	510.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (16)	28.00	2100.00	550.00	EPRI (93), PI=30

Tabella 4-1 *Caratteristiche meccaniche strati Modello Ariano Ferrarese*

4.2. Italba-Massenzatica

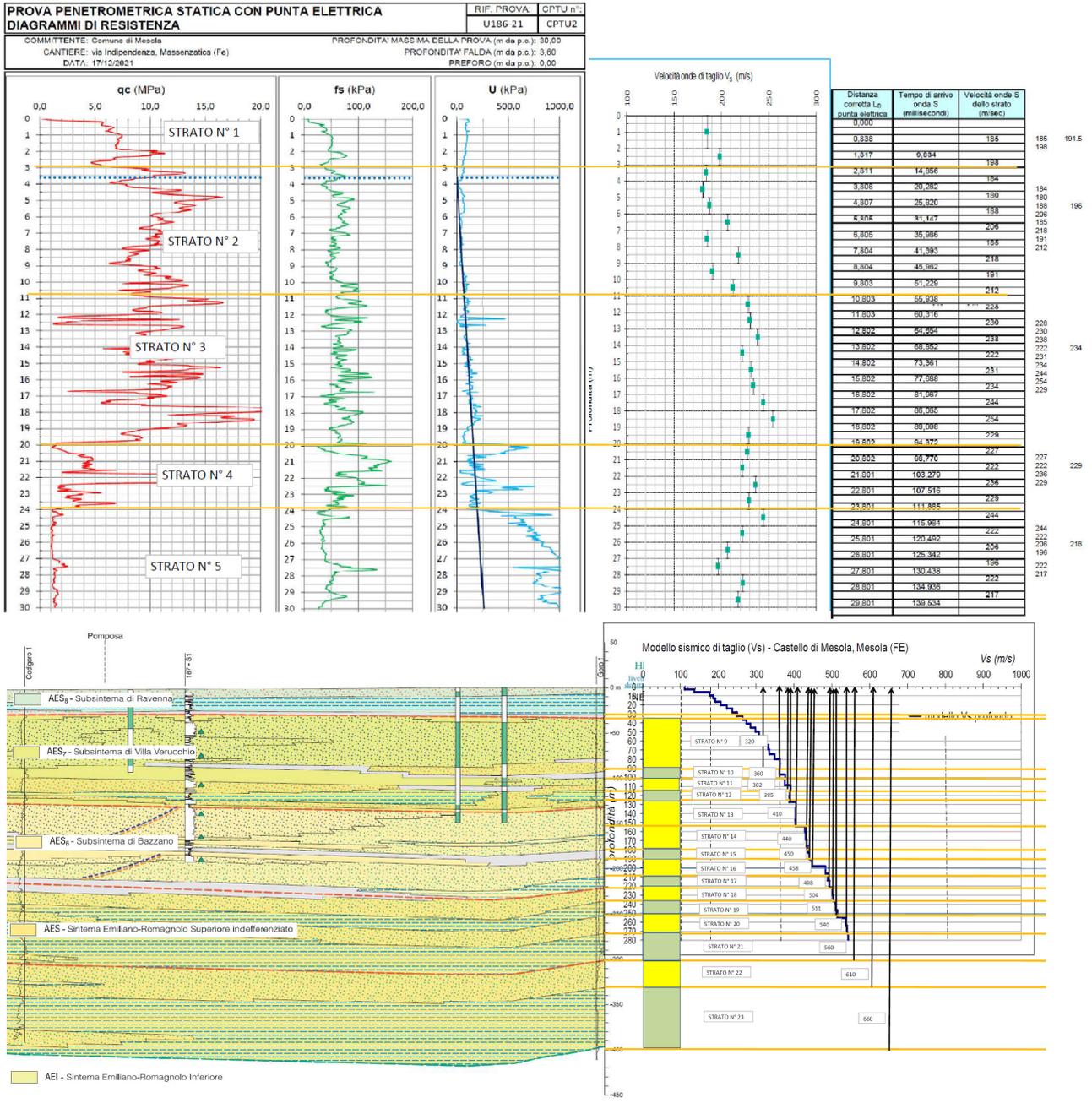


Figura 4-11 Modello Italba Massenzatica

Italba Massenzatica – Modello di INPUT

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

STRATO	S [M]	P [KG/M ³]	VS [M/S]	CURVA DECADIMENTO
STRATO (1)	3.00	1850.00	192.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (2)	7.00	1850.00	196.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (3)	9.00	1900.00	234.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (4)	4.00	1850.00	229.00	LIMI ARGILLOSO SABBIOSI PRODELTA
STRATO (5)	8.00	1800.00	218.00	FANGHI MARINI
STRATO (6)	3.00	1900.00	250.00	SABBIE PLEISTOCENICHE
STRATO (7)	55.00	1900.00	320.00	EPRI (93), 120-250 FT
STRATO (8)	10.00	1900.00	360.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (9)	14.00	2000.00	382.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (10)	12.00	2000.00	385.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (11)	27.00	2000.00	410.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (12)	27.00	2000.00	440.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (13)	10.00	2050.00	450.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (14)	20.00	2100.00	458.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (15)	12.00	2100.00	498.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (16)	14.00	2150.00	504.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (17)	16.00	2100.00	511.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (18)	20.00	2150.00	540.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (19)	28.00	2100.00	560.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (20)	30.00	2150.00	610.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (21)	70.00	2100.00	660.00	EPRI (93), PI=30

Tabella 4-2 Caratteristiche meccaniche strati Modello Italba Massenzatica

4.3. Monticelli

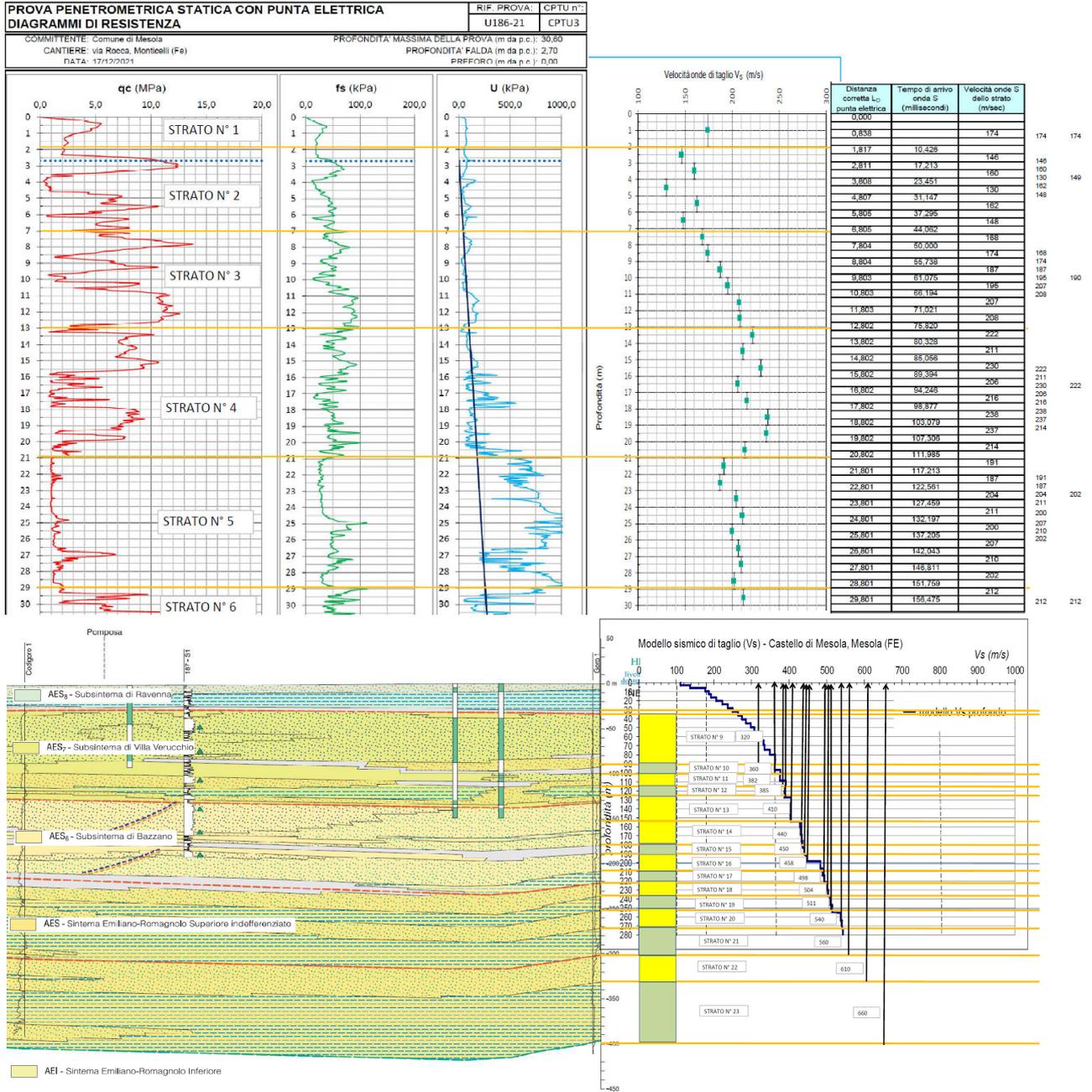


Figura 4-12 *Modello Monticelli*

Monticelli Modello di INPUT

Di seguito i riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

STRATO	S [M]	P [KG/M ³]	VS [M/S]	CURVA DECADIMENTO
STRATO (1)	2.00	1800.00	174.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (2)	5.00	1800.00	149.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (3)	6.00	1850.00	190.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (4)	8.00	1900.00	222.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (5)	8.00	1800.00	202.00	FANGHI MARINI
STRATO (6)	6.00	1900.00	212.00	SABBIE PLEISTOCENICHE
STRATO (7)	55.00	1900.00	320.00	EPRI (93), 120-250 FT
STRATO (8)	10.00	1900.00	360.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (9)	14.00	2000.00	382.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (10)	12.00	2000.00	385.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (11)	27.00	2000.00	410.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (12)	27.00	2000.00	440.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (13)	10.00	2050.00	450.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (14)	20.00	2100.00	458.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (15)	12.00	2100.00	498.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (16)	14.00	2150.00	504.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (17)	16.00	2100.00	511.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (18)	20.00	2150.00	540.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (19)	28.00	2100.00	560.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (20)	30.00	2150.00	610.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (21)	70.00	2100.00	660.00	EPRI (93), PI=30

Tabella 4-3 *Caratteristiche meccaniche strati Modello Monticelli*

4.4. Mesola

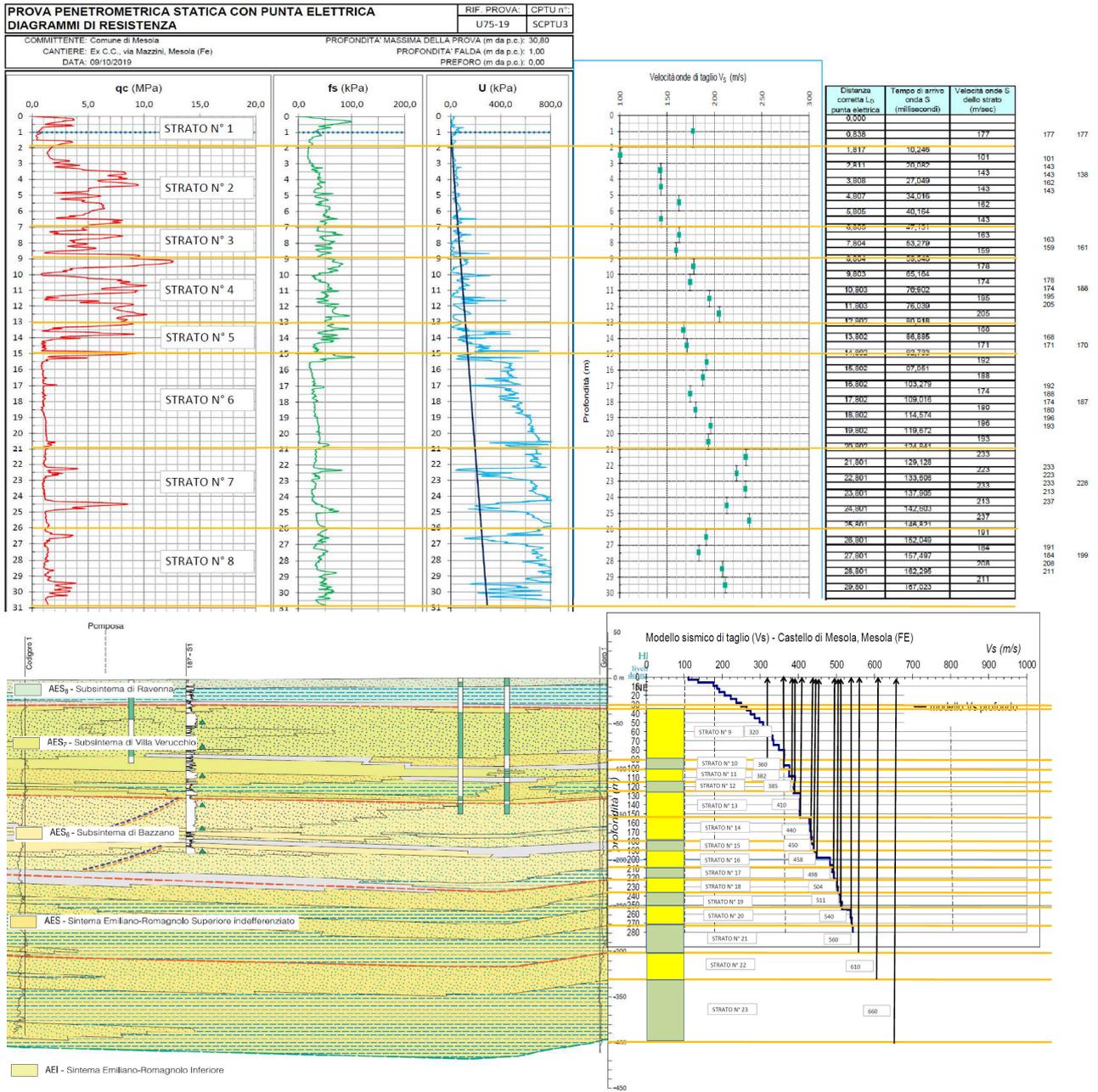


Figura 4-13 Modello Mesola

Mesola – modello di INPUT

Di seguito i riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

STRATO	S [M]	P [KG/M ³]	VS [M/S]	CURVA DECADIMENTO
STRATO (1)	2.00	1700.00	177.00	COPERTURA LIMOSO ARGILLOSA
STRATO (2)	1.00	1800.00	138.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (3)	2.00	1850.00	161.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (4)	4.00	1900.00	188.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (5)	2.00	1750.00	170.00	LIMI ARGILLOSO SABBIOSI PRODELTA
STRATO (6)	1.00	1800.00	300.00	FANGHI MARINI
STRATO (7)	5.00	1850.00	228.00	FANGHI MARINI
STRATO (8)	9.00	1850.00	199.00	FANGHI MARINI
STRATO (9)	55.00	1950.00	320.00	EPRI (93), 120-250 FT
STRATO (10)	10.00	1900.00	360.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (11)	14.00	2000.00	382.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (12)	12.00	2000.00	385.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (13)	27.00	2000.00	410.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (14)	27.00	2000.00	440.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (15)	10.00	2050.00	450.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (16)	20.00	2100.00	458.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (17)	12.00	2100.00	498.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (18)	14.00	2150.00	504.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (19)	16.00	2100.00	511.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (20)	20.00	2150.00	540.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (21)	28.00	2100.00	560.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (22)	30.00	2150.00	610.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (23)	70.00	2100.00	660.00	EPRI (93), PI=30

Tabella 4-4 Caratteristiche meccaniche strati Modello Mesola

4.5. Bosco Mesola

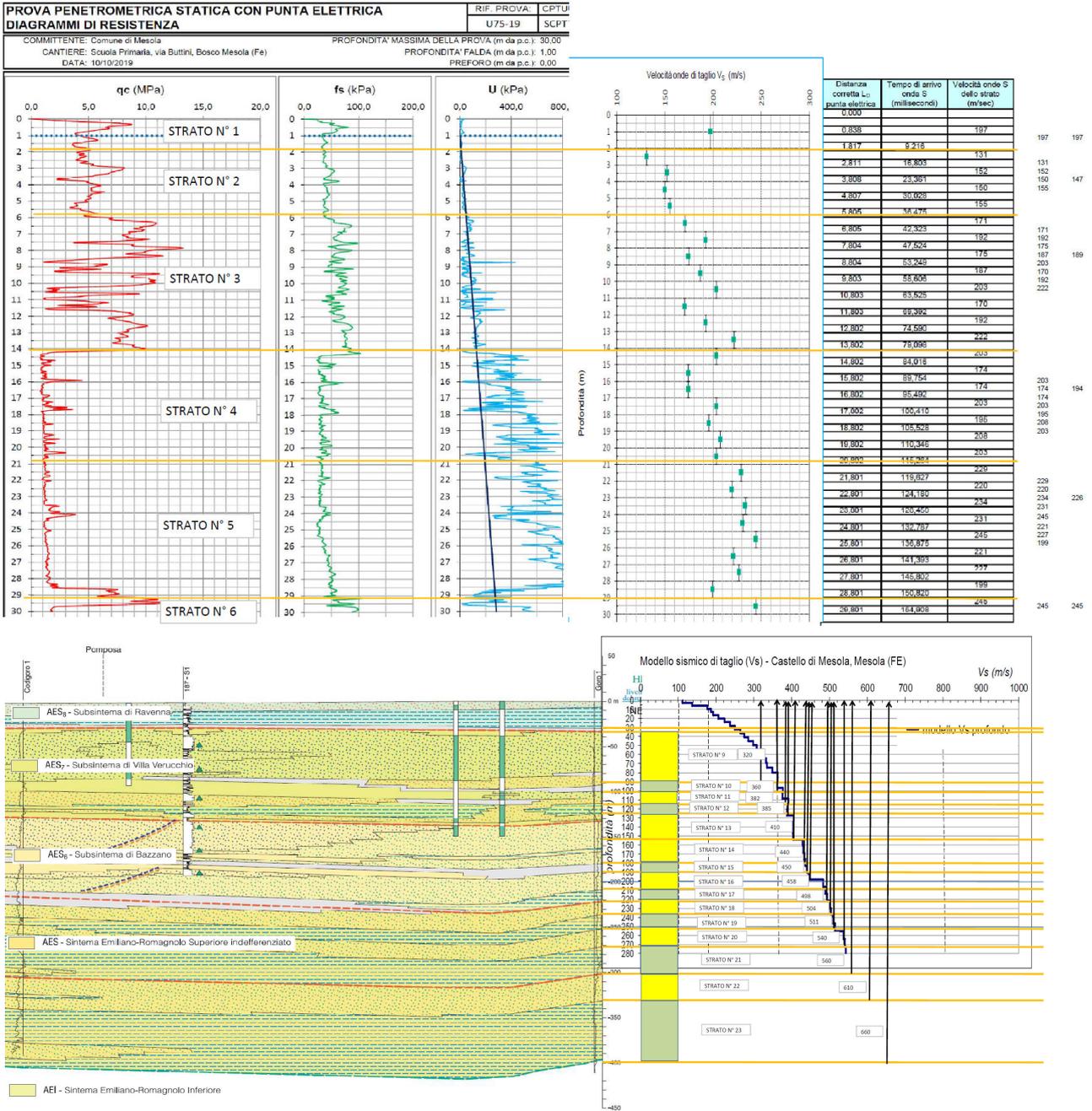


Figura 4-14 *Modello Bosco Mesola*

Bosco Mesola modello di INPUT

Di seguito i riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

STRATO	S [M]	P [KG/M ³]	VS [M/S]	CURVA DECADIMENTO
STRATO (1)	2.00	1800.00	197.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (2)	4.00	1750.00	147.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (3)	8.00	1850.00	189.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (4)	7.00	1800.00	194.00	LIMI ARGILLOSO SABBIOSI PRODELTA
STRATO (5)	8.00	1800.00	226.00	FANGHI MARINI
STRATO (6)	6.00	1850.00	245.00	ARGILLE LIMOSE PLEISTOCENE CONTINENTALI
STRATO (7)	55.00	1950.00	320.00	EPRI (93), 120-250 FT
STRATO (8)	10.00	1900.00	360.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (9)	14.00	2000.00	382.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (10)	12.00	2000.00	385.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (11)	27.00	2000.00	410.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (12)	27.00	2000.00	440.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (13)	10.00	2050.00	450.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (14)	20.00	2100.00	458.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (15)	12.00	2100.00	498.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (16)	14.00	2150.00	504.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (17)	16.00	2100.00	511.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (18)	20.00	2150.00	540.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (19)	28.00	2100.00	560.00	EPRI (93), PI=30
STRATO (20)	30.00	2150.00	610.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (21)	70.00	2100.00	660.00	EPRI (93), PI=30

Tabella 4-5 Caratteristiche meccaniche strati Modello Bosco Mesola

4.6. Santa Giustina-Alberazzo

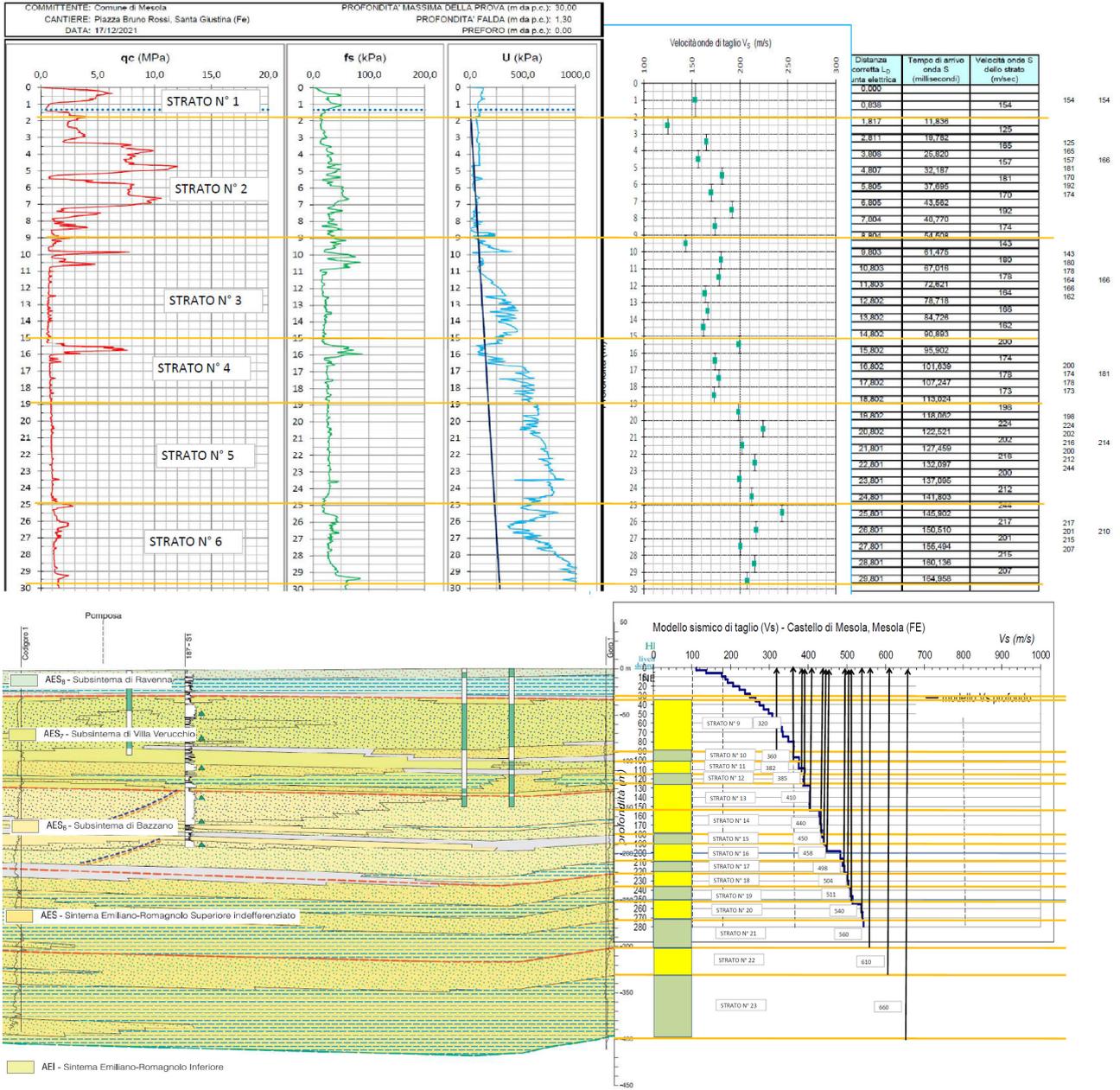


Figura 4-15 Modello Santa Giustina-Alberazzo

Santa Giustina – Alberazzo Modello di INPUT

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

STRATO	S [M]	P [KG/M ³]	VS [M/S]	CURVA DECADIMENTO
STRATO (1)	2.00	1800.00	154.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (2)	7.00	1850.00	166.00	SABBIE LIMOSE BATTIGIA
STRATO (3)	6.00	1800.00	166.00	LIMI ARGILLOSO SABBIOSI PRODELTA
STRATO (4)	4.00	1750.00	181.00	FANGHI MARINI
STRATO (5)	6.00	1800.00	214.00	FANGHI MARINI
STRATO (6)	10.00	1800.00	210.00	ARGILLE LIMOSE PLEISTOCENICHE
STRATO (7)	55.00	1900.00	320.00	EPRI (93), 120-250 FT
STRATO (8)	10.00	1900.00	360.00	EPRI (93), PI=50
STRATO (9)	14.00	2000.00	382.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (10)	12.00	2000.00	385.00	EPRI (93), PI=50
STRATO (11)	27.00	2000.00	410.00	EPRI (93), 250-500 FT
STRATO (12)	27.00	2000.00	440.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (13)	10.00	2050.00	450.00	EPRI (93), PI=50
STRATO (14)	20.00	2100.00	458.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (15)	12.00	2100.00	498.00	EPRI (93), PI=50
STRATO (16)	14.00	2150.00	504.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (17)	16.00	2100.00	511.00	EPRI (93), PI=50
STRATO (18)	20.00	2150.00	540.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (19)	28.00	2100.00	560.00	EPRI (93), PI=50
STRATO (20)	30.00	2150.00	610.00	EPRI (93), 500-1000 FT
STRATO (21)	70.00	2100.00	660.00	EPRI (93), PI=50

Tabella 4-6 Caratteristiche meccaniche strati Modello Bosco Mesola

5. SINTESI DEI RISULTATI – MODELLI DI OUTPUT

Di seguito si riportano le figure con rappresentati lo spettro medio di Input e lo spettro medio di Output per ogni località. Seguono i risultati dei calcoli dei fattori di amplificazione nei diversi periodi previsti dalla normativa per le accelerazioni spettrali FA, per la PGA/PGA0, e per l'Intensità di Housner SI/SI0.

