



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 dalla legge 24 giugno 2009, n. 77

# MICROZONAZIONE SISMICA

Regione Emilia-Romagna  
Comune di Tresignana

## RELAZIONE ILLUSTRATIVA



Regione Emilia-Romagna  
Comune di Tresignana



Unione dei Comuni  
**Terre e Fiumi**

Copparo - Riva del Po - Tresignana

Settore Pianificazione  
Territoriale

Resp. del procedimento:  
Geom. Silvia Trevisani

Soggetto realizzatore



Synthesis s.r.l.

P.zza del Popolo 13 int. 5  
44034 Copparo (FE)

Gruppo di lavoro

Responsabile del progetto:

Dr. Geol. Emanuele Stevanin

Collaboratori:

Dr.ssa Geol. Emma Biondani

Dr. Geol. Stefano Maggi

Data: 04/2020



## **INDICE**

<b>1. INTRODUZIONE</b>	<b>2</b>
<b>2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Caratteristiche sismotettoniche generali</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Storia sismica del territorio comunale</b>	<b>8</b>
<b>2.3. Pericolosità sismica di base sito specifica</b>	<b>11</b>
<b>3. ASSETTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Assetto geologico e idrogeologico</b>	<b>13</b>
<b>4. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI</b>	<b>16</b>
<b>4.1. Parametri geotecnici</b>	<b>17</b>
<b>4.2. Parametri geofisici</b>	<b>29</b>
<b>5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO</b>	<b>36</b>
<b>6. INTEPRETAZIONI ED INCERTEZZE</b>	<b>38</b>
<b>7. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI</b>	<b>39</b>
<b>8. ELABORATI CARTOGRAFICI</b>	<b>40</b>
<b>8.1 Carta delle Indagini</b>	<b>41</b>
<b>8.2 Carta delle frequenze naturali dei terreni</b>	<b>42</b>
<b>8.3 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)</b>	<b>43</b>
<b>8.4 Carta di Microzonazione Sismica</b>	<b>44</b>
<b>8.4.1 Analisi di Risposta Sismica Locale</b>	<b>46</b>
<b>8.4.2 Stima dell'indice di liquefazione IL terreni incoerenti</b>	<b>59</b>
<b>8.4.3 Stima dei cedimenti post-sismici attesi terreni coesivi</b>	<b>62</b>
<b>9. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DI DANNI PER EVENTI PASSATI</b>	<b>64</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>64</b>
<b>11. ALLEGATI</b>	<b>65</b>



## 1. INTRODUZIONE

La presente Relazione Illustrativa riferisce dei risultati ottenuti dalle analisi di *terzo Livello di approfondimento*, eseguite ai sensi della Delibera della Giunta Regionale DGR 630/2019 della Regione Emilia Romagna, relativamente al territorio di comunale di Tresignana (Comune Istituito con L.R. n. 17/2018 a seguito di fusione tra i Comuni di Tresigallo e di Formignana) e sue frazioni (Tresigallo, Final di Rero, Formignana, Brazzolo, Rero e Roncodigà). Il presente documento accompagna gli elaborati cartografici specifici richiesti per il livello di studio in questione.

Lo studio con *terzo livello di approfondimento* per il territorio di Tresignana e sue frazioni, alla luce delle evidenze emerse durante le fasi di I e II livello di approfondimento, si è posto come obiettivo la valutazione dell'effettivo grado di pericolosità sismica locale dell'area mediante la stima degli indici di rischio nelle aree identificate come potenzialmente "instabili" e pertanto eventualmente suscettibili di:

- liquefazione, limitatamente alle ZONE in cui si è riscontrata la presenza di terreni incoerenti, sciolti, in falda;
- densificazione, limitatamente alle ZONE in cui si è riscontrata la presenza di terreni coesivi, soffici.

Si ricorda altresì che la totalità del territorio oggetto di studio è caratterizzata da terreni soggetti ad amplificazione del moto sismico del suolo per effetti stratigrafici. Nel presente lavoro è stata eseguita l'analisi della risposta sismica locale (RSL) mediante approccio numerico non semplificato al fine di stimare con maggiore dettaglio i valori di PGA (accelerazione orizzontale massima in superficie) utilizzati sia per la stima degli Indici di Liquefazione a carico dei terreni granulari sia per la stima dei cedimenti post-sismici attesi nei terreni coesivi.

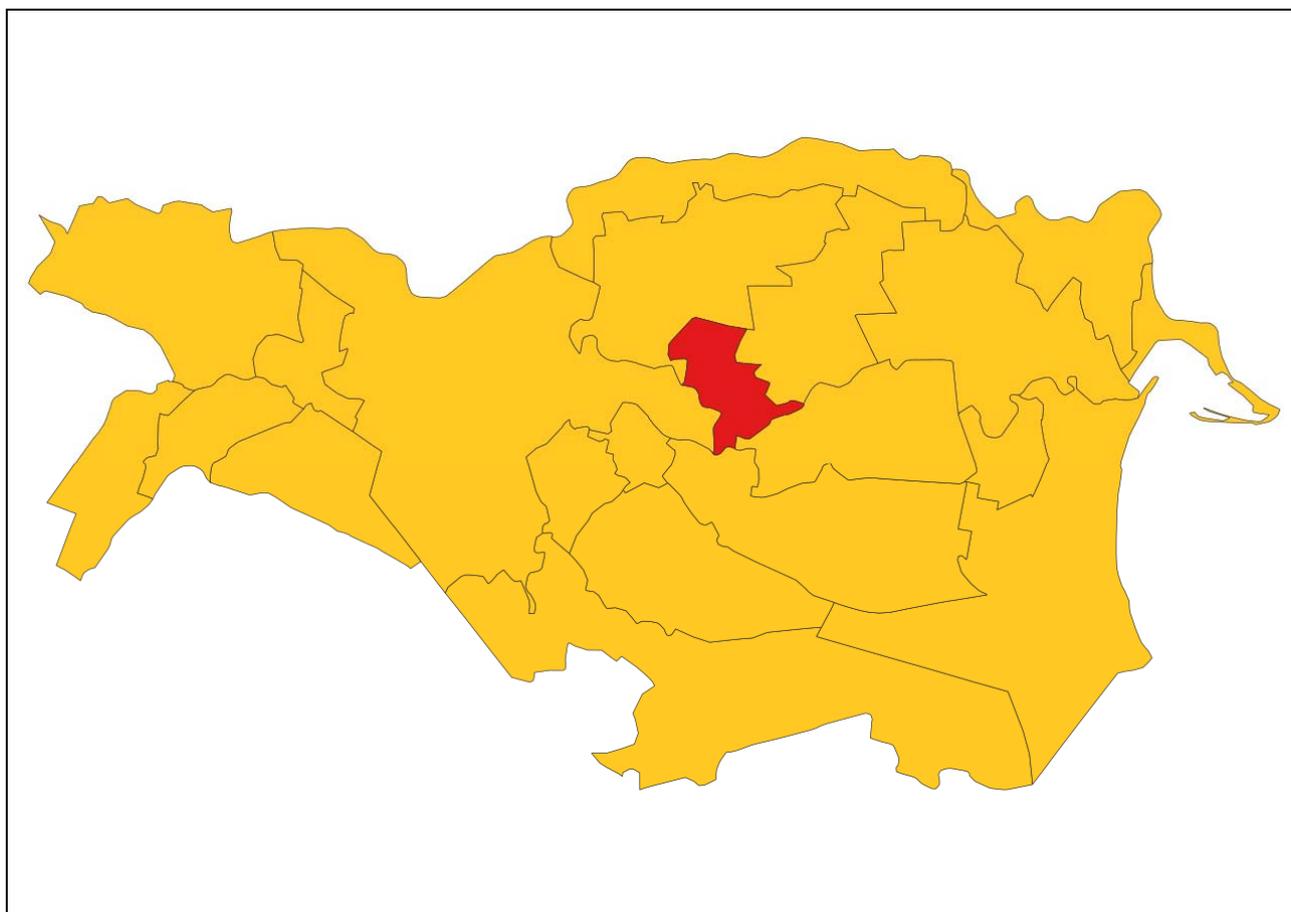
Il lavoro che ha portato alla redazione del presente documento è stato sviluppato nel seguente modo:

- sintesi e riepilogo delle principali informazioni desunte dai precedenti livelli di analisi;
- esecuzione di nuove indagini dirette (CPTU, sondaggi a trivella, prelievo campioni, analisi di laboratorio geotecnico) e indirette di tipo geofisico (misure a stazione singola del microtremore ambientale su suolo); il nuovo set di indagini realizzato ha avuto come scopo quello di integrare e completare le informazioni di carattere geologico-geotecnico-geofisico ottenute nelle fasi di studio precedenti, al fine di consentire l'analisi di risposta sismica locale e la stima dettagliata degli indici di rischio sopraccitati;
  - costruzione di un modello sintetico di sottosuolo dalla superficie al "bedrock" sismico ( $V_s \approx 700-800$  m/s) in termini di spessore strati, litologia predominante all'interno del singolo strato, velocità media di propagazione delle onde S all'interno del singolo stato e curve degrado-smorzamento (comportamento dinamico dello strato);
  - analisi di risposta sismica locale (RSL) sul modello sopraccitato con stima dello spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali per un periodo di ritorno  $TR = 475$  anni e smorzamento convenzionale pari al 5%, e mappe di amplificazione in termini di PGA, SA1, SA2, SA3, SA4, SI1, SI2, SI3, HSM e H0408, H0711, H0515, ovvero lo scuotimento in accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) atteso al sito per gli intervalli di periodi  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;
  - stima degli Indici di Liquefazione  $I_L$  sugli strati incoerenti entro i primi 20 m (laddove  $PGA > 0.1$  g da analisi RSL), e stima dei cedimenti post-sismici attesi a carico della frazione fine con particolare riferimento ai primi 5-10 m da p.c. (laddove verificate le condizioni di cui all'allegato B3 della DGR 630/2019); in entrambi i casi come parametro di input per la sollecitazione ciclica sono stati utilizzati i valori di PGA in superficie ottenuti da analisi RSL.

Il territorio comunale di Tresignana è identificabile nella cartografia IGM alla scala 1:25.000 nei fogli:  
186 SE Tresigallo  
204 NE Migliarino  
205 NO Lagosanto  
187SO Codigoro  
186 II Tresigallo

Dal punto di vista cartografico è inoltre ricoperto dalla Carta Tecnica Regionale ricostruita alla scala 1:5.000. Gli elementi che interessano l'intero territorio sono i seguenti:

186102  
186112-186113  
186141  
186151-186152-186153-186154  
186163-186164  
204031-204034  
204044



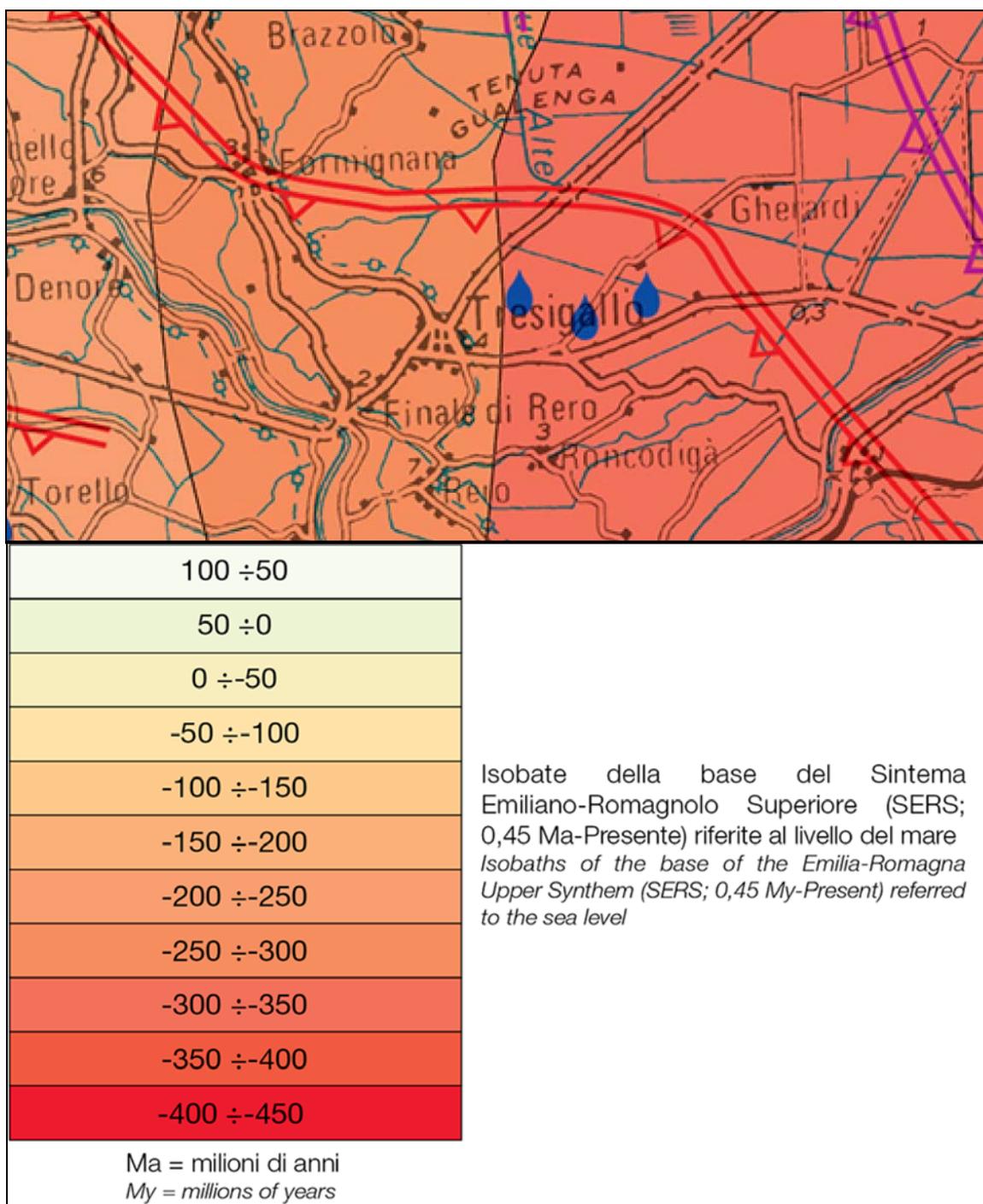
**Figura 1-1: Suddivisione amministrativa della provincia di Ferrara; nel riquadro il territorio oggetto di studio**

 <b>Synthesis s.r.l.</b> Piazza del Popolo civ. 13 – int. 5 44034 – Copparo – Fe Tel. 0532 860546 – Fax 0532 091680 www.synthesisr.com – info@synthesisr.com	STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO <b>Relazione Illustrativa</b>	RIF. 020/20-EB-REV00 DEL 04/2020
--	---	-------------------------------------

## 2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1. Caratteristiche sismotettoniche generali

Il territorio comunale di Tresignana è caratterizzato nel complesso da una sismicità di grado basso e molto basso. Dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe si evince che il territorio del Comune di Tresignana è compreso all'interno di una zona con profondità delle isobate della base *del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore* (depositi della Pianura Padana di età compresa tra 0.45-0.35 M.a. e l'Olocene) variabile tra -250 m e -350 m. Queste profondità verranno assunte come limite basale ("bedrock" sismico) del modello di sottosuolo ai fini della risposta sismica locale (RSL) come descritto in seguito.



**Figura 2.1-1: Estratto della Carta Sismotettonica Regione E-R e aree limitrofe**

Secondo l'ultima zonazione sismogenetica pubblicata ZS9 (30/06/2012), nella quale vengono individuate per tutto il territorio italiano n. 36 zone – sorgente, denominate dal numero 901 al numero 936, i cui limiti sono stati tracciati sulla base di informazioni tettoniche o geologico-strutturali e di differenti caratteristiche della sismicità, quali distribuzione spaziale e frequenza degli eventi, massima magnitudo rilasciata, ecc., il territorio comunale di Tresignana, a testimonianza di una sismicità nel complesso bassa e trascurabile, non rientra in alcuna zona (seppur al limite con la zona 912). L'area in esame, si colloca in

parte in corrispondenza della sorgente sismogenica composta ITCS050 Poggio Rusco – Migliarino (Figura 2.1-3), le cui caratteristiche sono riportate in figura 2.1-4.



**Figura 2.1-2: Carta Sismogenetica d'Italia - Zone Sismogenetiche ZS9 (nel riquadro l'area oggetto di studio).**



**Figura 2.1-3: Database delle Sorgenti Sismogenetiche INGV– DISS 3.2.1**

GENERAL INFORMATION				
DISS-ID	ITCS050			
Name	Poggio Rusco-Migliarino			
Compiler(s)	Burrato P.(1)			
Contributor(s)	Burrato P.(1), D'Ambrogio C.(2), Maesano F.E.(1), Toscani G.(3)			
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Tettonofisica; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy 2) Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale; Servizio Geologico d'Italia; Via Vitaliano Brancati, 48, 00144 Roma, Italy 3) Universit... di Pavia; Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente; Via Ferrara, 1, 27100 Pavia, Italy			
Created	08-Jan-2005			
Updated	16-Oct-2013			
Display map ...	 			
Related sources	<a href="#">ITIS090</a>			
PARAMETRIC INFORMATION				
	PARAMETER	QUALITY	EVIDENCE	
	Min depth [km]	1.0	OD	Based on geological data from various authors.
	Max depth [km]	8.0	OD	Based on geological data from various authors.
	Strike [deg] min... max	85...115	OD	Based on geological data from various authors.
	Dip [deg] min... max	25...55	OD	Based on geological data from various authors.
	Rake [deg] min... max	80...100	OD	Based on geological data from various authors.
	Slip Rate [mm/y] min... max	0.39...0.45	OD	Calculated using geologic subsurface data.
	Max Magnitude [Mw]	5.5	OD	Based on the strongest earthquake occurred in the region.
<small>LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;</small>				
<b>ACTIVE FAULTS</b>				
<b>ACTIVE FOLDS</b>				

Figura 2.1-4: Caratteristiche Sorgente Sismogenetica Composta ITCS050 Poggio Rusco - Migliarino

## 2.2. Storia sismica del territorio comunale

In questo paragrafo è descritta, sinteticamente, la storia sismica del comune di Tresignana, comune istituito con L.R. n. 17/2018 a seguito di fusione tra i Comuni di Tresigallo e Formignana. In figura 2.2-1 sono evidenziati i principali eventi sismici verificatisi dall'anno 1000 a oggi. Dal grafico si evince che gli eventi sono molto sporadici; questo, almeno in parte, è dovuto ad una mancanza di dati dato che queste zone erano disabitate e palustri fino a tempi moderni.

L'evento principale, di intensità macrosismica IMCS = 6-7 percepita presso il comune di Tresigallo e di intensità macrosismica IMCS = 5 percepita presso il comune di Formignana, è avvenuto nel 1570 e ha avuto epicentro nel comune di Ferrara (figura 2.2-2) distante circa 20 Km dall'area in studio. La Magnitudo Momento  $M_w$  associata a questo sisma è pari a  $5.44 \pm 0.17$  (INGV-CPTI15)

Altro dato è quello proveniente dal sisma del 20/05/2012, con epicentro nella zona di Finale Emilia (MO), con distanze dal sito in studio di circa 50 Km. Lo scuotimento registrato dalla stazione accelerometrica più vicina (circa 10 Km dal sito) è quella di Coccanelle (sigla in codice "CPC" – da Italian Accelerometric Archive ITACA 2.3). Essa ha registrato valori massimi di  $PGA = 33.167 \text{ cm/s}^2$  (= 0.033 g) sulla componente orizzontale. Il sisma, di Magnitudo Momento  $M_w = 6.1$ , è avvenuto a una distanza epicentro-stazione di misura pari a 48.4 Km.

Questi dati, con particolare riferimento a magnitudo momento e distanze epicentrali, sono stati utilizzati per la selezione degli accelerogrammi di input ai fini dell'analisi di risposta sismica locale come descritto in seguito.