5.1. Ariano Ferrarese

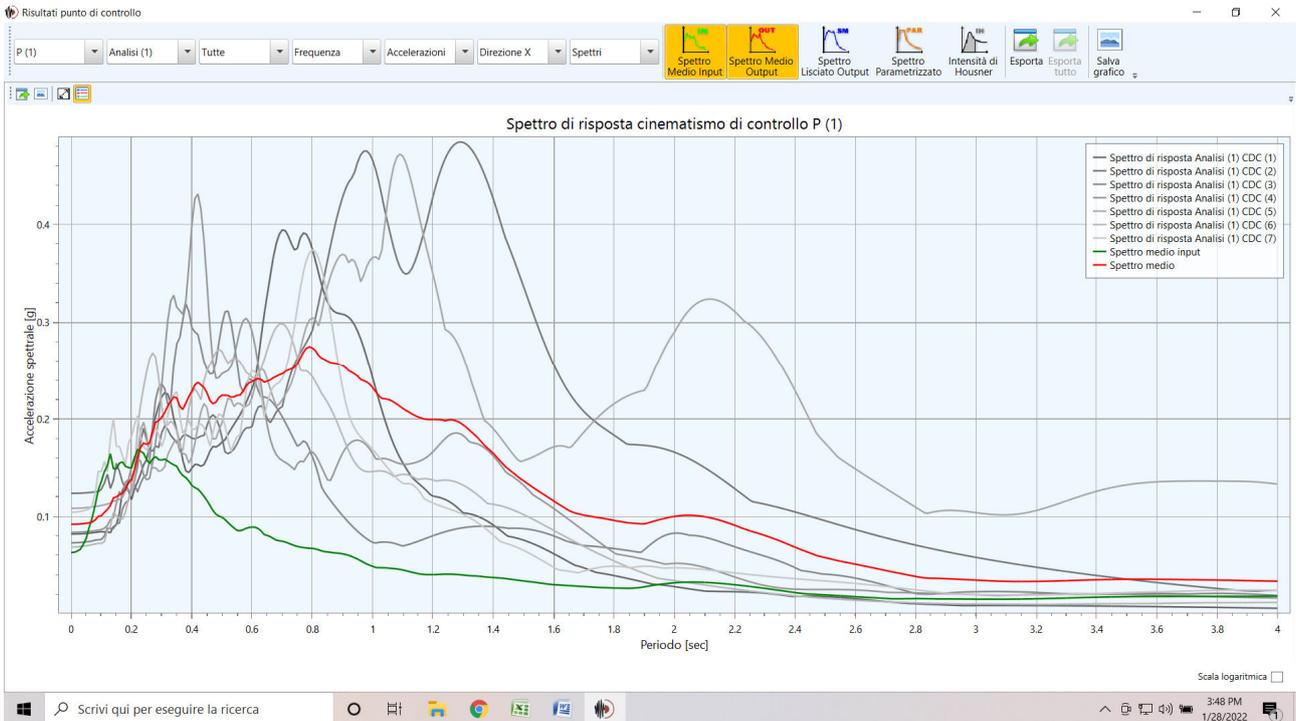


Figura 5-1 Ariano Ferrarese

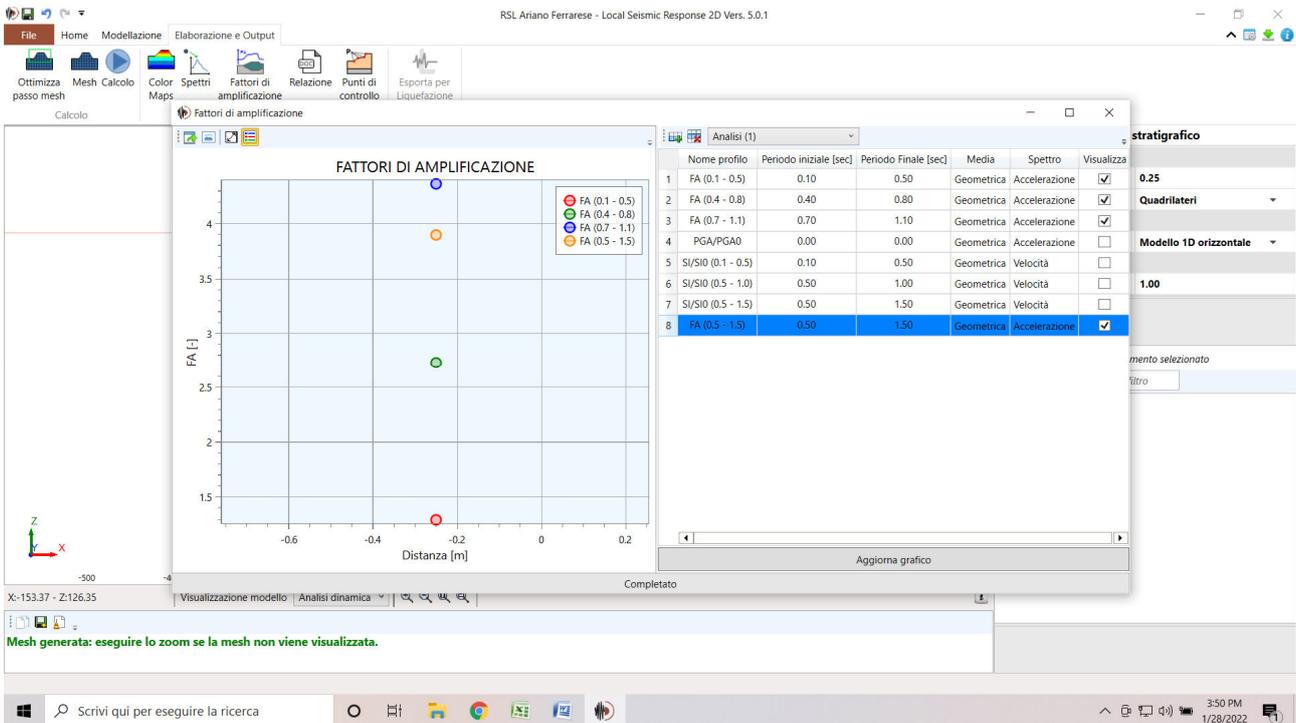


Figura 5-2 Ariano Ferrarese

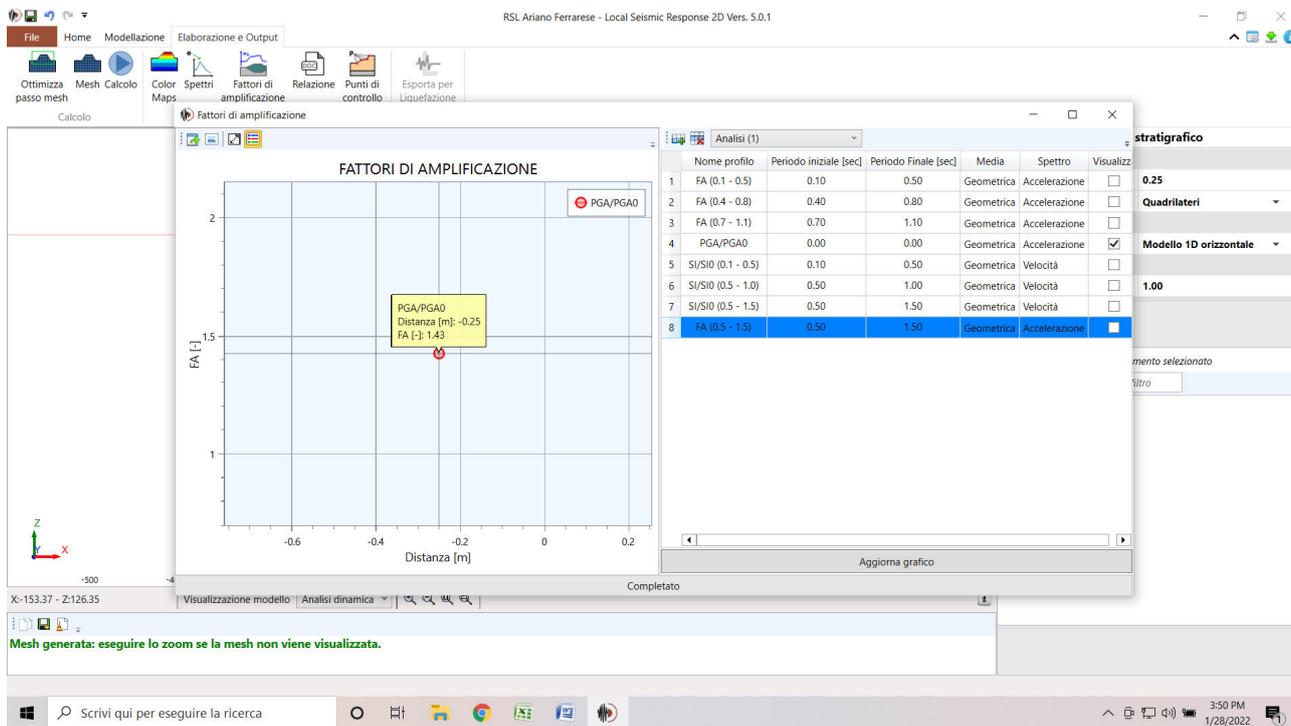


Figura 5-3 Ariano Ferrarese

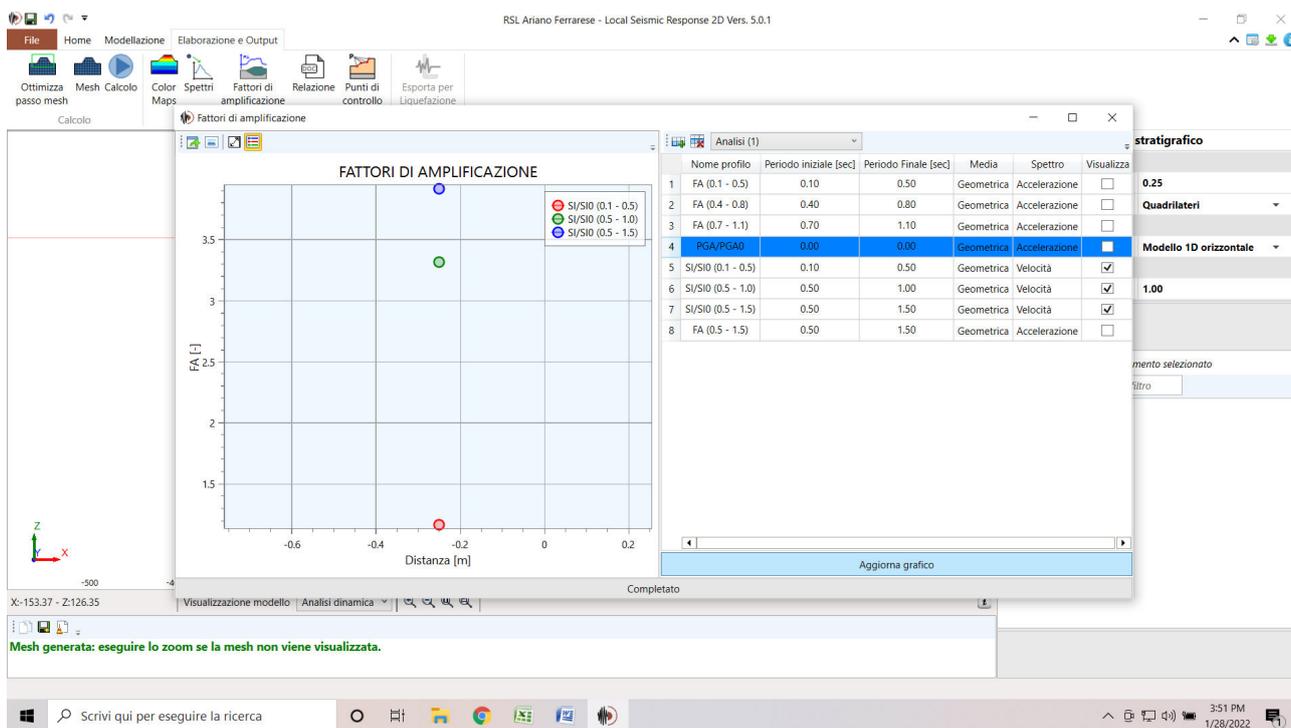


Figura 5-4 Ariano Ferrarese

5.2. Italba Massenzatica

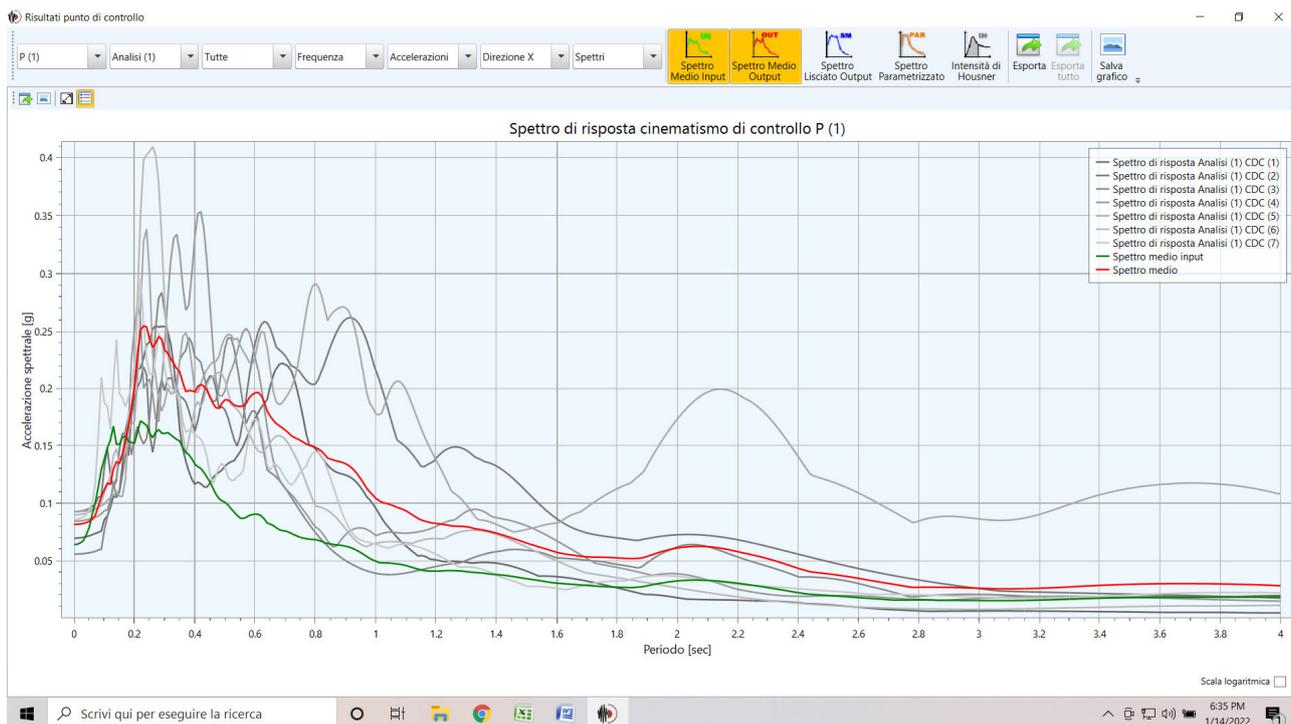


Figura 5-5 Italba Massenzatica

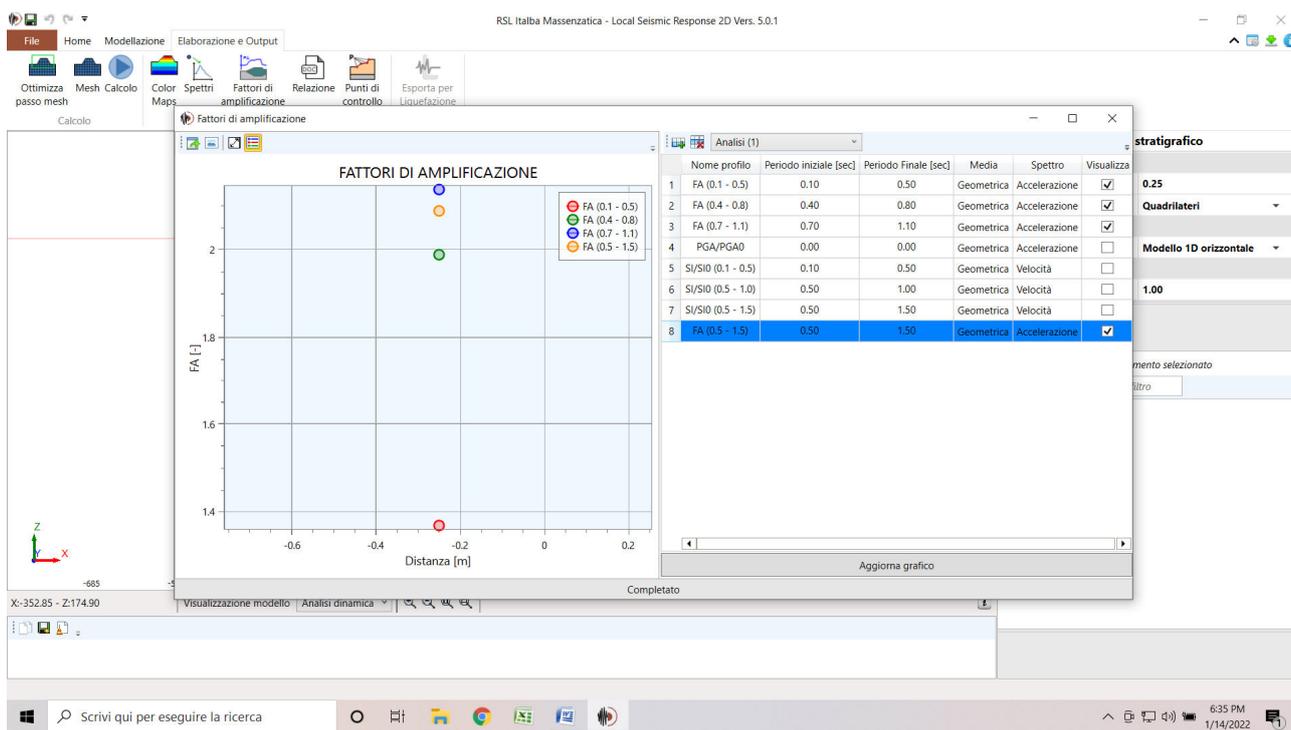


Figura 5-6 Italba Massenzatica

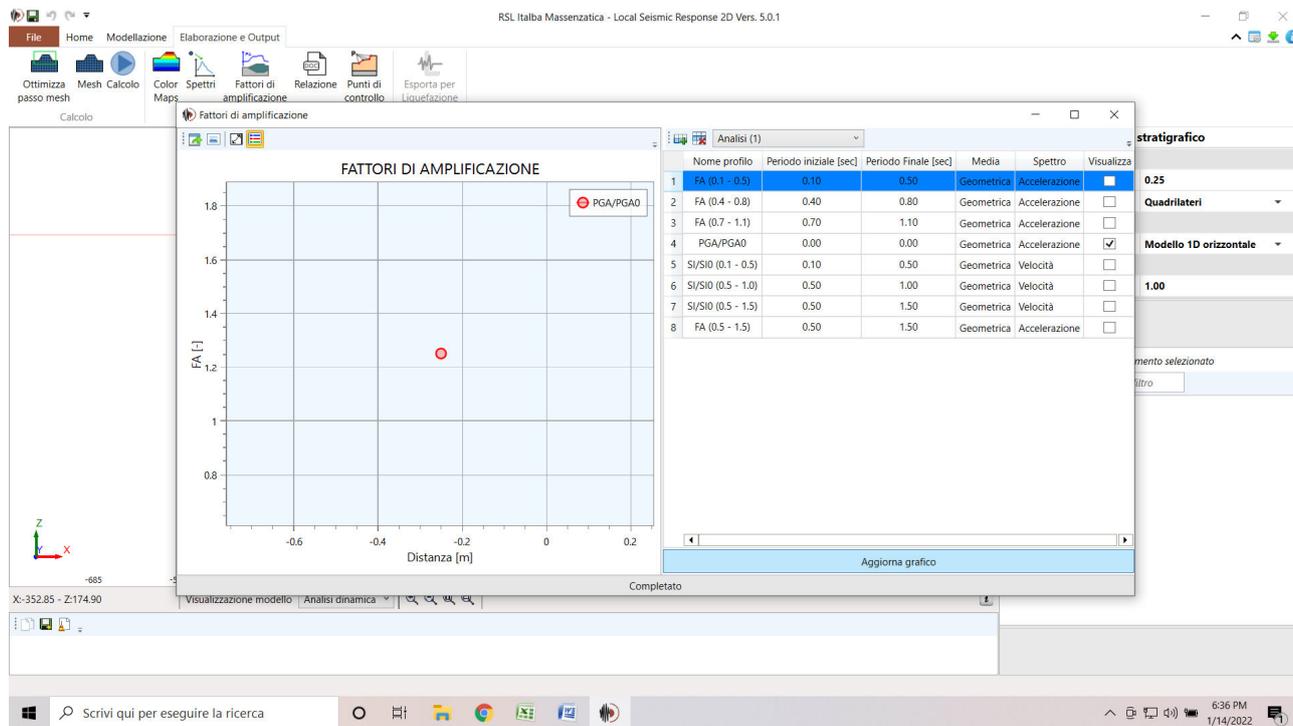


Figura 5-7 *Italba Massenzatica*

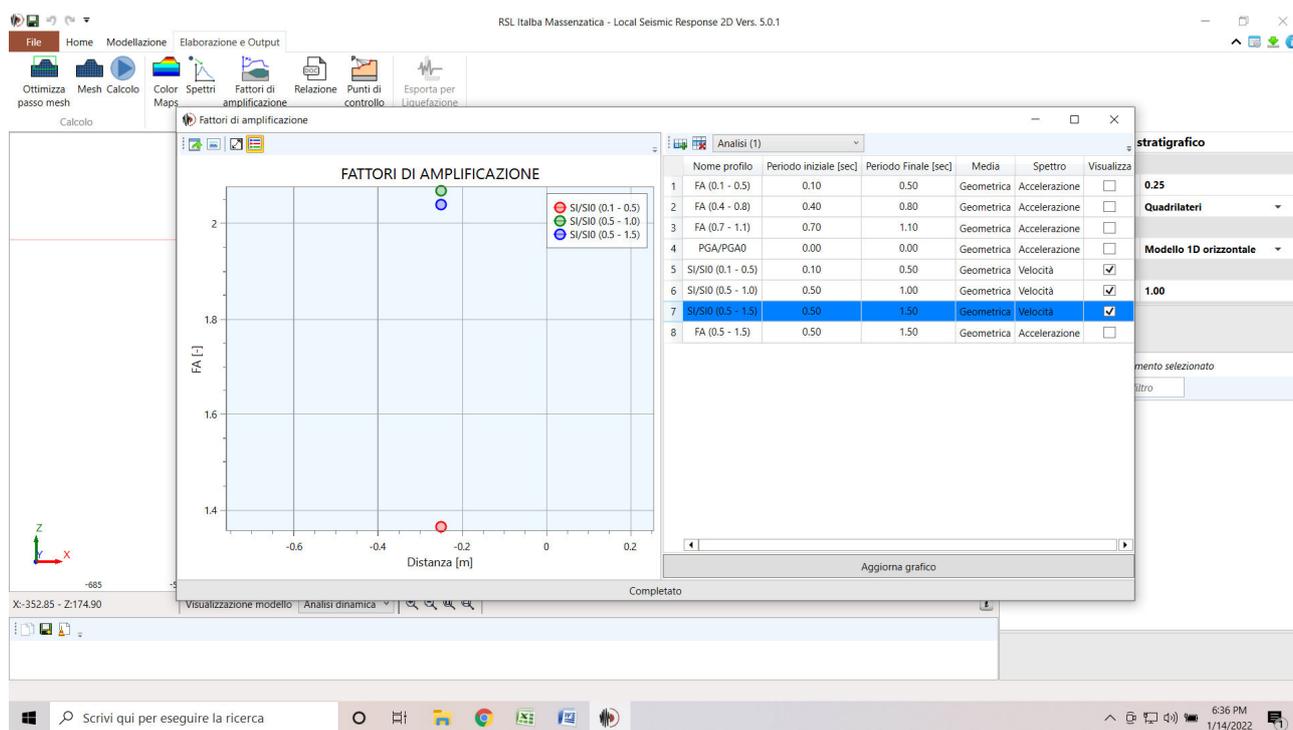


Figura 5-8 *Italba Massenzatica*

5.3. Monticelli

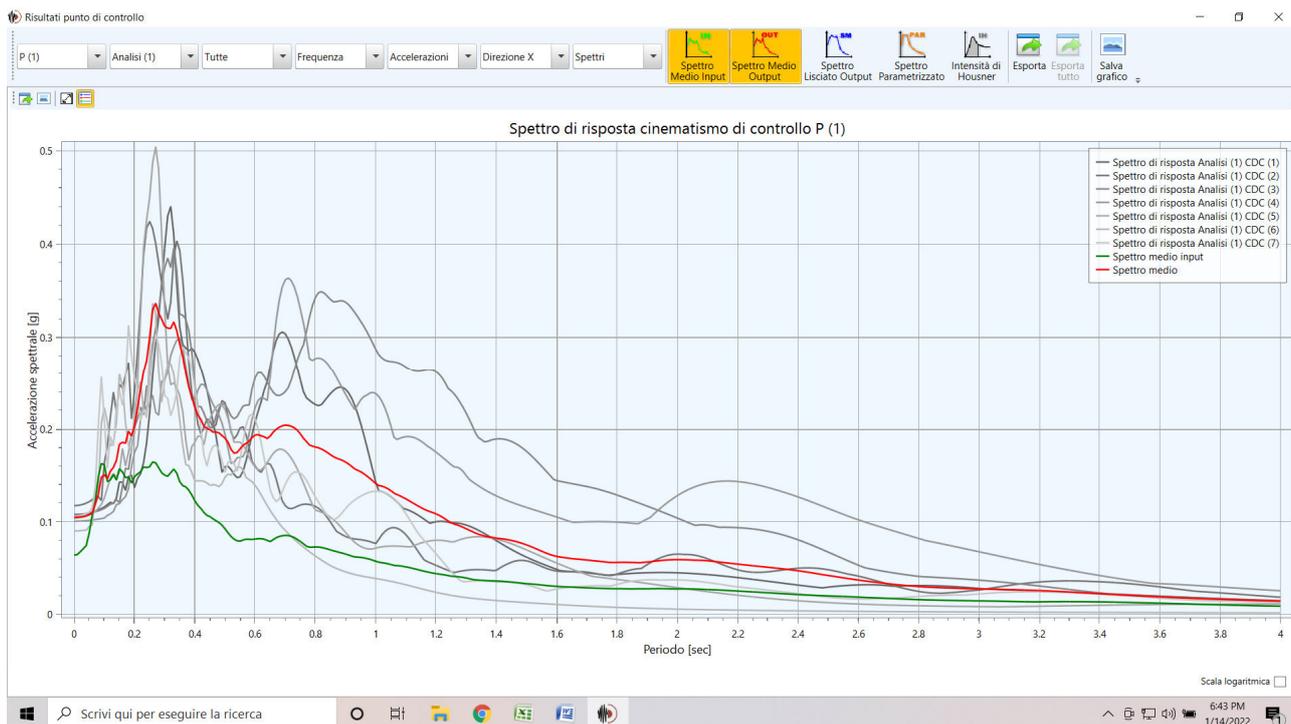


Figura 5-9 Monticelli

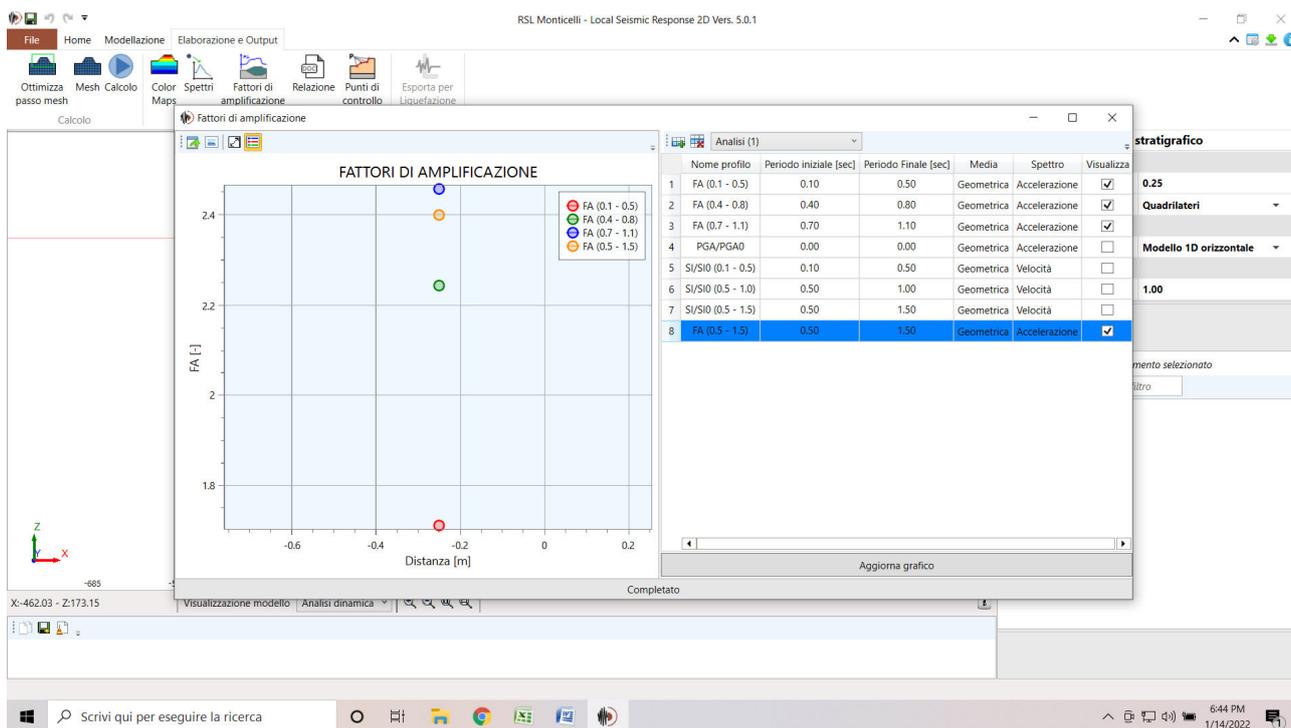


Figura 5-10 Monticelli

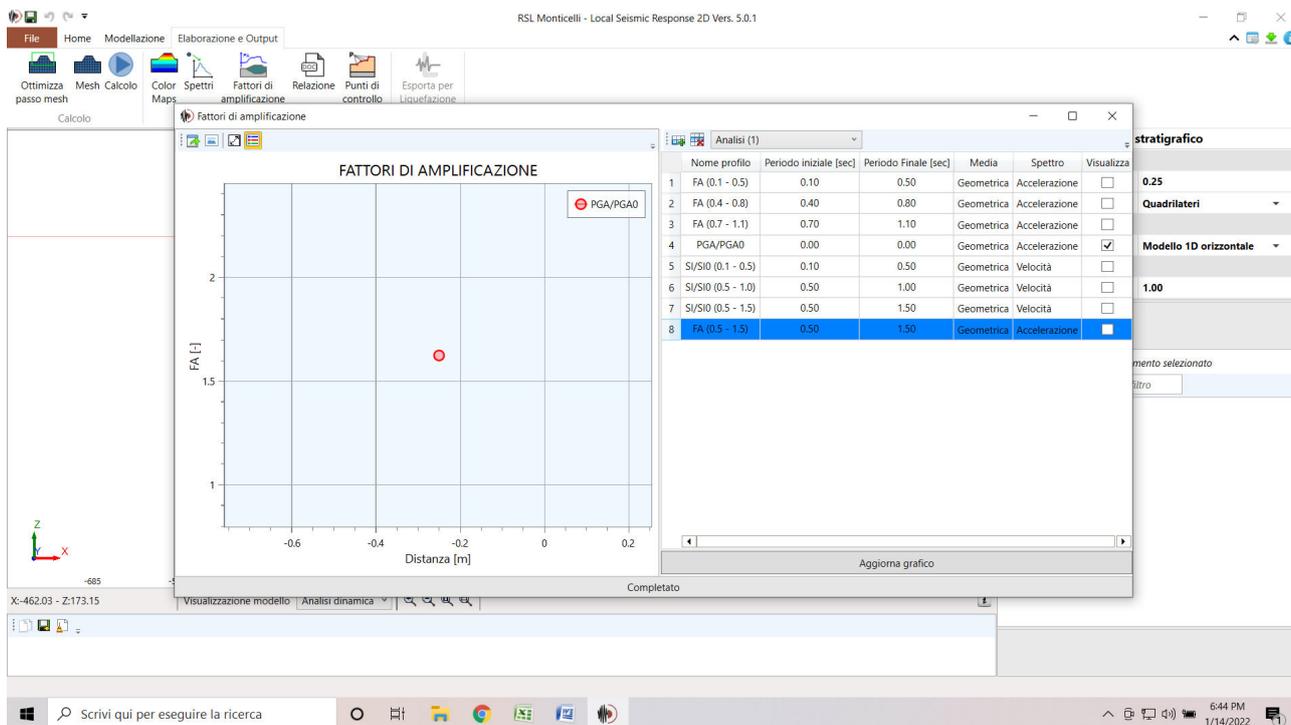


Figura 5-11 Monticelli

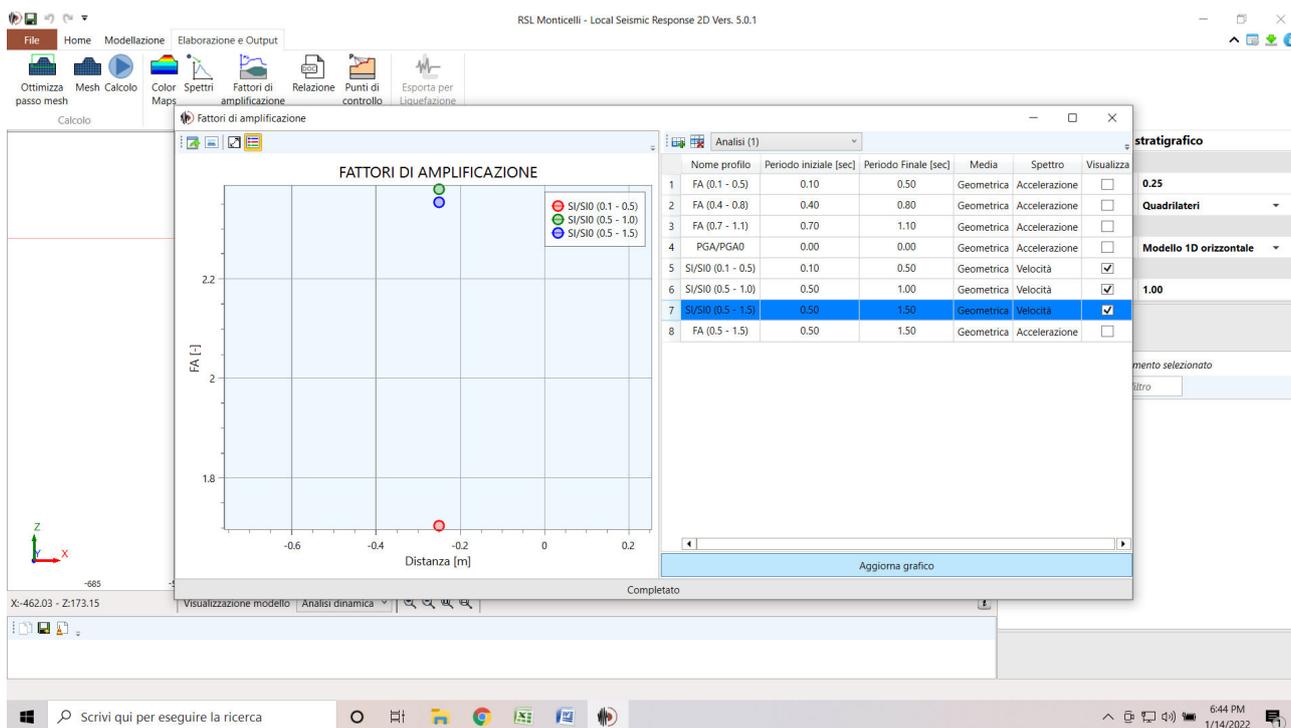


Figura 5-12 Monticelli

5.4. Mesola

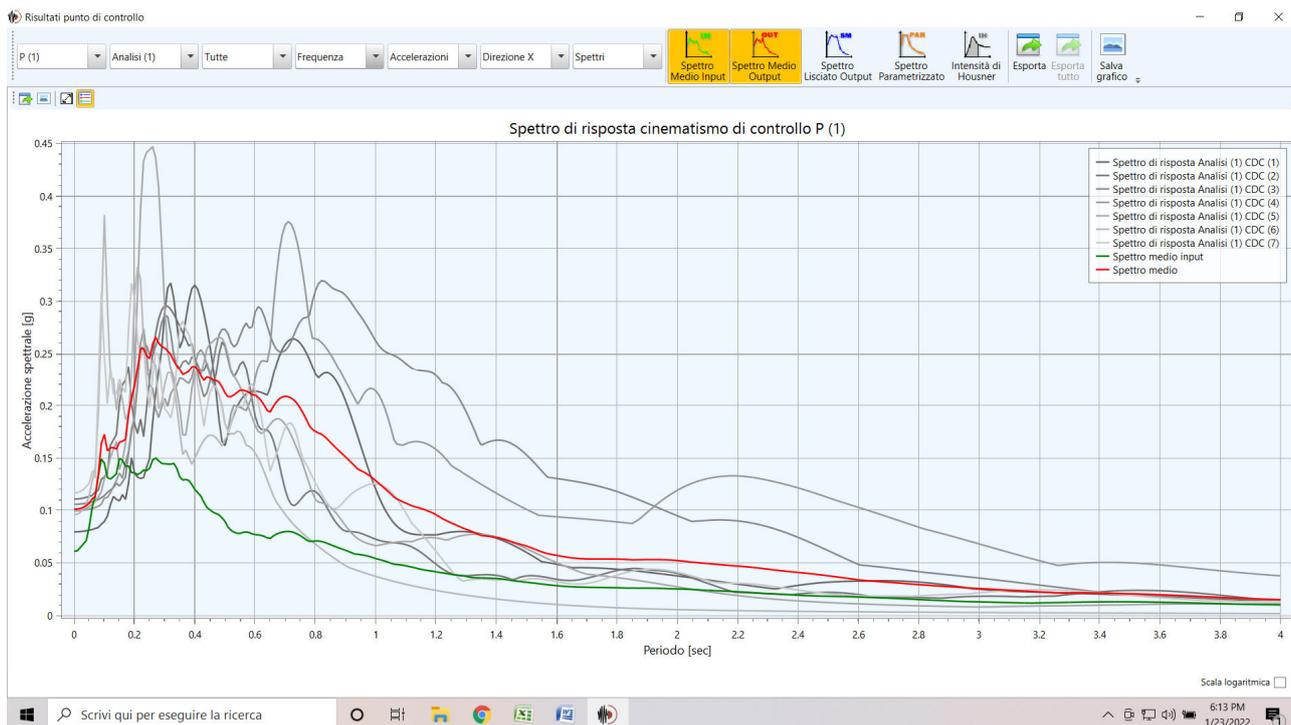


Figura 5-13 Mesola

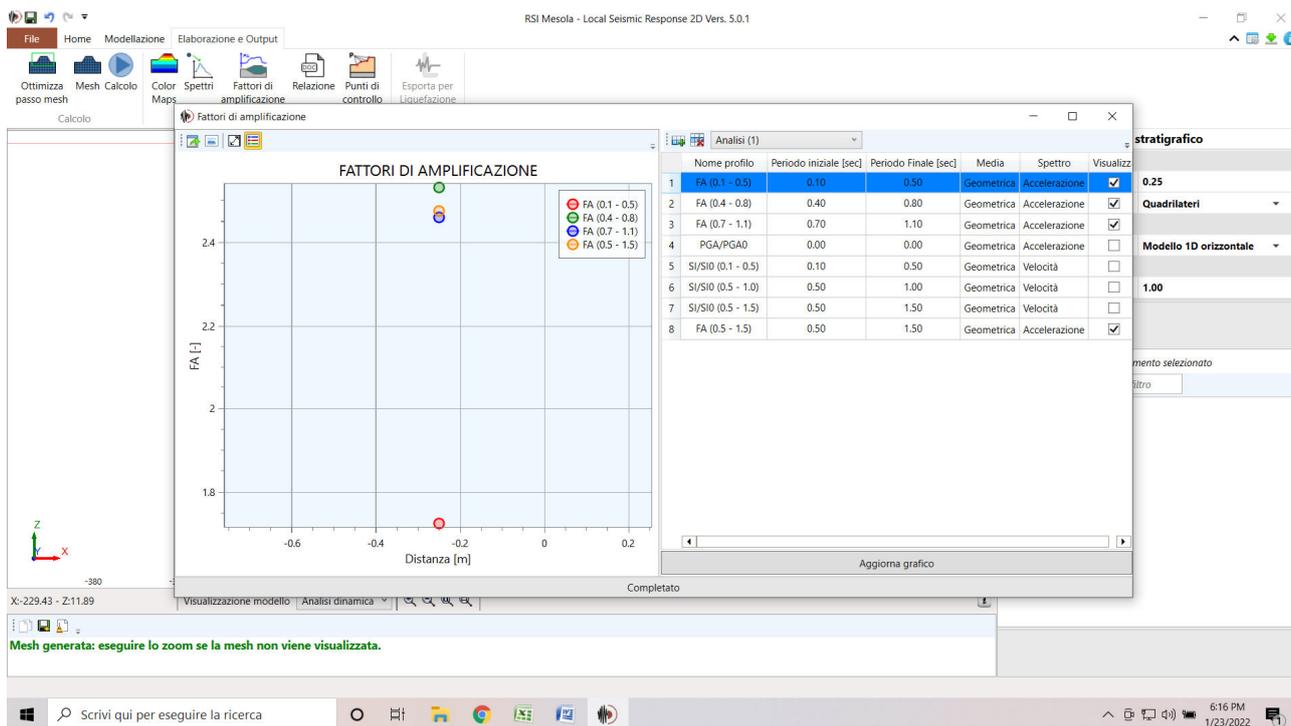


Figura 5-14 Mesola

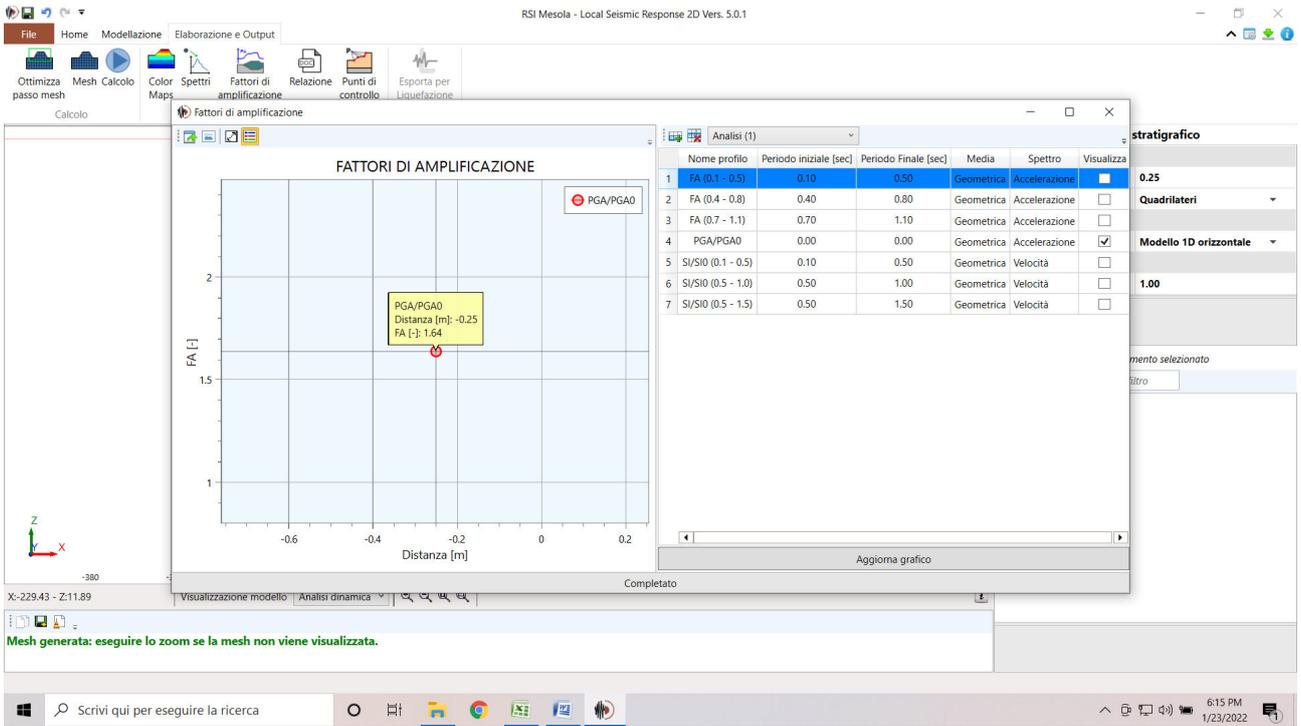


Figura 5-15 Mesola

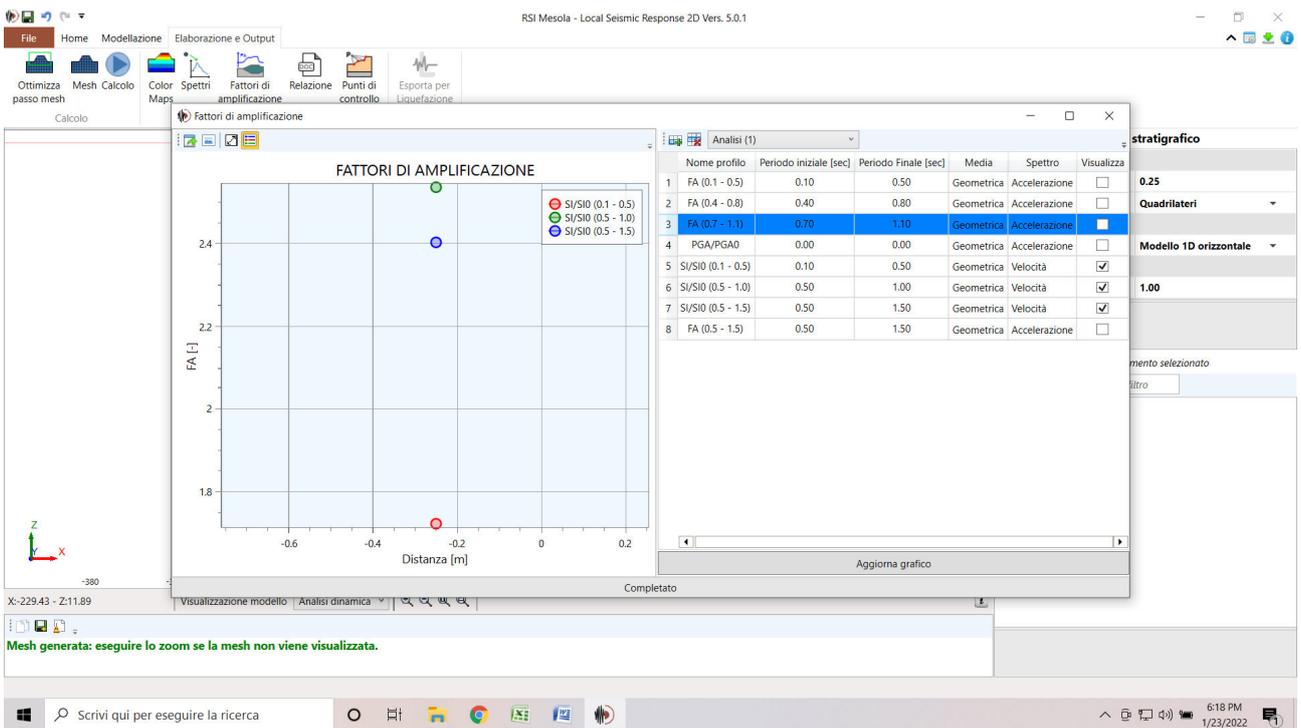


Figura 5-16 Mesola

5.5. Bosco Mesola

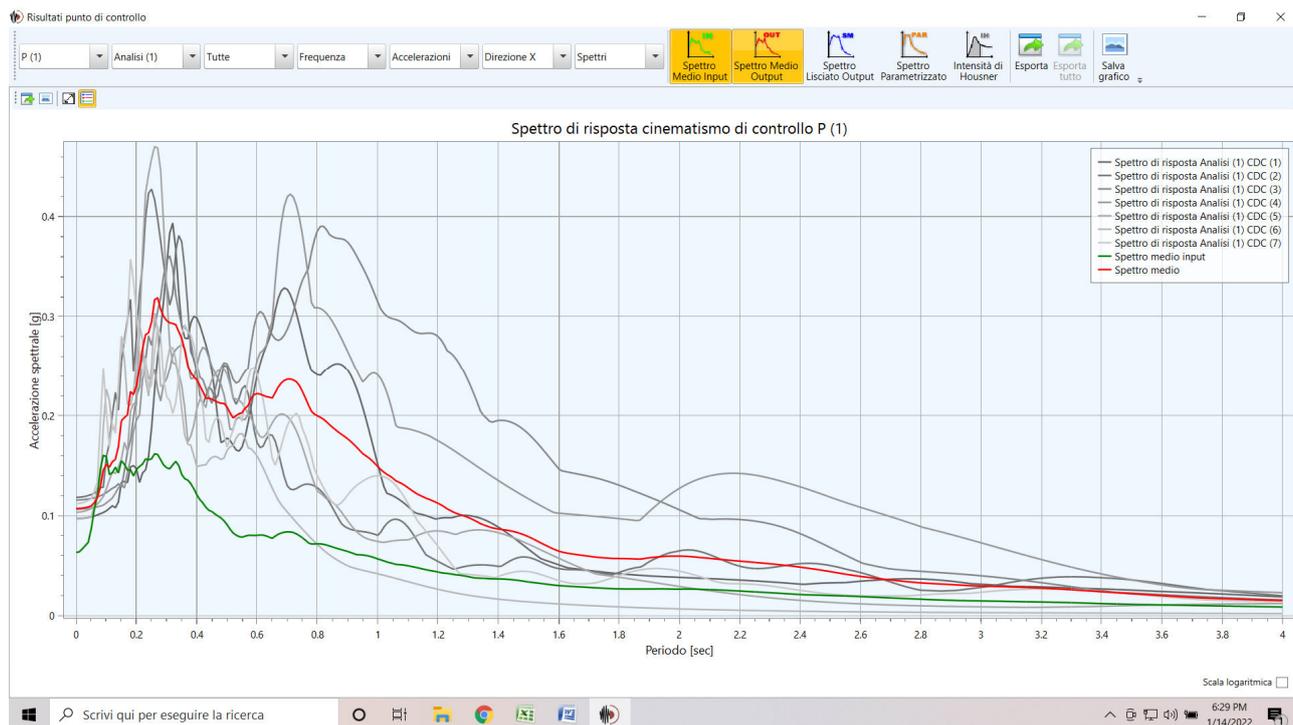


Figura 5-17 Bosco Mesola

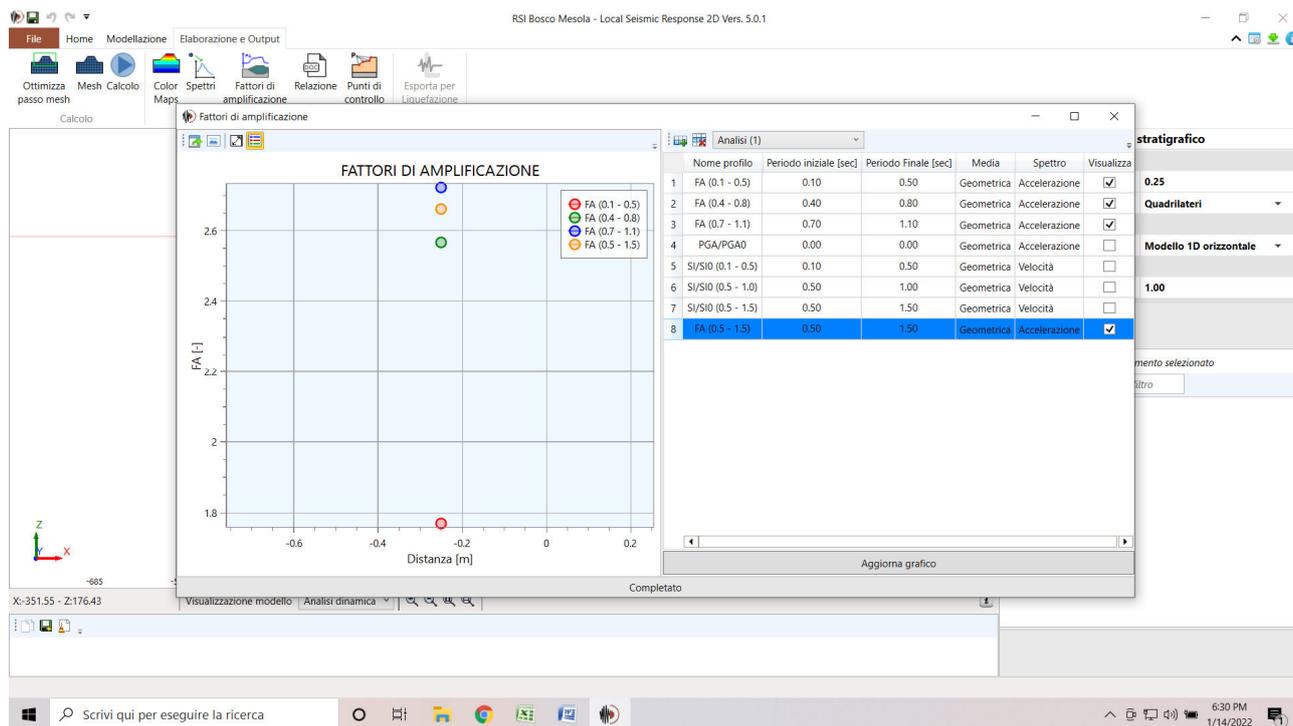


Figura 5-18 Bosco Mesola

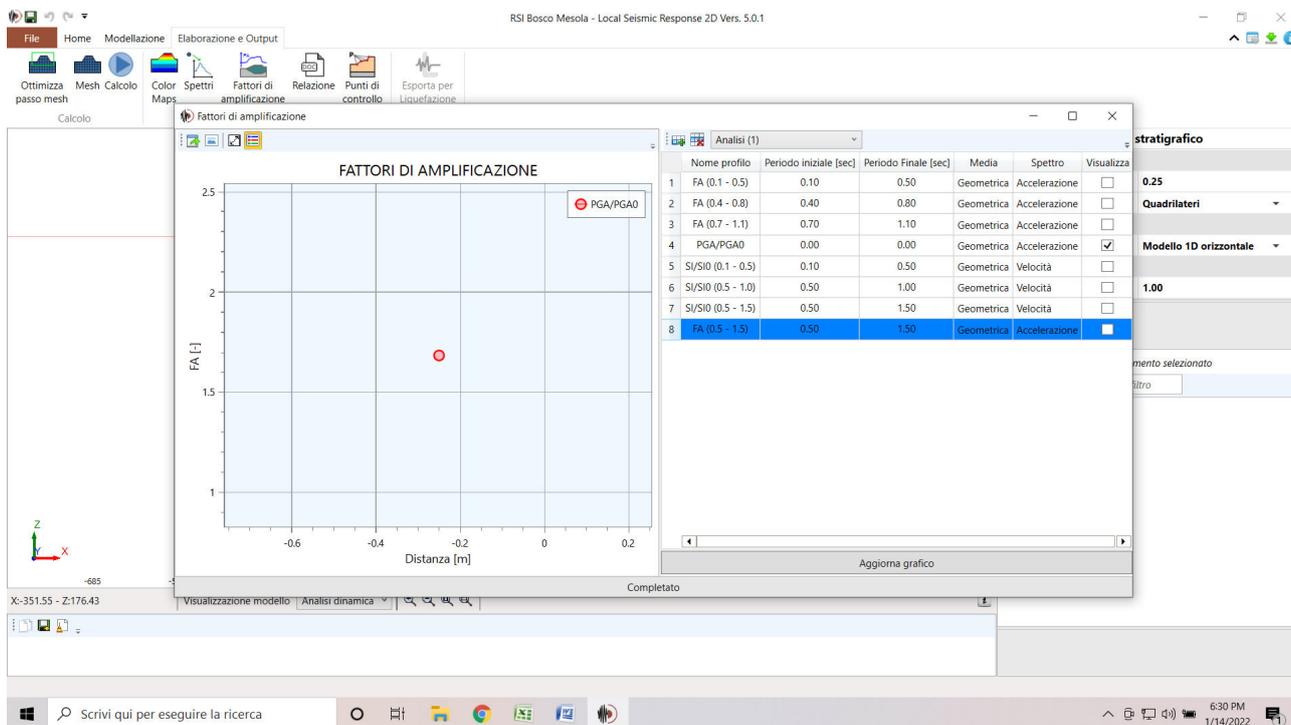


Figura 5-19 Bosco Mesola

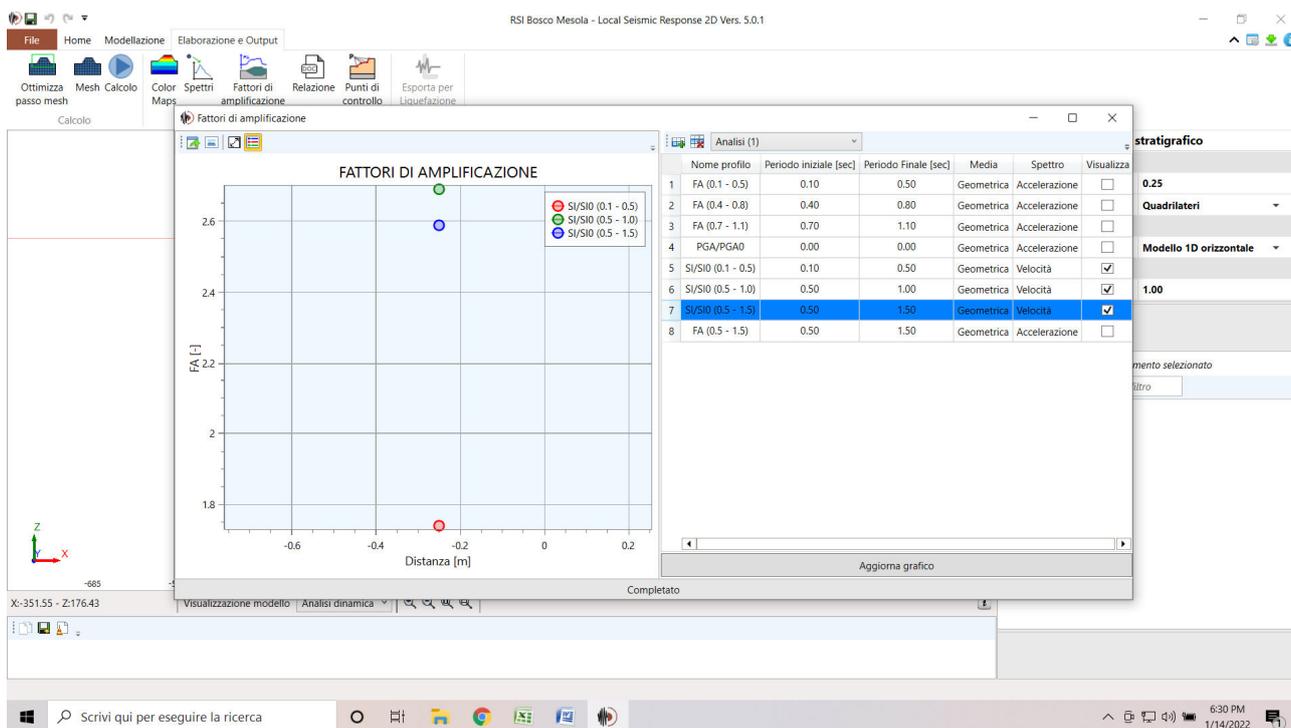


Figura 5-20 Bosco Mesola

5.6. Santa Giustina – Alberazzo

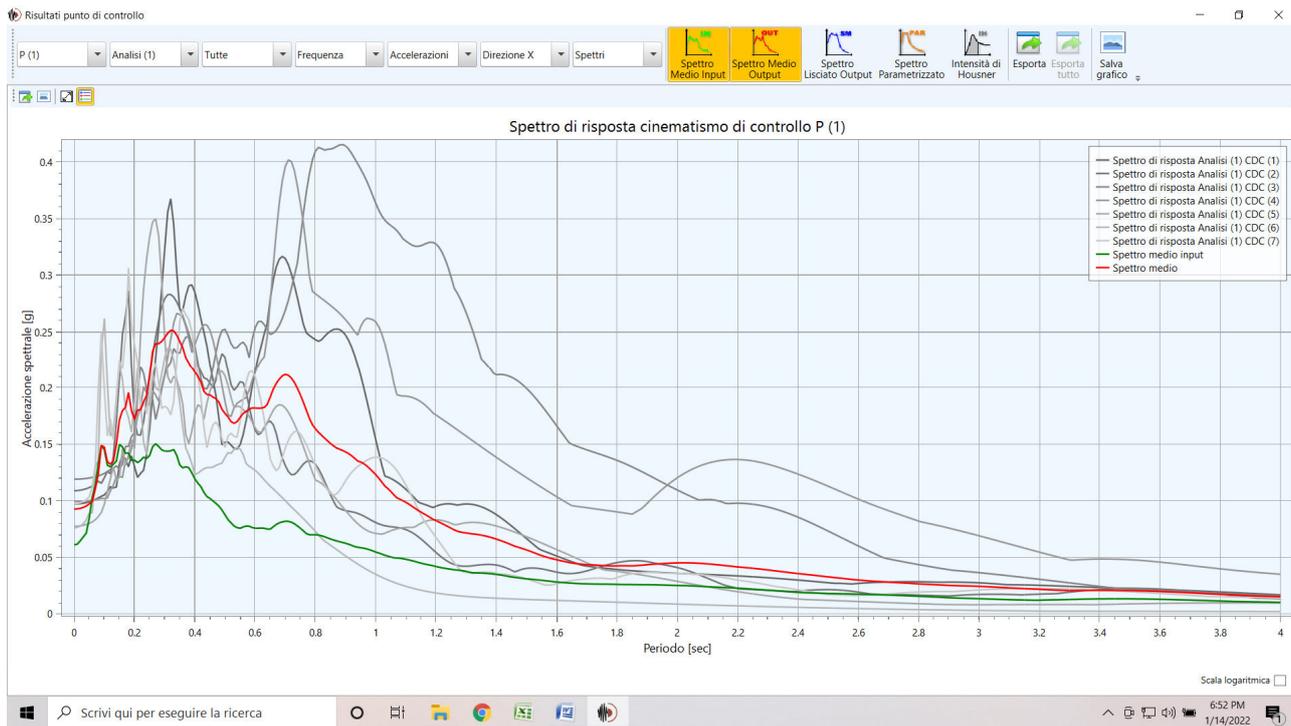


Figura 5-21 *Santa Giustina-Alberazzo*

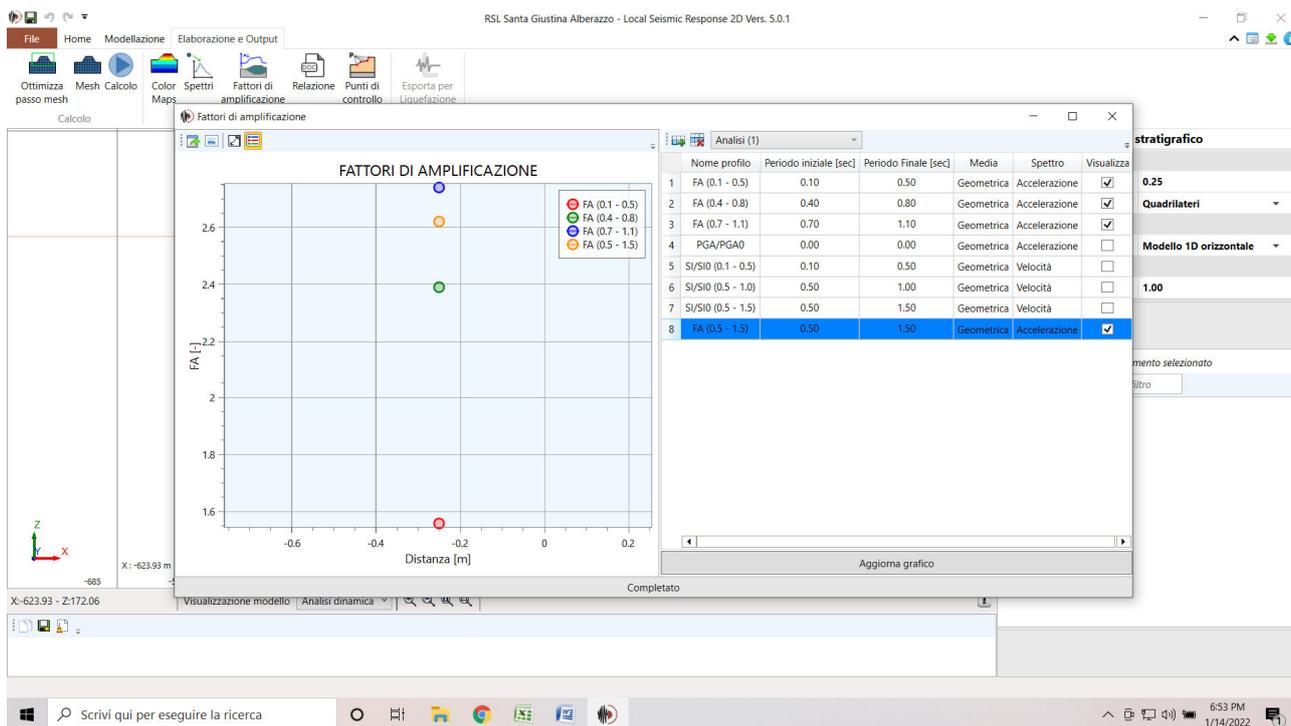


Figura 5-22 *Santa Giustina-Alberazzo*

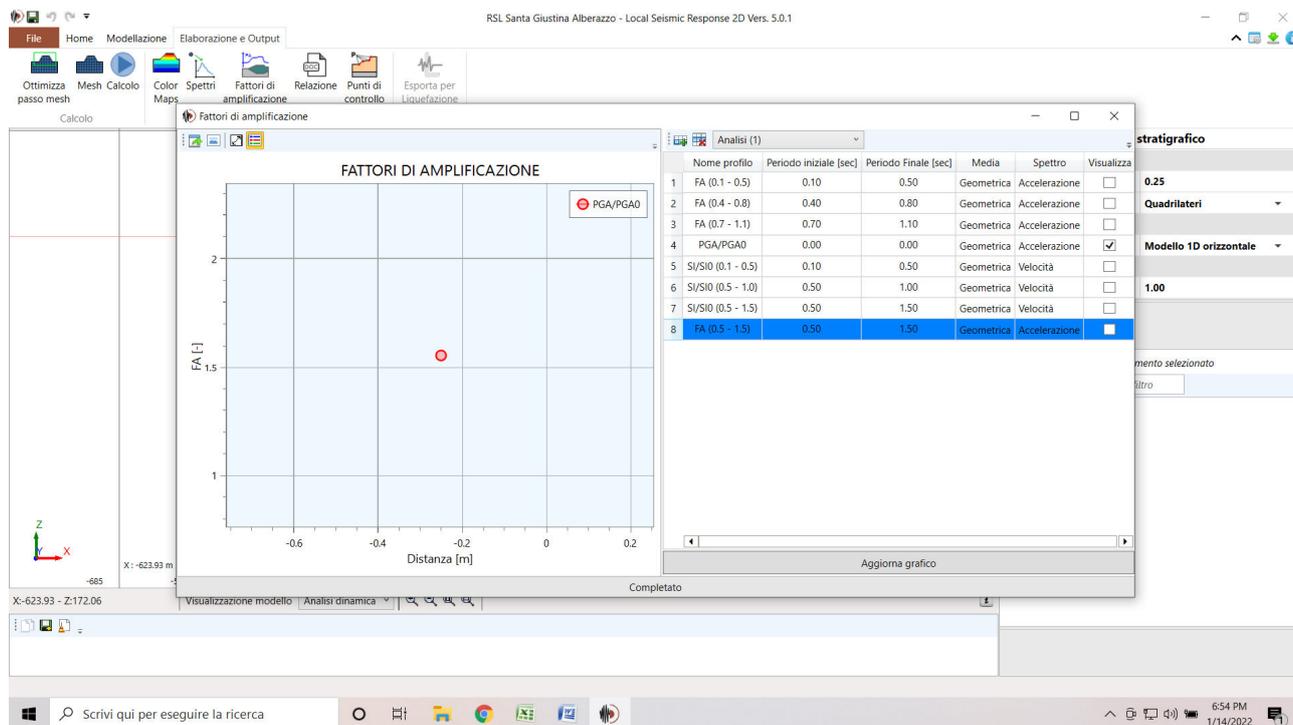


Figura 5-23 Santa Giustina-Alberazzo

5.7. CALCOLO DEGLI HSM E SINTESI RISULTATI

Una volta calcolati gli spettri in accelerazione di output della RSL, si procede al calcolo degli HSM, eseguendo l'integrale delle curve spettrali nei rispettivi periodi richiesti dalla normativa. Per l'esecuzione del calcolo è stato prodotto dallo scrivente un apposito foglio di calcolo Excel.