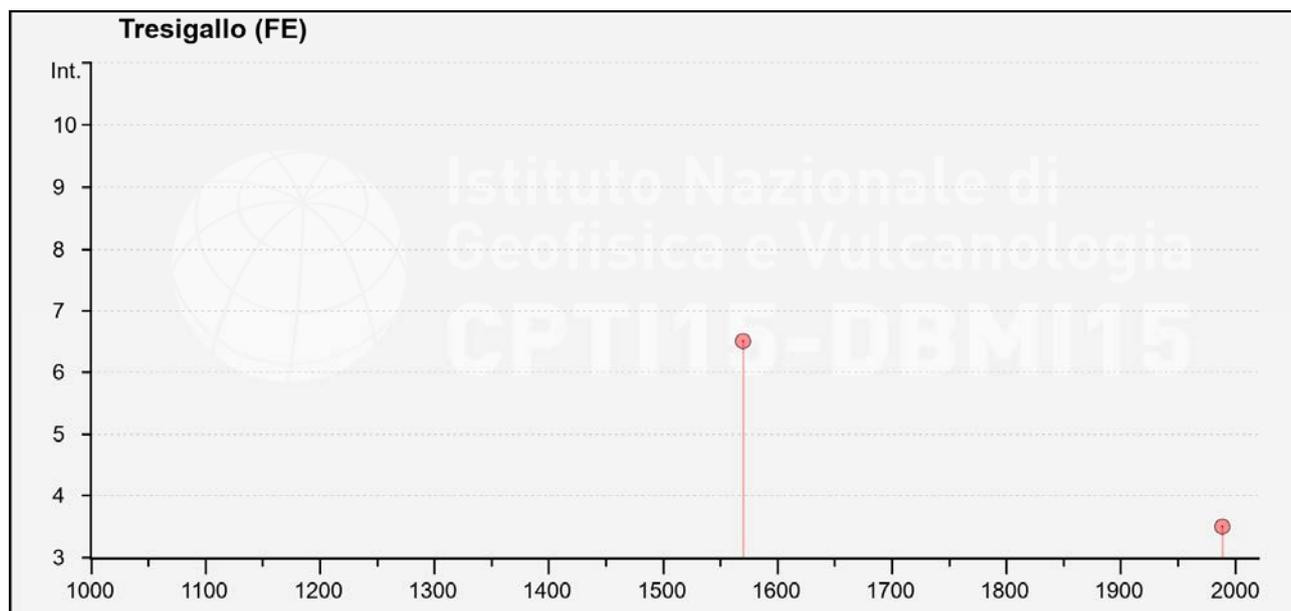


Figura 2.2-1: Eventi sismici Tresigallo (FE) da CPTI15 e BM15 – INGV

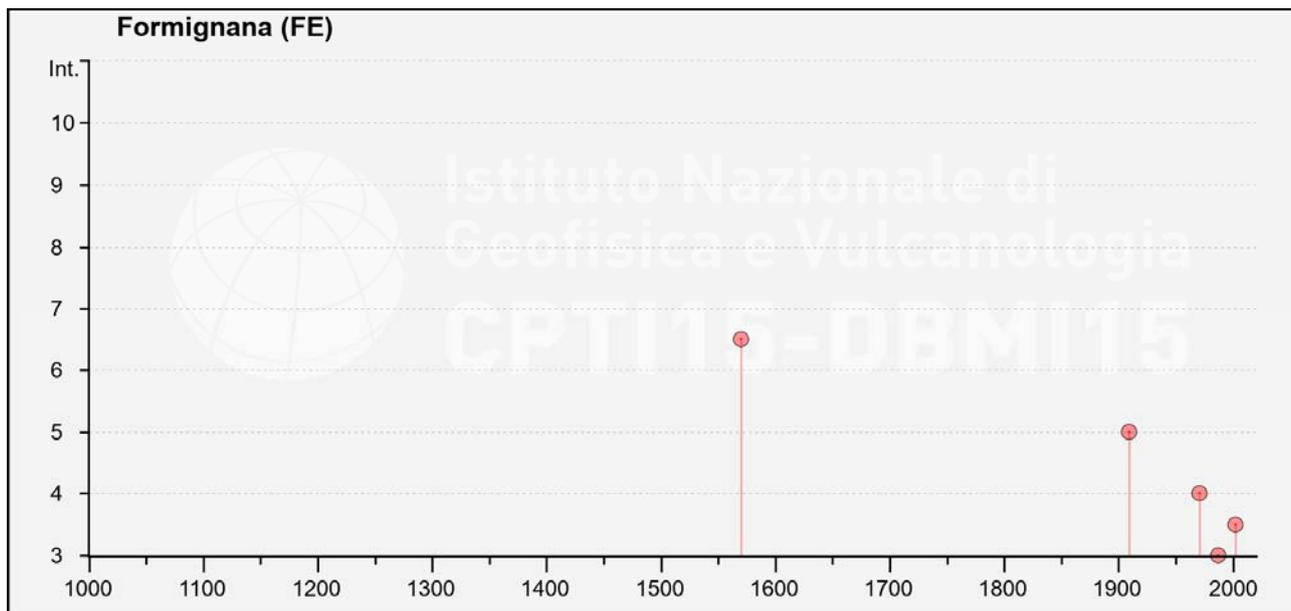


Figura 2.2-2: Eventi sismici Formignana (FE) da CPT15 E DBM15 - INGV

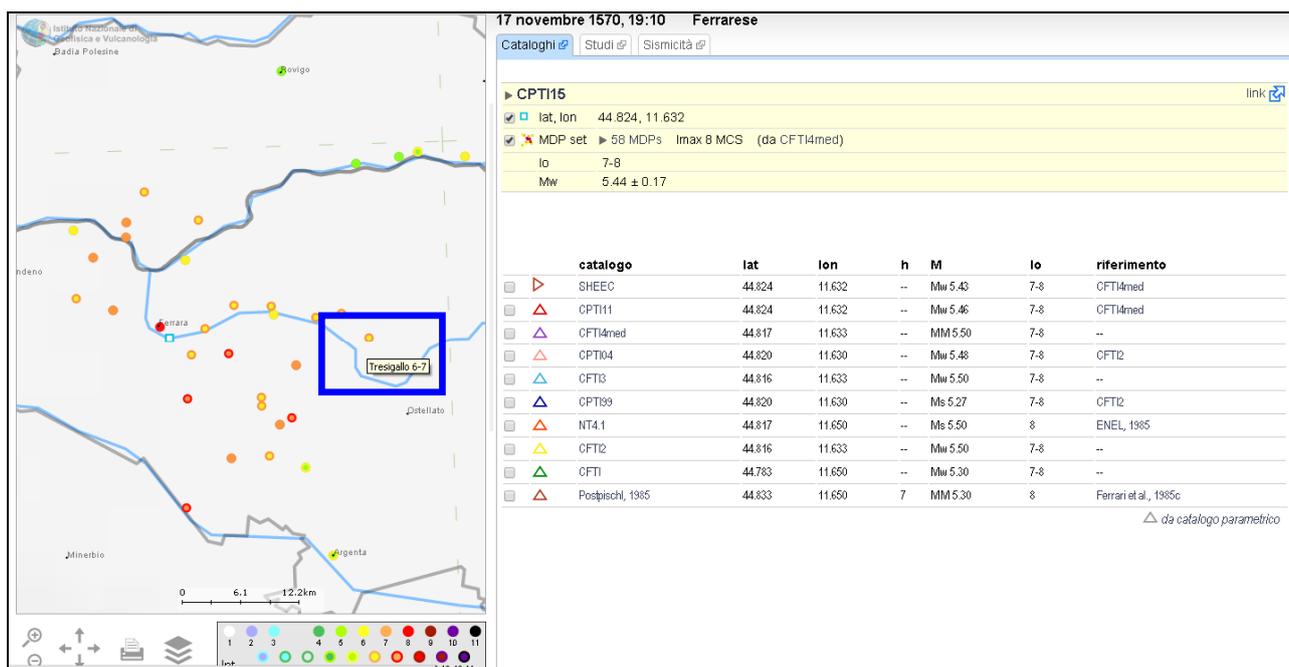
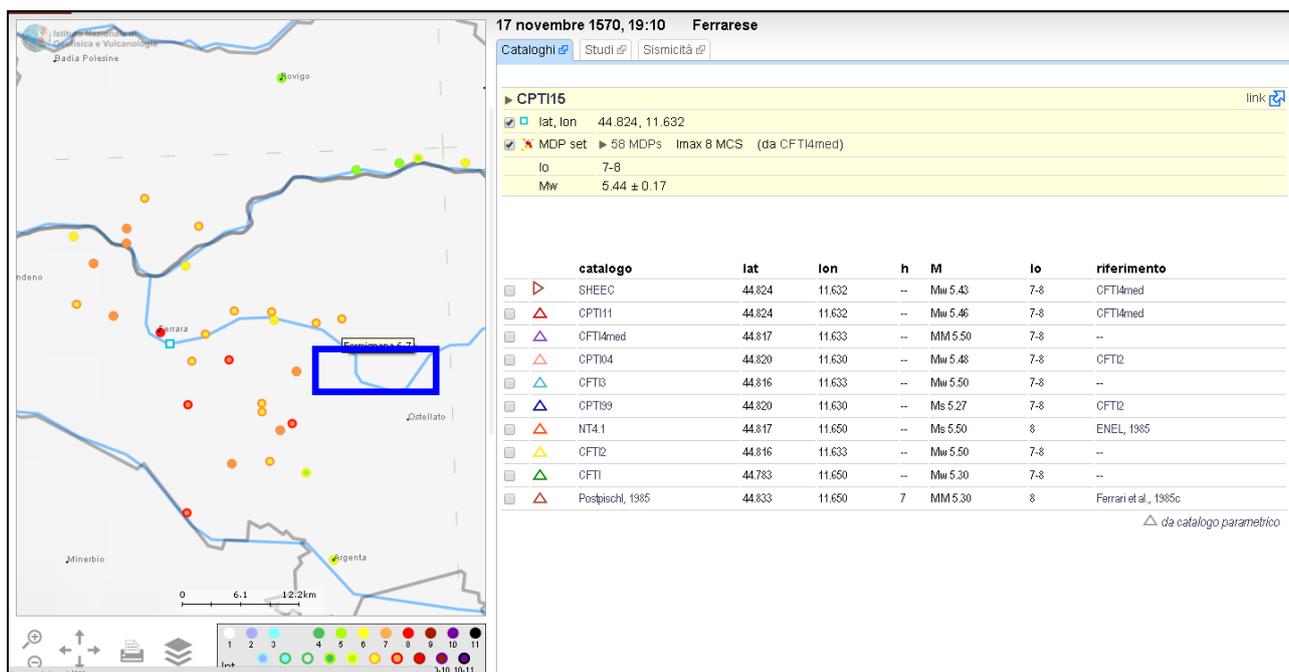
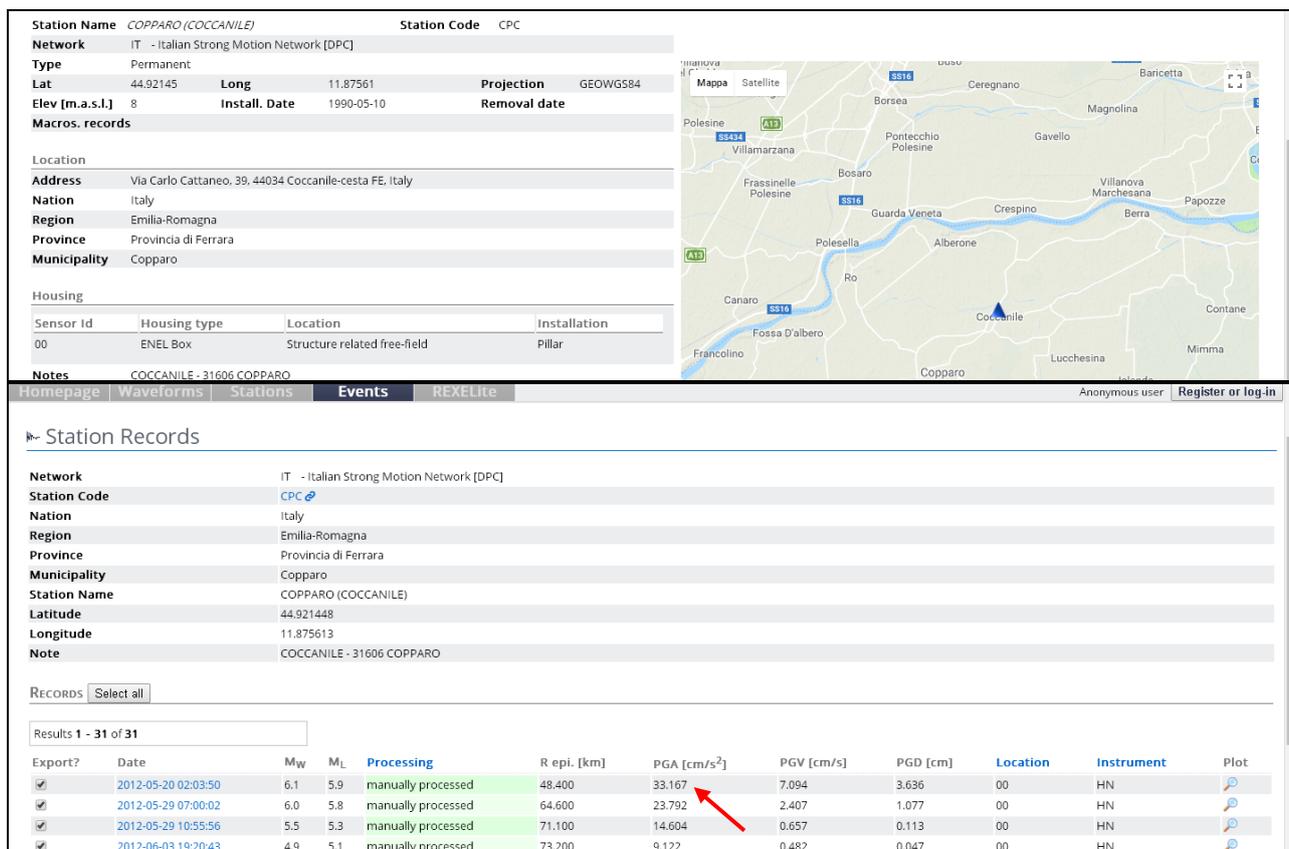


Figura 2.2-3: Localizzazione epicentro dell'evento principale che ha causato i maggiori effetti macrosismici sul comune di Tresigallo (FE) e valori di magnitudo associati. Nel riquadro l'area di interesse.



**Figura 2.2-4: Localizzazione epicentro dell’evento principale che ha causato i maggiori effetti macrosismici sul comune di Formignana (FE) e valori di magnitudo associati. Nel riquadro l’area di interesse.**



**Figura 2.2-5 – Stazione di Coccanile “CPC” (Italian Accelerometric Archive) e dati provenienti dal sisma 2012 (il triangolo blu rappresenta la stazione accelerometrica)**

### 2.3. Pericolosità sismica di base sito specifica

Nell'allegato 4 della DGR 2193/2015, la pericolosità sismica di base di ciascun punto del territorio regionale è definita sulla base di una griglia di nodi ai quali è associato un valore di  $a_{refg}$  determinato come l'accelerazione orizzontale di base espressa in frazioni percentuali dell'accelerazione di gravità ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ).

Il territorio regionale è suddiviso in una griglia di nodi (allegato 4 – DGR 2193/2015 e DGR 630/2019). A ciascun nodo corrisponde uno specifico valore di  $a_{refg}$  (allegato 4 – DGR 2193/2015) e uno specifico valore di  $ASl_{0.1-0.5}/0.4s$ . Nelle figure 2.3-1 e 2.3-2 è riportato nel dettaglio il territorio comunale di Tresignana con i nodi ricadenti in corrispondenza dell'area di studio e nelle immediate vicinanze. I valori di riferimento di  $a_{refg}$  e di  $ASl_{0.1-0.5}/0.4s$ , selezionati nel presente studio, sono associati ai punti griglia più vicini al comune capoluogo o alla frazione considerata.

La pericolosità sismica di base secondo la DGR 630/2019 è definita per un Periodo di Ritorno  $T_R$  pari a 475 anni con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

Considerando i nodi più vicini, spostandosi da nord verso sud (dall'abitato di Brazzolo verso Medelana, appartenente al comune di Ostellato), i valori di  $a_{refg}$  aumentano passando da valori di **0.0946 g** (zona di Brazzolo), a valori di **0.1306 g** (Medelana, frazione di Ostellato). Spostandosi da ovest verso est (dagli abitati di Formignana e di Tresigallo verso Gherardi, appartenente al comune di Jolanda di Savoia), i valori di  $a_{refg}$  diminuiscono passando da valori di **0.1105 g** (zona di Formignana e di Tresigallo), a valori di **0.1018 g** (Gherardi, appartenente al comune di Jolanda di Savoia).

Questi valori sono stati utilizzati, come descritto in seguito, per scalare gli accelerogrammi di input utilizzati nell'analisi di risposta sismica locale.



Figura 2.3-1: nodi identificativi della pericolosità sismica di base (valori di  $a_{refg}$  o  $PGA_0$  riportati nel testo) per il territorio comunale di Tresignana (FE) e sue frazioni.



**Figura 2.3-2: nodi identificativi del parametro Acceleration Spectrum Intensity (ASI) per il territorio comunale di Tresignana (FE) e sue frazioni.**

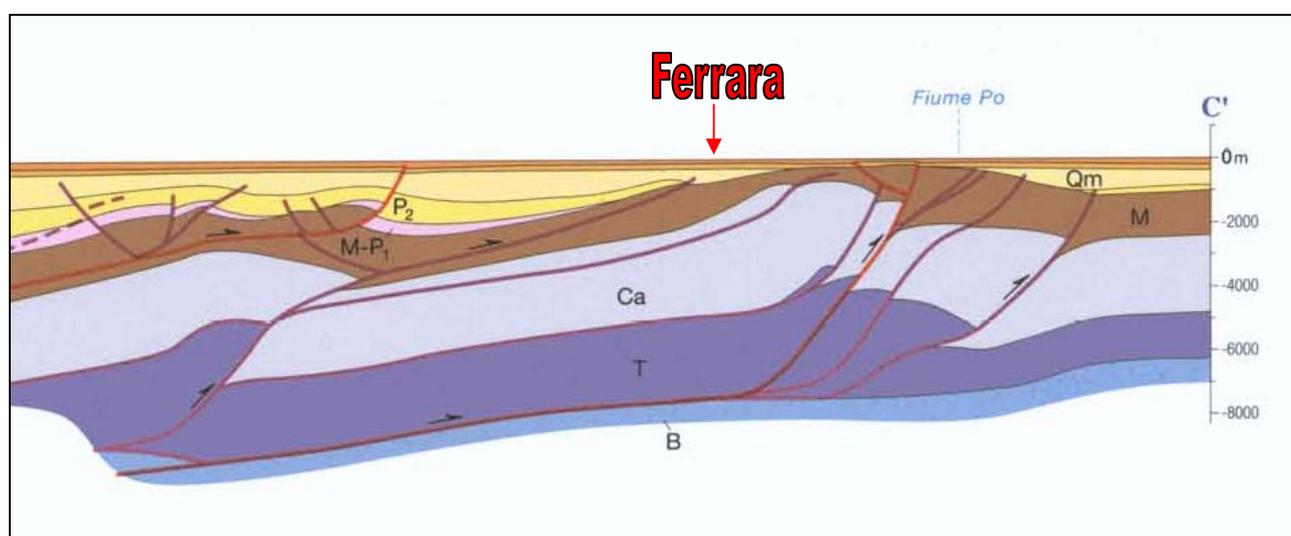
### 3. ASSETTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

#### 3.1 Assetto geologico e idrogeologico

Il territorio comunale di Tresignana si colloca nel settore sud orientale della pianura padana in destra idrografica del Fiume Po. Il paesaggio, piatto e uniforme, è caratterizzato lungo il confine sud-occidentale dal paleoalveo del Po di Volano ed è interrotto sia dagli argini del Grande Fiume che da strutture di paleoalvei meno rilevanti, di ubicazione incerta e certa.

Il comune capoluogo (Tresigallo) e le frazioni di Brazzolo, Formignana, Final di Rero, Rero e Roncodigà si collocano in un'area attualmente di piana fluvio-deltizia caratterizzata da quote medie comprese tra circa -2 m e + 2 m s.l.m.

Nello specifico si registrano quote attorno a mt +6.00 da piano campagna in corrispondenza del rilievo arginale del Po di Volano e quote attorno a mt -1.00 da piano campagna nelle zone di piana esterne al paleo-argine, con un dislivello complessivo massimo di circa mt 7.00.



**Figura 3.1-1: Dettaglio della sezione C-C' della Carta Sismotettonica della Regione E-R (assetto strutturale profondo della pianura padana sud-orientale)**

Il settore di studio si identifica nella pianura fluvio-deltizia orientale del Fiume Po, caratterizzata in profondità dall'alternanza di potenti corpi sabbiosi molto estesi lateralmente e sedimenti fini (limi-argille). Le sabbie derivano dalla sedimentazione del Fiume Po e sono presenti in strati amalgamati tra loro in modo tale da formare livelli molto spessi, anche diverse decine di metri, ed estesi per svariati chilometri. Questi corpi sabbiosi sono presenti in genere a profondità variabili da circa 15 a circa 25 m e sono di età pleistocenica (*canali distributori principali – piana alluvionale pleistocenica*).

Procedendo verso la superficie, al di sopra delle sabbie pleistoceniche si trovano pacchi di sedimenti più fini di età olocenica costituiti prevalentemente da limi più o meno argillosi, argille e subordinatamente da sabbie limose e sabbie in strati di spessore contenuto. Si tratta di depositi olocenici di piana deltizia del fiume Po, dove i sedimenti sabbiosi identificano antichi *canali distributori minori* o secondari di piana deltizia, depositi di argine e tracimazione; i depositi più fini (limi argillosi - argille e talora torbe) rappresentano invece le aree cosiddette *interdistributrici*, ossia aree poste tra i diversi canali distributori che solcavano la piana deltizia. Queste aree venivano frequentemente interessate da allagamenti a seguito delle esondazioni dei canali distributori e pertanto erano interessate da sedimentazione relativamente più

fine. Spesso sono presenti anche argille ricche in sostanza organica e livelli torbosi che fungono da livelli guida e testimoniano la presenza in passato di ampie zone palustri formatesi all'interno di conche morfologiche (valli) dove l'acqua ristagnava per tempi molto lunghi dopo le naturali esondazioni dei canali distributori.

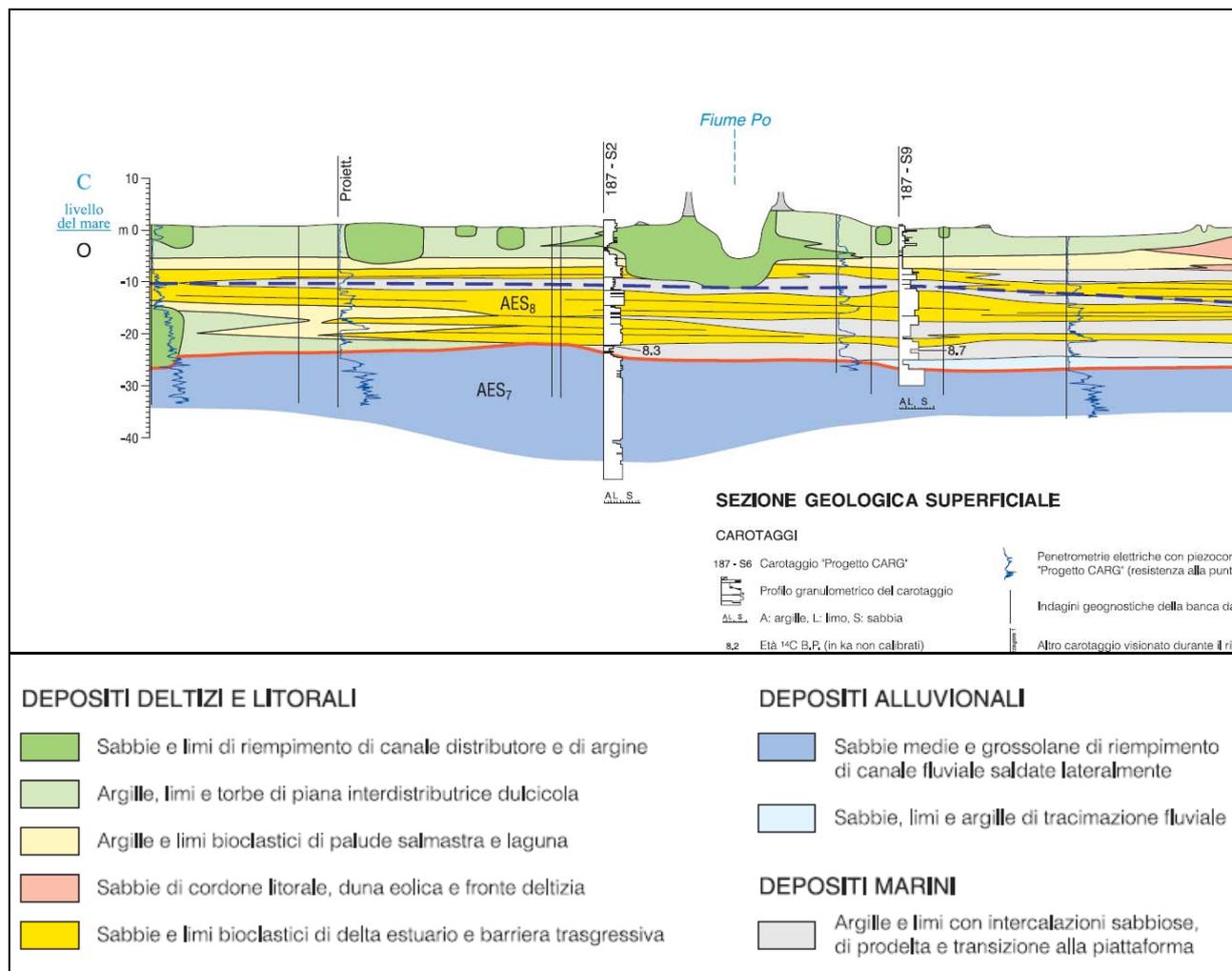


Figura 3.1-2: Stralcio della sezione geologica superficiale 073 – Regione Emilia-Romagna.

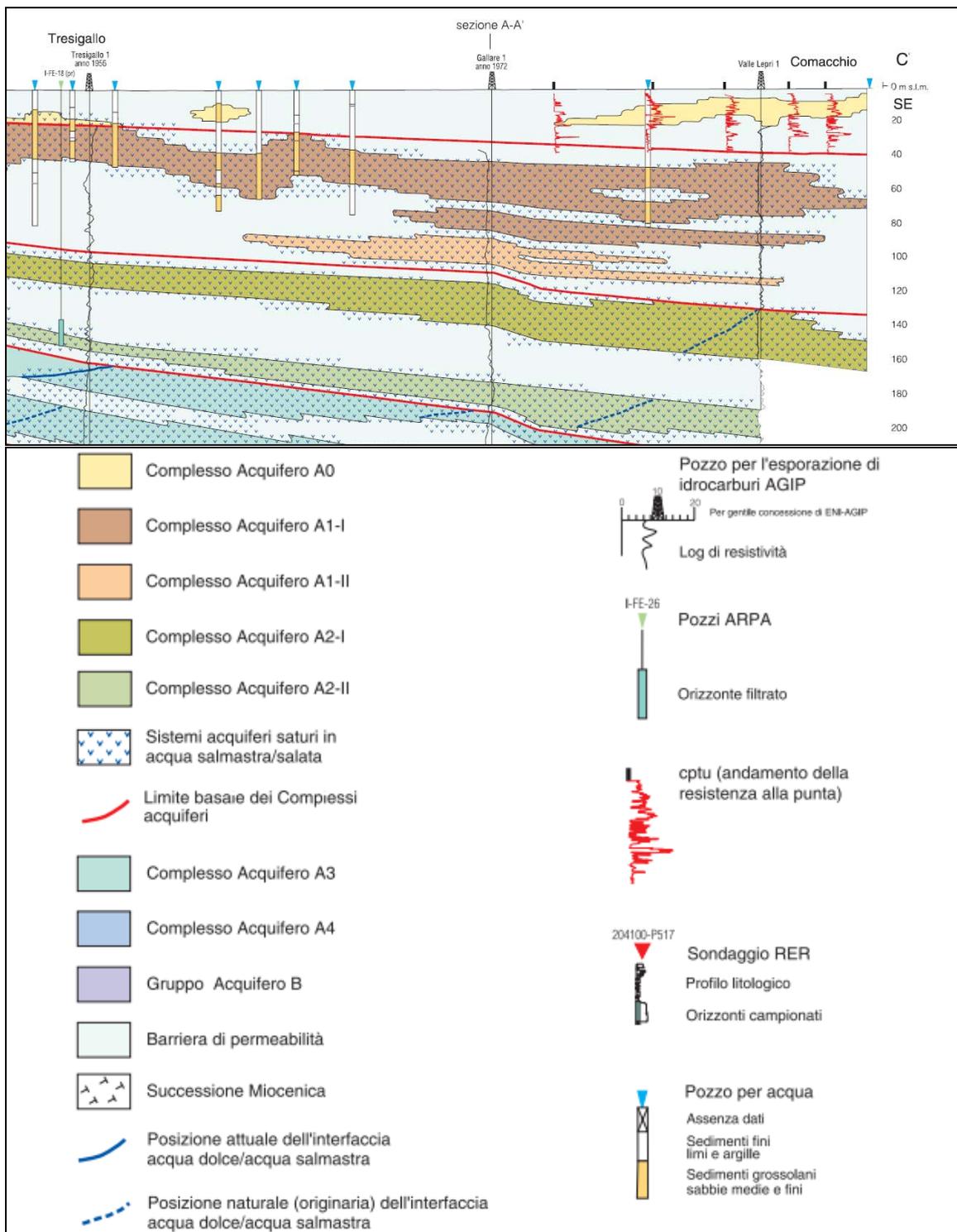


Figura 3.1-3: Stralcio della sezione 68 – Regione Emilia-Romagna.

 <b>Synthesis s.r.l.</b> Piazza del Popolo civ. 13 – int. 5 44034 – Copparo – Fe Tel. 0532 860546 – Fax 0532 091680 www.synthesisr.com – info@synthesisr.com	STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO <b>Relazione Illustrativa</b>	RIF. 020/20-EB-REV00 DEL 04/2020
--	---	-------------------------------------

#### 4. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Lo studio di microzonazione sismica di III livello di approfondimento ha visto l'esecuzione di una serie di indagini dirette e indirette allo scopo, come già accennato in premessa, di integrare e completare le informazioni di carattere geologico-geotecnico e geofisico ricavate durante le fasi di approfondimento precedenti.