I risultati sono riassunti nella seguente tabella di sintesi:

	ΔT (sec)	Ariano Ferrarese	Italba-Massenzatica	Monticelli	Mesola	Bosco Mesola	Santa Giustina-Alberazzo
FA SA1	0.1-0.5	1.29	1.37	1.71	1.72	1.77	1.56
FA SA2	0.4-0.8	2.73	1.99	2.24	2.53	2.57	2.39
FA SA3	0.7-1.1	4.37	2.14	2.46	2.46	2.72	2.74
FA SA4	0.5-1.5	3.9	2.09	2.4	2.48	2.66	2.62
PGA/PGAo		1.43	1.25	1.63	1.64	1.69	1.56
PGAo		0.063	0.064	0.064	0.061	0.063	0.061
PGA		0.090	0.080	0.104	0.100	0.106	0.095
SI1	0.1-0.5	1.17	1.37	1.7	1.72	1.74	1.51
SI2	0.5-1.0	3.32	2.07	2.38	2.54	2.69	2.59
SI3	0.5-1.5	3.92	2.04	2.35	2.4	2.59	2.58
Hsm	0.1-0.5	181	194	232	218	236	197
Hsm	0.4-0.8	235	175	190	204	214	185
Hsm	0.7-1.1	242	126	160	151	174	144
Hsm	0.5-1.5	214	117	139	134	151	123

Tabella 5-1 – Tabella riassuntiva dei risultati del calcolo dei diversi fattori di amplificazione e della distribuzione dei valori di HSM per i diversi intervalli di periodo previsti dalla normativa

Di seguito si riportano le fasi di calcolo, per ogni località.

ARIANO FERRARESE

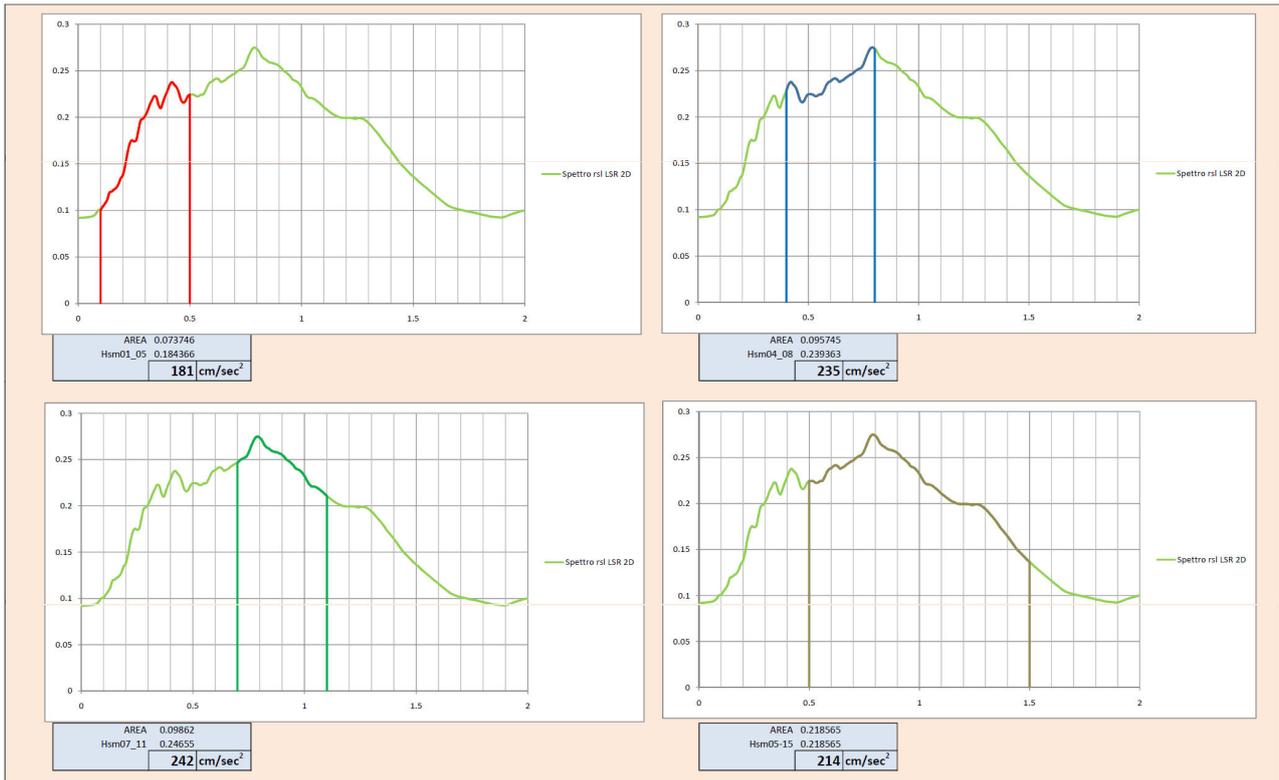


Figura 5-24 ARIANO FERRARESE

ITALBA-MASSENZATICA

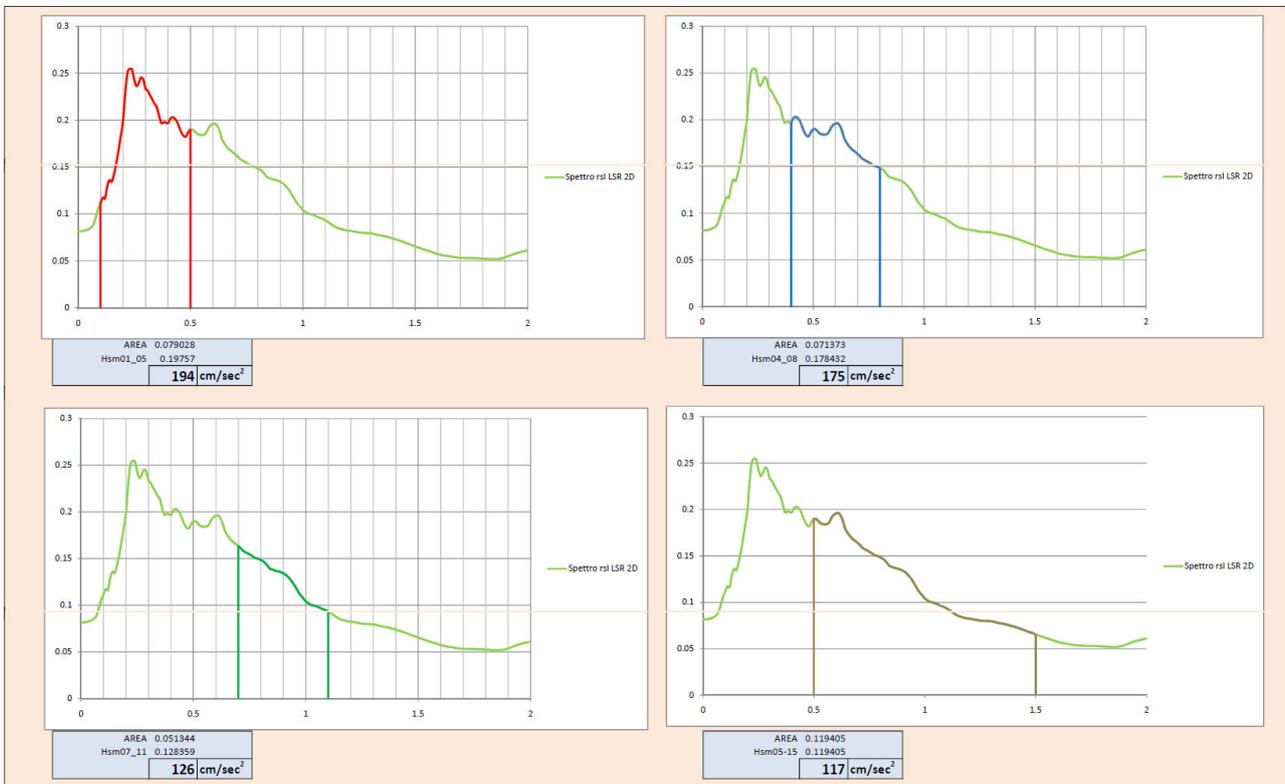


Figura 5-25 ITALBA-MASSENZATICA

MONTICELLI

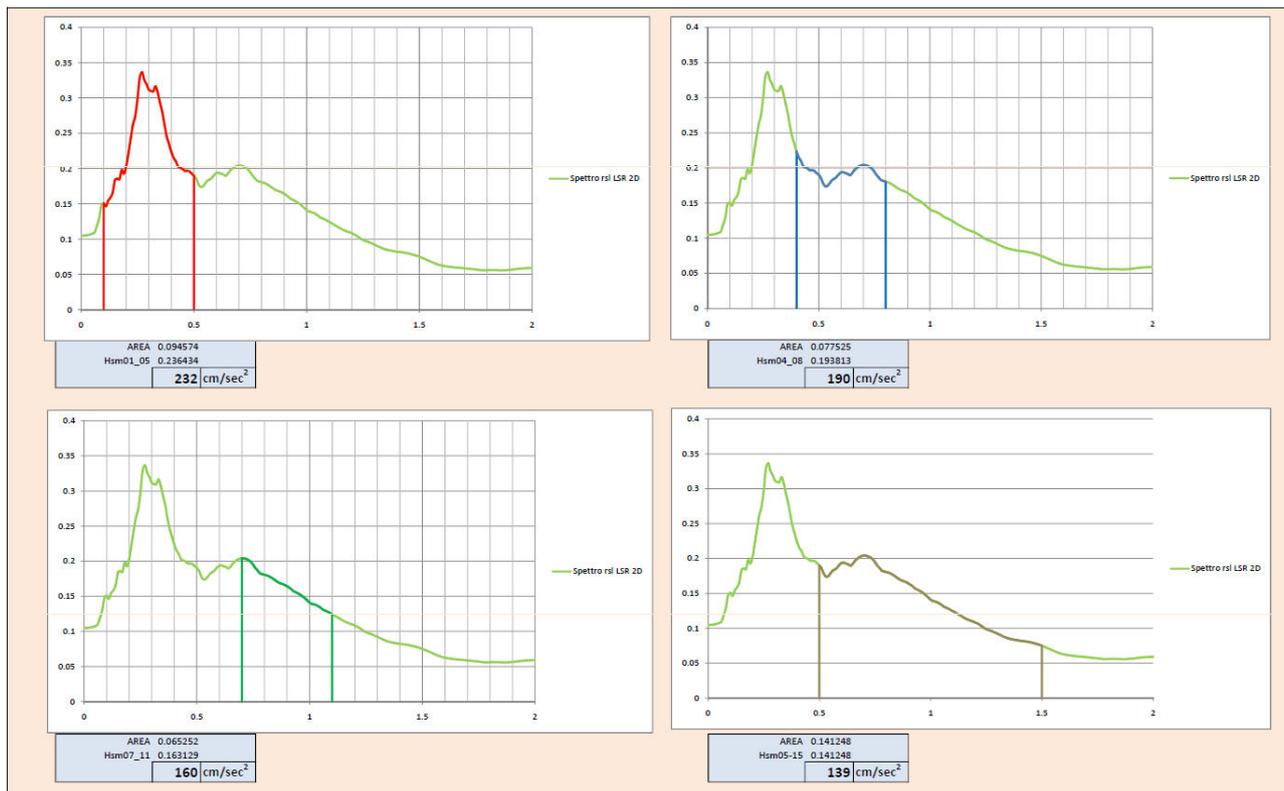


Figura 5-26 MONTICELLI

MESOLA

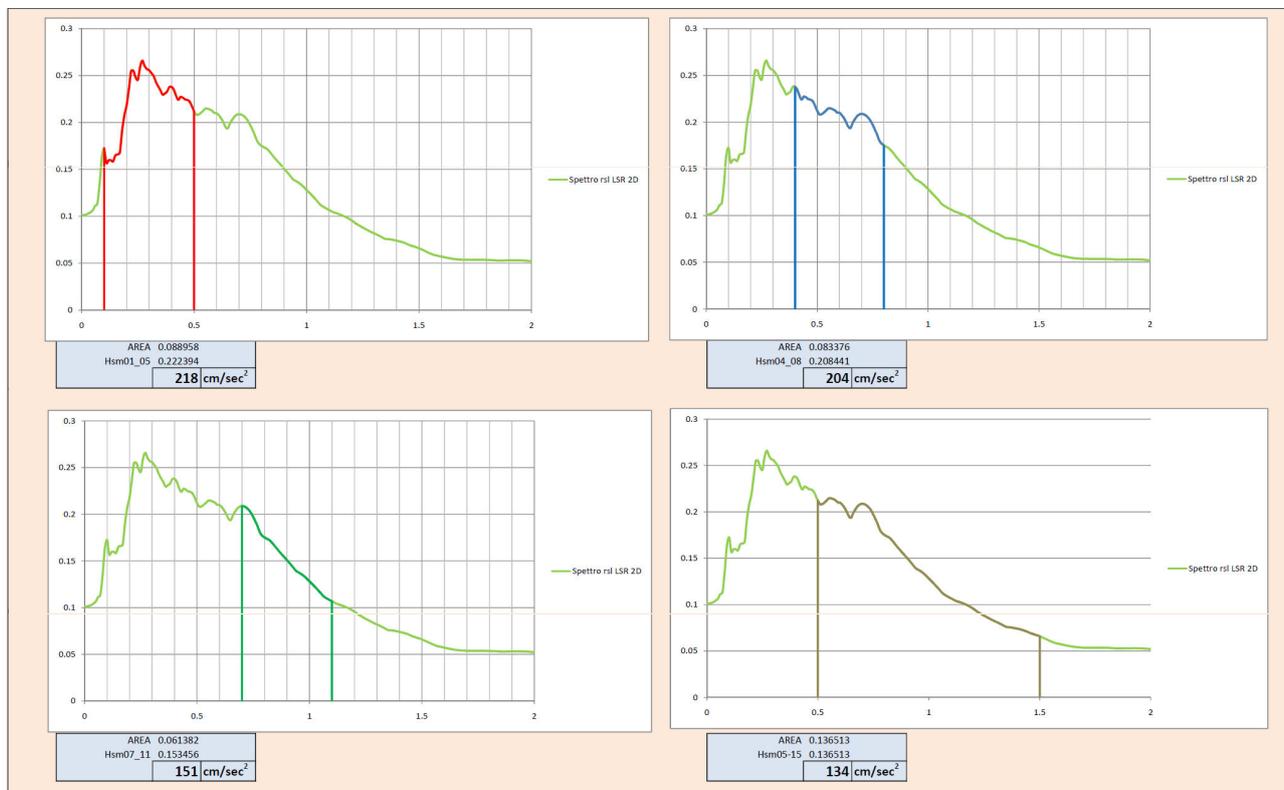


Figura 5-27 MESOLA

BOSCO MESOLA

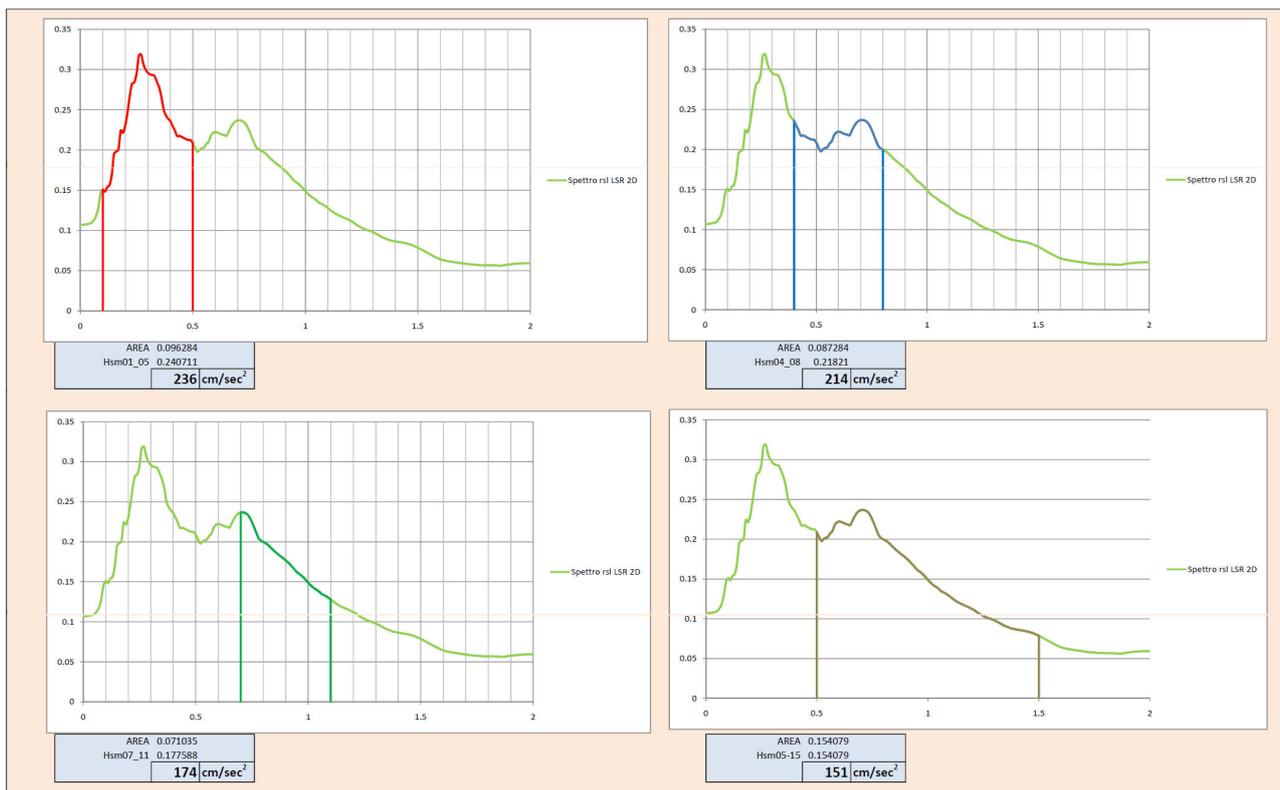


Figura 5-28 BOSCO MESOLA

SANTA GIUSTINA-ALBERAZZO

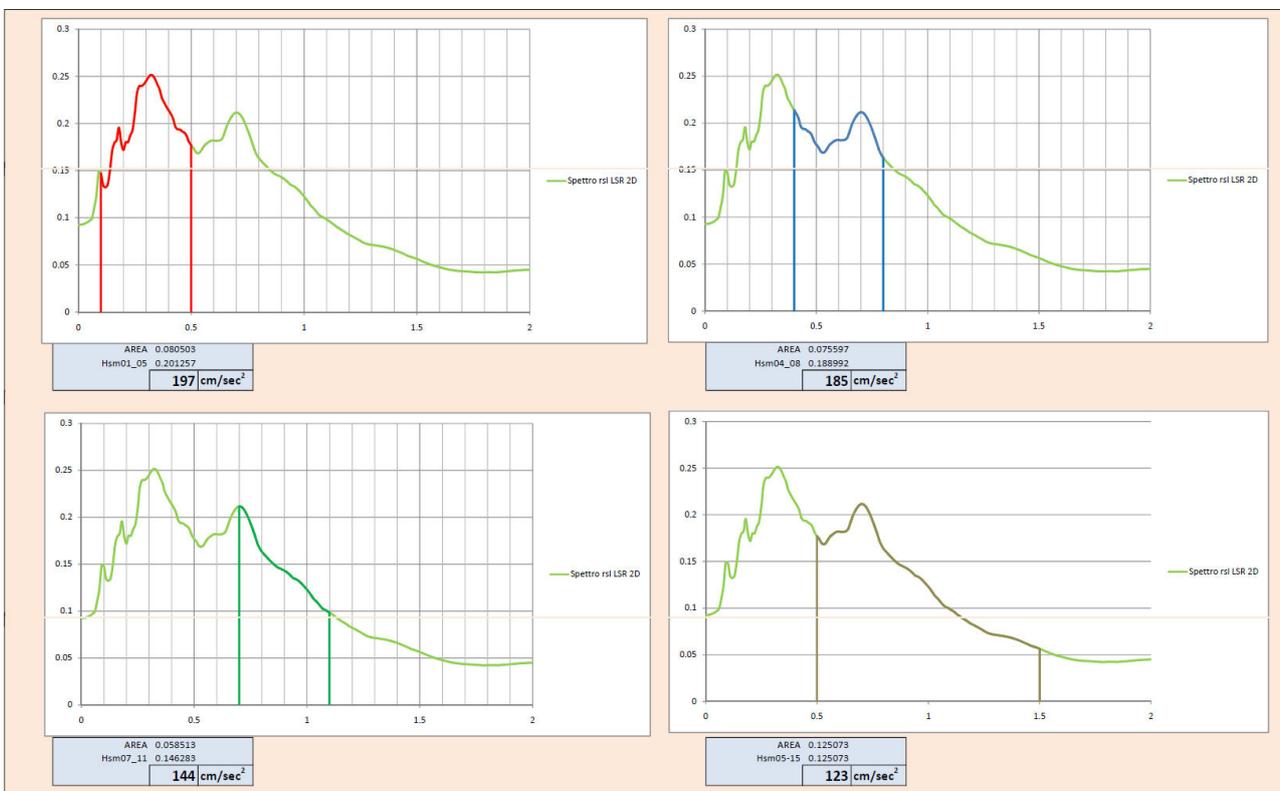


Figura 5-29 SANTA GIUSTINA-ALBERAZZO

6. CARTE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

Attraverso le analisi di risposta sismica locale RSL eseguite per le varie località, vengono forniti gli spettri di risposta sismica riferiti a tali aree, per un periodo di ritorno di 475 anni con smorzamento pari al 5% ed è stato possibile realizzare le carte di amplificazione in termini di F_{PGA} , $FH_{0,1-0,5s}$, $FH_{0,5-1,0s}$, $FH_{0,5-1,5s}$, $FA_{0,1-0,5s}$, $FA_{0,4-0,8s}$, $FA_{0,7-1,1s}$ e $FA_{0,5-1,5s}$, e le mappe di scuotimento atteso in termini di H_{SM} , $H_{0,4-0,8s}$, $H_{0,7-1,1s}$ e $H_{0,5-1,5s}$.

Le Carte di microzonazione sismica sono state realizzate attraverso i valori calcolati da RSL per ogni Località del comune e vengono riprodotte in scala 1:10.000 e sono focalizzate sulle sole aree di interesse per il PUG, oggetto dello studio di microzonazione sismica di III Livello.

In queste carte vengono quantificati i fattori di amplificazione sismica che quel territorio provoca al moto sismico, per via della sua condizioni stratigrafica.

Dove sussistono le condizioni per cui si possano avere effetti di sito (presenza dei fattori predisponenti), non necessariamente si possono verificare effetti connessi al rischio sismico, se non ci sono eventi sismici di intensità sufficiente (presenza dei fattori scatenanti). Per questo è importante in questi territori a bassa sismicità comprendere comunque gli effetti di amplificazione sismica, per stabilire se possono o meno indurre fenomeni di instabilità. Queste carte sono fondamentali negli studi di Microzonazione sismica.

Per la valutazione del fattore di amplificazione sismica è stato predisposto uno studio di risposta sismica locale RSL per ogni località del comune.

Il risultato di tale studio è riportato in **Tabella 6.1.**

	ΔT (sec)	Ariano Ferrarese	Italba-Massenzatica	Monticelli	Mesola	Bosco Mesola	Santa Giustina-Alberazzo
FA SA1	0.1-0.5	1.29	1.37	1.71	1.72	1.77	1.56
FA SA2	0.4-0.8	2.73	1.99	2.24	2.53	2.57	2.39
FA SA3	0.7-1.1	4.37	2.14	2.46	2.46	2.72	2.74
FA SA4	0.5-1.5	3.9	2.09	2.4	2.48	2.66	2.62
PGA/PGAo		1.43	1.25	1.63	1.64	1.69	1.56
PGAo		0.063	0.064	0.064	0.061	0.063	0.061
PGA		0.090	0.080	0.104	0.100	0.106	0.095
SI1	0.1-0.5	1.17	1.37	1.7	1.72	1.74	1.51
SI2	0.5-1.0	3.32	2.07	2.38	2.54	2.69	2.59
SI3	0.5-1.5	3.92	2.04	2.35	2.4	2.59	2.58
Hsm	0.1-0.5	181	194	232	218	236	197
Hsm	0.4-0.8	235	175	190	204	214	185
Hsm	0.7-1.1	242	126	160	151	174	144
Hsm	0.5-1.5	214	117	139	134	151	123

Tabella 6-1 – *Fattori di Amplificazione e valori di HSM*

6.1. CARTA IN TERMINI DI F.P.G.A.

Si riporta in **Tabella 6.2** la sintesi dei risultati ottenuti attraverso lo studio di risposta sismica locale RSL per ogni località del comune, per i fattori di amplificazione P.G.A..

	ΔT (sec)	Ariano Ferrarese	Italba-Massenzatica	Monticelli	Mesola	Bosco Mesola	Santa Giustina-Alberazzo
PGA/PGAo		1.43	1.25	1.63	1.64	1.69	1.56
PGAo		0.063	0.064	0.064	0.061	0.063	0.061
PGA		0.090	0.080	0.104	0.100	0.106	0.095

Tabella 6-2

Si riporta la legenda delle carte dei fattori di amplificazione in termini di P.G.A..

Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

	FA = 1.3 - 1.4
	FA = 1,5 - 1.6
	FA = 1,7 - 1.8
	FA = 2.3 - 2.4
	Confine Comunale
	Aree di interesse per il PUG (MS di Livello3)

6.2. CARTE IN TERMINI DI F.A.

Si riporta in **Tabella 6.3** la sintesi dei risultati ottenuti attraverso lo studio di risposta sismica locale RSL per ogni località del comune, per i fattori di amplificazione S.A..

	ΔT (sec)	Ariano Ferrarese	Italba-Massenzatica	Monticelli	Mesola	Bosco Mesola	Santa Giustina-Alberazzo
FA SA1	0.1-0.5	1.29	1.37	1.71	1.72	1.77	1.56
FA SA2	0.4-0.8	2.73	1.99	2.24	2.53	2.57	2.39
FA SA3	0.7-1.1	4.37	2.14	2.46	2.46	2.72	2.74
FA SA4	0.5-1.5	3.9	2.09	2.4	2.48	2.66	2.62

Tabella 6-3

Si riporta la legenda delle carte dei fattori di amplificazione in termini di S.A..

Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

	FA = 1.3 - 1.4
	FA = 1,5 - 1.6
	FA = 1,7 - 1.8
	Confine Comunale
	Aree di interesse per il PUG (MS di Livello3)

6.3. CARTE IN TERMINI DI F.H.

Si riporta in **Tabella 6.4** la sintesi dei risultati ottenuti attraverso lo studio di risposta sismica locale RSL per ogni località del comune, per i fattori di amplificazione S.I..

	ΔT (sec)	Ariano Ferrarese	Italba-Massenzatica	Monticelli	Mesola	Bosco Mesola	Santa Giustina-Alberazzo
SI1	0.1-0.5	1.17	1.37	1.7	1.72	1.74	1.51
SI2	0.5-1.0	3.32	2.07	2.38	2.54	2.69	2.59
SI3	0.5-1.5	3.92	2.04	2.35	2.4	2.59	2.58

Tabella 6-4

Si riporta la legenda delle carte dei fattori di amplificazione in termini di S.I..

Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

	FA = 1.1 -1.2
	FA = 1.3 -1.4
	FA = 1.5 -1.6
	FA = 1.7 - 1.8
	Confine Comunale
	Aree di interesse per il PUG (MS di Livello3)

6.4. CARTE DELLA DISTRIBUZIONE SUL TERRITORIO DEI VALORI DI HSM

Le mappe di microzonazione sismica rappresentano il rischio sismico locale attraverso fattori di amplificazione, vale a dire valori relativi, e le mappe di rischio sismico di riferimento non considerano gli effetti locali che possono derivare da condizioni geologiche e morfologiche locali. Per l'implementazione di politiche per ridurre il rischio sismico, le autorità responsabili della gestione del territorio hanno bisogno di mappe realistiche di pericolosità sismica comparabili su scala nazionale. Grazie ai dati disponibili sulla geologia e al rischio sismico e alle procedure indicate dalle linee guida regionali e nazionali, è possibile produrre, in modo rapido ed economico, mappe del rischio sismico del sito su qualsiasi scala. L'uso del parametro H_{SM} per questa mappatura consente di considerare sia il rischio sismico di riferimento sia gli effetti locali e rende i risultati finali comparabili su scala nazionale; pertanto, consente una classificazione realistica del pericolo sismico applicabile a tutte le scale.

In **FIGURA 6.1** si riporta lo schema per la mappatura del rischio sismico del sito secondo le linee guida italiane per la microzonazione sismica (SM Working Gruppo, 2015; CTMS, 2017c), adottato nella DGR 630/2019.