Le indagini dirette sono state volutamente realizzate nelle aree maggiormente interessate da paleocanali o tracce di percorsi fluviali (canali distributori minori e sabbie pleistoceniche del Po) con lo scopo di investigare terreni potenzialmente soggetti a liquefazione e fornire stime circa la pericolosità. Le stesse prove sono servite anche per il corretto studio dei depositi coesivi soffici di area interdistributrice e palude (cedimenti post-sismici attesi), sempre presenti alla scala dell'intero territorio nei primi 20 m di profondità come ampiamente rilevato nelle analisi di II livello di approfondimento.

Le indagini indirette sono invece servite a definire con sempre maggiore dettaglio le velocità di propagazione delle onde S dalla superficie al bedrock sismico, naturalmente con maggiore affidabilità e accuratezza entro i primi 30 m.

I dati complessivamente desunti dalla campagna geognostica attuale, unitamente a quelli ottenuti dalle indagini pregresse eseguite nel corso del II livello di approfondimento, hanno permesso di raggiungere gli obiettivi dello studio: analisi di risposta sismica locale (fattori di amplificazione e spettri di risposta), indici di rischio e parametri quantitativi delle aree potenzialmente instabili individuate nei livelli di studio precedenti (Indice di liquefazione e cedimenti attesi).

Le prove eseguite per lo studio di microzonazione sismica di III Livello sono di seguito elencate:

##### TRESIGALLO (CAPOLUOGO) E FRAZIONI DI FINAL DI RERO, RERO E RONCODIGÁ

- n. 6 CPTU spinte fino a 20 m di profondità da p.c. attuale;
- n. 6 sondaggi a trivella spinti fino alla profondità massima di circa 7.00 m da p.c. attrezzati con piezometro e prelievo di n. 9 campioni di terreno rimaneggiati e n. 1 campione di terreno indisturbato per analisi di laboratorio geotecnico;
- n. 5 misure a stazione singola del microtremore ambientale (HVSr) per la misura delle principali frequenze di risonanza del sottosuolo.

##### FORMIGNANA CAPOLUOGO

- n. 1 SCPTU spinta fino a 30 m di profondità da p.c. attuale;
- n. 2 CPTU spinta fino a 20 m di profondità da p.c. attuale;
- n. 3 sondaggi a trivella spinti fino a circa 7.00 m di profondità da p.c. attrezzati con piezometro e prelievo di n. 5 campioni di terreno rimaneggiati;
- n. 1 Indagine a stazione singola con misura del microtremore ambientale (forzante) per l'analisi sperimentale speditiva del comportamento dinamico di una struttura; nel caso specifico la misura è stata eseguita sull'edificio sede dell'ex Municipio di Formignana.

##### BRAZZOLO FRAZIONE

- n. 1 CPTU spinta fino a 20 m di profondità da p.c. attuale;
- n. 1 sondaggio a trivella spinto fino a circa 7.00 m di profondità da p.c. attrezzati con piezometro e prelievo di n. 2 campioni di terreno rimaneggiati e n. 1 campione di terreno indisturbato per analisi di laboratorio geotecnico (il campione indisturbato è stato prelevato con campionatore shelby).



Si ricorda che le indagini sopraelencate integrano le n. 222 indagini, in gran parte provenienti dall'archivio interno degli scriventi, distribuite sull'intero territorio comunale e costituite da indagini di tipo geotecnico, geologico e geofisico già considerate e analizzate durante la fase di studio precedente (Livello II).

#### 4.1. Parametri geotecnici

Le prove eseguite per l'analisi di III livello di approfondimento hanno confermato in toto l'assetto del sottosuolo già ricostruito nelle precedenti fasi di studio alla scala dell'intero territorio comunale sia dal punto di vista litostratigrafico sia per quanto riguarda la consistenza e quindi la qualità dei terreni presenti.

Si distinguono in generale 3 tipologie di depositi:

- sabbie e sabbie limose prevalenti (canali distributori, argini, tracimazioni);
- limi argillosi e argille limose prevalenti con subordinate intercalazioni di limi sabbiosi (aree interdistributrici);
- argille organiche e torbe prevalenti (paludi, zone depresse con ristagno prolungato delle acque di esondazione).

Le sabbie di canale distributore del Po, costituenti la piana alluvionale pleistocenica, sono generalmente caratterizzate da valori elevati di resistenza alla punta (in media  $R_p > 30/50 \text{ Kg/cm}^2$ , spesso  $R_p > 100 \text{ Kg/cm}^2$  nell'ex territorio comunale di Tresigallo e in media  $R_p > 50/100 \text{ Kg/cm}^2$  nell'ex territorio comunale di Formignana) e presumibilmente sono costituite da sabbie medio-grossolane addensate/mediamente addensate ( $D_r \geq 50 \%$ ). Le sabbie pleistoceniche sono presenti con grande continuità alla scala dell'intero territorio comunale di Tresigallo per profondità in genere  $\geq 20 \text{ m}$ . Il tetto di tali sabbie mostra comunque variazioni dell'ordine di qualche metro spostandosi da punto a punto.

Le sabbie dei canali distributori minori, che si trovano e si intrecciano a vari livelli lungo la piana interdistributrice (profondità in genere  $< 20 \text{ m}$ ), sono invece caratterizzate da valori di  $R_p$  decisamente inferiori, che in genere non superano i  $30/50 \text{ Kg/cm}^2$ ; il loro grado di addensamento è generalmente medio-scarso ( $D_r < 50\%$ ). Si tratta probabilmente di sabbie molto sporche, limose o addirittura di limi sabbiosi. Questi depositi sono presenti con grande discontinuità e variabilità in termini di spessore, profondità ed estensione laterale.

I depositi argillosi e limoso argillosi di area interdistributrice sono, nel complesso, caratterizzati da valori di  $R_p$  piuttosto modesti, a testimonianza di un grado medio di compattezza da soffice a moderato. In generale, i valori di coesione non drenata ( $C_u$ ), ottenuti per correlazione con i valori di  $R_p$  misurati durante le numerose prove esaminate, sono in genere inferiori a  $0.70 \text{ Kg/cm}^2$  ( $70 \text{ KPa}$ ). Questi depositi si rinvergono in modo omogeneo e continuo alla scala dell'intero territorio comunale e sono sicuramente caratterizzati da un'elevata compressibilità.

I depositi francamente torbosi o costituiti da argille organiche sono i più soffici in assoluto, con valori molto scarsi di  $R_p$  ( $R_p < 10 \text{ Kg/cm}^2$  nell'ex territorio comunale di Tresigallo e  $R_p < 0.20 \text{ Kg/cm}^2$  nell'ex territorio comunale di Formignana) ed elevata compressibilità. Sono presenti in modo discontinuo, spesso sottoforma di sottili (spessore decimetrico o pluridecimetrico) e ripetuti livelli di intercalazione.

Di seguito si riportano i grafici ottenuti dalle prove dirette con andamento dei principali parametri geotecnici utili per le finalità del presente studio (litotipo-*Behaviour Type*, densità relativa-*relative density*, angolo di attrito-*friction angle*, coesione non drenata-*shear strength Su*).

In adiacenza alle singole verticali di indagine CPTU-SCPTU, sulla scorta delle informazioni stratigrafiche desunte dalle prove stesse, sono stati eseguiti i sondaggi a trivella con prelievo di campioni sia nel terreno fine coesivo sia nel terreno relativamente più grossolano e incoerente di natura sabbiosa. Lo scopo del prelievo è stato quello di sottoporre i campioni ad analisi di laboratorio geotecnico mirate a determinare il grado di plasticità dei terreni coesivi (Indice Plastico IP) e la curva granulometrica dei terreni



sabbiosi. In quest'ultimo caso la curva granulometrica è stata confrontata con i fusi di riferimento indicati dalla DGR 630/2019 per lo studio della potenziale liquefacibilità dei depositi incoerenti.

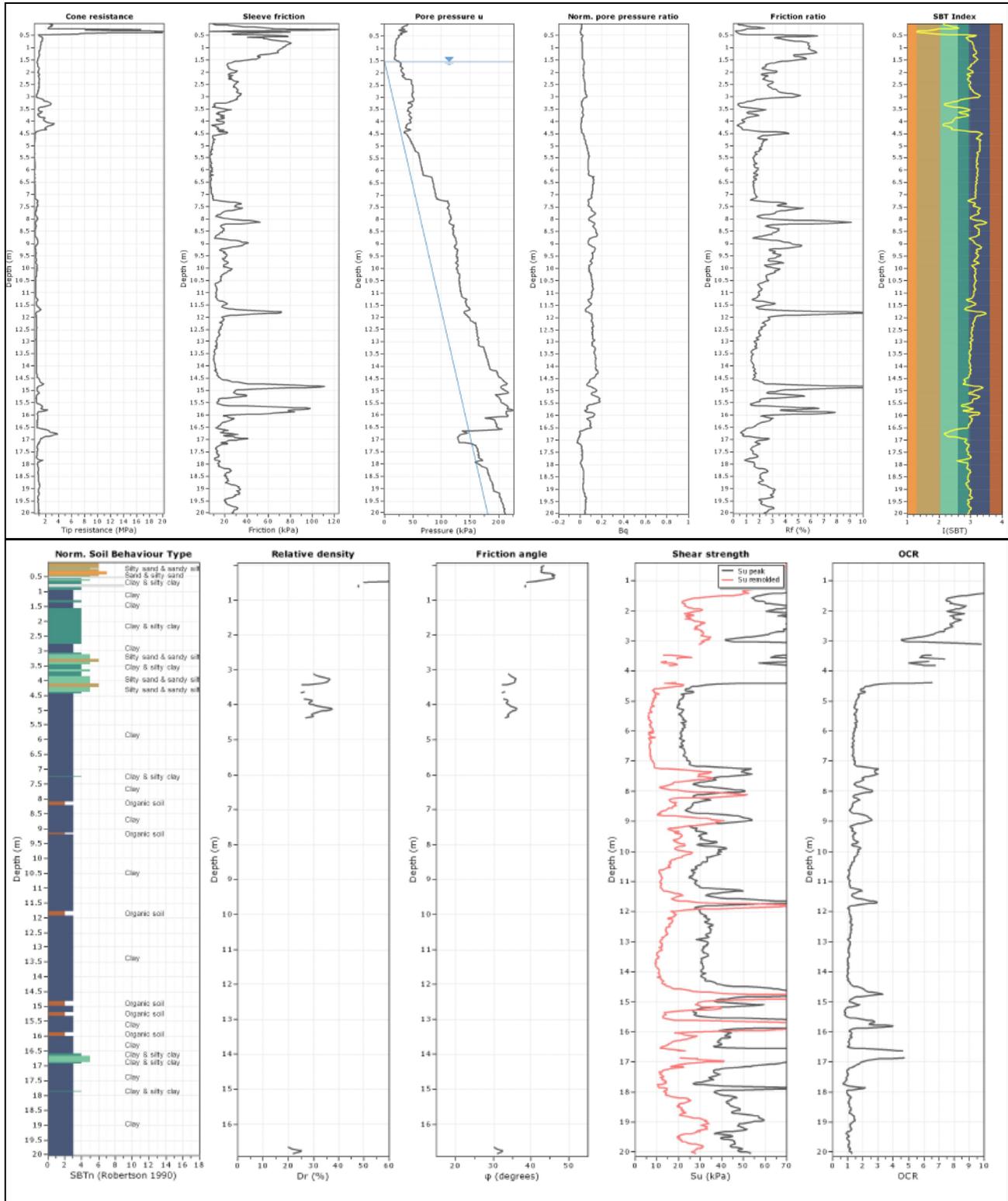


Figura 4.1-1 CPTU1 (Tresigallo)

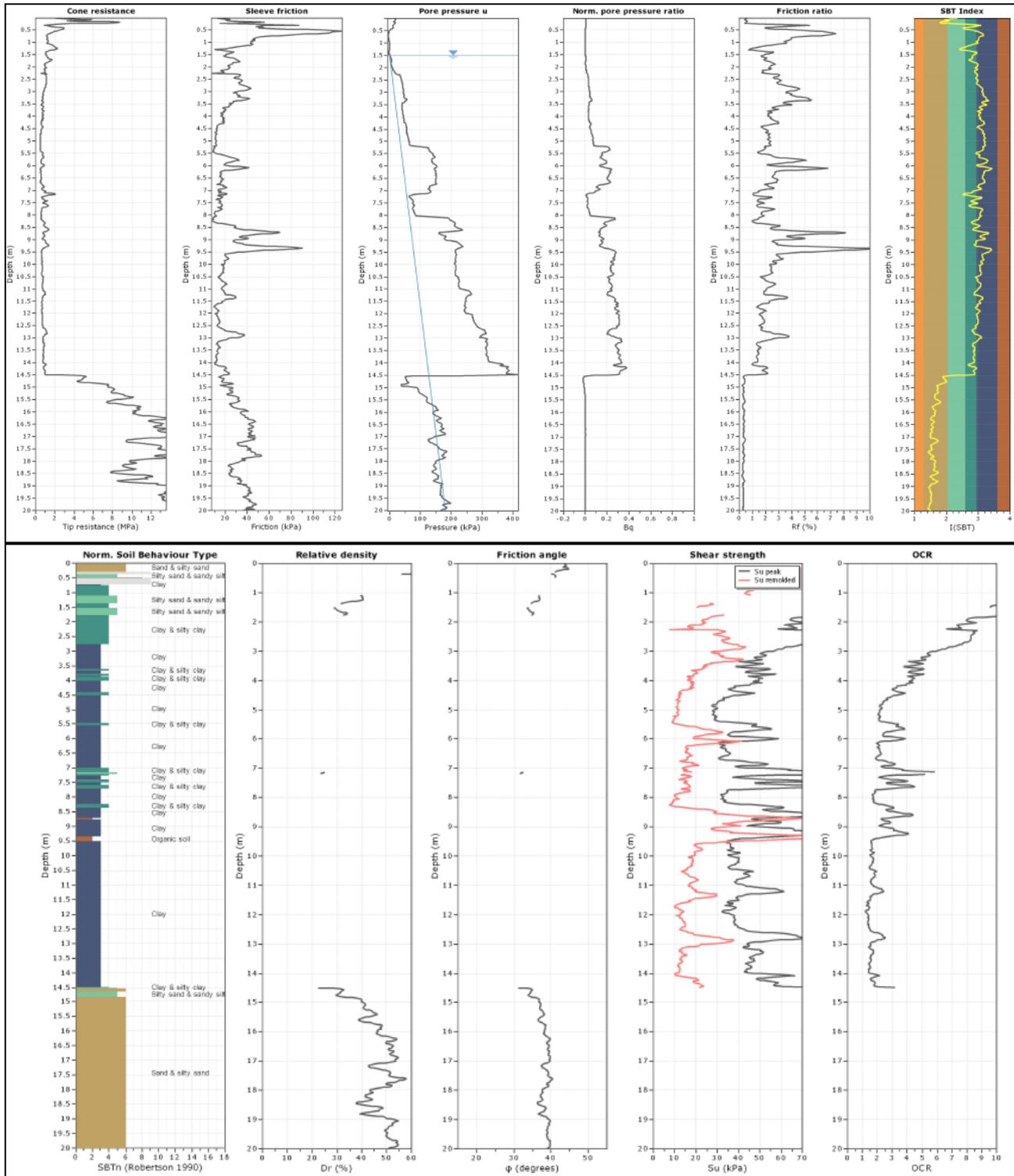


Figura 4.1-2 CPTU2 (Tresigallo)

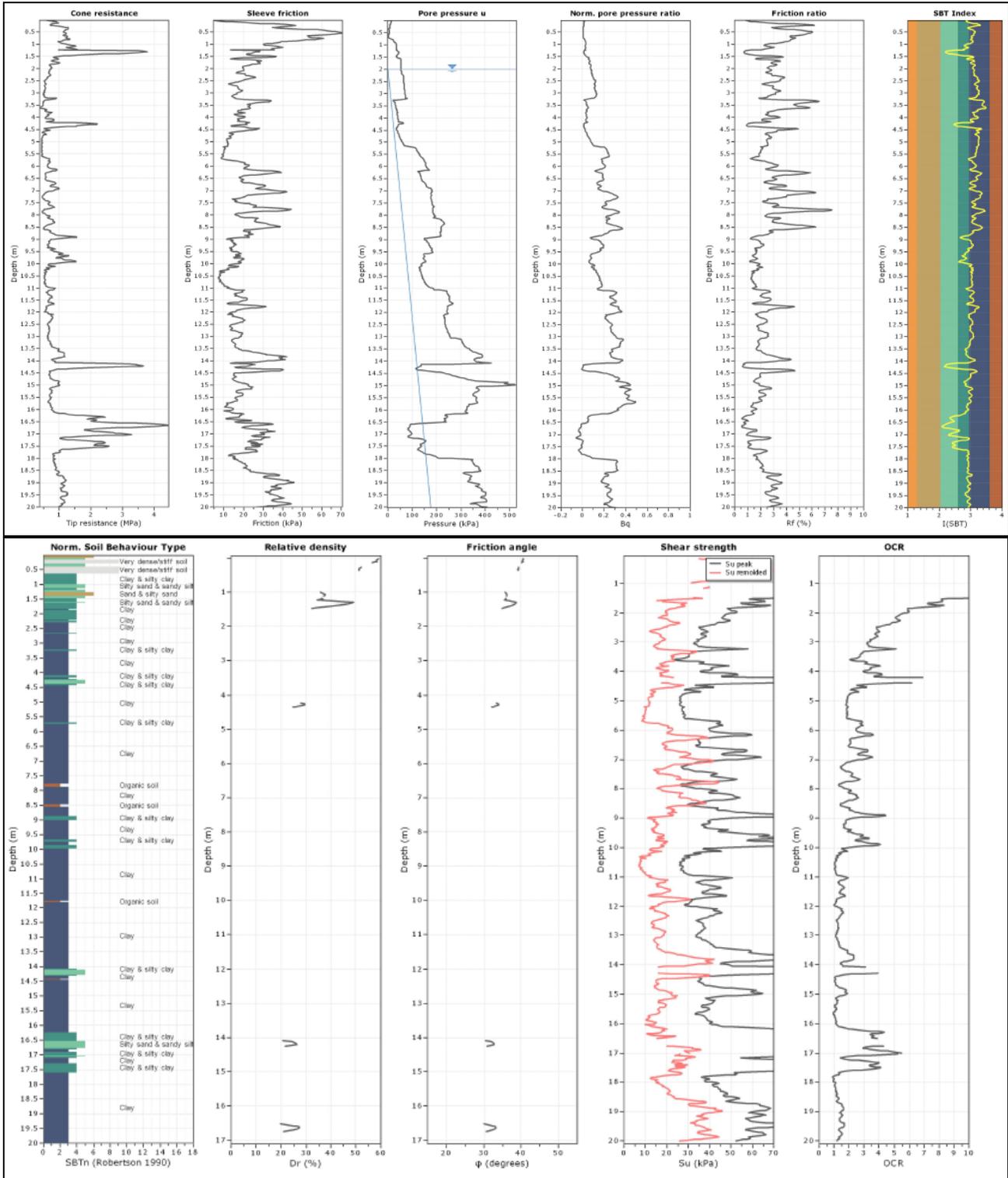


Figura 4.1-3 CPTU3 (Tresigallo)

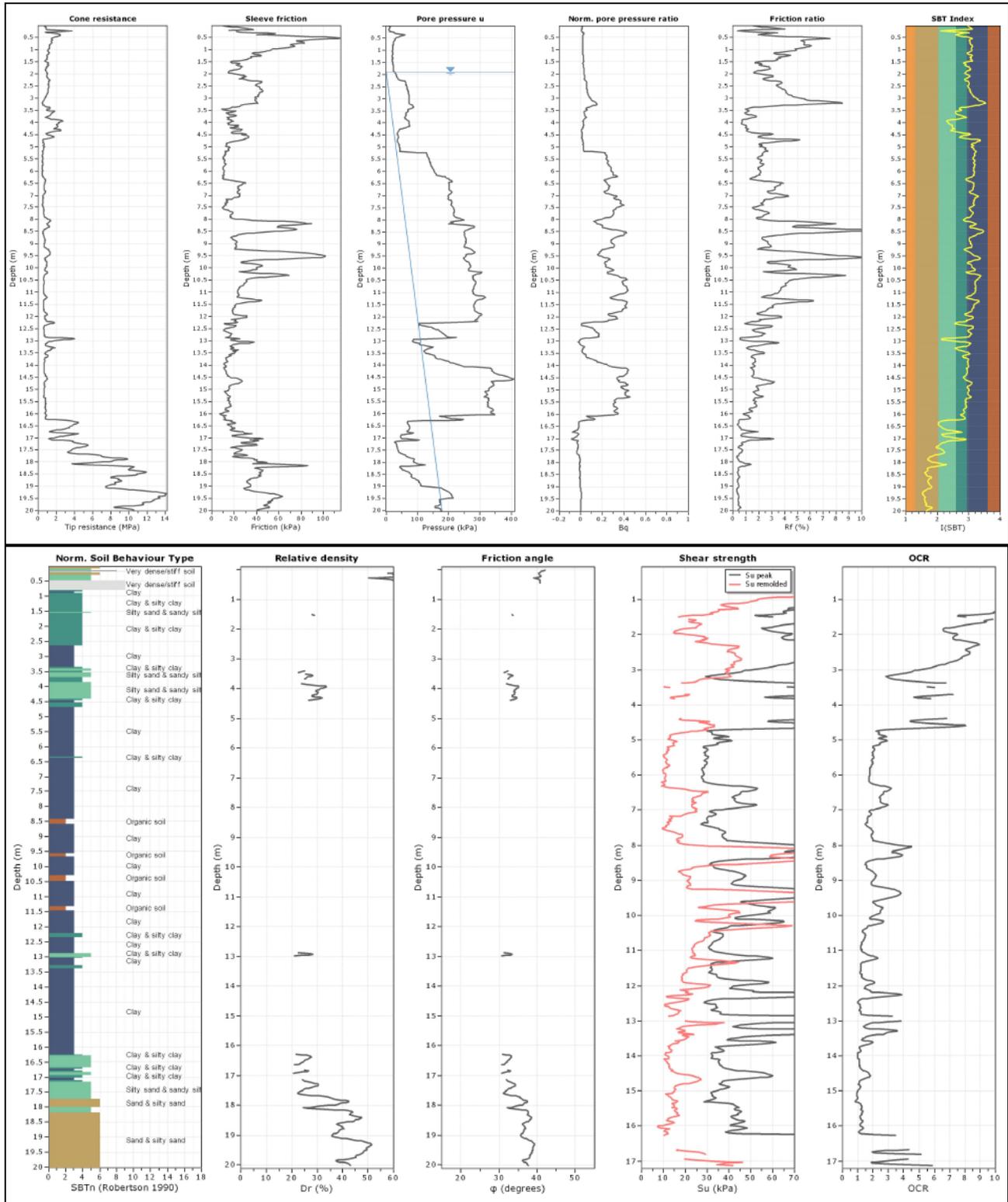


Figura 4.1-4 CPTU4 (Tresigallo)

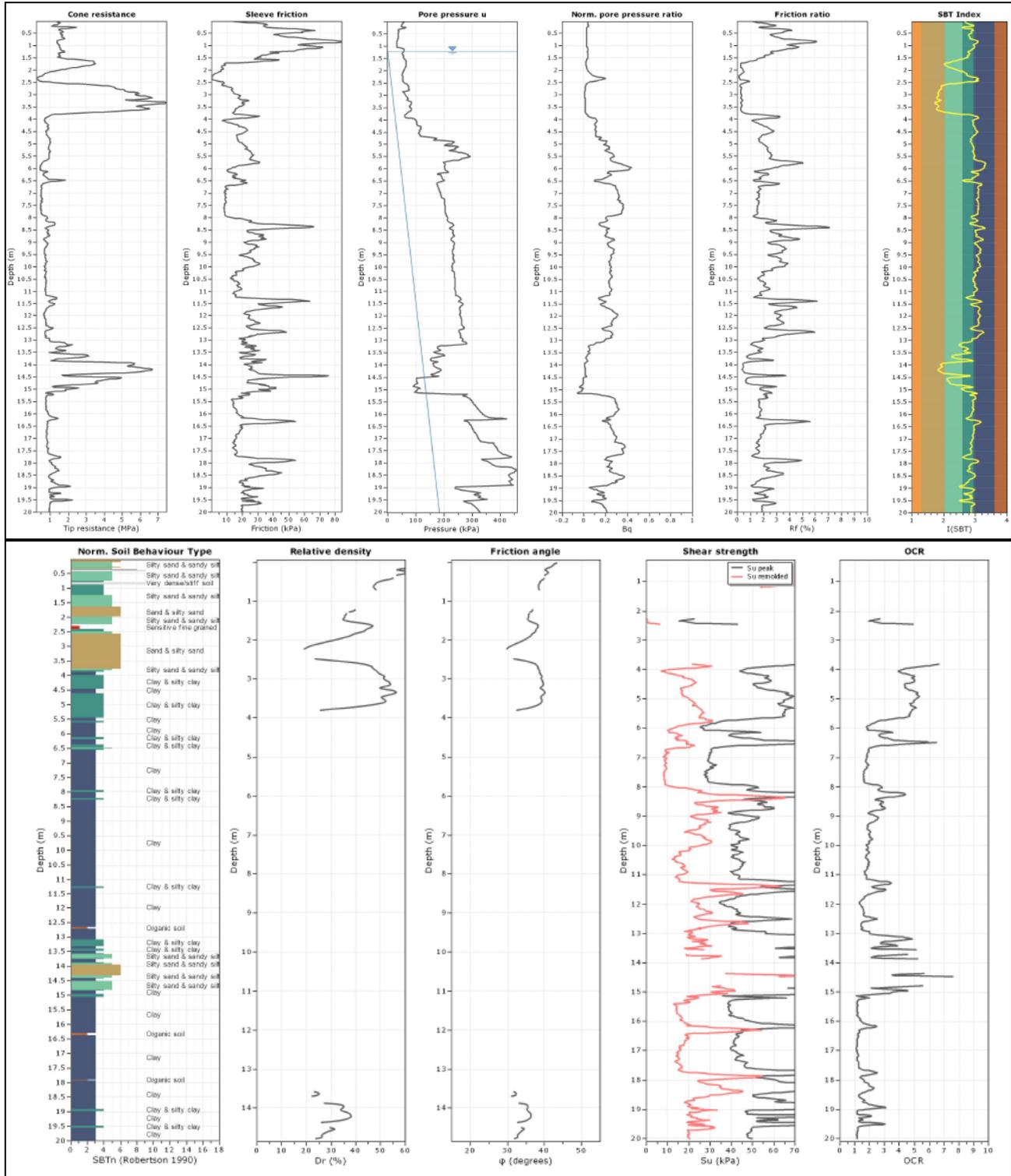


Figura 4.1-5 CPTU5 (Final di Rero)