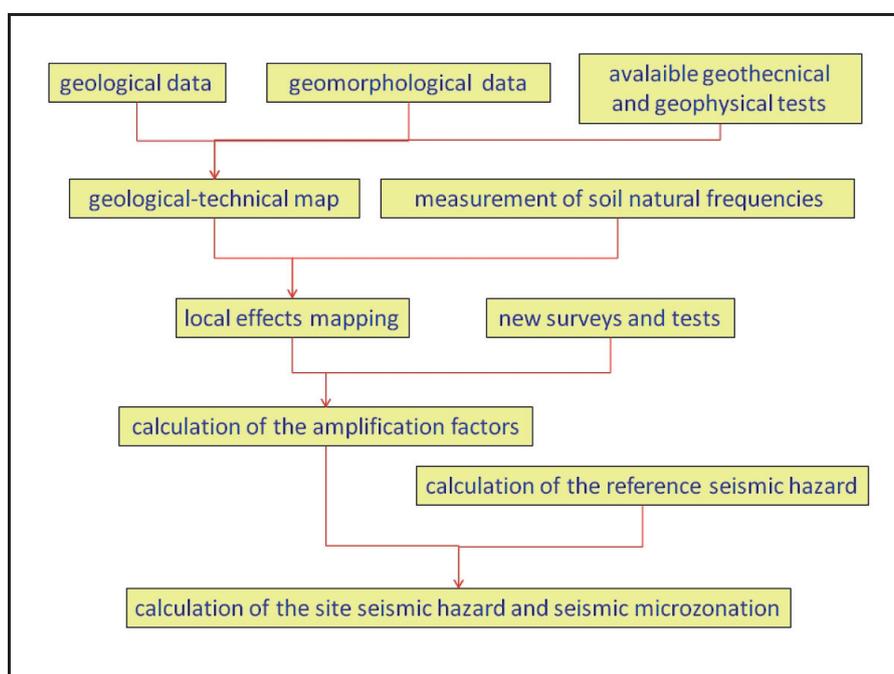


Figura 6-1 - Schema per la mappatura del rischio sismico del sito secondo le linee guida italiane per la microzonazione sismica (SM Working Gruppo, 2015; CTMS, 2017c)

Con l'introduzione del parametro H_{SM} si è scelto di sviluppare mappe che tenessero in conto del rischio sismico derivato dalla interazione tra il moto sismico e la presenza di edifici con determinati modo di vibrare. L'intervallo compreso tra 0,1sec e 0,5sec risulta essere il più significativo possibile per la realtà edilizia della Regione Emilia Romagna (**FIGURA 6.2**), ma la norma prevede che nel III livello di approfondimento il parametro di H_{SM} venga calcolato anche per l'intervallo di periodo 0,4sec-0,8 sec, 0,7sec-1,1sec e 0,5sec-1,5sec.

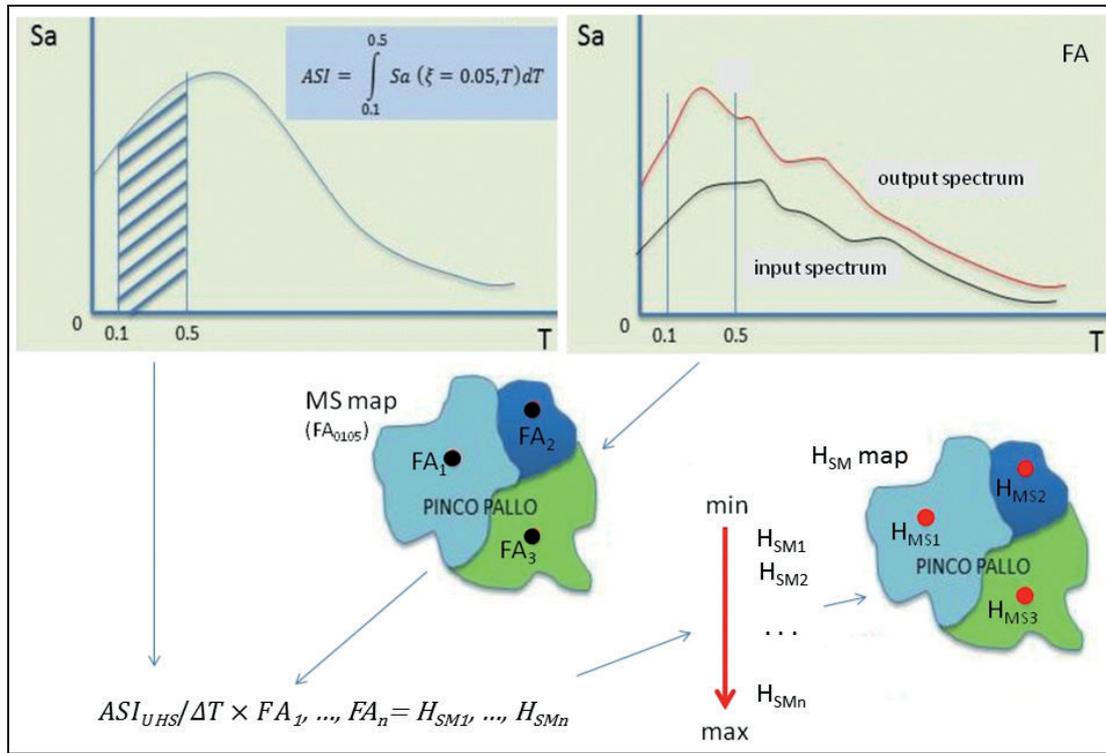


Figura 6-2 - Schema per il calcolo del parametro HSM e mappatura HSM

Non ci sono, sulla normativa regionale, delle classi di rischio in cui suddividere il territorio. Una ipotesi è stata proposta da Naso et Alii (giugno 2019):

" Il parametro H_{SM} può essere discretizzato in classi in modo semiquantitativo, relativo al livello di scuotimento, il potenziale danno agli edifici e l'intensità strumentale. Le possibili soglie delle classi per i valori H_{SM} proposti da Naso et Alii (2019) possono variare da "basso-molto basso", "moderato-basso", Pericolo sismico da "moderato", "alto", a "molto alto". In **Tabella 6.5** si riporta la recente proposta di classificazione.

seismic hazard	low-very low	moderate-low	moderate	high	very high
H_{SM} (cm/s ²)	≤ 180	$180 < H_{SM} \leq 340$	$340 < H_{SM} \leq 650$	$650 < H_{SM} \leq 1240$	> 1240
potential damage	none - very light	very light - moderate	moderate - heavy	heavy	very heavy
instrumental intensity	$\leq VI$	VII	VIII	IX	$\geq X$

Tabella 6-5 Possibili soglie delle classi per i valori H_{SM}

Nel territorio comunale di Mesola le fasce individuate appartengono alla "moderato-basso" per i bassi periodi, e a "basso-molto basso" per i medi e alti periodi.

	ΔT (sec)	Ariano Ferrarese	Italba-Massenzatica	Monticelli	Mesola	Bosco Mesola	Santa Giustina-Alberazzo
Hsm	0.1-0.5	181	194	232	218	236	197
Hsm	0.4-0.8	235	175	190	204	214	185
Hsm	0.7-1.1	242	126	160	151	174	144
Hsm	0.5-1.5	214	117	139	134	151	123

Tabella 6-6 – Sintesi dei risultati con classi di appartenenza dello scuotimento, potenziale danno agli edifici e intensità strumentale macrosismica attesa. I potenziali danni attesi agli edifici sono da nessuno, molto leggeri, o moderati.

La legenda della carta H_{SM} presenta una gradazione di colori differenti per ogni intervallo espresso in cm/s^2 , forniti dalla Regione Emilia Romagna. Nella stessa carta vengono indicati i valori puntuali di HSM calcolati attraverso analisi di risposta sismica locale R.S.L. per ogni ambito.

Legenda

HSM (Cm/s^2)

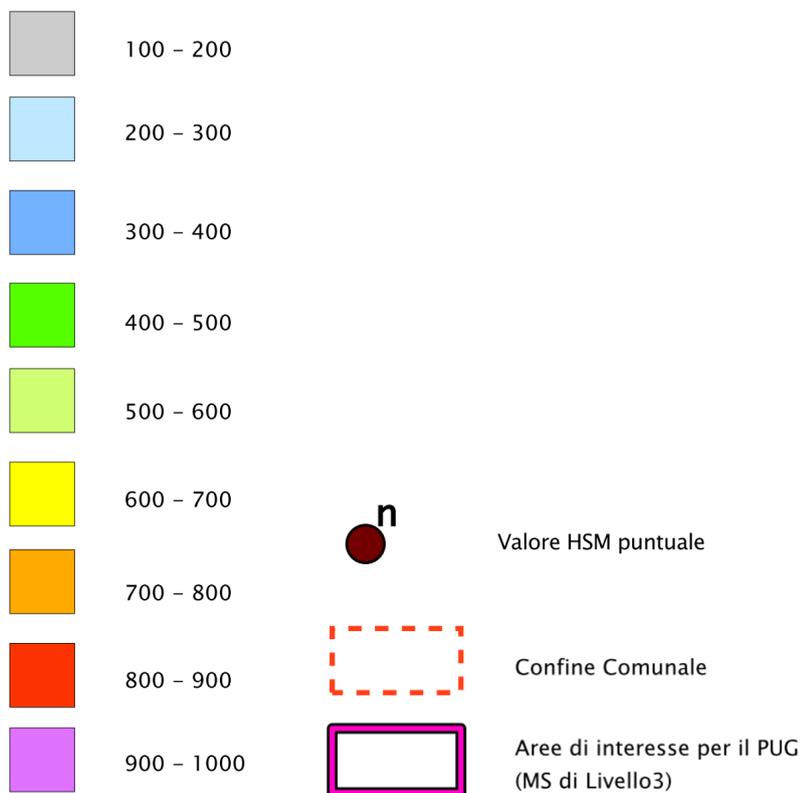


Figura 6-3 *Legenda della mappa di distribuzione dei valori di Hsm*

7. ANALISI DELLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE E CALCOLO INDICE DI LIQUEFAZIONE

Durante gli studi precedenti era stata evidenziata nel primo livello di approfondimento la presenza dei caratteri predisponenti la liquefazione delle sabbie, in quanto era stato mappato su tutto il territorio il perimetro ove erano presenti le sabbie sciolte oloceniche sature di acqua di falda, presenti nei primi 20m di spessore. Erano sostanzialmente le sabbie limose di battigia che hanno segnato l'avanzamento dei depositi deltizi dei rami di foce del fiume Po, a costruire le nuove linee di costa durante le fase trasgressive postflandriane. Quindi era stata dimostrata la diffusa presenza di depositi potenzialmente liquefacibili di sabbie limose.

Nel secondo livello di approfondimento era emerso che tutta l'area comunale era soggetta ad amplificazione sismica stratigrafica, e si era fatto ricorso agli abachi regionali per determinare i vari fattori di amplificazione attesi. Anche in questo caso si confermava la necessità di proporre delle MOPS in cui vi erano i retini dell'instabilità per la potenziale liquefazione dei depositi sabbioso limosi.

Si rimandava dunque al terzo livello di approfondimento il compito di valutare numericamente e analiticamente quanto potesse essere effettivamente pericolosa la potenziale liquefazione dei depositi sabbiosi, facendo ricorso ad una più attenta definizione dei fattori di amplificazione da determinare mediante analisi di risposta sismica locale. Una volta definite le azioni sismiche, ovvero le cause scatenanti, si è proceduto a valutare le resistenze dei depositi sabbiosi presenti nel territorio comunale di Mesola, alle sollecitazioni di taglio cicliche indotte dal terremoto di progetto, convenzionalmente scelto per un tempo di ritorno di 475 anni.

Quello che ne è emerso è che le cause scatenanti la liquefazione delle sabbie, e dunque la potenziale instabilità del sito, non sono sufficienti ad innescare liquefazione, ed il territorio può essere considerato tutto stabile, se sollecitato ad eventi sismici convenzionali con tempo di ritorno di 475 anni.

Questo era abbastanza atteso, in quanto non vi è memoria storica documentata che testimoni l'accadimento di questo fenomeno in questa porzione di pianura. Inoltre il comune di Mesola si colloca sulla monoclinale padano veneta, al di fuori delle zone sismo genetiche, le quali possono solo provocare risentimenti sismici capaci di danni leggeri.

Di seguito verrà descritto il metodo analitico utilizzato per verificare la liquefazione delle sabbie ed i riferimenti normativi a cui si è attenuti.

7.1. METODO DI ANALISI

Per verificare la possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione vanno impiegate le procedure che nell'Ingegneria Geotecnica Sismica vengono denominati 'metodi semplificati'. Tali metodi sono basati su prove geotecniche quali le CPTU (penetrometrie a punta elettrica con piezocono) e attraverso i dati ottenuti di CSR e CRR si procede poi a valutare, ad ogni quota z del deposito, compresa nei primi 20 m, il coefficiente di sicurezza rispetto alla possibilità di liquefazione:

$$F_L(z) = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1atm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad \text{Equazione 7-1}$$

dove:

$CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1atm} = \frac{\tau_{ult}}{\sigma'_{v0}}$ è il rapporto di resistenza ciclica, ovvero la resistenza normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale σ'_{v0} , per terremoto di magnitudo $M = 7.5$ e pressione efficace di riferimento $\sigma'_v = 1atm$;

MSF è il fattore di scala della magnitudo che è funzione, oltre che dal valore della magnitudo dell'azione sismica di riferimento, anche del metodo di stima di CRR;

K_σ è il fattore di correzione che tiene conto della pressione efficace alla profondità a cui la resistenza viene valutata;

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d \quad \text{Equazione 7-2}$$

è il rapporto di tensione ciclica, ovvero la tensione di taglio ciclica media indotta dall'azione sismica di riferimento, normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale σ'_{v0} , ove a_{max} è il picco di accelerazione al piano campagna, g è l'accelerazione di gravità, σ_{v0} e σ'_{v0} sono le tensioni verticali rispettivamente totale e efficace alla profondità considerata, ed r_d è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica per effetto della deformabilità del terreno che può essere stimato con relazioni empiriche associate ai diversi metodi di stima di CRR (e di MSF). Il valore della tensione tangenziale media $\tau_{media} = 0.65 \tau_{max}$ al variare della profondità può essere più precisamente determinato con analisi di risposta sismica locale.

Tra i metodi semplificati basati sui risultati di prove CPTe/CPTu è particolarmente raccomandato dalle delibere regionali il recente metodo di *Boulanger e Idriss, 2014*.

Lo scrivente tende a non utilizzarlo nella pratica professionale, poiché, oltre ad utilizzare le prove penetrometriche statiche a punta elettrica e piezocono, esso necessiterebbe di analisi dettagliate sulla granulometrie dei depositi sabbiosi incontrati. Il metodo infatti necessita della determinazione di un fattore di correzione per il contenuto in fine C_{FC} , senza il quale si fanno valutazioni che possono apparire fin troppo cautelative. Nel territorio comunale di Mesola la pericolosità di base è così bassa, che anche utilizzando questo metodo, senza il C_{FC} , non porta a sovrastime di una instabilità che non è attesa.

Si riporta di seguito lo stralcio della DGR 630/2019 con la sequenza logica del calcolo (**FIGURA 7.1, 7.2, 7.3**).

A2.2 Metodo basato sui risultati di prove CPTe/CPTu (Boulanger e Idriss, 2014)

Tutti i metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione che utilizzano i risultati di prove penetrometriche statiche sono calibrati sull'apparecchiatura a punta elettrica (CPTe/CPTu). L'uso di tali metodi con i risultati di prove CPT a punta meccanica può condurre ad una sovrastima della resistenza CRR e quindi del fattore di sicurezza.

$$1. q_{c1N} = C_N \cdot \frac{q_c}{p_a}$$

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^m \leq 1.7$$

$$m = 1.338 - 0.249 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264} \quad \text{con } 21 \leq q_{c1Ncs} \leq 254$$

(q_{c1Ncs} è definito al punto 2 e m è determinato per via iterativa; p_a è la pressione atmosferica)

$$2. q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \cdot \exp \left[1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left(\frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right]$$

FC è il contenuto di fine espresso in %. In assenza di dati specifici per il sito, FC può essere stimato con l'espressione empirica²:

$$FC = 80 I_c - 137$$

in cui I_c è l'indice di classificazione del terreno da prova CPT proposto da Robertson (1990):

$$I_c = \sqrt{(\log F + 1.22)^2 + (\log Q_n - 3.47)^2}$$

con

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma'_{v0}} \cdot 100$$

$$Q_n = \left(\frac{q_c - \sigma'_{v0}}{p_a} \right) \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^m$$

$$3. CRR = \exp \left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right]$$

$$4. MSF = 1 + (MSF \left[8.64 \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 1.325 \right])_{max}$$

$$MSF \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180} \right)_{max}^3$$

² L'espressione deriva dalla seguente correlazione tra I_c e FC proposta da Boulanger e Idriss (2014):

$I_c = [(FC+137)/80] - C_{FC}$ dove $(-C_{FC})$ è l'errore che, per il set di dati utilizzato dagli Autori, presenta media nulla e deviazione standard 0.29.

Qualora si disponga di dati specifici per il sito, il parametro C_{FC} può essere appositamente calibrato mantenendo la stessa forma funzionale (lineare) della suddetta correlazione, o forme funzionali differenti.

In mancanza di dati specifici per il sito, è lecito invece determinare FC dalla curva di regressione media ottenuta da Boulanger e Idriss (2014), ovvero assumere nella suddetta correlazione $C_{FC}=0$.

Figura 7-1

$$5. K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_d}\right) \leq 1.0$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3$$

$$6. CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \text{sen}\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \text{sen}\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

$$7. F_L = \frac{CRR_{M=7.5, \sigma'_{v0}=1atm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

Nelle equazioni precedenti M è la magnitudo momento del terremoto di riferimento.

La curva CRR – q_{c1Ncs} è mostrata in Figura 2b.

Figura 7-2

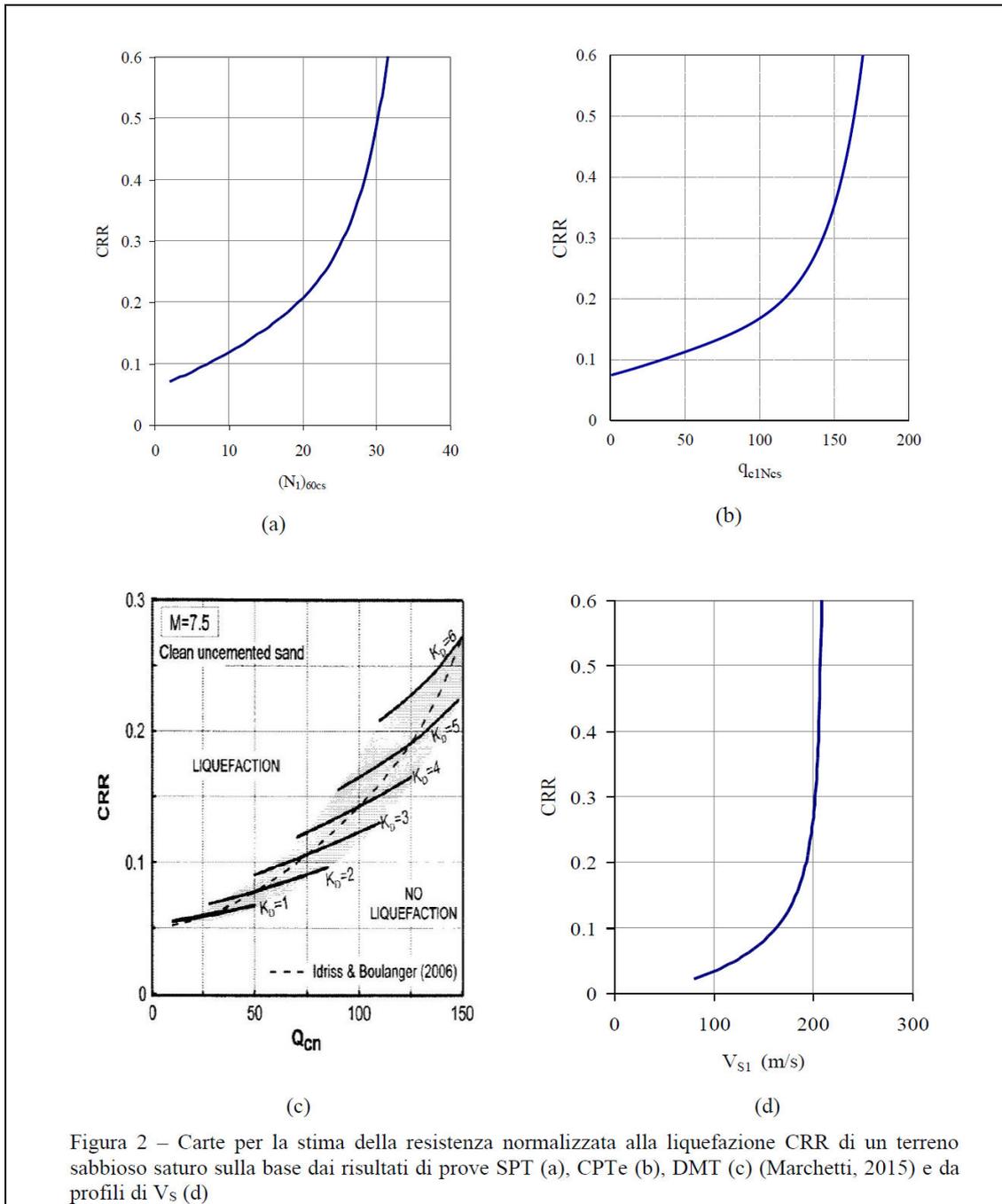


Figura 2 – Carte per la stima della resistenza normalizzata alla liquefazione CRR di un terreno sabbioso saturo sulla base dai risultati di prove SPT (a), CPTe (b), DMT (c) (Marchetti, 2015) e da profili di V_s (d)

Figura 7-3

L'indice del potenziale di liquefazione, I_L , è definito dalla seguente relazione (**FIGURA 7.4**):

Liquefaction Potential Index (LPI) calculation procedure

Calculation of the Liquefaction Potential Index (LPI) is used to interpret the liquefaction assessment calculations in terms of severity over depth. The calculation procedure is based on the methodology developed by Iwasaki (1982) and is adopted by AFPS.

To estimate the severity of liquefaction extent at a given site, LPI is calculated based on the following equation:

$$LPI = \int_0^{20} (10 - 0,5z) \times F_L \times dz$$

where:

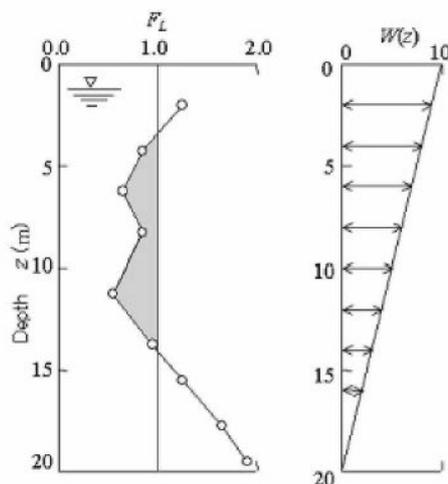
$F_L = 1 - F.S.$ when F.S. less than 1

$F_L = 0$ when F.S. greater than 1

z depth of measurement in meters

Values of LPI range between zero (0) when no test point is characterized as liquefiable and 100 when all points are characterized as susceptible to liquefaction. Iwasaki proposed four (4) discrete categories based on the numeric value of LPI:

- LPI = 0 : Liquefaction risk is very low
- $0 < LPI \leq 5$: Liquefaction risk is low
- $5 < LPI \leq 15$: Liquefaction risk is high
- LPI > 15 : Liquefaction risk is very high



Graphical presentation of the LPI calculation procedure

Mentre per Iwasaki (1982) il calcolo tiene conto degli strati ove $FL \leq 1$, con Somnez (2003) si tiene conto degli strati ove $FL \leq 1,2$.

Altra particolarità del metodo di Somnez è che per valori di FL compresi tra 1,2 e 0,95 la funzione variabile $F(z)$ si discosta da quella di Iwasaki, e per Somnez è:

$$\begin{array}{ll} F(z) = 0 & \text{per } F_L \geq 1.2 \\ F(z) = 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot F_L) & \text{per } 1.2 > F_L \geq 0.95 \\ F(z) = 1 - F_L & \text{per } F_L \leq 0.95 \end{array}$$

Il metodo di Boulanger & Idriss 2014, a rigore, andrebbe utilizzato nel modo di seguito esposto. La pubblicazione originale degli autori indica che il contenuto in fine va stimato con questa formula (**FIGURA 7.5**):

For the present study, the relationship for estimating FC was developed by first regressing I_c against FC using the combined data sets in Figure 2.10 to obtain the least-squares fit,

$$I_c = \frac{(FC + 137)}{80} + \varepsilon \quad (2.29)$$

where ε = an error term, which was found to have a mean of 0 and a standard deviation of 0.29 and be unbiased against FC . This equation can then be inverted to provide the following form for estimating FC ,

$$\begin{array}{l} FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137 \\ 0\% \leq FC \leq 100\% \end{array} \quad (2.30)$$

where C_{FC} is a fitting parameter that can be adjusted based on site-specific data when available. The sign convention for C_{FC} is set opposite to that for the error term ε in Equation 2.29 so that a positive C_{FC} corresponds to a larger estimate of FC . The regression of I_c against FC was preferred over regressing FC directly against I_c because this is a calibration or inverse regression problem (e.g., Draper and Smith 1998). This expression with $C_{FC} = 0.0, -0.29$, and 0.29 (i.e., +/- an amount equal to the standard deviation in the general correlation) is shown in Figure 2.11. The curves envelope approximately 2/3 of the data points, as expected. The term C_{FC} can be calibrated to site specific data by regressing I_c against FC using the equation,

$$I_c = \frac{(FC + 137)}{80} - C_{FC} \quad (2.31)$$

Figura 7-5

La DGR 630/2019 riporta la formula per la stima del contenuto in fine, in modo parziale (**FIGURA 7.6**):

FC è il contenuto di fine espresso in %. In assenza di determinazione sperimentale di laboratorio FC può essere stimato con l'espressione empirica:

$$FC = 80 I_c - 137$$

in cui I_c è l'indice di classificazione del terreno da prova CPT proposto da Robertson (1990):

$$I_c = \sqrt{(\log F + 1.22)^2 + (\log Q_n - 3.47)^2}$$

Figura 7-6

Nelle note a fondo pagina è indicato (**FIGURA 7.7**):

² L'espressione deriva dalla seguente correlazione tra I_c e FC proposta da Boulanger e Idriss (2014):
 $I_c = [(FC+137)/80] - C_{FC}$ dove $(-C_{FC})$ è l'errore che, per il set di dati utilizzato dagli Autori, presenta media nulla e deviazione standard 0.29.
Qualora si disponga di dati specifici per il sito, il parametro C_{FC} può essere appositamente calibrato mantenendo la stessa forma funzionale (lineare) della suddetta correlazione, o forme funzionali differenti.
In mancanza di dati specifici per il sito, è lecito invece determinare FC dalla curva di regressione media ottenuta da Boulanger e Idriss (2014), ovvero assumere nella suddetta correlazione $C_{FC}=0$.