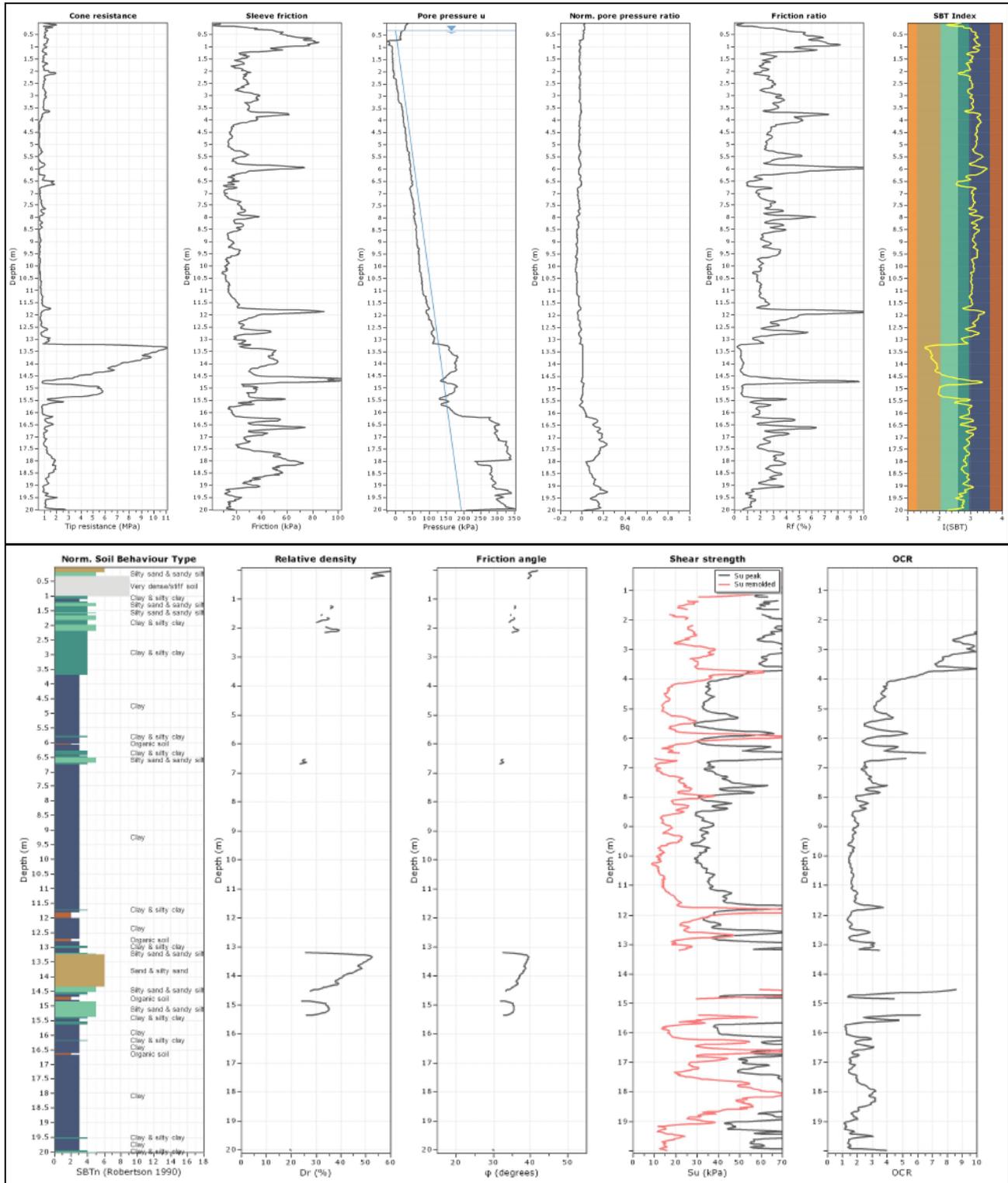


Figura 4.1-6 CPTU6 (Roncodigà)

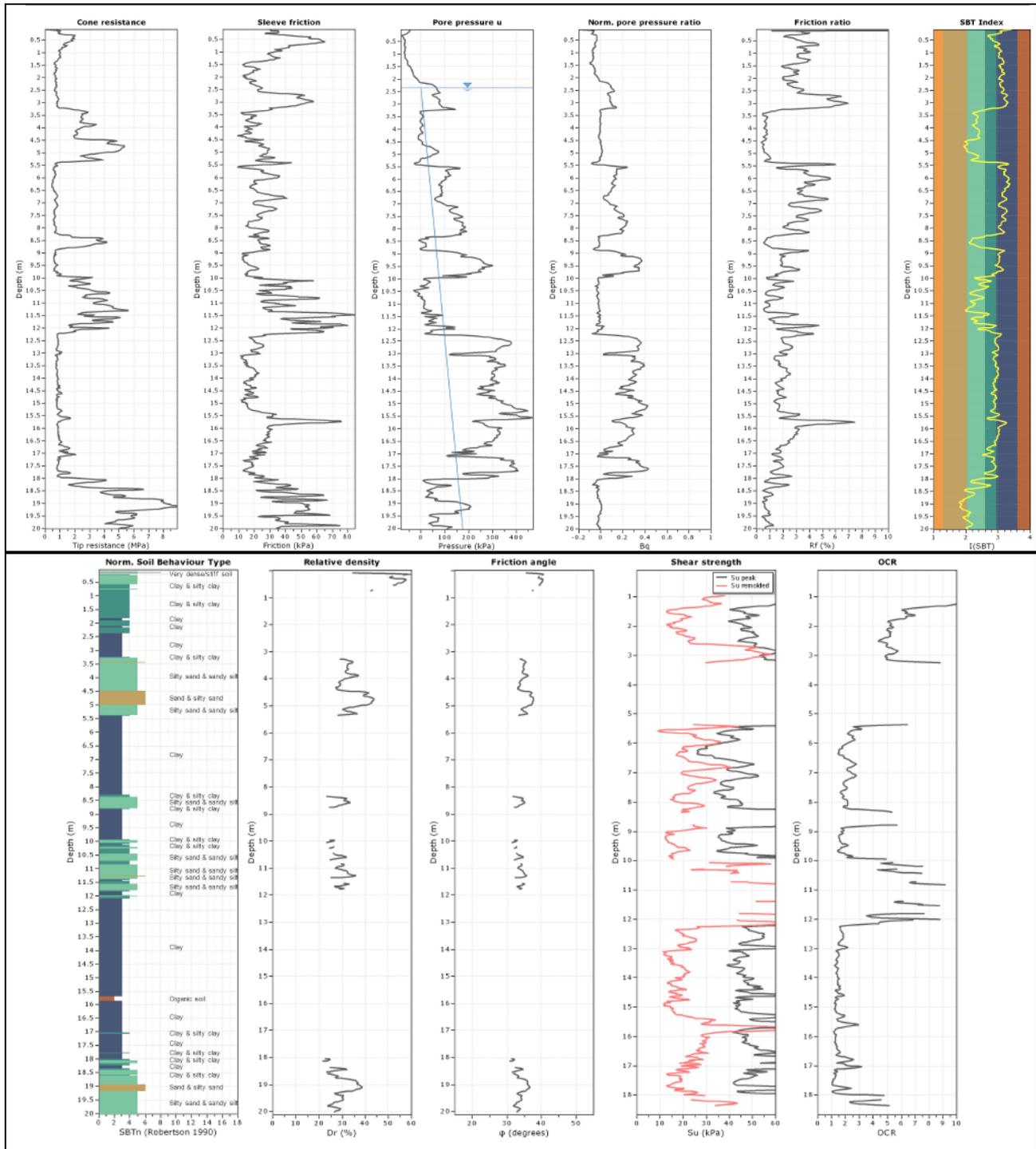


Figura 4.1-7 CPTU5 (Formignana)

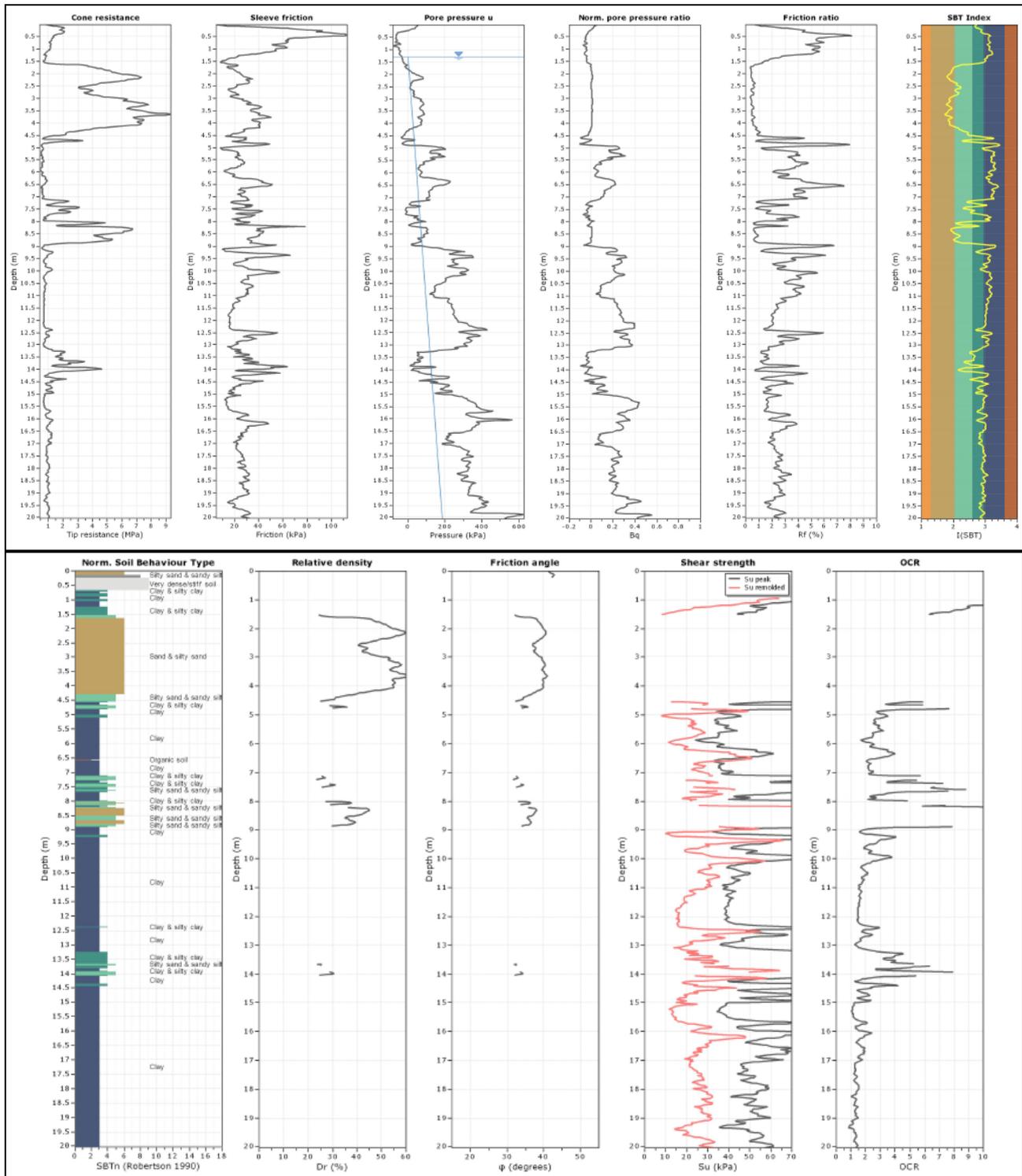


Figura 4.1-8 CPTU6 (Formignana)

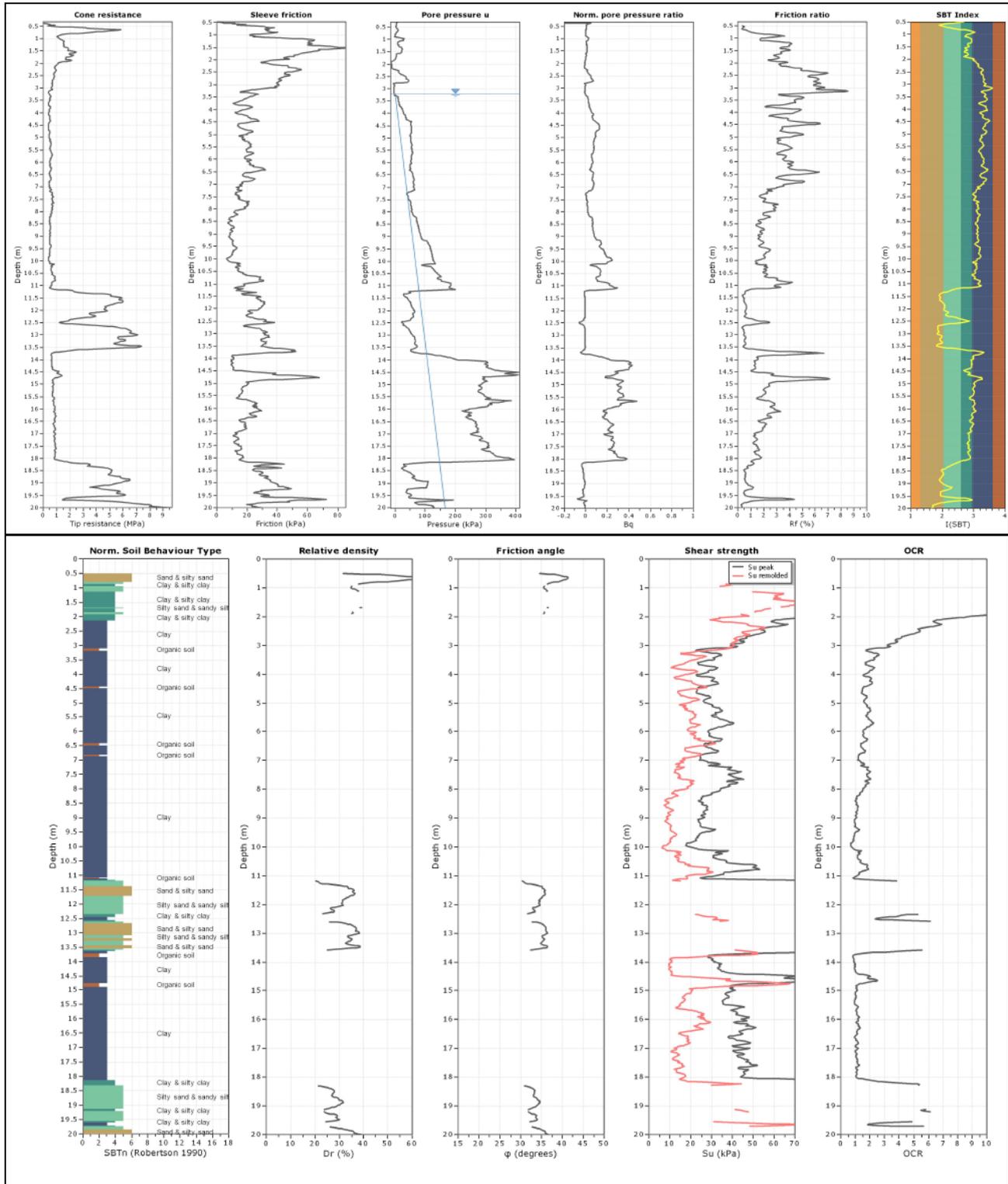
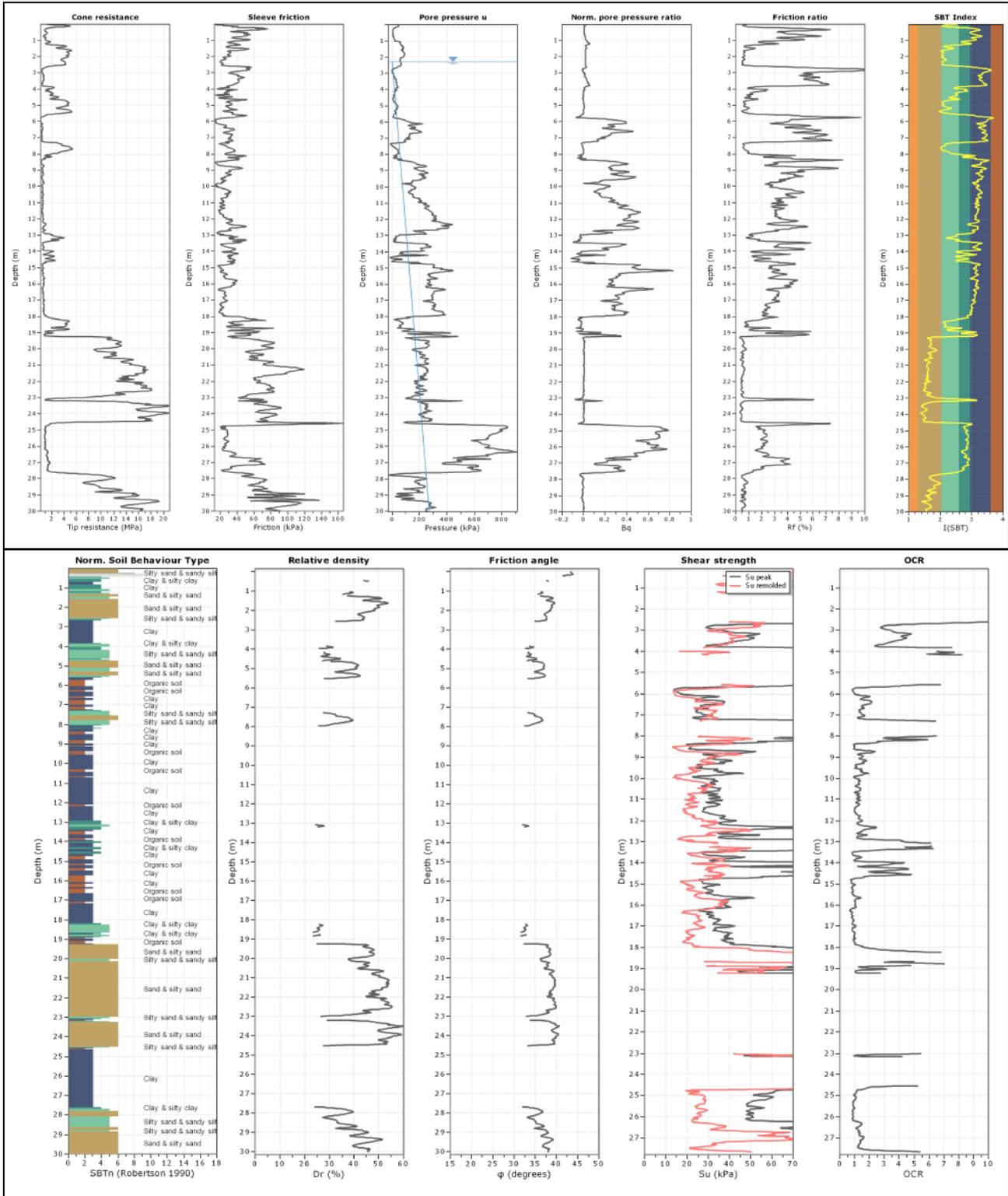


Figura 4.1-9 CPTU7 (Brazzolo)



**Figura 4.1-10 SCPTU4 (Formignana)**

Mediante i sondaggi a trivella sono stati prelevati i campioni elencati in tabella per le analisi di laboratorio geotecnico. Circa i terreni coesivi, il valore di soglia dell'Indice Plastico fissato al 30% rappresenta il limite oltre il quale i campioni presentano un grado di plasticità significativo ai fini della stima dei cedimenti post-sismici. A tal proposito, come si vedrà in seguito, il valore di IP ottenuto in laboratorio è stato analizzato unitamente ai valori di coesione non drenata e velocità di propagazione delle onde S rilevate all'interno del medesimo strato come indicato dalla normativa di riferimento.

TABELLA 4.1-1: SINTESI DEI RISULTATI PROVE DI LABORATORIO TERRENI INCOERENTI

SITO	PROF. PRELIEVO (m)	ID CAMPIONE	LITOTIPO	ANALISI ESEGUITE	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
TRESIGALLO	3.20-4.40	S1-C1	SABBIA LIMOSA	ANALISI GRANULOMETRICA	0.08	64.61	28.11	7.20
TRESIGALLO	3.85-4.70	S4-C1	SABBIA LIMOSA	ANALISI GRANULOMETRICA	0.49	62.87	34.61	2.03
FINAL DI RERO	2.40-4.00	S5-C1	SABBIA LIMOSA	ANALISI GRANULOMETRICA	0.05	83.86	13.31	2.78
FORMIGNANA	3.70-5.00	S5-C1	SABBIA LIMOSA	ANALISI GRANULOMETRICA	0.06	68.96	28.12	2.86
FORMIGNANA	2.30-3.60	S6-C1	SABBIA LIMOSA	ANALISI GRANULOMETRICA	0.02	86.60	12.62	0.76
FORMIGNANA	1.50-2.20	S14-C1	SABBIA LIMOSA	ANALISI GRANULOMETRICA	0.06	78.46	19.54	1.94

TABELLA 4.1-2: SINTESI DEI RISULTATI PROVE DI LABORATORIO TERRENI COESIVI

SITO	PROF. PRELIEVO (m)	ID CAMPIONE	LITOTIPO	ANALISI ESEGUITE	VALORE IP medio (%)	VALORE DI SOGLIA (%) (DGR 630/2019)
TRESIGALLO	S1-C2	4.90-6.70	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	25.5 (<)	30
TRESIGALLO	S2-C1	2.80-3.70	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	18.4 (<)	30
TRESIGALLO	S3-C1	2.40-4.80	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	19.4 (<)	30
TRESIGALLO	5.30-6.65	S4-C2	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	27.5 (<)	30
FINAL DI RERO	4.40-5.80	S5-C2	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	28.4 (<)	30

TRESIGALLO	2.30-3.80	S6-C1	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	30.9 (>)	30
FORMIGNANA	5.90-6.70	S5-C2	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	19.3 (<)	30
FORMIGNANA	5.50-5.80	S6-C2	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	19.5 (<)	30
BRAZZOLO	2.10-3.10	S7-C1	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	27.5 (<)	30
BRAZZOLO	5.90-6.80	S7-C2	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	33.5 (>)	30
FORMIGNANA	2.50-3.70	S14-C2	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	26.8 (<)	30
FORMIGNANA	5.60-5.90	S14-C3	LIMO/ARGILLA	LIMITI DI ATTERBERG	22.4 (<)	30

## 4.2. Parametri geofisici

### INDAGINI SUOLO

Le prove che sono state seguite nella campagna geognostica 2018 per il III Livello di approfondimento sono elencate di seguito:

- n.5 misure a stazione singola del microtremore ambientale (HVSr) per la misura delle frequenze di risonanza del sottosuolo.
  - n.3 indagini MASW;
  - n.3 prove SCPTU;
  - n.1 profilo in array bidimensionale ESAC (geometria a croce)
- analizzate per definire il profilo delle velocità di propagazione delle onde di taglio vs.

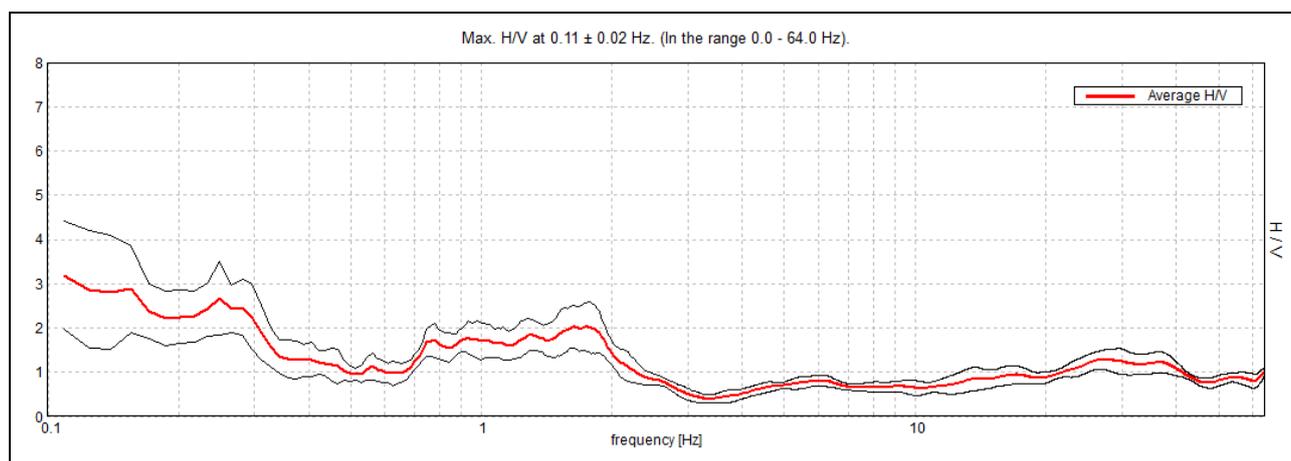
L'area investigata è caratterizzata da valori di velocità delle onde di taglio S (Vs) caratteristici di terreni da molto soffici (argille e torbe con Vs<180 m/s) a compatti/addensati (sabbie del Po con Vs ≈ 250 m/s). Le velocità delle onde S, nel complesso, tendono ad aumentare con la profondità in modo abbastanza graduale fino all'interfaccia tra i depositi di pianura deltizia di età olocenica e le sabbie medio-grossolane di riempimento canale (canale distributore) del fiume Po di età pleistocenica. In corrispondenza di tale superficie, posta a profondità variabile, che in media corrisponde all'intervallo 15-27 m circa, le Vs subiscono un deciso innalzamento per poi tornare ad aumentare gradualmente con la profondità.

L'elaborazione del profilo ESAC ha permesso di estendere la modellazione delle Vs fino a profondità di oltre 100 m. Il bedrock sismico con Vs = 800 m/s è sicuramente profondo oltre i 250-300 m almeno.

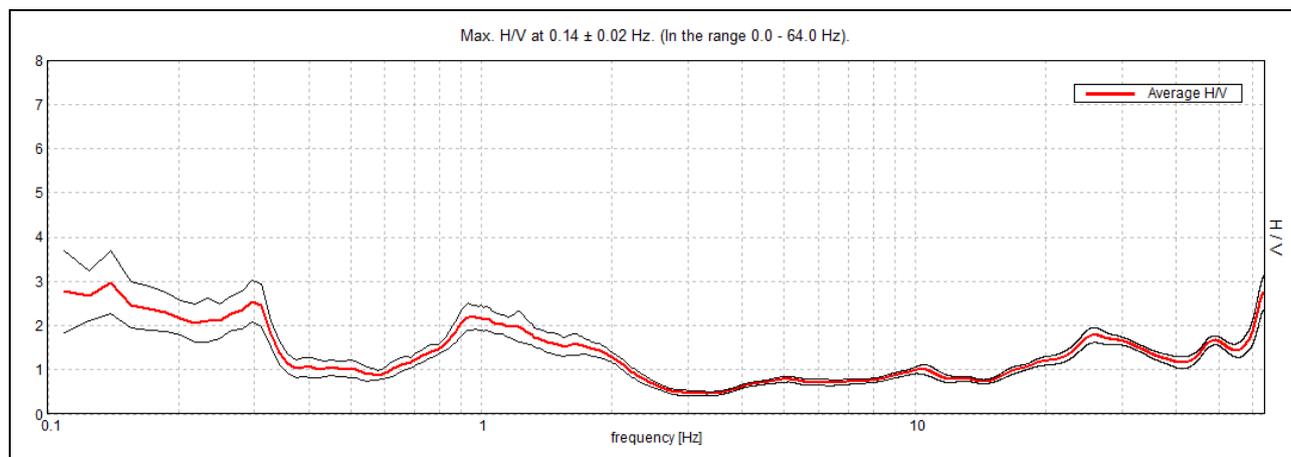
Il comportamento in campo dinamico del terreno, è stato definito mediante prove di laboratorio geotecnico in colonna risonante. I campioni analizzati sono rappresentativi rispettivamente della frazione coesiva argillosa (0-20 m) e di quella incoerente sabbiosa (20-30 m). I campioni sono stati prelevati nell'area di Ro mediante un sondaggio a carotaggio continuo a rotazione spinto fino a 30 m di profondità. I terreni

carotati si ritengono assolutamente rappresentativi e del tutto simili a quelli presenti nel territorio di Tresignana. Le curve di laboratorio (curve degrado modulo di taglio e smorzamento) sono state impiegate nell'analisi di risposta sismica locale come descritto in seguito.

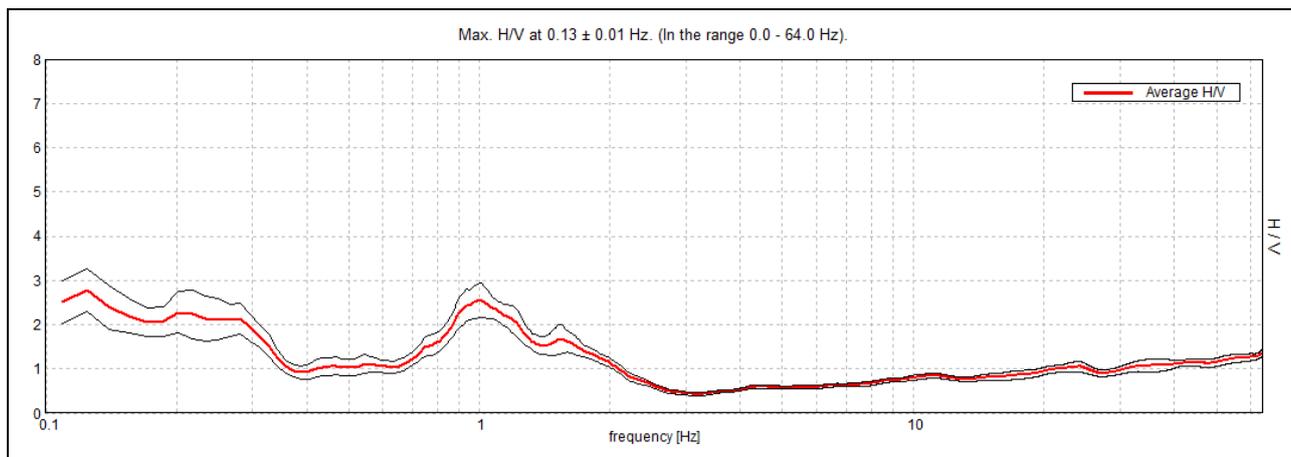
Le figure seguenti mostrano i risultati sperimentali delle indagini geofisiche effettuate in termini di curve HVSr (frequenze di risonanza stratigrafica del sottosuolo), di profilo Vs-profondità (SCPTU) e spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh (profilo ESAC).



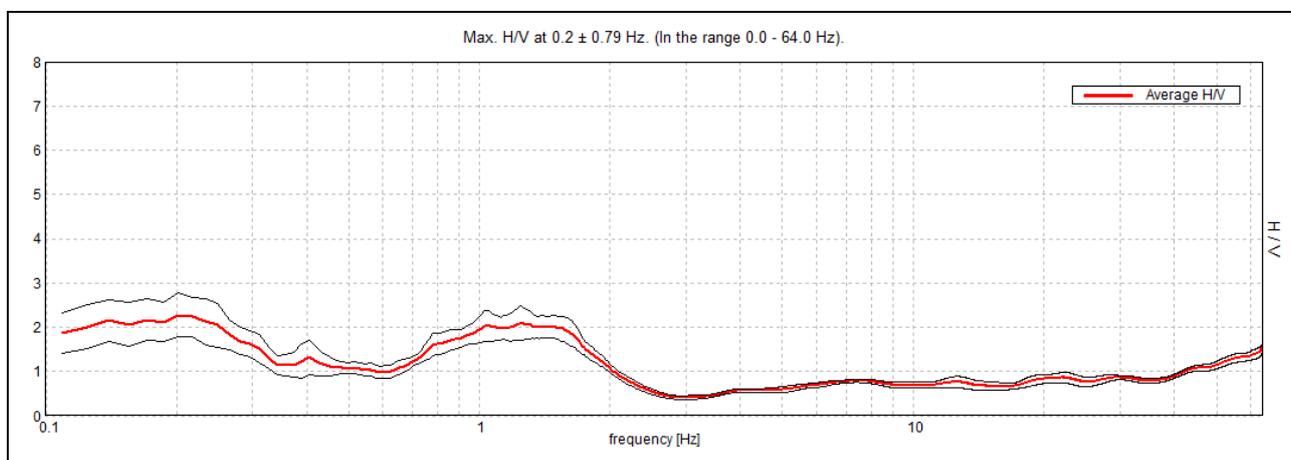
**Figura 4.2-1 – Misura HVSr1 eseguita presso Tresigallo**



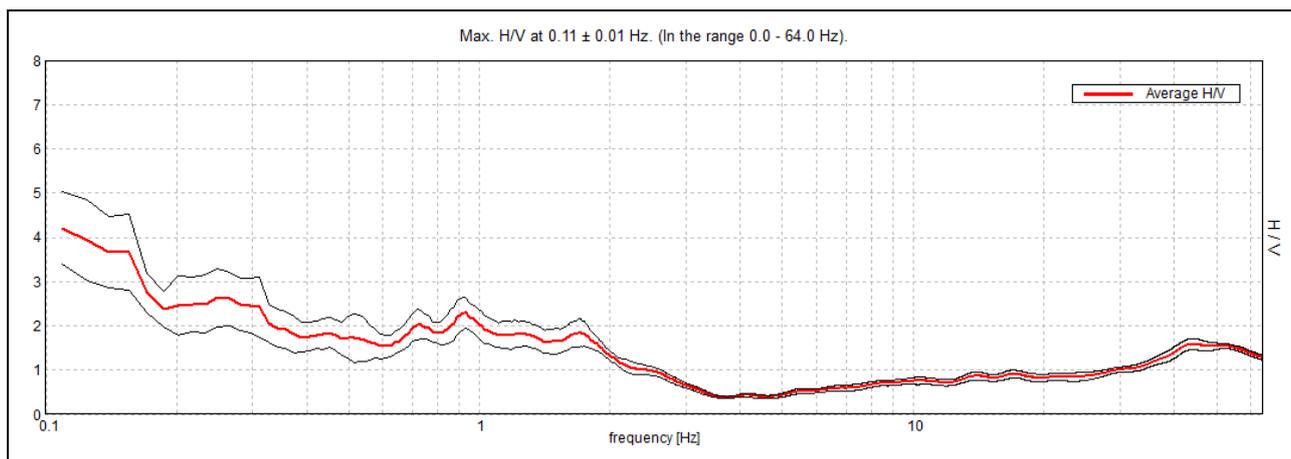
**Figura 4.2-2 – Misura HVSr2 eseguita presso Tresigallo**



**Figura 4.2-3 – Misura HVSR3 eseguita presso Tresigallo**



**Figura 4.2-4 – Misura HVSR4 eseguita presso Final di Rero**



**Figura 4.2-5 – Misura HVSR6 eseguita presso Roncodigà**

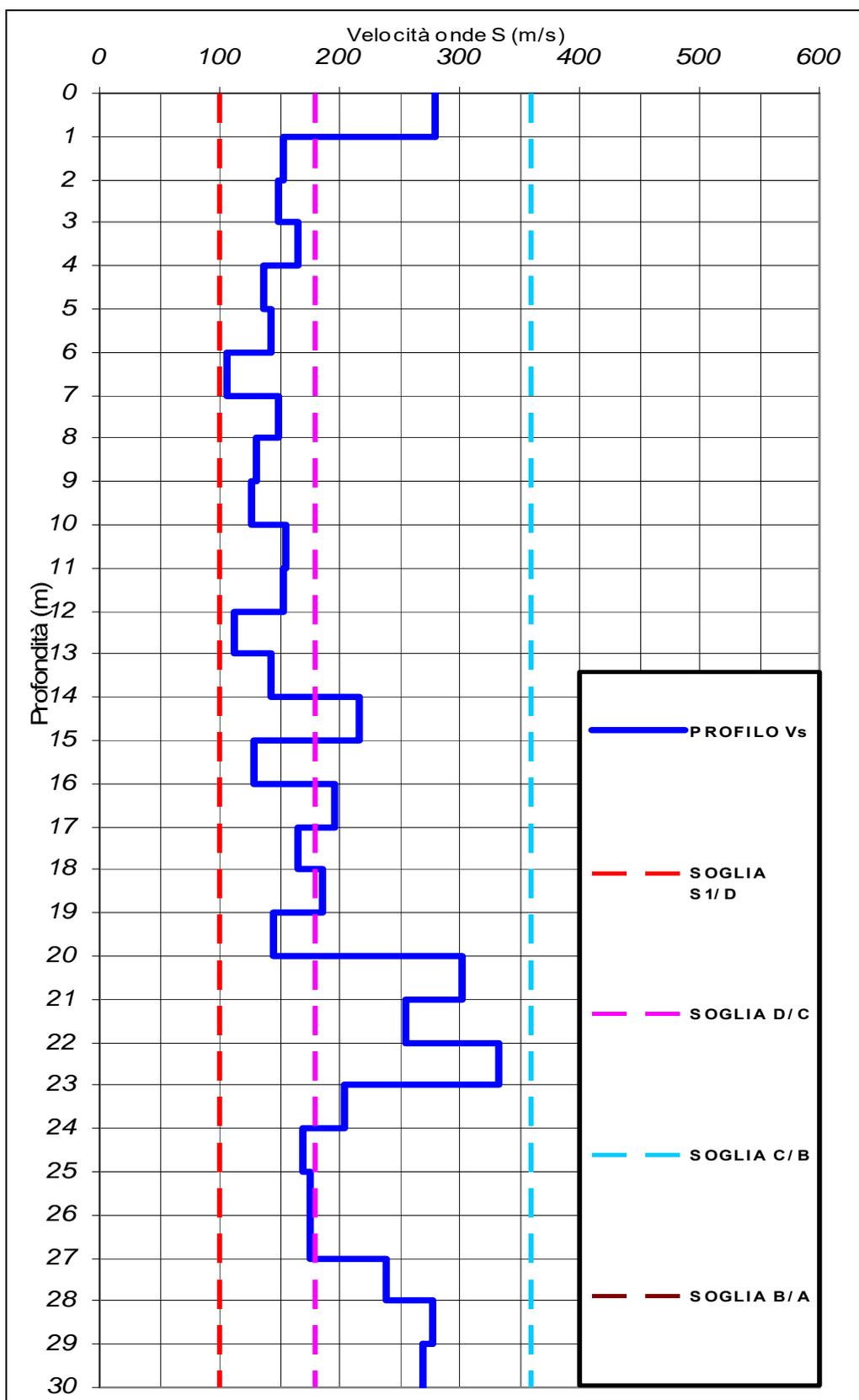


Figura 4.2-6 – Profilo di velocità onde S da SPTU4 eseguita presso Formignana

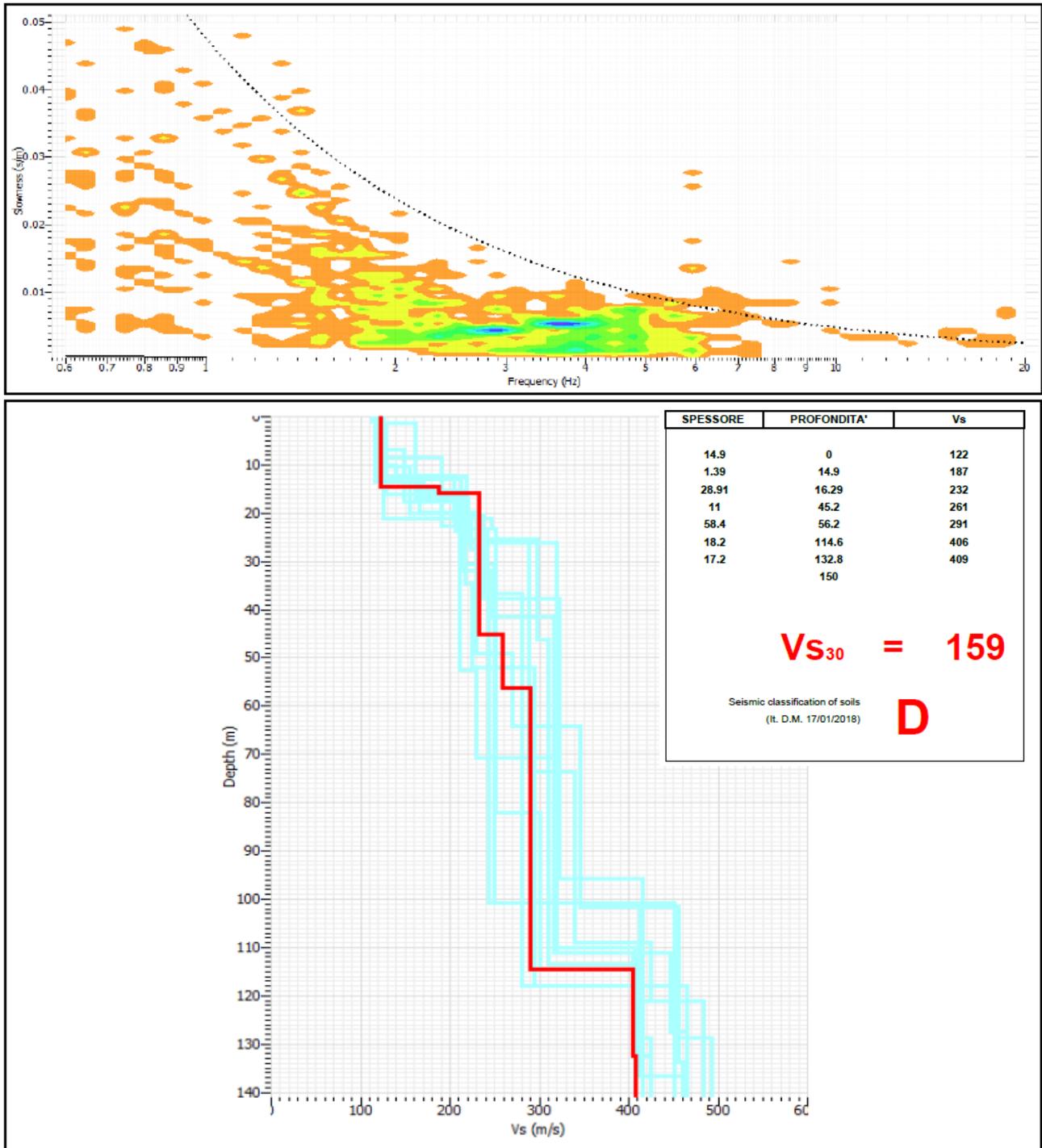


Figura 4.2-7 – ESAC eseguito presso Formignana

Nella tabella seguente si riepilogano i risultati ottenuti dalle prove analizzate:

TABELLA 4.2-1: SINTESI DEI RISULTATI DELLE INDAGINI GEOFISICHE

SITO	TIPO DI PROVA	VS30	AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA	MAX H/V	AMPIEZZA PICCO	COMMENTI
TRESIGALLO	HVSR1		Intervallo 1-2 Hz e freq. < 1 Hz	≈ 1.8 Hz	MODERATO (2<F0<3)	I picchi H/V riguardano ampi intervalli di frequenza; in genere non si individua un picco stretto chiaro. L'amplificazione a basso/medio contrasto registrata a 1-2 Hz è associabile al contatto tra depositi soffici e sabbie del Po posto a circa 20 m presente alla scala dell'intera area. Le amplificazioni per frequenze < 1 Hz (da basse a moderate) sono riferibili a contrasti profondi ≥ 100 m
TRESIGALLO	HVSR2		Intervallo 1-2 Hz e freq. < 1 Hz	≈ 1.0 Hz	BASSO (≈ 2)	
TRESIGALLO	HVSR3		Intervallo 1-2 Hz e freq. < 1 Hz	≈ 1.0 Hz	BASSO (≈ 2)	
TRESIGALLO	HVSR4		Intervallo 1-2 Hz e freq. < 1 Hz	≈ 1.5 Hz	BASSO (≈ 2)	
RONCODIGA'	HVSR6		Intervallo 1-2 Hz e freq. < 1 Hz	≈ 1.8 Hz	BASSO (≈ 2)	
FORMIGNANA	SCPTU4	171 m/s	-	-	-	-
FORMIGNANA	ESAC	159 m/s	-	-	-	Profilo elaborato con fit congiunto con misure HVSR da II livello di approfondimento

### **INDAGINI STRUTTURA**

Come già accennato, in corrispondenza dell'edificio ex sede del Municipio di Formignana, è stata eseguita un'indagine a stazione singola con misura del microtremore ambientale (forzante) per analizzare sperimentalmente il comportamento dinamico della struttura. In particolare si è tentato, in modo speditivo, di individuare la frequenza del primo modo flessionale di vibrazione (ed eventualmente anche quella dei modi superiori) del fabbricato in oggetto. Lo scopo è stato quello di permettere un primo e indicativo confronto tra la frequenza di vibrazione di una struttura presente sul territorio e le frequenze di risonanza del suolo al fine di stabilire la possibilità di effetti di doppia risonanza terreno-struttura.

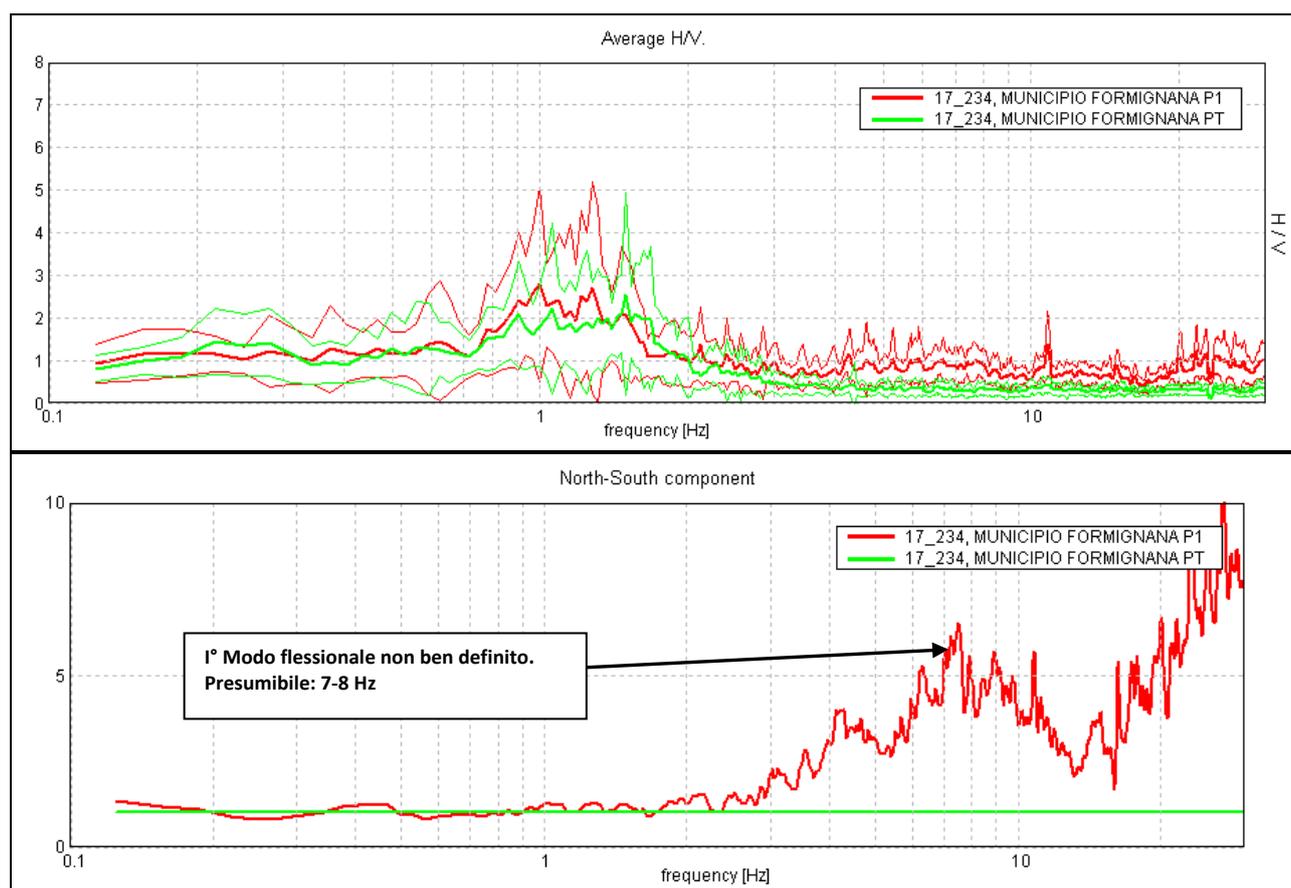
Le misure a stazione singola, eseguite con tomografo digitale (lo stesso impiegato per le registrazioni al suolo), prevedono la registrazione in seno alla struttura del microtremore ambientale (forzante) sempre presente e costituito da rumore antropico e rumore naturale (vento, perturbazioni atmosferiche etc.); pertanto non sono state utilizzate sorgenti energetiche esterne quali masse battenti, esplosivi o altro.