Figura 7-7

L'importanza di stimare il fattore di correzione del contenuto in fine C_{FC} sembra fondamentale per gli autori, al fine di utilizzare il loro metodo, Boulanger & Idriss 2014.

La stima del C_{FC} può essere fatta solo attraverso prelievo di campioni con misura in laboratorio del contenuto in fine reale, per cui in assenza di questo parametro, se si usa la sola prova penetrometrica statica per stimare il contenuto in fine, si perviene a risultati estremamente cautelativi per non dire molto penalizzanti.

Per il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione è stato utilizzato il software di calcolo dal nome C-Liq, versione 3.3.3.2. (FIGURA 7.8)



Figura 7-8

Questo software è in grado di elaborare le prove penetrometriche statiche a punta elettrica e con i relativi dati di input è in grado di calcolare il fattore di sicurezza alla liquefazione e tutto ciò che concerne questo rischio.

Quindi utilizzando solo le penetrometrie CPTU, senza analisi granulometriche, si adotta un comportamento cautelativo.

La sintesi dei risultati è riportata nella Tabella 7.1.. Il territorio comunale si conferma essere sostanzialmente stabile rispetto all'effetto di sito della liquefazione delle sabbie.

Codice prova	ag/g		IPL B&I 2014
Ariano			
U89-16 CPT1	0,10 g		0,01
U89-16 CPT2	0,10 g		0,00
U97-15 CPT1	0,10 g		0,00
U186-21 CPT1	0,10 g		0,00
Bosco Mesola			
187110U505X	0,10 g		0,07
U06-17 CPTU1	0,10 g		0,00
U08-19 CPTU1	0,10 g		0,00
U25-16 CPTU1	0,10 g		0,00
U34-18 CPTU1	0,10 g		0,00
U51-16 CPTU1	0,10 g		0,00
U66-15 CPTU1	0,10 g		0,00
U75-19 CPTU4	0,10 g		0,00
U75-19 CPTU5	0,10 g		0,00
U75-19 SCPTU6	0,10 g		0,00
U76-14 CPTU1	0,10 g		0,01
U84-20_1	0,10 g		0,00
U84-20_2	0,10 g		0,00
U29-21	0,10 g		0,00
U107-21	0,10 g		0,00
U145-21	0,10 g		0,00
U82-19	0,10 g		0,00
Italba			
U101-14	0,10 g		0,00

Massenzatica			
U116-21	0,10 g		0,00
U186-21 CPTU2	0,10 g		0,00
187070U502	0,10 g		0,05
Mesola			
U71-14	0,10 g		0,25
U88-17	0,10 g		0,00
U41-18 CPTU1	0,10 g		0,00
U75-19 CPTU1	0,10 g		0,00
U75-19 CPTU2	0,10 g		0,00
U75-19 CPTU3	0,10 g		0,00
Monticelli			
U07-16 CPTU1	0,10 g		0,00
U12-14 CPTU1	0,10 g		0,00
U34-14 CPTU1	0,10 g		0,01
U60-14 CPTU1	0,10 g		0,00
U186-21 CPTU3	0,10 g		0,00
187070U503	0,10 g		0,01
187070U506	0,10 g		0,01
Santa Giustina			
U186-21 CPTU4	0,10 g		0,00

IPL – Indice del potenziale di liquefazione
(Calcolato con la metodologia Boulanger & Idriss 2014 con C.F.C.=0)

	IPL	IPL = 0 – non liquefacibile
	IPL	IPL <= 2 – basso
	IPL	2 < IPL <= 5 – moderato
	IPL	5 < IPL <= 15 – alto
	IPL	IPL > 15 – molto alto

Tabella 7-1

7.2. CARTA DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Le Carte di microzonazione sismica di III Livello – Indice del potenziale di Liquefazione IPL sono calcolate utilizzando il metodo Boulanger & Idriss 2014 e vengono riprodotte in scala 1:10.000, interessando le aree di interesse per il PUG.

Le carte dell'indice del potenziale di liquefazione sono state realizzate attraverso tutte le prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU), sia bibliografiche estrapolate dall'archivio della regione Emilia Romagna sia realizzate dallo scrivente, presenti sul territorio comunale di Mesola. Ad ogni punto d'indagine realizzato sul territorio corrisponde un diverso colore in funzione del valore del potenziale di liquefazione stimato con il calcolo; inoltre per ogni indagine presente sul territorio comunale viene riportato il valore puntuale di I_{PL} (**FIGURA 7.8**)

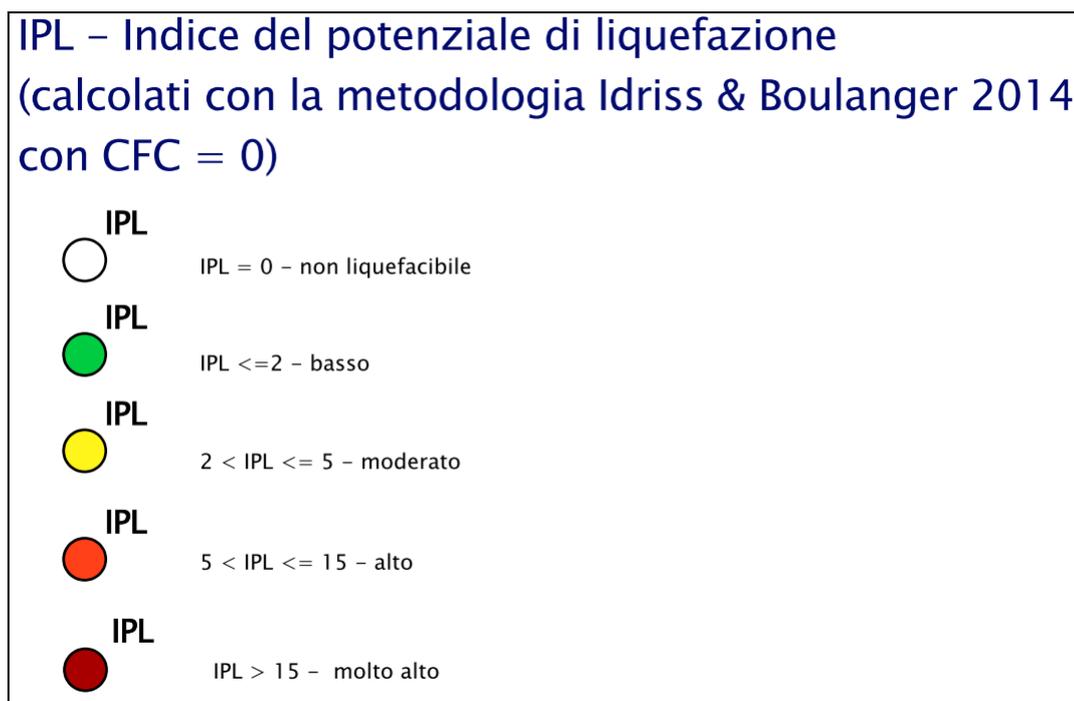


Figura 7-9

L'indice del potenziale di liquefazione è un valore adimensionale che parte da 0 ed esprime il grado di pericolosità dovuto a liquefazione delle sabbie in caso di sisma. Sulla base dei valori di questo indice si esprime una diversa classificazione del potenziale di liquefazione (**Tabella 7.1**) indicata con diversi colori in carta, come riportato da D.G.R. 2245/2018 e dalla successiva D.G.R. 630/2019 della Regione Emilia Romagna.

Indice del Potenziale di Liquefazione I_L	Classificazione D.G.R. 2245 del 2018	Colori nella carta
0,00	Rischio di liquefazione nullo	Verde scuro
$0,00 \leq 2,00$	Rischio di liquefazione basso	Verde chiaro
$2,00 \leq 5,00$		Giallo
$5,00 \leq 15,00$	Rischio di liquefazione elevato	Arancione
$\geq 15,00$	Rischio di liquefazione estremamente elevato	Rosso scuro

Tabella 7-2 - Classificazione dell'indice del potenziale di liquefazione

Per il calcolo dell'indice di liquefazione sono stati considerati gli esiti degli studi di III livello, ove sono stati determinati i fattori di amplificazione, riportati in **Tabella 7.2**.

		Ariano Ferrarese	Italba-Massenzatica	Monticelli	Mesola	Bosco Mesola	Santa Giustina-Alberazzo
PGA/PGAo	F.A.	1.43	1.25	1.63	1.64	1.69	1.56
PGAo	Bedrock	0.063	0.064	0.064	0.061	0.063	0.061
PGA	Superficie	0.090	0.080	0.104	0.100	0.106	0.095

Tabella 7-3

Come si può notare in diverse porzioni del territorio si potrebbe omettere il calcolo dell'indice di liquefazione, in quanto le accelerazioni di picco in superficie PGA, risultano inferiori a 0,10g.

Si è scelto cautelativamente di condurre il calcolo dell'Indice di Liquefazione IL assumendo una accelerazione di superficie pari a 0,10g ovunque.

La Magnitudo di progetto, come da studi di II Livello, è stata considerata pari a $M_w=5,30$. Il livello freatico di tutte le indagini realizzate è stato considerato indicativamente pari a -1,00 m da p.c..

Nella Carta dell'indice di liquefazione (Boulanger & Idriss 2014 senza fattore di correzione C_{FC}) si rileva che il territorio comunale di Mesola è caratterizzato da un indice di liquefazione nullo.

E' ovvio che se avvengono terremoti con energie e quindi tempi di ritorno più alti rispetto a quelli convenzionali per gli studi di microzonazione sismica, oppure se avvengono nel giro di pochi minuti, più sismi importanti, che provocano una somma delle relative sovrappressioni neutre interstiziali indotte, qui ci sono tutti i caratteri predisponenti per l'effetto di sito della liquefazione.

Comunque nella progettazione come nella pianificazione territoriale occorre scegliere delle soglie di eventi per cui progettare in modo sostenibile per la comunità, sarebbe bello e utile progettare opere ordinarie che resistono ad eventi estremi, ma non sarebbe sostenibile economicamente e socialmente.

8. CALCOLO DEI CEDIMENTI POSTSISMICI NEI TERRENI COESIVI SOFFICI

Ad Ariano sono presenti sedimenti particolarmente soffici. I valori di Vs misurati con il cono sismico sono stati inferiori a 100m/sec. La coesione non drenata è inferiore a 70kPa, e l'indice di plasticità di circa il 30%. Lo strato va da -2,5m fino a -4,5m dal p.c.. La falda freatica si colloca a -1,8m dal p.c..

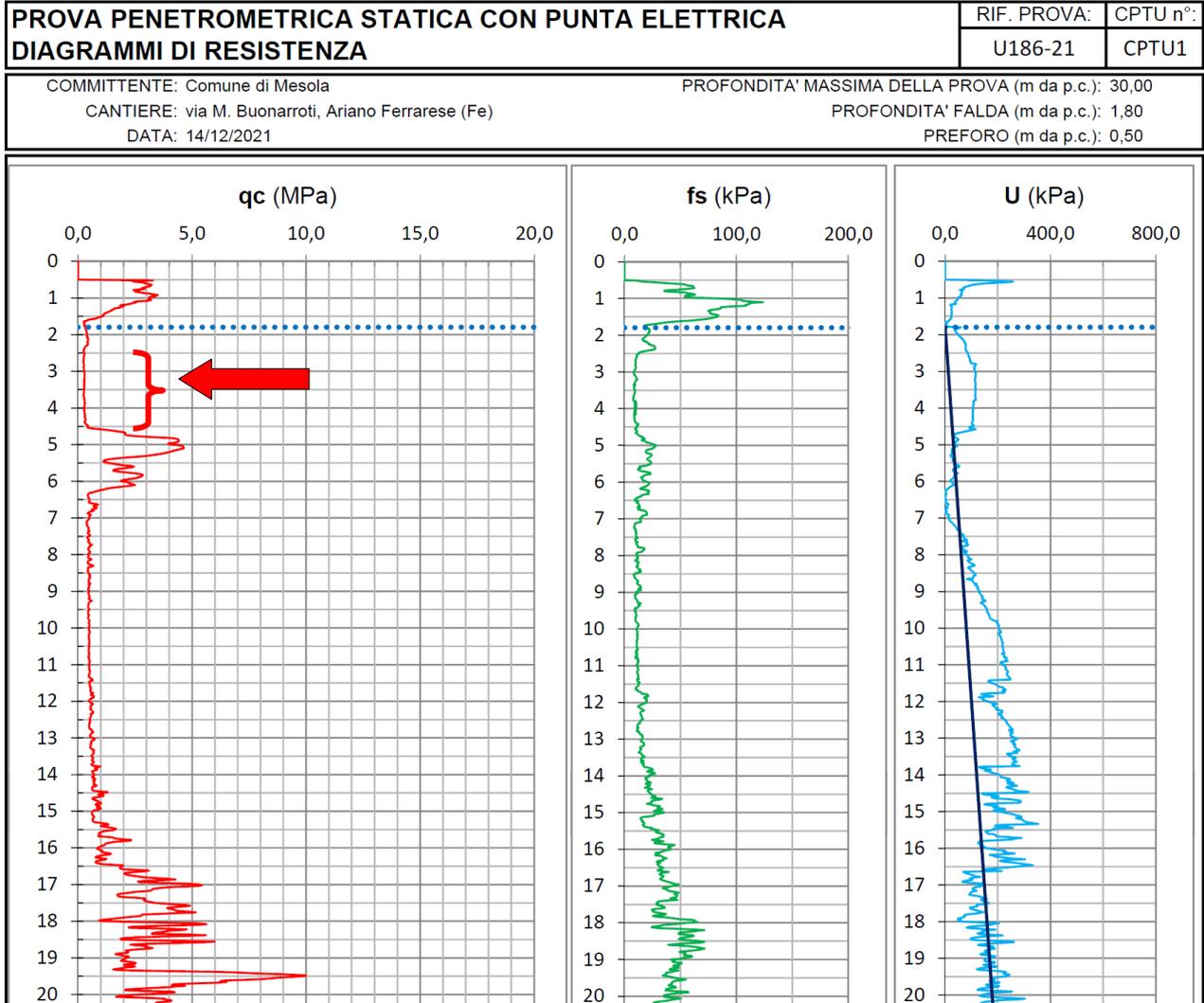


Figura 8-1

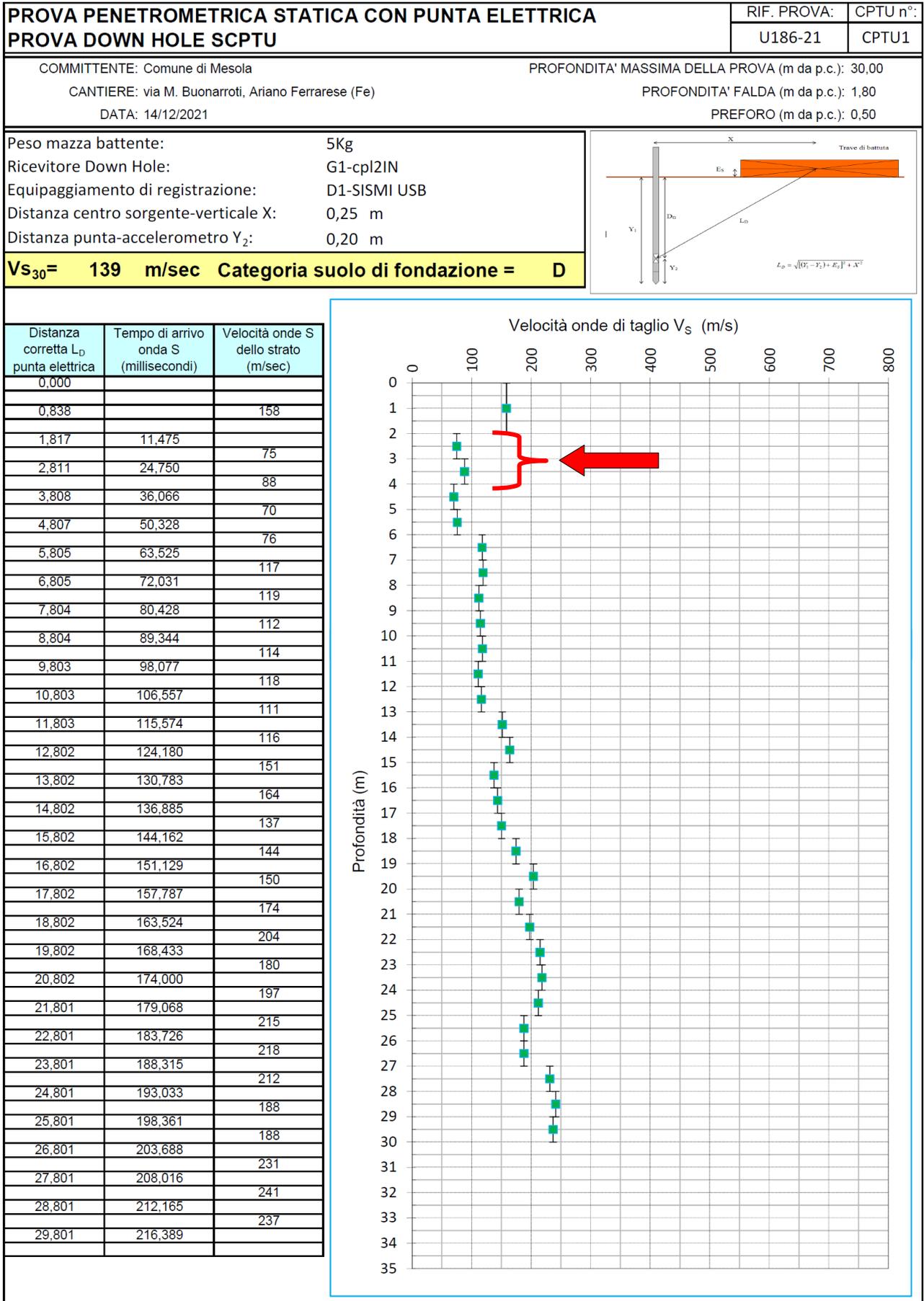


Figura 8-2

I parametri geotecnici dello strato sono riportati negli stralci dei certificati di prova sul campione indisturbato ivi prelevato ed analizzato presso il laboratorio ISMGEO di Bergamo.

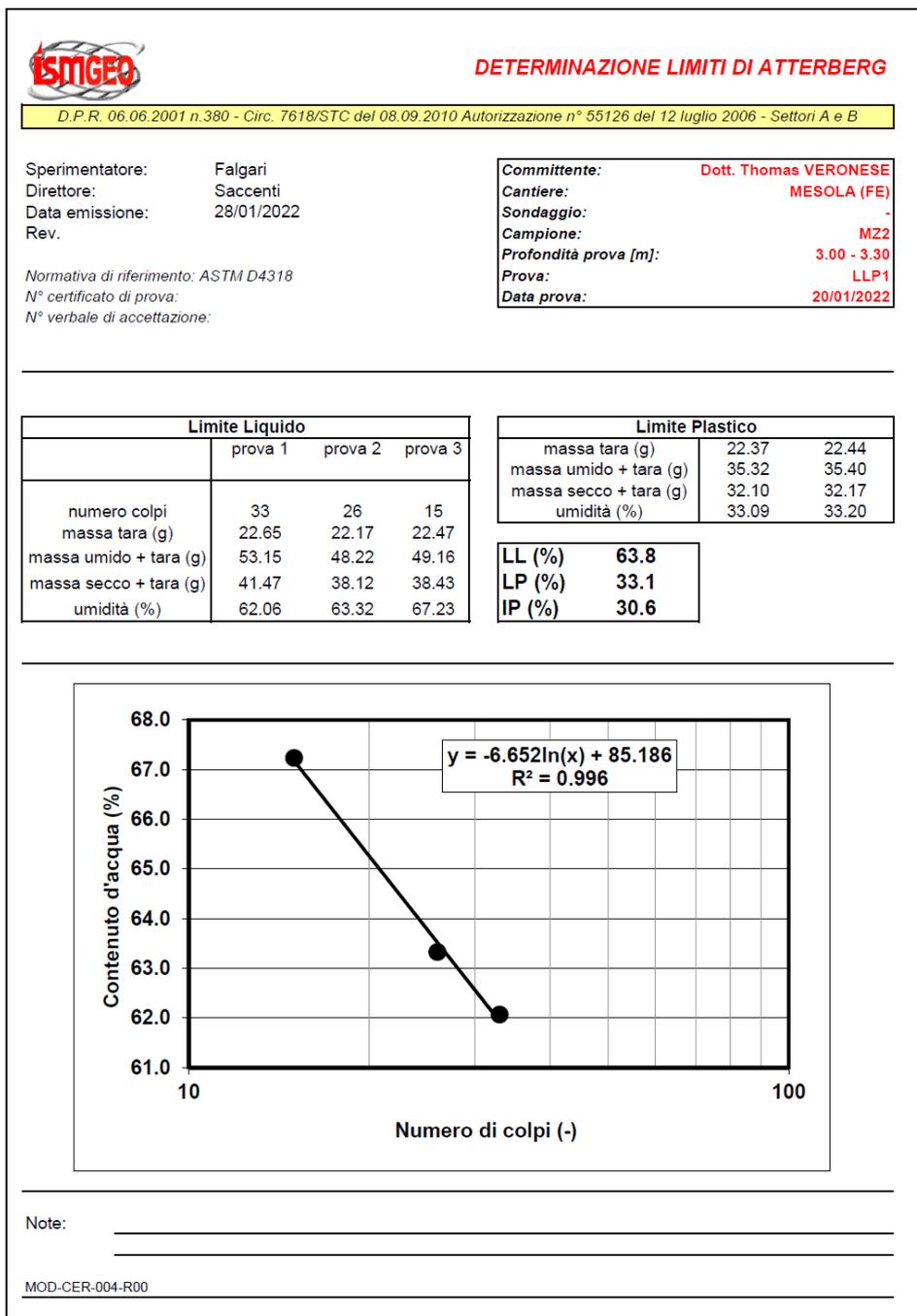
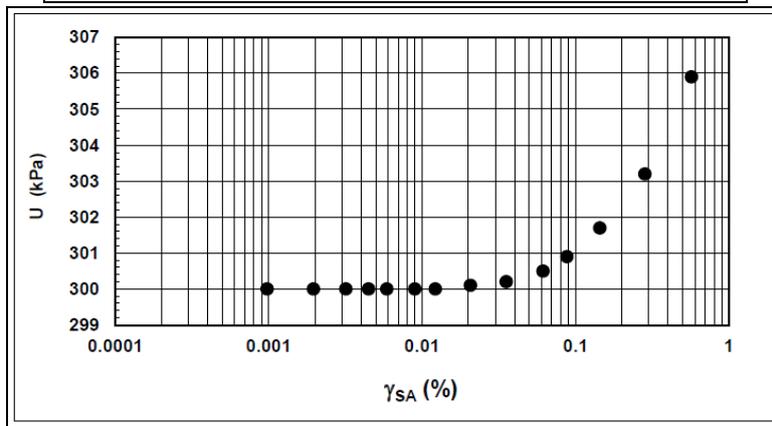
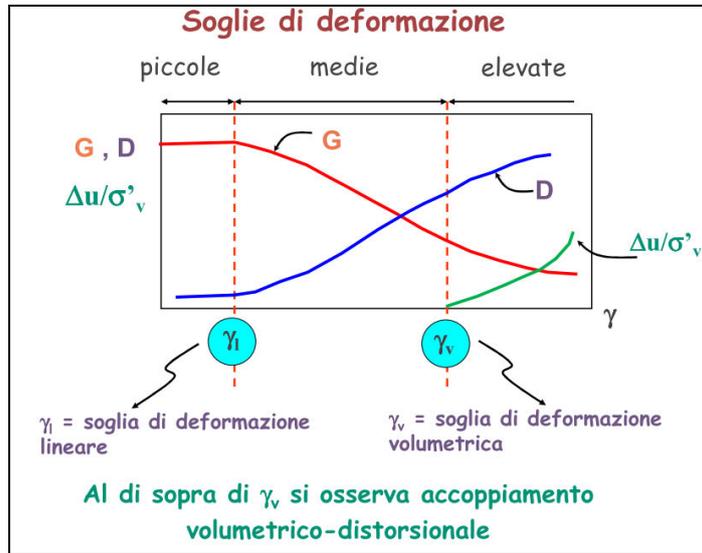


Figura 8-3

Analizzando la prova di colonna risonante si vede quale è la deformazione di soglia volumetrica $\bar{\epsilon}_v$ che induce deformazioni nel terreno, capaci di generare sovrappressioni neutre:



Valori numerici

G	G/G _{MAX}	γ	D	U
(MPa)	(-)	(%)	(%)	(kPa)
10.05	1.000	0.00098		300.0
10.03	0.998	0.00196	3.95	300.0
10.01	0.996	0.00319	3.51	300.0
9.88	0.983	0.00448	3.73	300.0
9.58	0.953	0.00590	3.90	300.0
9.31	0.926	0.00897	4.34	300.0
8.86	0.881	0.01220	4.91	300.0
7.96	0.792	0.02067	6.04	300.1
6.94	0.690	0.03540	6.71	300.2
5.79	0.576	0.06152	8.88	300.5
5.16	0.514	0.08796	10.15	300.9
4.08	0.406	0.14448	11.32	301.7
2.94	0.293	0.28371	13.31	303.2
1.72	0.171	0.57078	16.48	305.9

Legenda:

- ϕ = diametro del provino
- H = altezza del provino
- γ_w = peso di volume umido
- w = contenuto d'acqua
- e = indice dei vuoti
- σ' = tensioni efficaci
- K = σ_v / σ_3
- B.P. = back pressure
- B = coefficiente di Skempton
- G = Modulo di taglio
- γ_{SA} = def. di taglio in singola ampiezza
- D = Rapporto di smorzamento di taglio
- Subscritto 'a' = assiale
- Subscritto 'r' = radiale

Note:

Tipologia Titolo Identificativo Foglio di 3 3

Figura 8-4

Come si può notare dalla tabella il primo segnale di incremento di sovrappressione neutra U si ha per una deformazione $\gamma_{SA}=0,02067\%$.