Son ostate eseguite in totale n. 2 misure, al piano terra e al piano più alto lungo la stessa verticale. Lo strumento impiegato è dotato di n. 3 canali velocimetrici orientati nelle 3 direzioni dello spazio (due componenti Orizzontali: N-S;E-W e una componente Verticale: UP-DOWN) in grado di campionare e registrare il microtremore ambientale (0.1 – 0.0001 mm/s) proveniente in modo casuale da tutte le direzioni dello spazio.

Lo strumento di misura è stato posto a diretto contatto con il pavimento/solaio in modo che fosse solidale con la struttura. Gli assi strumentali denominati N-S e E-W, da non confondere con il nord-sud ed est-ovest geografici, sono stati sempre disposti parallelamente ai principali assi strutturali. In particolare l'asse strumentale N-S è stato posto perpendicolarmente al lato lungo dell'edificio.

La tecnica di indagine impiegata, denominata SSR (Standard Spectral Ratio) prevede la rimozione dell'effetto del sottosuolo (misura eseguita a piano terra) dalle registrazioni eseguite ai diversi piani della struttura (in questo caso il piano più alto). Nell'analisi sono considerati esclusivamente i rapporti tra le componenti di vibrazione orizzontali Nord-Sud (N-S) e Est-Ovest (E-W) mentre si trascura l'effetto sulla componente verticale UP-DOWN.

Di seguito si mostrano i risultati sperimentali ottenuti:



**Figura 4.2-8 – Modi di vibrare della struttura esaminata**



Il primo modo flessionale non è ben definito., probabilmente causa dell'elevata inerzia della struttura data dalla sua geometria e altezza. Il 1° modo flessionale di vibrazione dell'edificio potrebbe essere individuato a circa 7-8 Hz.

## 5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Sulla base delle prove analizzate e dei risultati ottenuti nel corso del III livello di approfondimento, considerando tutte le informazioni e le conoscenze di carattere geologico e geomorfologico, le indagini geognostiche consultate ed eseguite nel corso del II livello di analisi, è possibile fornire il seguente modello di sottosuolo di sintesi:

TABELLA 5-1: MODELLO SCHEMATICO DEL SOTTOSUOLO NELL'AREA COMUNALE DI TRESIGNANA (ZONA DI TRESIGALLO, FINAL DI RERO, RERO E RONCODIGÀ)

UNITA'	DESCRIZIONE	PERIODO	PROFONDITA'	COMPATTEZZA ADDENSAMENTO DEPOSITO	FREQ. RISONANZA PRINCIPALE	Vs MEDIA
A	Unità dei canali distributori e argine	OLOCENE	0-3/5 m circa	addensamento medio-scarso (frazione granulare) soffice (frazione coesiva)	1-2 Hz ampiezza in genere bassa ( $F_0 \approx 2$ ), talora moderata $2 < F_0 < 3$	Vs < 180 m/s
B	Unità delle paludi di piana deltizia	OLOCENE	3/5– 15/20 m circa	Soffice e molto soffice (coesivo)	< 1 Hz amplificazioni in genere di ampiezza bassa ( $F_0 \approx 2$ )	Vs < 180 m/s talora Vs << 180 m/s
C	Unità della pianura alluvionale pleistocenica del Fiume Po	PLEISTOCENE	> 15-20 m circa	addensamento medio-alto (granulare)		Vs > 200 m/s



TABELLA 5-2: MODELLO SCHEMATICO DEL SOTTOSUOLO NELL'AREA COMUNALE DI TRESIGNANA (ZONA DI FORMIGNANA E BRAZZOLO)

UNITA'	DESCRIZIONE	PERIODO	PROFONDITA'	COMPATTEZZA ADDENSAMENTO DEPOSITO	FREQ. RISONANZA PRINCIPALE	Vs MEDIA
<b>A</b>	Unità dei canali distributori e delle aree interdistributrici di piana deltizia	OLOCENE	0-8/10 m circa	soffice (frazione coesiva) addensamento medio-scarso (frazione granulare)	1-2 Hz ampiezza in genere moderata $2 < F_0 < 3$	Vs < 180 m/s
<b>B</b>	Unità delle paludi di piana deltizia	OLOCENE	8/10 – 15/20 m circa	Molto soffice (coesivo)	< 1 Hz amplificazioni in genere di ampiezza bassa ( $F_0 \approx 2$ )	Vs << 180 m/s
<b>C</b>	Unità della pianura alluvionale pleistocenica del Fiume Po	PLEISTOCENE	> 15-20 m circa	addensamento medio-alto (granulare)		Vs > 200 m/s

L'unità **A** è costituita da tutti quei depositi di età olocenica (10000 anni fa – attuale) depositi in ambiente di piana deltizia del fiume Po. In corrispondenza dell'ex territorio comunale di Tresigallo, è costituita da depositi granulari incoerenti (sabbie, sabbie limose, limi sabbiosi) di canale distributore minore, argine, rotta e tracimazioni, con densità relativa medio-scarso, in alternanza a depositi fini limo-argillosi soffici.

Mentre, in corrispondenza dell'ex territorio comunale di Formignana, è costituita principalmente da depositi fini coesivi soffici di natura argillosa e limosa che rappresentano depositi di area interdistributrice depositi durante le frequenti e ripetute esondazioni dei canali distributori. Quest'ultimi sono caratterizzati invece da depositi granulari incoerenti (sabbie, sabbie limose, limi sabbiosi) di canale distributore minore, argine, rotta e tracimazioni, con densità relativa medio-scarso. I livelli sabbiosi sono in genere subordinati in termini di spessore rispetto agli strati coesivi.

Frequentemente si incontrano livelli torbosi che testimoniano periodi di ristagno delle acque più lunghi e condizioni di energia molto bassa. Allontanandosi progressivamente dall'asse del canale distributore la tessitura dei depositi diminuisce progressivamente. La base dell'unità A è rappresentata dalle sabbie pleistoceniche del Fiume Po, che ovunque nel territorio comunale, sono presenti a circa 15-20 m di profondità.

L'unità **B** è costituita dalla presenza significativa di terreni argillosi, argillosi organici e torbosi. Talora in corrispondenza dell'ex territorio comunale di Formignana è presente l'unità **B**; essa è costituita dalla presenza significativa di terreni argillosi organici e torbosi intercalati all'interno di argille inorganiche e limi argillosi.

Questa unità testimonia la presenza in passato di aree depresse e pressoché sempre invase dalle acque di tracimazione che ristagnavano per tempi molto lunghi, consentendo la deposizione di argille miste ad abbondante frazione organica e a significativi spessori di torba (> 1 m). La base dell'Unità B è

 <b>Synthesis s.r.l.</b> Piazza del Popolo civ. 13 – int. 5 44034 – Copparo – Fe Tel. 0532 860546 – Fax 0532 091680 www.synthesisr.com – info@synthesisr.com	STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO <b>Relazione Illustrativa</b>	RIF. 020/20-EB-REV00 DEL 04/2020
--	---	-------------------------------------

rappresentata dalle sabbie pleistoceniche del Fiume Po, che ovunque nel territorio comunale, sono presenti a circa 15-20 m di profondità.

L'Unità C è rappresentata dalle sabbie pleistoceniche di pianura alluvionale del Po. Sono sabbie per lo più di riempimento canale (canale-barra-argine), medio grossolane con lamine di trazione, presenti in modo continuo ed omogeneo in quanto saldate lateralmente in modo da formare un livello continuo per diversi chilometri.

Tutti i depositi sopradescritti sono suscettibili di amplificazione locale per risonanza stratigrafica; si trascurano gli effetti topografici in quanto l'area è pianeggiante. I depositi appartenenti alle Unità A e B sono, per le loro caratteristiche tessiturali, di consistenza e per le profondità a cui si trovano, potenzialmente suscettibili di instabilità per densificazione (frazione coesiva soffice) e liquefazione (frazione granulare incoerente satura). Si rimanda al capitolo 8 per le considerazioni di dettaglio.

## 6. INTERPRETAZIONI ED INCERTEZZE

Come precedentemente descritto, ai fini del presente studio sono state utilizzate le seguenti banche dati:

- Archivio prove e dati di Synthesis S.r.l.;
- Banca dati del Servizio Geologico Sismico e de i Suoli Regione Emilia-Romagna;
- Banca dati del Comune di Tresigallo;
- banca dati del Comune di Formignana;
- Prove geognostiche e geofisiche eseguite ex-novo per il III Livello di approfondimento al fine di integrare i dati in possesso laddove carenti o confermare risultati precedentemente ottenuti.

Le unità litostratigrafiche descritte, i valori geotecnici associati e gli spessori riportati sono da considerarsi validi a scala generale; tuttavia, data la copertura non omogenea e totale del territorio dal punto di vista delle prove geognostiche, si ritengono possibili variazioni locali in termini di qualunque elemento considerato (spessore, resistenze, litologia, Vs etc...).

In fase di nuove edificazioni e di sviluppo urbanistico sono sempre necessarie specifiche e puntuali indagini a conferma o smentita dell'assetto geologico-sismico proposto per l'area comunale di Tresignana.

## 7. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Le metodologie di elaborazione impiegate nel presente studio e i risultati di III livello di approfondimento sono i seguenti:

TABELLA 7-1: SCHEMA METODOLOGICO APPLICATO

EFFETTI LOCALI	Obiettivo	Metodologia	Risultato
AMPLIFICAZIONI STRATIGRAFICHE DEL MOTO SISMICO	Stima fattori di amplificazione sismica e spettri di risposta per l'area comunale di Tresignana e sue frazioni	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcolo numerico della risposta sismica locale mediante codice di calcolo STRATA (<i>Equivalent linear site response analysis</i>). Modello Vs-profondità basato su indagini SCPTU-MASW-HVSR-ESAC. Litologia strati desunta da prove CPT, CPTU, Sondaggi profondi, Database Servizio Geologico E-R. Comportamento dinamico terreni ottenuto da prove di laboratorio in Colonna Risonante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spettro di risposta elastico 1-sigma (spettro medio + deviazione standard);</li> <li>• Valori del rapporto PGA/PGA0 (fattore di amplificazione F.A.);</li> <li>• Valori del rapporto SA/SA0 (Housner);</li> <li>• Valori del rapporto SI/SI0 (Housner);</li> <li>• Valori dello scuotimento in accelerazione (cm/s<sup>2</sup>) atteso al sito per gli intervalli di periodi 0,4s ≤ T ≤ 0,8s, 0,7s ≤ T ≤ 1,1s e 0,5s ≤ T ≤ 1,5s.</li> </ul>
INSTABILITA' DEI SUOLI IN CASO DI SISMA	<p>Stima degli Indici di liquefazione <math>I_L</math> e relative classi di pericolosità nei terreni incoerenti in falda (canali distributori, argini, rotte)</p> <p>Stima dei cedimenti attesi post-sisma (aree interdistributrici e paludi)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisi dei dati ottenuti dalle prove CPTU e CPT con metodo di Boulanger &amp; Idriss (2014) e stima di <math>I_L</math> con metodo di Somnez (2003);</li> <li>• Analisi delle curve granulometriche ottenute in laboratorio geotecnico e confronto con i fusi di riferimento indicati dalla normativa vigente (DGR 630/2019).</li> <li>• Analisi dei dati ottenuti dalle prove CPTU e di laboratorio geotecnico con individuazione dei livelli dove: <math>C_u &lt; 70</math> KPa, <math>V_s &lt; 180</math> m/s e <math>IP &gt; 30\%</math>.</li> <li>• Prove edometriche per analisi della compressibilità dei livelli di terreno ove sono verificate le condizioni di cui al punto precedente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Andamento del fattore di sicurezza alla liquefazione con la profondità fino a 20 m;</li> <li>• Stima del valore di <math>I_L</math> e attribuzione della classe di pericolosità alla liquefazione;</li> <li>• Considerazioni circa i fusi granulometrici.</li> <li>• Stima indicativa del cedimento permanente post-sismico a carico della frazione coesiva soffice (compattazione dinamica).</li> </ul>

 <b>Synthesis s.r.l.</b> Piazza del Popolo civ. 13 – int. 5 44034 – Copparo – Fe Tel. 0532 860546 – Fax 0532 091680 www.synthesisr.com – info@synthesisr.com	STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO <b>Relazione Illustrativa</b>	RIF. 020/20-EB-REV00 DEL 04/2020
--	---	-------------------------------------

## 8. ELABORATI CARTOGRAFICI

Il presente studio, come prescritto dalla DGR 630/2019, è corredato da una serie di elaborati cartografici di seguito elencati:

### Terzo livello di approfondimento:

- Carta delle indagini in scala 1:20.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) e di Formignana e Brazzolo (2° di 2), tutte in scala 1:10.000;
- Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo e Final di Rero con riquadri per Rero e Roncodigà (1° di 2) e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2), tutte in scala 1:5.000;
- Carte delle velocità delle onde di taglio S (Vs) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo e Final di Rero (1° di 2) e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2), tutte in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Accelerazione Massima Orizzontale (F.A.<sub>PGA</sub> = PGA/PGA<sub>0</sub>) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione (F.A. = SA/SA<sub>0</sub>) (0,1s ≤ T ≤ 0,5s) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione (F.A. = SA/SA<sub>0</sub>) (0,4s ≤ T ≤ 0,8s) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione (F.A. = SA/SA<sub>0</sub>) (0,7s ≤ T ≤ 1,1s) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione (F.A. = SA/SA<sub>0</sub>) (0,5s ≤ T ≤ 1,5s) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. = SI/SI<sub>0</sub>) (0,1s ≤ T ≤ 0,5s) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. = SI/SI<sub>0</sub>) (0,5s ≤ T ≤ 1,0s) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. = SI/SI<sub>0</sub>) (0,5s ≤ T ≤ 1,5s) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione (cm/s<sup>2</sup>) H<sub>SM</sub> (0,1s ≤ T ≤ 0,5s) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;



- Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000;
- Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) in scala 1:15.000 (carta unica) e distinte per le frazioni di Tresigallo, Final di Rero, Rero e Roncodigà (1° di 2) in scala 1:10.000 e di Formignana con il riquadro per Brazzolo (2° di 2) in scala 1:5.000.

### 8.1 Carta delle Indagini

E' la carta in cui sono riportate tutte le indagini geognostiche, sia quelle utilizzate per il I° e II° Livello di approfondimento sia quelle realizzate nel presente studio (III livello di approfondimento).

Per il comune di Tresignana, comprese le sue frazioni sono state nel complesso analizzate e/o realizzate:

#### I-II LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

- n. 155 prove penetrometriche statiche meccaniche (CPT);
- n. 2 prove penetrometriche statiche a punta elettrica e piezocono (CPTU);
- n. 3 prove penetrometriche con cono sismico (SCPTU);
- n. 34 pozzi per acqua;
- n. 7 sondaggi a carotaggio continuo;
- n. 2 sondaggi con piezometro;
- n. 4 campioni di terreno;
- n. 6 indagini tipo *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW);
- n. 9 misurazioni dei microtremiti ambientali Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr).

#### III LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

- n. 9 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU);
- n. 1 prova penetrometrica statica con piezocono sismico (SCPTU);
- n. 10 sondaggi a trivella con prelievo di n. 17 campioni tra rimaneggiati e indisturbati (shelby) per analisi di laboratorio geotecnico;
- n. 5 misure a stazione singola del microtremore ambientale (HVSr).
- n. 1 profilo sismico con array bidimensionale tipo ESAC;
- n. 1 misura sperimentale del comportamento dinamico di una struttura (metodo SSR e misura a stazione singola).

Circa le indagini dirette che fanno riferimento al I-II livello di approfondimento, la maggior parte di esse proviene dall'archivio interno di Synthesis S.r.l. Si tratta per lo più di prove penetrometriche statiche a punta meccanica e a punta elettrica con piezocono, eseguite nel corso di pregresse campagne geognostiche. Le penetrometrie in media hanno raggiunto profondità comprese tra 15-30 m da piano campagna. Per quanto riguarda i sondaggi e pozzi per acqua la profondità è in genere compresa tra 7 m e 188 m da p.c., mentre il pozzo per idrocarburi ha raggiunto profondità di circa 200 m.

Le prove invece che fanno riferimento al III livello di approfondimento (campagna 2018) sono state realizzate interamente nel corso del presente studio. Le indagini dirette hanno esplorato profondità paria a 20-30 m, i sondaggi a trivella hanno raggiunto profondità massime di circa 7 m.

 <b>Synthesis s.r.l.</b> Piazza del Popolo civ. 13 – int. 5 44034 – Copparo – Fe Tel. 0532 860546 – Fax 0532 091680 www.synthesisr.com – info@synthesisr.com	STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO <b>Relazione Illustrativa</b>	RIF. 020/20-EB-REV00 DEL 04/2020
--	---	-------------------------------------

La profondità raggiunta nel complesso dalle prove è ampiamente sufficiente per individuare e stimare gli indici di rischio degli orizzonti potenzialmente suscettibili di instabilità, nello specifico terreni suscettibili di densificazione (terreni fini-coesivi) o liquefazione (terreni granulari-incoerenti).

Circa le indagini indirette di tipo geofisico, per il I-II livello di approfondimento sono stati eseguiti e analizzati profili sismici in array in onde di superficie, misure a stazione singola del microtremore ambientale con metodo HVSR e prove in foro di tipo SCPTU.

Le indagini geofisiche eseguite per il III livello di approfondimento (campagna 2018) consistono in n. 5 misure a stazione singola del microtremore ambientale con tecnica HVSR, in un profilo in array bidimensionale di tipo ESAC (Formignana) e in misure a stazione singola del microtremore ambientale su struttura (SSR-periodo di vibrazione della struttura); nel caso specifico la struttura esaminata è stato l'edificio ex sede del Municipio di Formignana. Altre prove considerate (N. 1 SCPTU in zona Final di Rero) provengono dall'archivio interno degli scriventi.

## 8.2 Carta delle frequenze naturali dei terreni

La carta contiene informazioni sulla frequenza e l'ampiezza dei picchi di amplificazione locale del moto del suolo per risonanza stratigrafica che caratterizzano l'area. E' una carta molto importante in quanto frutto di registrazioni dirette eseguite in sito. Le misure effettuate, i cui valori di picco sono riportati sulla carta, indicano a quali frequenze il moto del suolo subisce delle amplificazioni per effetto dell'assetto stratigrafico specifico del sottosuolo investigato e per effetto dei contrasti di rigidità relativi tra gli strati, o più in generale tra le unità, che lo compongono.

Dall'elaborazione delle curve HVSR registrate in corrispondenza dell'ex territorio comunale di Tresigallo si è rilevata la presenza di modeste amplificazioni locali del moto del suolo per risonanza stratigrafica a contrasto d'impedenza variabile da basso ( $F_0 \approx 2$ ) a moderato ( $2 < F_0 < 3$ ) specie nell'intervallo di frequenze 1-2 Hz. Per frequenze  $< 1$  Hz si registrano in generale deboli amplificazioni a contrasto in media basso/moderato.

Dall'elaborazione delle curve HVSR registrate in corrispondenza dell'ex territorio comunale di Formignana si è rilevata la presenza di amplificazioni locali del moto del suolo per risonanza stratigrafica a contrasto d'impedenza variabile da basso-moderato ( $2 < F_0 < 3$ ) a elevato ( $F_0 > 3$ ) nell'intervallo di frequenze 1-2 Hz. Per frequenze  $< 1$  Hz si registrano in generale deboli amplificazioni a contrasto in media basso ( $F_0 \approx 2$ ).

I risultati ottenuti e descritti sono da confrontare con specifiche misure del periodo di vibrazione delle strutture (analisi del comportamento dinamico delle strutture) al fine di consentire il confronto tra le frequenze di vibrazione del terreno e quelle delle strutture con l'obiettivo di evitare o contenere il fenomeno di *doppia risonanza terreno-struttura*.

Nello studio in esame, a tal proposito, è stato analizzato il comportamento dinamico (modi di vibrazione e relativi periodi) dell'edificio ex sede del Municipio di Formignana.

### 8.3 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)

La carta illustra e riporta i valori stimati di Vs30, ovvero la media ponderata di velocità delle onde di taglio S nei primi 30 m da p.c.

La stima è stata eseguita mediante:

#### I-II LIVELLO DI APROFONDIMENTO (indagini pregresse in corrispondenza dell'ex territorio comunale di Formignana)

- n. 3 profili in array con tecnica MASW;
- n.1 prova SCPTU;
- n. 1 misura a stazione singola HVSR.

#### III LIVELLO DI APPROFONDIMENTO (campagna attuale 2018)

- n. 3 profili in array con tecnica MASW;
- n.4 prove SCPTU;
- n.1 profilo in array con tecnica ESAC (profilo bidimensionale)

La tabella sottostante riepiloga i risultati ottenuti.

TABELLA 8.3-1: VALORI DI VS<sub>30</sub> STIMATI PER L'AREA COMUNALE DI TRESIGNANA

SITO	Tipologia di indagine e anno campagna geofisica	VS <sub>30</sub> m/s	COMMENTI
TRESIGALLO	MASW	124	Rigidezza dei terreni soffice/molto soffice
TRESIGALLO	MASW	169	Rigidezza dei terreni soffice
TRESIGALLO	MASW	176	Rigidezza dei terreni soffice/moderata
TRESIGALLO	SCPTU	167	Rigidezza dei terreni soffice
TRESIGALLO	SCPTU	152	Rigidezza dei terreni soffice/molto soffice
FINAL DI RERO	SCPTU	155	Rigidezza dei terreni soffice/molto soffice
FORMIGNANA	MASW (2017)	147	Rigidezza dei terreni soffice/molto soffice
FORMIGNANA	MASW (2017)	169	Rigidezza dei terreni soffice/molto soffice
FORMIGNANA	MASW (2017)	182	Rigidezza dei terreni soffice/moderata

FORMIGNANA	SCPTU (2017)	160	Rigidezza dei terreni soffice/molto soffice
BRAZZOLO	HVSR (2017)	195	Rigidezza dei terreni soffice/moderata; Picco H/V = 1.88 Hz (moderato)
FORMIGNANA	SCPTU (2018)	171	Rigidezza dei terreni soffice/moderata
FORMIGNANA	ESAC (2018)	159	Rigidezza dei terreni soffice

Come già più volte descritto, anche i valori di velocità delle onde S testimoniano e confermano la presenza di terreni a scarsa rigidezza, soffici e molto soffici, caratterizzati da valori medi di  $V_s < 180$  m/s in particolare nei primi 15-20 m di profondità da p.c. (UNITA' A/B). Al di sotto di tale quota, le sabbie pleistoceniche mostrano decisi innalzamenti dei valori di velocità  $V_s$  (UNITA' C) con valori medi di circa 250 m/s.

#### 8.4 Carta di Microzonazione Sismica

Come riportato nelle carte delle aree suscettibili di effetti locali redatte nel corso della microzonazione di II livello di approfondimento per il comune di Formignana, con la frazione di Brazzolo, e per il Comune di Tresigallo e sue frazioni si distinguono:

- **ZONA 1:** caratterizzata dalla presenza di argilla/limo argilloso e sabbia – zona stabile suscettibile di amplificazioni locali;
- **ZONA 2:** caratterizzata dalla presenza di argilla/limo argilloso, torba e sabbia – zona stabile suscettibile di amplificazioni locali;
- **ZONA 3:** caratterizzata dalla presenza di argilla/limo argilloso e torba – zona stabile suscettibile di amplificazioni locali;
- **ZONA 4:** caratterizzata dalla presenza di argilla/limo argilloso e sabbia – zona di attenzione per le instabilità;
- **ZONA 5:** caratterizzata dalla presenza di argilla/limo argilloso e torba – zona di attenzione per le instabilità.

Tutte le zone individuate e distinte sono da considerarsi suscettibili di amplificazione stratigrafica del moto sismico. Trascurando gli effetti topografici, trattandosi di aree pianeggianti, le coperture sedimentarie poste sopra al bedrock sismico, per le loro stesse caratteristiche di rigidezza, natura litologica e assetto stratigrafico, sono in grado di modificare il moto sismico proveniente da basso in termini di frequenza, durata e ampiezza, amplificandone gli effetti di scuotimento in superficie.

Nel presente studio si forniscono le carte dei fattori di amplificazione in termini di:

- rapporto  $F_{PGA} = PGA/PGA_0$ , dove  $PGA_0$  è l'accelerazione massima orizzontale a periodo  $T=0$  al suolo di riferimento e  $PGA$  è l'accelerazione massima orizzontale a periodo  $T=0$  alla superficie del sito;
- rapporto  $FA = SA/SA_0$ , dove  $SA_0$  è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e  $SA$  è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi  $T$ :  $SA_1$  per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ,  $SA_2$  per  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $SA_3$  per  $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ,  $SA_4$  per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;
- rapporto  $FH = SI/SI_0$ , dove  $SI_0$  è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e  $SI$  l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di



Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T: SI1 per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , SI2 per  $0,5s \leq T \leq 1,0s$ , SI3 per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;

- valori di  $H_{SM}$ , parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in  $cm/s^2$ ), dato dal prodotto del parametro Acceleration Spectrum Intensity ( $ASI_{UHS}$ ), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , diviso per  $\Delta T$  (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ .

Allo stesso modo tutte le zone riconosciute si caratterizzano per la presenza di terreni fini, coesivi, soffici e molto soffici caratterizzati da valori medi di resistenza a rottura in condizioni non drenate (breve termine)  $< 70$  KPa. Resistenze medie inferiori a tale valore di soglia, come indicato nella DGR 630/2019 nell'allegato A3 – Capitolo B – paragrafo B3, unitamente ai valori stimati di velocità delle onde di taglio S, in genere risultati  $< 180$  m/s, indicano la predisposizione di tali depositi allo sviluppo di cedimenti potenzialmente rilevanti in caso di scuotimento indotto dall'azione ciclica e dinamica del sisma. Tale fenomeno, indicato con il termine di *densificazione* (abbassamento generalizzato del piano campagna), può causare effetti di danno rilevanti specie sulle costruzioni poggianti su fondazioni superficiali, poste a diretto contatto con gli strati superficiali e in genere più soffici, sollecitati dall'azione sismica. Pertanto, le zone sono state oggetto di analisi con III° livello di approfondimento al fine di stimare, a livello indicativo e di ordine di grandezza, il cedimento indotto dal sisma a carico della frazione coesiva fine (argilla e limi argillosi dell'unità A). Sui campioni di terreno prelevati nel corso della presente campagna geognostica è stato determinato il valore di Indice Plastico IP al fine di verificare il superamento o meno della soglia del 30% indicata dalla normativa. Nei casi in cui  $IP > 30\%$ , unitamente a  $cu < 70$  KPa e  $V_s$  strato  $< 180$  m/s già ampiamente verificati, si è proceduto all'esecuzione in laboratorio geotecnico di prove edometriche su campioni indisturbati prelevati nei primi 5-10 m da p.c., al fine di stimare numericamente il cedimento post-sismico atteso. L'accelerazione massima in superficie utilizzata nel calcolo è stata quella ottenuta dall'analisi di risposta sismica locale per un Tempo di Ritorno di 475 anni e smorzamento pari al 5%.

Limitatamente alle ZONA 1 e ZONA 3, rilevate ovunque sul territorio comunale, si riscontra anche la presenza di depositi incoerenti-granulari nei primi 20 m da p.c., quali sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi, con scarso grado di addensamento e sotto falda.

Alla luce di quanto detto, per i depositi sabbiosi individuati sono state eseguite analisi con III livello di approfondimento al fine di stimare a scala dell'intero territorio comunale, l'Indice di Liquefazione  $I_L$  come prescritto dalla normativa di riferimento. Le analisi sono state condotte sulla scorta dei risultati ottenuti da prove CPTU e SCPTU, applicando come accelerazione massima in superficie quella ottenuta dall'analisi di risposta sismica locale per un Tempo di Ritorno di 475 anni e smorzamento pari al 5%. Il metodo utilizzato per il calcolo del fattore di sicurezza alla liquefazione è stato quello di Boulanger & Idriss (2014), mentre il valore dell'indice di Liquefazione  $I_L$  è stato determinato mediante Sonmez (2003).

Con l'approfondimento di III livello le zone sono divenute:

#### ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

- ZONA 6: caratterizzata dalla presenza di argilla/limo argilloso e sabbia;
- ZONA 8: caratterizzata dalla presenza di argilla/limo argilloso, torba e sabbia;
- ZONA 9: caratterizzata dalla presenza unicamente di argilla/limo argilloso;
- ZONA 10: caratterizzata dalla presenza di argilla/limo argilloso e torba.

#### ZONE di INSTABILITA' (attenzione, suscettibilità e rispetto)

- ZONA tipo 3080: zona di attenzione per densificazione.



### 8.4.1 Analisi di Risposta Sismica Locale

La valutazione degli effetti sismici di sito (Risposta Sismica Locale) dell'intera area comunale di Tresignana, è stata condotta mediante approccio numerico non semplificato come previsto dalla DGR N. 630/2019 della Regione Emilia Romagna per il III livello di approfondimento, utilizzando il **codice di calcolo STRATA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis; STRATA è distribuito con licenza GNU disponibile al sito <http://www.gnu.org/licenses/>)**.

L'analisi di risposta sismica locale è stata eseguita in modo sito specifico per le zone di Formignana, di Tresigallo – Final di Rero e per la zona di Rero-Roncodigà. Le aree infatti si distinguono sostanzialmente per valori di arefg ( $PGA_0$  = accelerazione orizzontale massima al bedrock) leggermente differenti.

### PARAMETRI DI INPUT

TABELLA 8.4.1-1: PARAMETRI DI INPUT UTILIZZATI PER L'ANALISI RSL

SITO	Valori di $a_{refg}$ (g)	Scelta dei segnali di input	Banca dati di provenienza dei segnali di input	N. Accelerogrammi input impiegati	Profondità presunta bedrock sismico riferita al livello del mare
TRESIGALLO e FINAL DI RERO	0.1105	Storia sismica da DBMI15-CPTI15 (INGV) e Carta Sismogenetica d'Italia Zone ZS9 (si veda capitolo 2 nel presente documento)	European Strong Motion Database ISESD (dati disponibili su Servizio Geologico Sismico e dei Suoli E-R: "Sismica-Microzonazione Sismica") come da DGR2193/2015; Italian Accelerometric Archive (ITACA 2.3) si veda scheda di seguito nel testo	10 (N. 3 da European Strong Motion Database e n. 7 da ITACA 2.3)	250-350 m
RERO e RONCODIGA'	0.125				



FORMIGNANA	0.1105	Storia sismica da DBMI15-CPTI15 (INGV) e Carta Sismogenetica d'Italia Zone ZS9 (si veda capitolo 2 nel presente documento)	European Strong Motion Database IESD (dati disponibili su Servizio Geologico Sismico e dei Suoli E-R: "Sismica-Microzonazione Sismica") come da DGR2193/2015; Italian Accelerometric Archive (ITACA 2.3) si veda scheda di seguito nel testo	10 (N. 3 da European Strong Motion Database e n. 7 da ITACA 2.3)	250-300 m
------------	--------	--	--	---	-----------

Dove:

- come valori di  $a_{refg}$  sono stati assunti quelli riferiti al nodo più vicino oppure, in caso di una certa equidistanza, si è fatto riferimento al nodo con valore più elevato (DGR2193/2015 file: *all\_4\_coord.kmz*);
- **DBMI** = Database Macrosismico Italiano 2015 (INGV);
- **CPTI** = Catalogo Parametrico Terremoti Italiani 2015 (INGV);
- la **profondità del bedrock sismico** ( $V_s \approx 700/800$  m/s) è stata stimata in base all'isobata del tetto del Sistema Emiliano Romagnolo superiore (da Carta Sismotettonica Regione E-R) e all'interpretazione delle indagini geofisiche (in particolare HVSR e ESAC);
- tutti gli accelerogrammi utilizzati come **segnali di input** sono stati scalati al valore di  $a_{refg}$  riportato in tabella e i relativi spettri di risposta in accelerazione fanno riferimento a un Tempo di Ritorno  $T_R = 475$  anni e a uno **smorzamento convenzionale del 5%**;
- i 3 segnali provenienti dalla banca dati europea (**IESD**) e indicati sulla normativa di riferimento provengono dai seguenti files: 000046xa.xy; 000126xa.xy; 000354xa.xy
- i 7 segnali provenienti dal database **ITACA 2.3** sono stati selezionati come riportato di seguito (gli accelerogrammi con fattore di scala troppo elevato a giudizio dello scrivente non sono stati considerati nell'analisi):

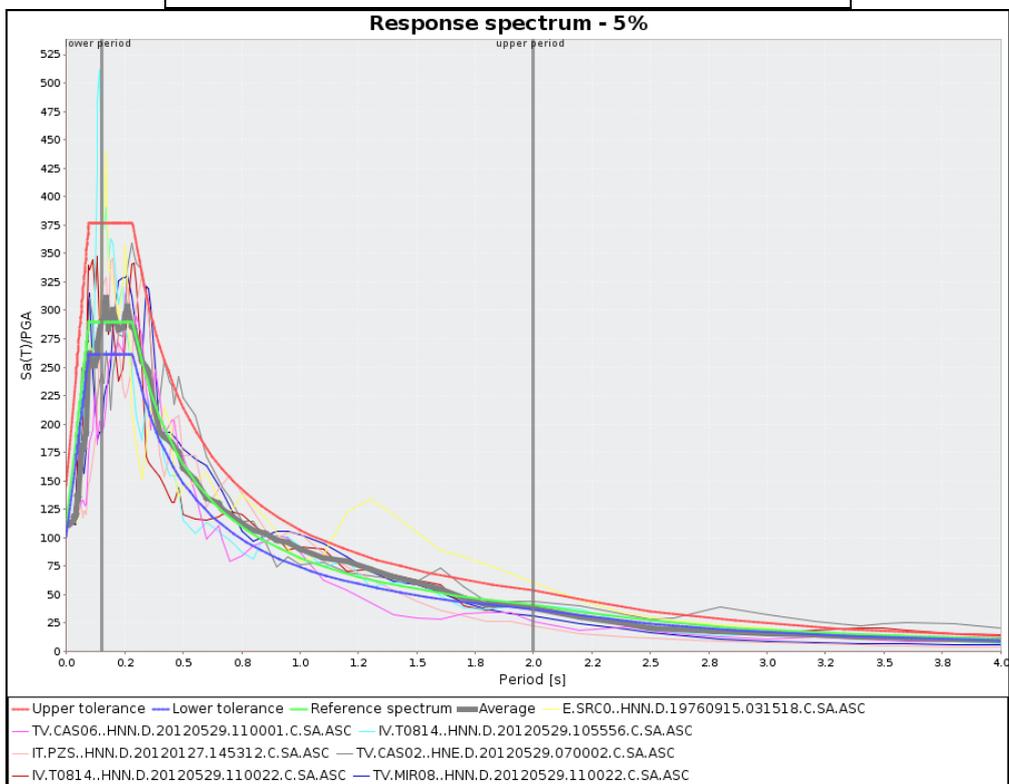


**Target spectrum**  
 =====  
 Latitude: 44.818597  
 Longitude: 11.898105  
 Site classification: A  
 Topography: 1  
 Nominal life [years]: 50  
 Building functional type (Cu): 1.0  
 Limit state probability : 0.1

**Preliminary record search**  
 =====  
 Station site classification: A,A\*,B,B\*,C,C\*,D,D\*,E,E\*  
 Magnitude min: 5.0  
 Magnitude max: 6.0  
 Types of magnitude considered: WL  
 Epicentral distance min [km]: 0.0  
 Epicentral distance max [km]: 50.0  
 Include late trigger events: no  
 Include analog recordings: yes

**Spectrum matching parameters and analysis options**  
 =====  
 Period range min [s]: 0.15  
 Period range max [s]: 2.0  
 Tolerance below average [%]: 10.0  
 Tolerance above average [%]: 30.0  
 Scaled records: yes

**Scaled records and corresponding scale factors**  
 =====  
 TV.MIR08..HNN.D.20120529.110022.C.SA.ASC 1.366  
 IV.T0814..HNN.D.20120529.110022.C.SA.ASC 1.221  
 TV.CAS02..HNE.D.20120529.070002.C.SA.ASC 2.738  
 IT.PZS..HNN.D.20120127.145312.C.SA.ASC 12.347  
 IV.T0814..HNN.D.20120529.105556.C.SA.ASC 0.716  
 TV.CAS06..HNN.D.20120529.110001.C.SA.ASC 14.298  
 E.SRC0..HNN.D.19760915.031518.C.SA.ASC 1.908



**Figura 8.4.1-1 – Spettri dei segnali di input provenienti da ITACA 2.3 (spettri compatibili in media con lo spettro del terremoto target) – TRESIGALLO e FINAL DI RERO**



**Target spectrum**

=====  
Latitude: 44.796589  
Longitude: 11.891074  
Site classification: A  
Topography: 1  
Nominal life [years]: 50  
Building functional type (Cu): 1.0  
Limit state probability : 0.1

**Preliminary record search**

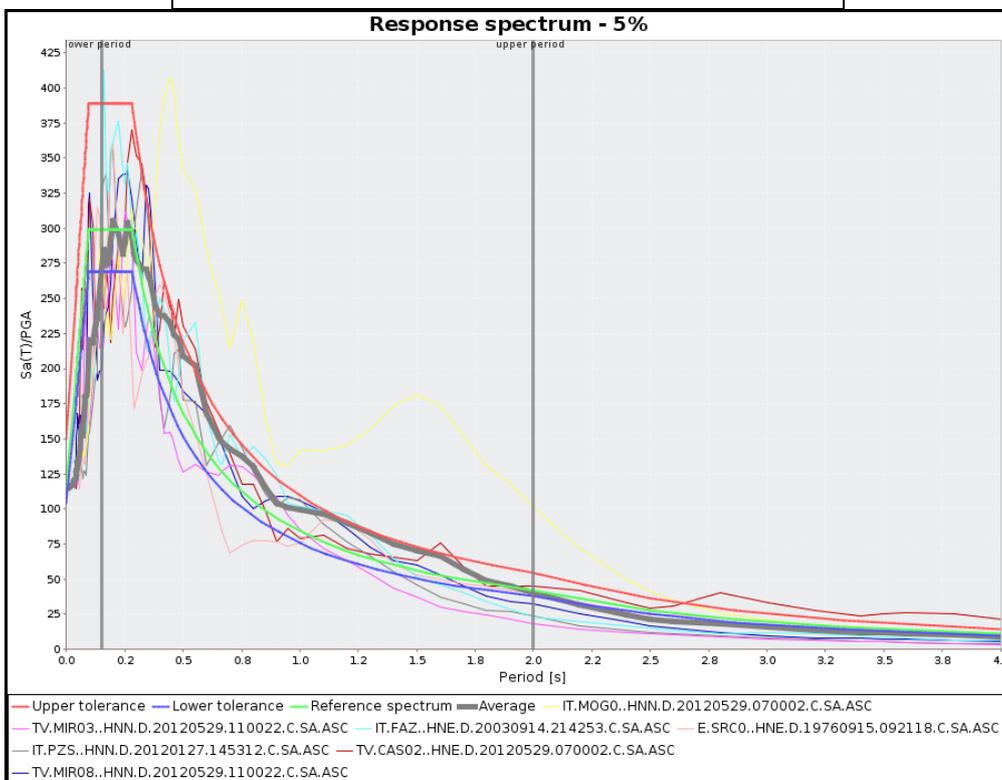
=====  
Station site classification: A,A\*,B,B\*,C,C\*,D,D\*,E,E\*  
Magnitude min: 5.0  
Magnitude max: 6.5  
Types of magnitude considered: W  
Epicentral distance min [km]: 10.0  
Epicentral distance max [km]: 50.0  
Include late trigger events: no  
Include analog recordings: yes

**Spectrum matching parameters and analysis options**

=====  
Period range min [s]: 0.15  
Period range max [s]: 2.0  
Tolerance below average [%]: 10.0  
Tolerance above average [%]: 30.0  
Scaled records: yes

**Scaled records and corresponding scale factors**

=====  
TV.MIR08..HNN.D.20120529.110022.C.SA.ASC 1.408  
TV.CAS02..HNE.D.20120529.070002.C.SA.ASC 2.820  
IT.PZS..HNN.D.20120127.145312.C.SA.ASC 12.720  
E.SRCO..HNE.D.19760915.092118.C.SA.ASC 0.471  
IT.FAZ..HNE.D.20030914.214253.C.SA.ASC 15.059  
TV.MIR03..HNN.D.20120529.110022.C.SA.ASC 1.076  
IT.MOGO..HNN.D.20120529.070002.C.SA.ASC 0.688



**Figura 8.4.1-2 – Spettri dei segnali di input provenienti da ITACA 2.3 (spettro compatibili in media con lo spettro del terremoto target) –RERO e RONCODIGA’**



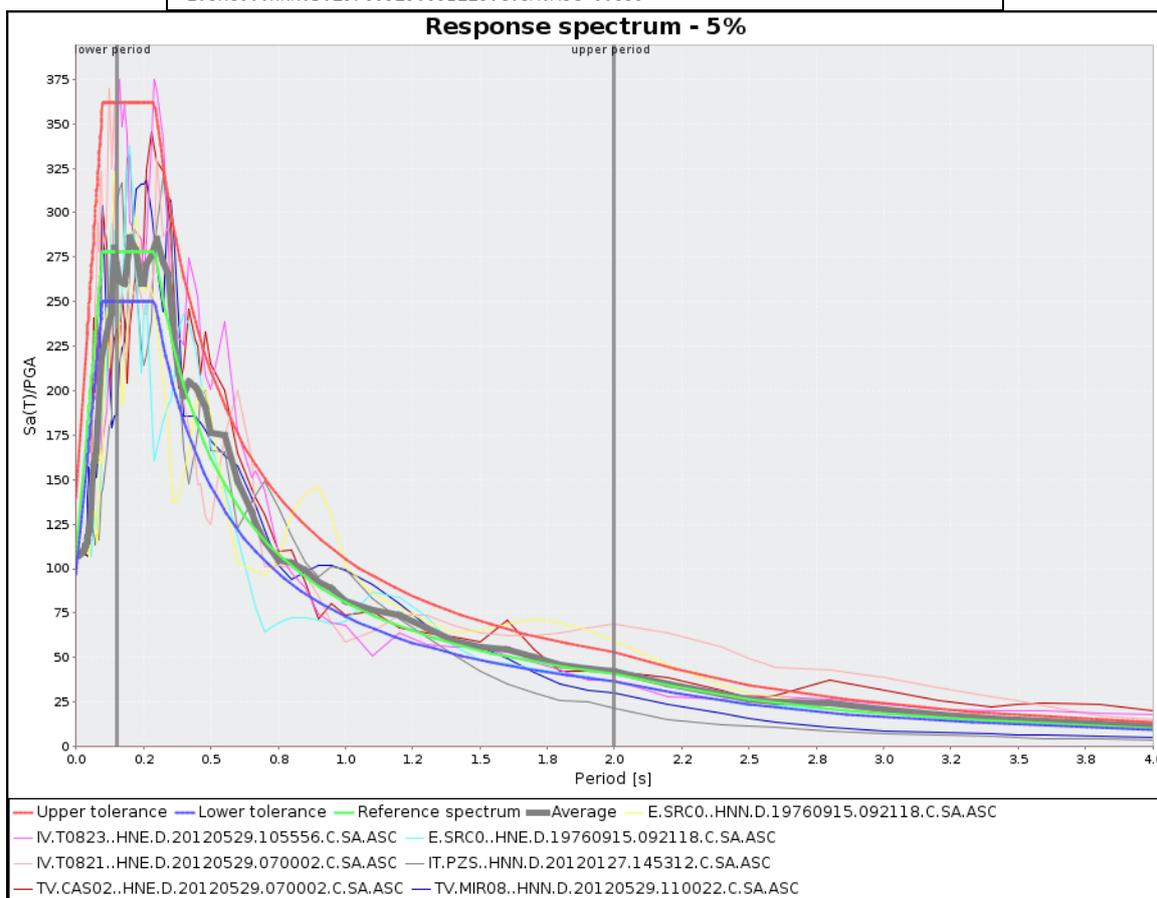
```

Target spectrum
=====
Latitude: 44.842125
Longitude: 11.863807
Site classification: A
Topography: 1
Nominal life [years]: 50
Building functional type (Cu): 1.0
Limit state probability : 0.1

Preliminary record search
=====
Station site classification: A,A*,B,B*,C,C*,D,D*,E,E*
Magnitude min: 5.0
Magnitude max: 6.0
Types of magnitude considered: W
Epicentral distance min [km]: 10.0
Epicentral distance max [km]: 50.0
Include late trigger events: no
Include analog recordings: yes

Spectrum matching parameters and analysis options
=====
Period range min [s]: 0.15
Period range max [s]: 2.0
Tolerance below average [%]: 10.0
Tolerance above average [%]: 30.0
Scaled records: yes

Scaled records and corresponding scale factors
=====
TV.MIRO8..HNN.D.20120529.110022.C.SA.ASC 1.316
TV.CAS02..HNE.D.20120529.070002.C.SA.ASC 2.636
IT.PZS..HNN.D.20120127.145312.C.SA.ASC 11.889
IV.T0821..HNE.D.20120529.070002.C.SA.ASC 5.477
E.SRC0..HNE.D.19760915.092118.C.SA.ASC 0.440
IV.T0823..HNE.D.20120529.105556.C.SA.ASC 11.613
E.SRC0..HNN.D.19760915.092118.C.SA.ASC 0.839
  
```



**Figura 8.4.1-3 – Spettri dei segnali di input provenienti da ITACA 2.3 (spettro compatibili in media con lo spettro del terremoto target) - FORMIGNANA**

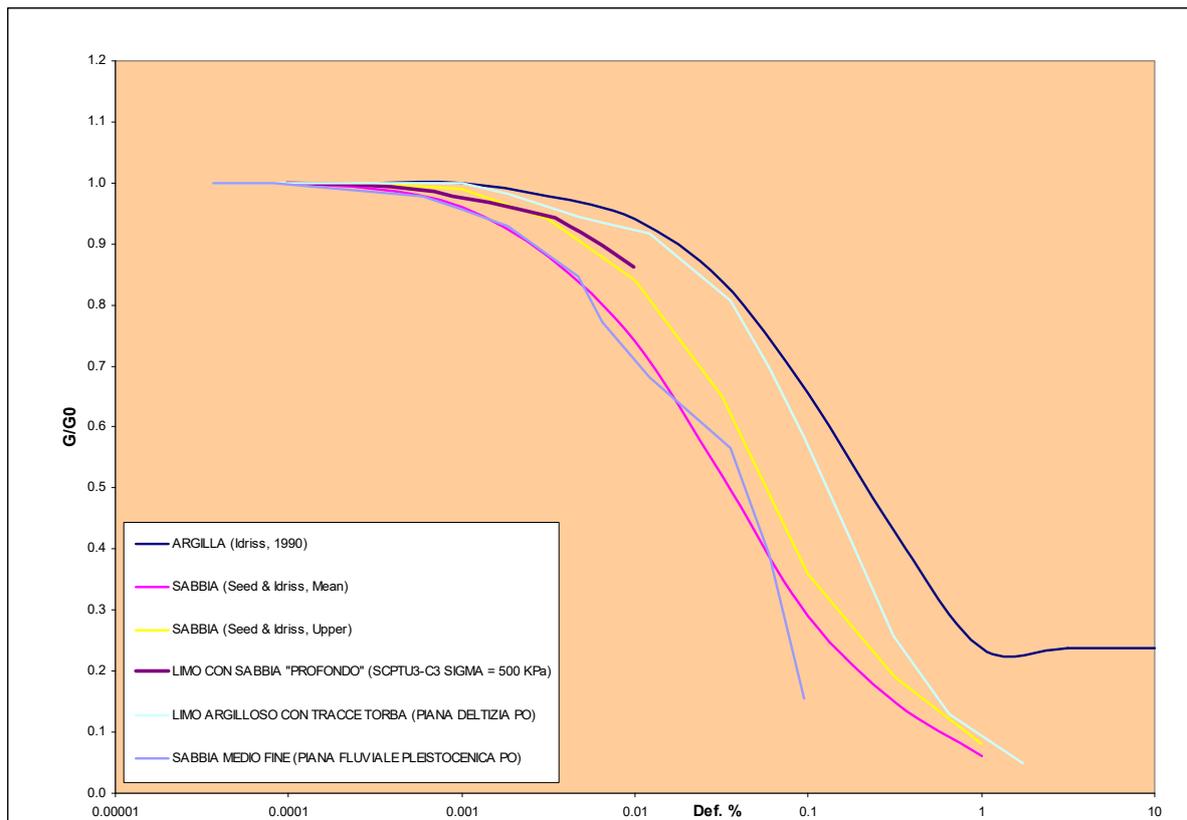
### **MODELLO DI SOTTOSUOLO UTILIZZATO PER IL TERRITORIO DI TRESIGALLO, FINAL DI RERO, RERO E RONCODIGÀ**

TABELLA 8.4.1-2: MODELLO DI SOTTOSUOLO UTILIZZATO PER L'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE PER L'AREA SIA DI TRESIGALLO – FINAL DI RERO CHE DI RERO-RONCODIGÀ

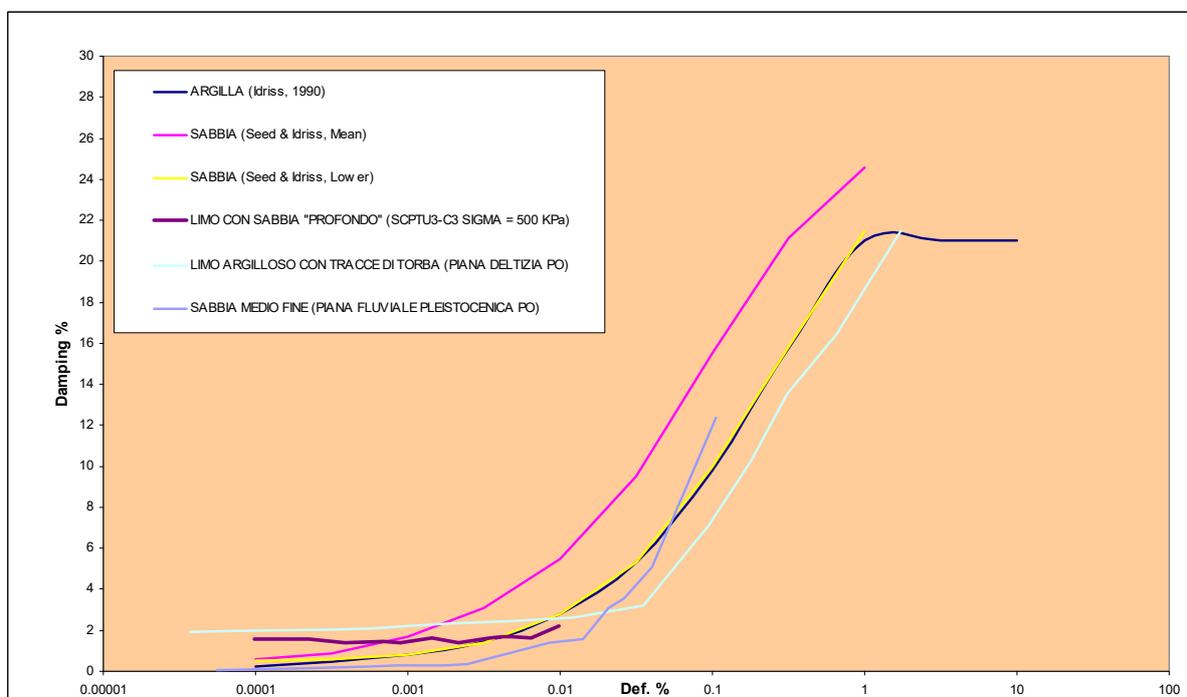
Prof. da p.c. tetto sismostrato (m)	Spessore sismostrato (m)	Litotipo prevalente nel sismostrato	Unità di riferimento (modello geologico da I-II-III livello)	Velocità media stimata onde S (m/s) nel sismostrato	Velocità minima stimata onde S (m/s) nel sismostrato	Velocità massima stimata onde S (m/s) nel sismostrato	Curve G-gamma; D-gamma (degrado modulo taglio/dumping)
0.00	20.00	limo argilloso organico con tracce di torba	A/B piana deltizia/paludi olocenica Po	140.00	100.00	180.00	Colonna risonante su campione litologicamente analogo proveniente da RO (≈9 m profondità)
20.00	80.0	sabbia medio fine grigia	C piana alluvionale pleistocenica Po	270.00	240.00	300.00	Colonna risonante su campione litologicamente analogo proveniente da RO (≈20 m profondità)
65.00	200.00	limo con sabbia "profondo"	Altri Depositi del Sintema E-R superiore	400.00	400.00	450.00	Colonna risonante su campione proveniente da alta pianura bolognese consolidato a 500 kPa
250-300 (variabile)	half-space	Bedrock	Tetto Sintema E-R inferiore	700.00	600.00	800.00	Da letteratura (Darendeli)

La profondità della falda è stata assunta mediamente a – 1.50 m di profondità da p.c.