Ora si procede alla stima della deformazione massima attesa al centro dello strato che si estende da -2,5m a -4,5m, ovvero a -3,5m di profondità. Assumendo che i terreni fuori falda abbiano peso di volume $1,80 \text{ t/m}^3$,

mentre quelli sotto falda abbiamo peso di volume di 1,59 t/m³, si ottiene un carico litostatico efficace pari a 4,24t/m²., ovvero di circa 42kPa, e pari ad una tensione totale di 59kPa.

Il valore del modulo di taglio alle basse deformazioni G₀, calcolato dalla q_c dello strato attraverso la formula proposta da Mayne & Rix (1993), è praticamente coincidente con quello misurato in laboratorio con la prova di colonna risonante, ovvero 10,208MPa contro 10,050Mpa.

		ARGILLE (Mayne & Rix, 1993)	
k	406		
a	0.695		
b	1.13		
e ₀	1.762		
q _c	260	kPa	ag= 0.063
G ₀	10208	kPa	S= 1.43
	104	kg/cm ²	PGA= 0.090
			G/Go= 0.82973
			G= 8470

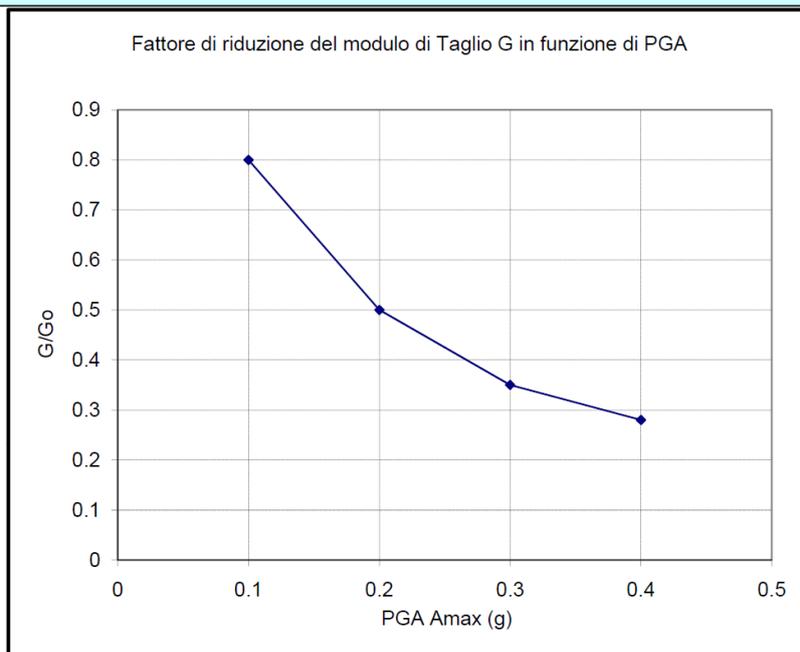


Figura 8-5

In teoria per valori inferiori a 0,10g non sarebbe neanche previsto di procedere per il calcolo.

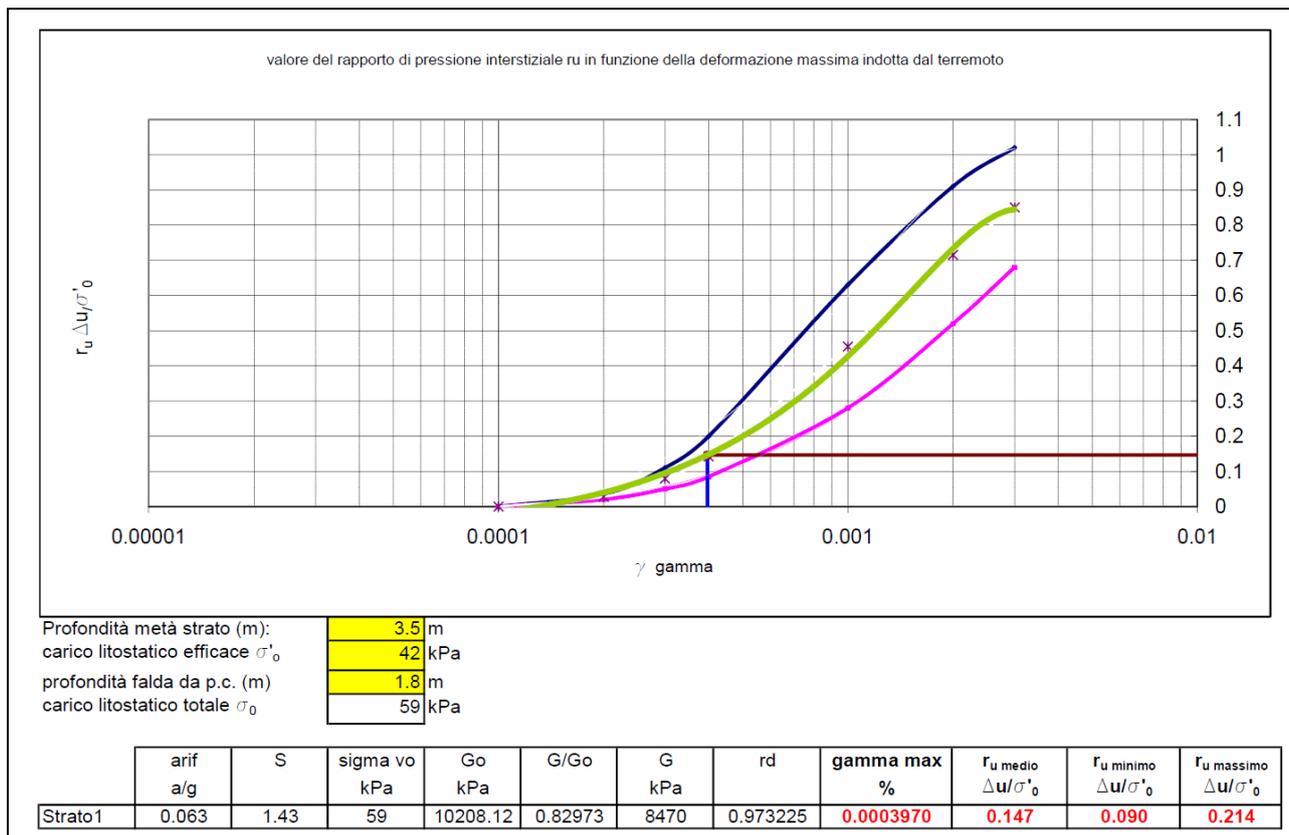


Figura 8-6

Come si osserva, il valore della deformazione massima attesa è, nello strato analizzato, inferiore al valore di deformazione di soglia volumetrica, per cui non sono attesi cedimenti postsismici, infatti il valore di r_u , anche nel suo massimo valore ricavabile, rimane inferiore a 0,3 (questo significa che per deformazioni così basse l'incremento della sovrappressione neutra rimane inferiore al 30% della tensione efficace a quella profondità, e dunque non sono attese deformazioni volumetriche).

Comunque si sta parlando di uno strato dello spessore di circa 200 cm, che anche se avesse una deformazione del 1%, significherebbe un cedimento di circa 2cm.

Si procede ora applicando rigorosamente i contenuti della DGR 476/2021 ; tenendo conto dei risultati della Risposta Sismica Locale e delle analisi di laboratorio geotecnico (Prova di Colonna Risonante e Prova di Consolidazione Edometrica).

B3. Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni coesivi soffici

Nei depositi coesivi soffici ($c_u \leq 70\text{kPa}$; $V_s < 180\text{m/s}$) e plastici ($I_p \geq 30\%$), in cui si prevede un incremento delle pressioni interstiziali $\frac{\Delta u}{p_0} \geq 0.3$ durante l'azione sismica di

riferimento, la deformazione volumetrica (e verticale) e quindi l'entità del cedimento di riconsolidazione conseguente alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto può essere stimata con l'equazione (Yasuhara e Andersen, 1991):

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha \cdot C_r}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{p_0}} \right) \quad \text{in cui}$$

C_r è l'indice di ricompressione, che si assume pari all'indice di rigonfiamento C_s , determinabile con prova edometrica,

$\alpha = 1.5$ è un coefficiente empirico che tiene conto della particolare storia di carico ciclico,

e_0 è l'indice dei vuoti naturale in sito dell'argilla,

$\frac{\Delta u}{p_0} = r_u$ è il rapporto fra l'incremento di pressione interstiziale indotta dallo scuotimento sismico e la tensione media efficace iniziale

Per la stima del rapporto di sovrappressione interstiziale può essere utilizzata la seguente relazione empirica (Matsui et al., 1980):

$$r_u = \frac{\Delta u}{p_0} = \beta \cdot \left[\log \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_v} \right] \quad \text{in cui}$$

$\beta \cong 0.45$ è un coefficiente sperimentale,

γ_{\max} è la deformazione di taglio massima in semplice ampiezza indotta dal terremoto, determinabile, in prima approssimazione, con la relazione empirica:

$$\gamma_{\max} = \frac{a_{\max s}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \cdot \frac{1}{G} \quad \text{dove } r_d = 1 - 0.015z \quad (z \text{ in metri})$$

G è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ_{\max} , che può essere determinato per via iterativa, noto il valore della rigidità iniziale $G_0 (= \rho \cdot V_s^2)$, utilizzando la legge di variazione $G(\gamma)/G_0$ ottenuta con prove dinamiche di laboratorio o, in modo approssimato, desunta da curve di letteratura per terreni con proprietà simili (si veda ad es. Figura 4 da AGI (2005))³.

γ_v è la deformazione di soglia volumetrica, determinabile con prove dinamiche di laboratorio, o in prima approssimazione con la relazione empirica (Matsui et al. 1980): $\gamma_v = A \cdot (\text{OCR} - 1) + B$ in cui OCR è il rapporto di sovraconsolidazione e A e B sono coefficienti sperimentali che, in assenza di determinazione diretta, possono essere stimati in funzione dell'indice di plasticità, I_p (Tabella 1).

Tabella 1 - Valori suggeriti per i coefficienti A e B

I_p (%)	A	B
20	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$0.6 \cdot 10^{-3}$
40	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
55	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

Attraverso l'analisi della risposta sismica locale, utilizzando il codice STRATA, ed inserendo il medesimo modello utilizzato con il software LSR-2D, si ottiene in output il profilo del massimo sforzo di taglio (Maximum Shear Strain profile).

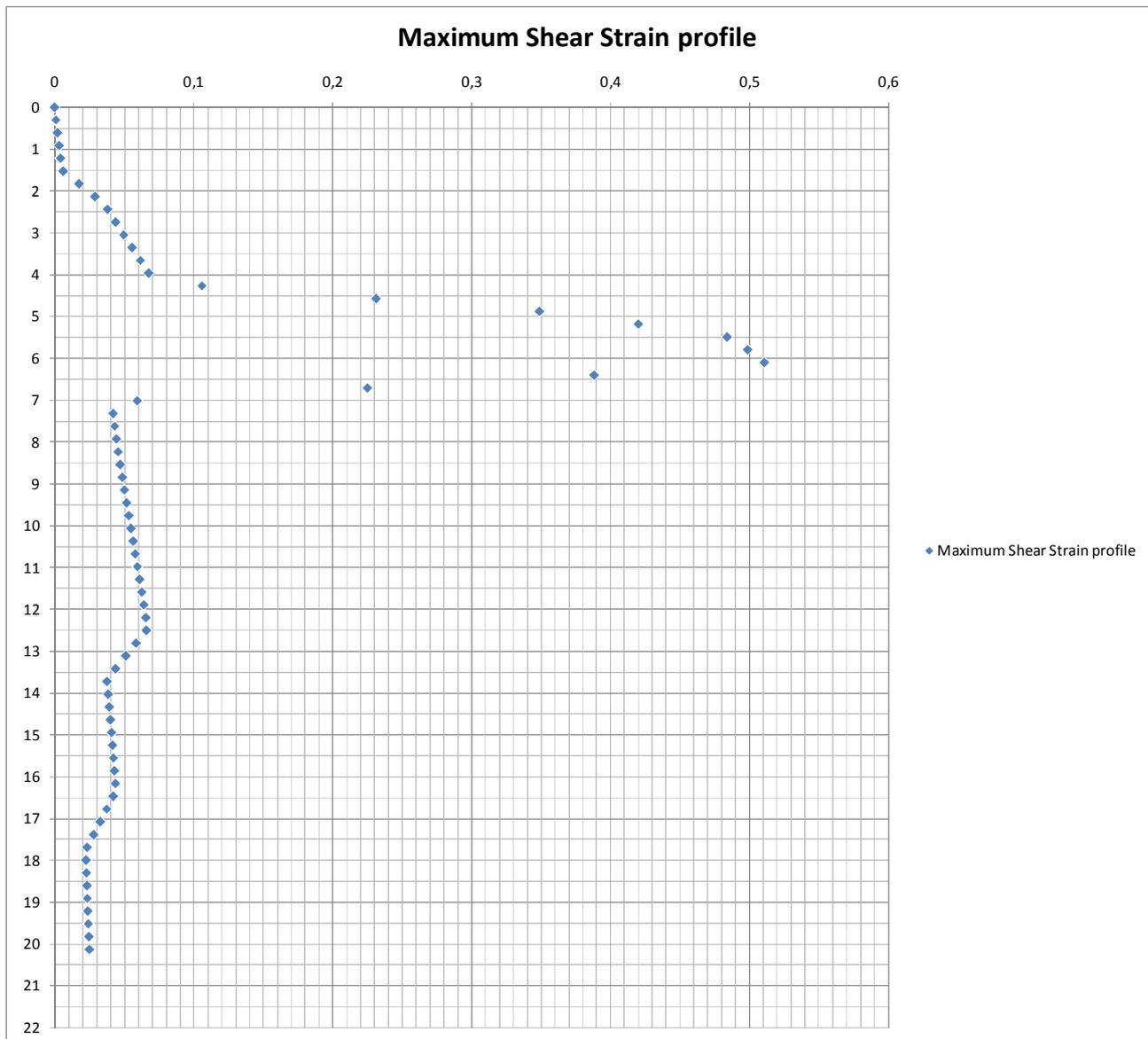


Figura 8-7

Cambiano i fondi scala si può leggere il valore del **gmax** alla profondità compresa tra -2,5m e -4,5m dal p.c.. Si ottiene un valore medio di **gmax=0,059.**, come visibile dalla **FIGURA 8-8.**

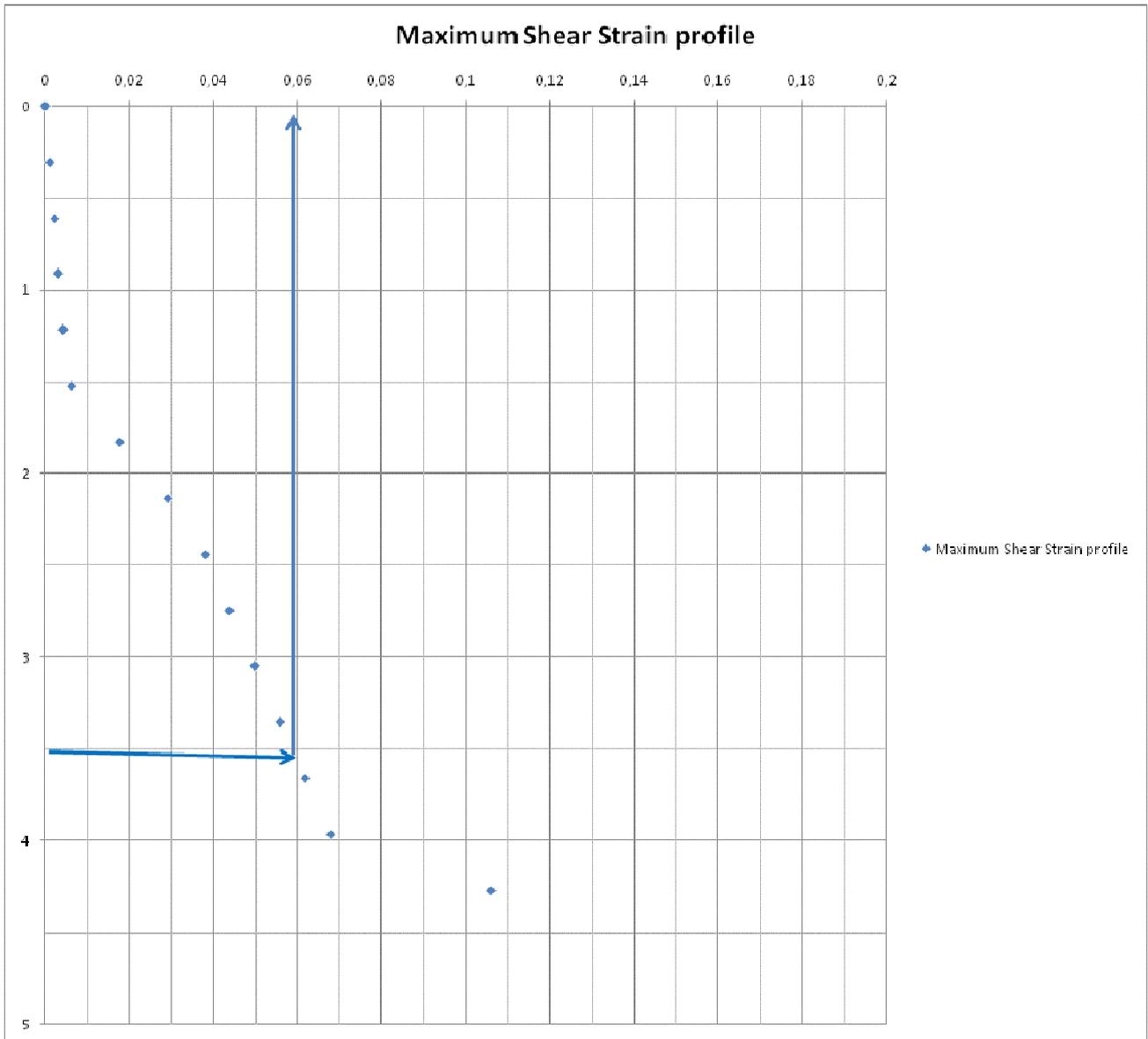


Figura 8-8

Il valore del γ_v viene letto direttamente dalla prova di colonna risonante sul campione prelevato all'interno dello strato in valutazione, e come già visto sopra in **FIGURA 8-4**, è pari a 0,02498.

Sostituendo i valori nella formula:

$$r_u = \frac{\Delta u}{p'_0} = \beta \cdot \left[\log \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_v} \right]$$

Si ottiene che $r_u=0,20498$

Si procede ora con l'analisi della prova di consolidazione edometrica eseguito sul medesimo strato di terreno.

Si calcola il valore dell'indice di rigonfiamento C_s , che viene assunto pari all'indice di ricompressione C_r .

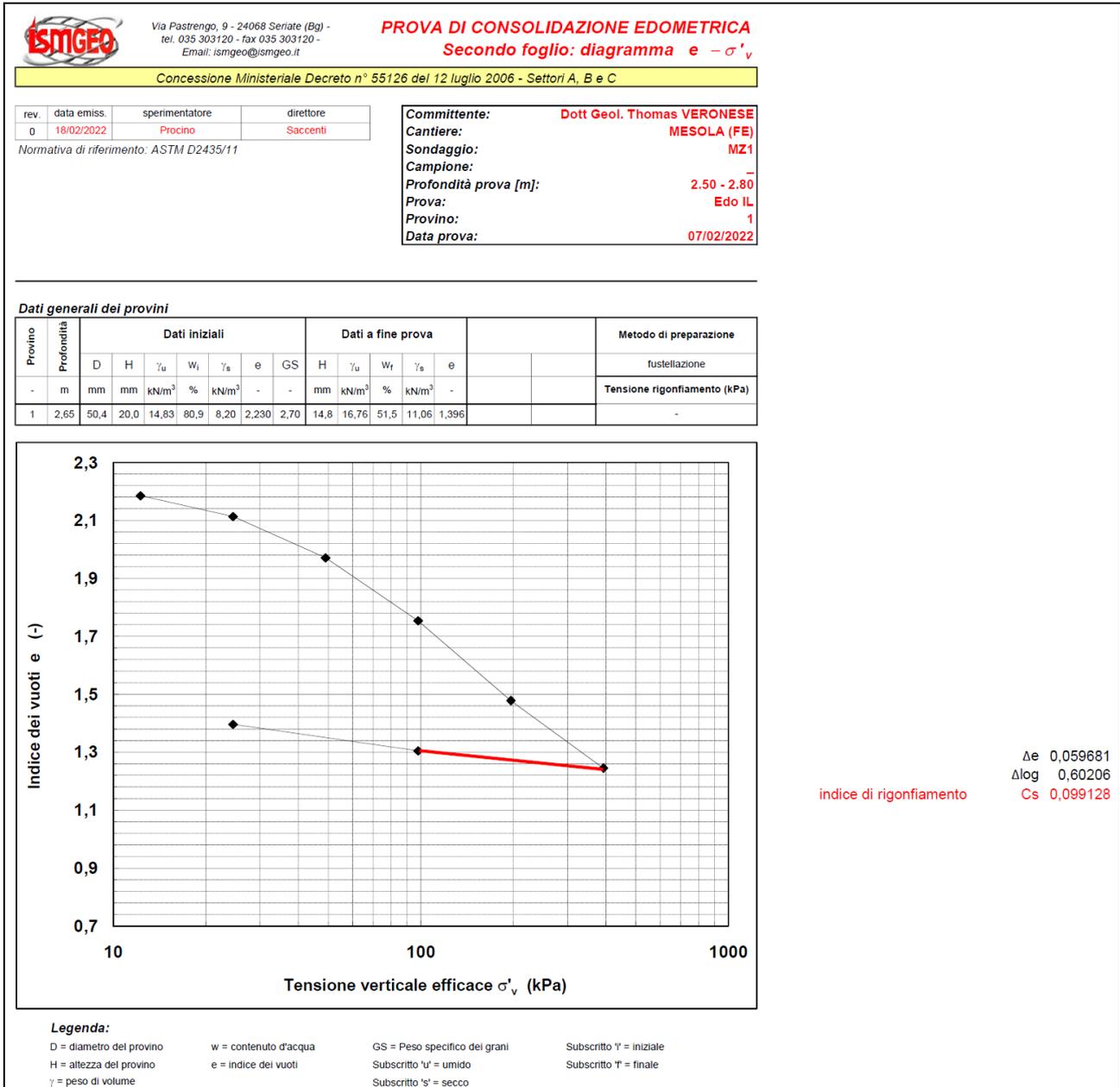


Figura 8-9

$C_r = C_s = 0,099128$ (si veda calcolo riportato in **FIGURA 8-9**)

$e_0 = 2,185$

$\alpha = 1,5$

$r_u = \Delta u / p'_0 = 0,20498$

Sostituendo nella seguente equazione si ottiene il valore della deformazione:

$$\epsilon_v = \frac{\alpha \cdot C_r}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{p'_0}} \right)$$

Quindi $\epsilon_v = 0,004651$

Essendo lo strato di 200 cm di spessore, la deformazione complessiva dello strato, indotta dal terremoto di progetto, causa un cedimento postsismico nel terreno coesivo soffice, di circa 0,93cm, quindi del tutto trascurabile, come già emerso dall'analisi condotta nel paragrafo precedente. Il foglio di calcolo Excel è riassunto nella **FIGURA 8-10**.

γ_{\max}	0,059
γ_v	0,02067
ru=	0,20498
e0=	2,185
Cr=	0,09913
ϵ_v =	0,004651
Δ strato=	200 cm
cedimento=	0,930192 cm

Figura 8-10

Codigoro, li 03/02/2022

Dott. Geol. Thomas Veronese