Le curve degrado (g-gamma) e smorzamento (dumping D-gamma) utilizzate sono riportate nelle figure seguenti. A titolo di confronto nei grafici sono inserite anche le curve provenienti da ben noti studi di letteratura associate a litotipi analoghi a quelli presenti in sito (studi su argille e sabbie di Seed e Idriss).



**Figura 8.4.1-4 – Curve G-gamma materiali impiegati nell'analisi e confronto con curve note da letteratura**



**Figura 8.4.1-5 - Curve D-gamma materiali impiegati nell'analisi e confronto con curve note da letteratura**



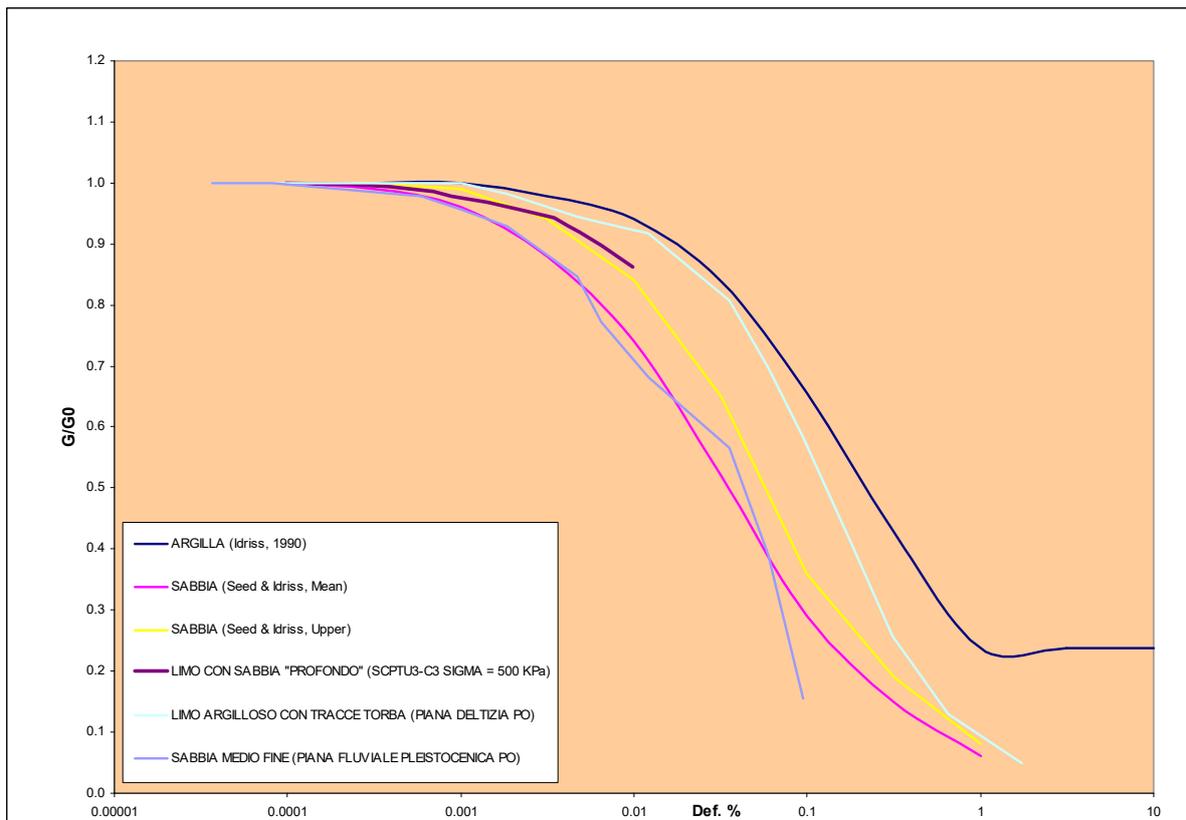
## MODELLO DI SOTTOSUOLO UTILIZZATO PER IL TERRITORIO DI FORMIGNANA

TABELLA 8.4.1-3: MODELLO DI SOTTOSUOLO UTILIZZATO PER L'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE PER L'AREA DI FORMIGNANA

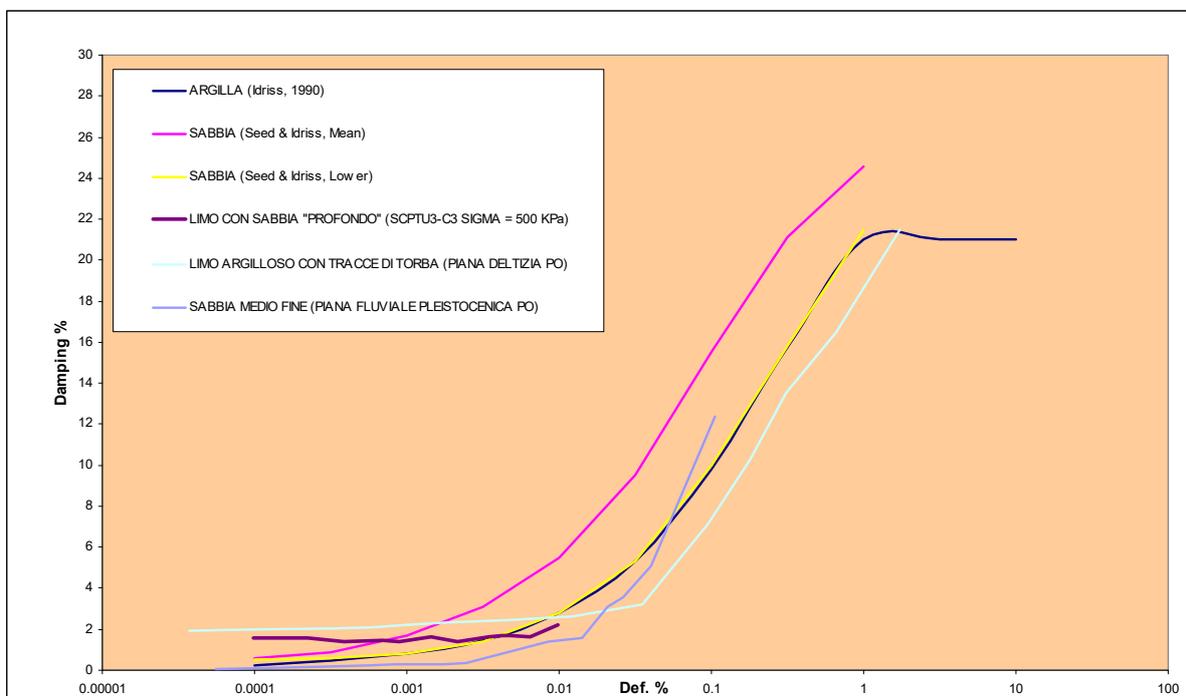
Prof. da p.c. tetto sismostrato (m)	Spessore sismostrato (m)	Litotipo prevalente nel sismostrato	Unità di riferimento (modello geologico da I-II-III livello)	Velocità media stimata onde S (m/s) nel sismostrato	Velocità minima stimata onde S (m/s) nel sismostrato	Velocità massima stimata onde S (m/s) nel sismostrato	Curve G-gamma; D-gamma (degrado modulo taglio/dumping)
0.00	20.00	limo argilloso organico con tracce di torba	A piana deltizia olocenica Po	150.00	100.00	180.00	Colonna risonante su campione litologicamente analogo proveniente da RO (≈9 m profondità)
20.00	80.0	sabbia medio fine grigia	C piana alluvionale pleistocenica Po	250.00	220.00	330.00	Colonna risonante su campione litologicamente analogo proveniente da RO (≈20 m profondità)
65.00	200.00	limo con sabbia "profondo"	Altri Depositi del Sintema E-R superiore	400.00	400.00	500.00	Colonna risonante su campione proveniente da alta pianura bolognese consolidato a 500 KPa
250-300 (variabile)	half-space	Bedrock	Tetto Sintema E-R inferiore	700.00	600.00	800.00	Da letteratura (Darendeli)

La profondità della falda è stata assunta mediamente a – 2 m di profondità da p.c.

Le curve degrado (g-gamma) e smorzamento (dumping D-gamma) utilizzate sono riportate nelle figure seguenti. A titolo di confronto nei grafici sono inserite anche le curve provenienti da ben noti studi di letteratura associate a litotipi analoghi a quelli presenti in sito (studi su argille e sabbie di Seed e Idriss).



**Figura 8.4.1-6 – Curve G-gamma materiali impiegati nell’analisi e confronto con curve note da letteratura**

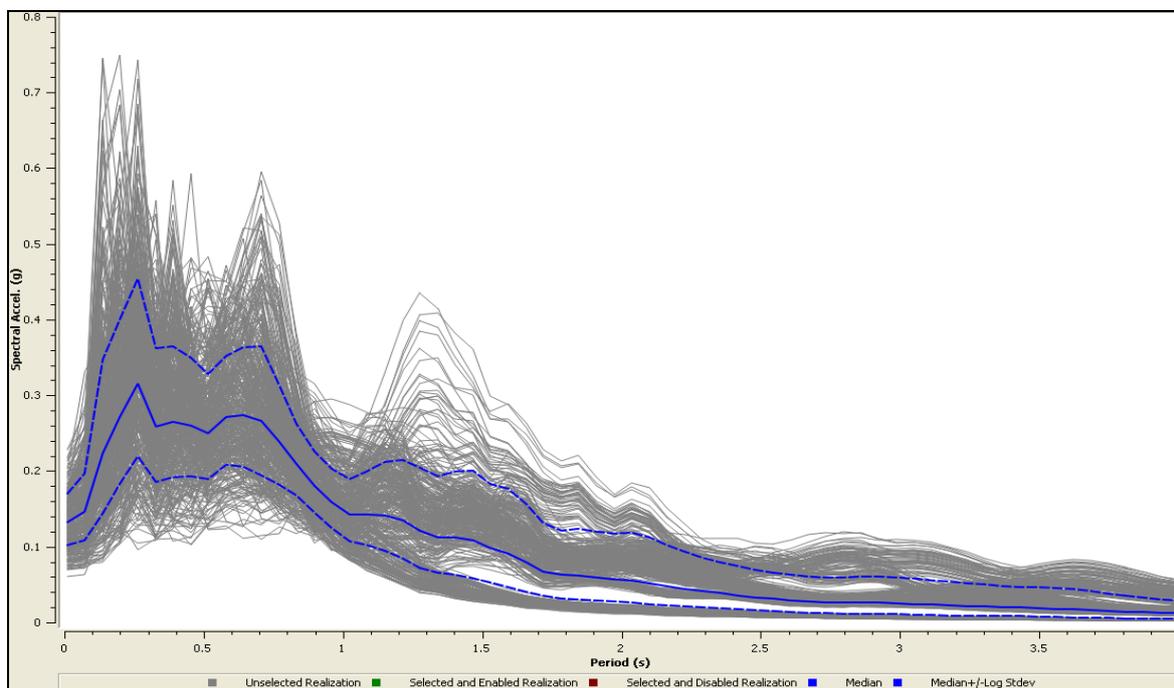


**Figura 8.4.1-7 - Curve D-gamma materiali impiegati nell’analisi e confronto con curve note da letteratura**

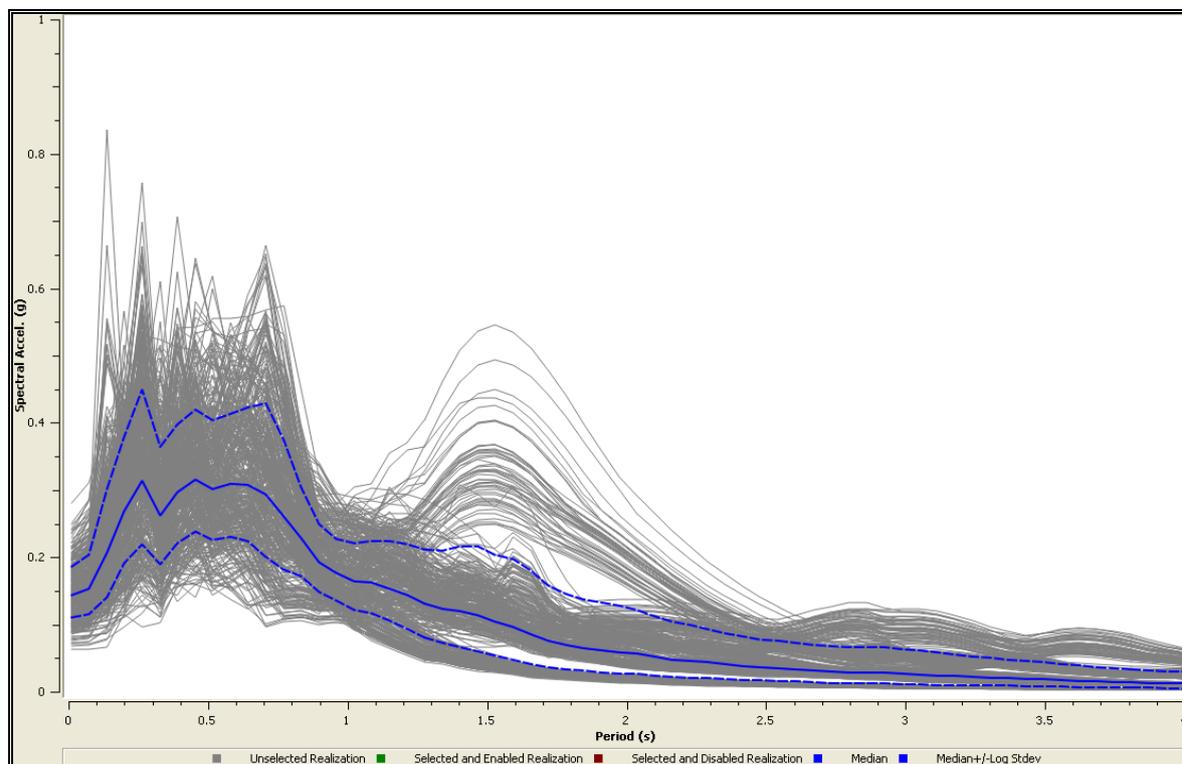
TABELLA 8.4.1-4: GESTIONE DELLE INCERTEZZE: VARIAZIONI CONSENTITE NELL'ANALISI CON SOFTWARE STRATA

SITO	Metodo utilizzato per variazione parametri	Variabili su cui è stato applicato il metodo <i>Monte Carlo</i>	NOTE
TRESIGALLO E FINAL DI RERO	Simulazioni con metodo <i>Monte Carlo</i> basate sulla generazione di una distribuzione statistica (in genere normale o log-normale) di una variabile prescelta a partire dalla sua media e dalla sua deviazione standard	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Velocità onde S nel sismostrato;</li> <li>✓ Spessore del sismostrato</li> <li>✓ Profondità bedrock sismico</li> <li>✓ Andamento curve G-gamma; D-gamma nel sismostrato</li> </ul>	<p>Circa la variazione delle Vs sono stati fissati dei limiti minimi e massimi per il singolo sismostrato sulla base dei risultati delle indagini geofisiche (modello empirico Toro, 1995 – distribuzione log-normale);</p> <p>Circa lo spessore degli strati (modello empirico Toro, 1995 – distribuzione log-normale) si è posta particolare attenzione all'interfaccia tra i depositi dell'Unità A/B (Limi e argille prevalenti di piana deltizia olocenica e palude) e i depositi dell'Unità C (Sabbie pleistocenice Po). Si è cercato di tenere conto del fatto che alla scala dell'intero territorio comunale il limite tra queste 2 unità sia risultato variabile dell'ordine di qualche metro con una media fissata intorno a circa 20 m;</p> <p>Circa la profondità del bedrock questo è stato fatto variare con distribuzione log-normale all'interno del range indicato sulla Carta Sismotettonica della Regione E-R (isobate Sintema Emiliano-Romagnolo superiore);</p> <p>Circa le curve degrado/smorzamento, sono state fatte variare secondo il modello empirico di Darendeli (2001 – distribuzione normale).</p>
RERO E RONCODIGA'			
FORMIGNANA			

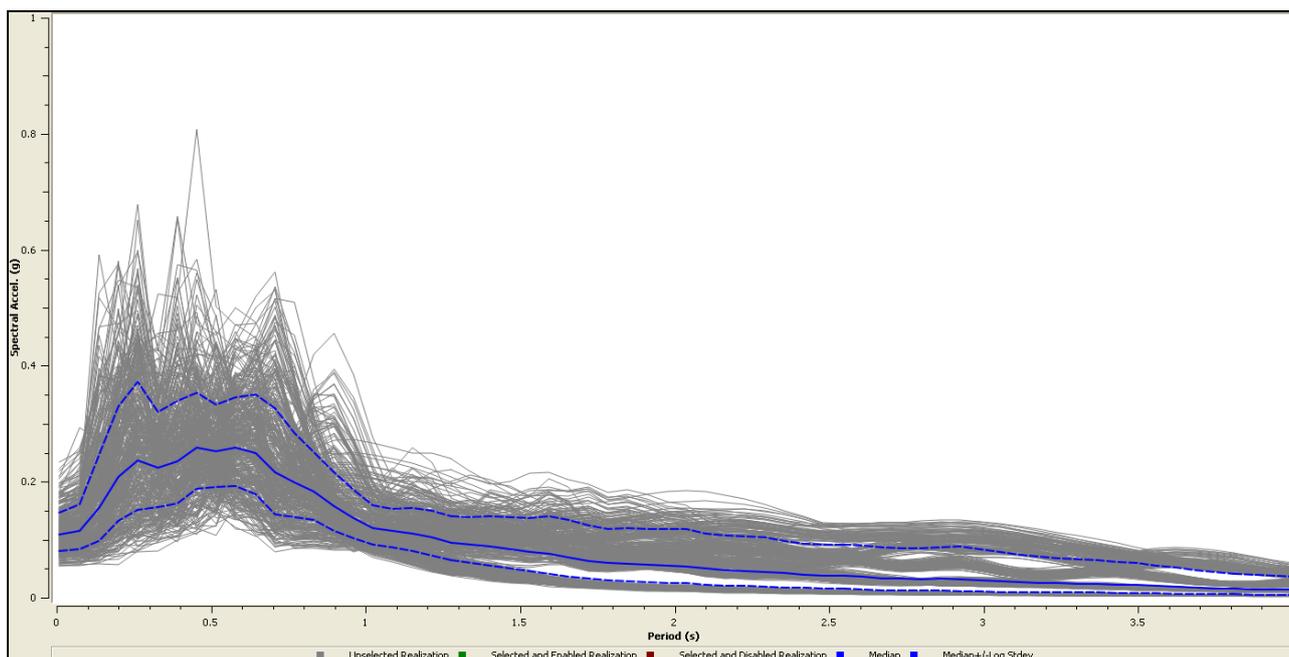
**SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI IN ACCELERAZIONE CALCOLATI ( $T_R = 475$  anni; smorzamento 5%)**



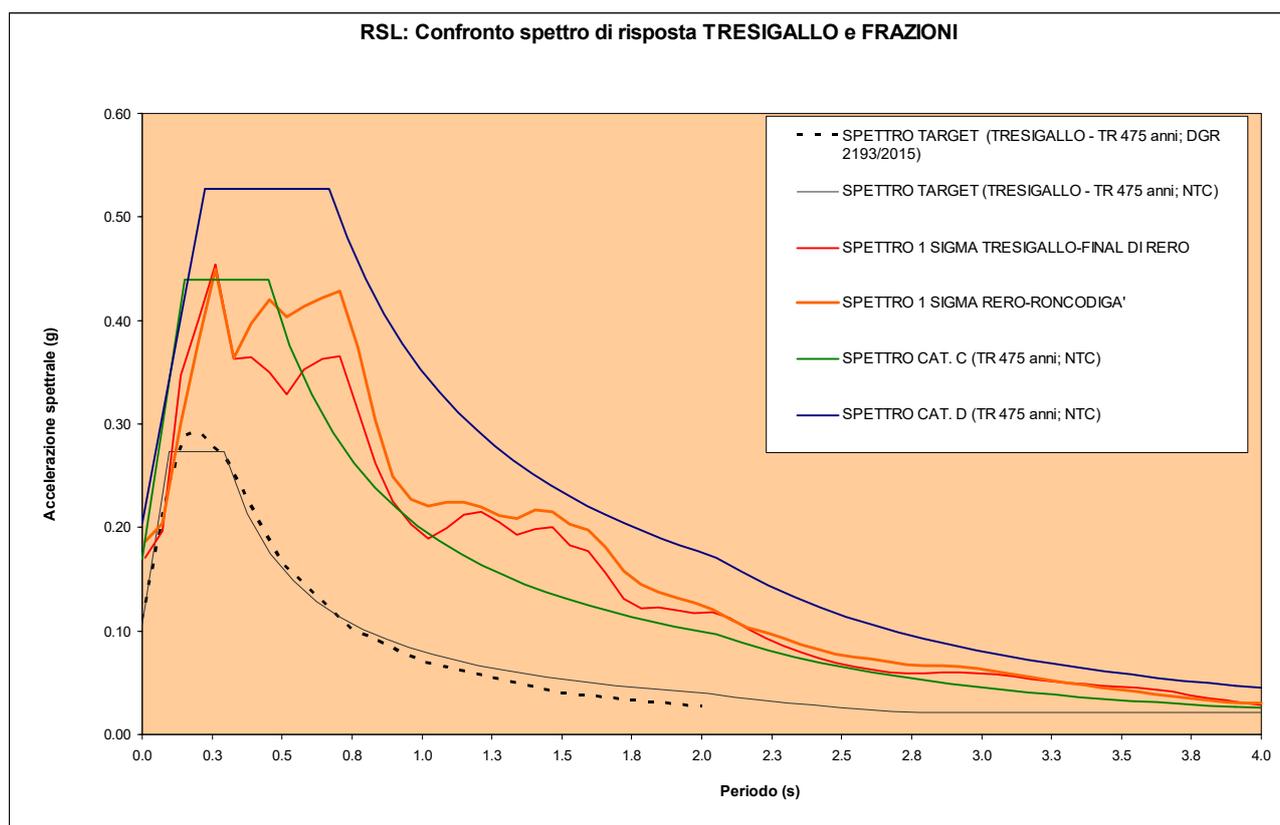
**Figura 8.4.1-8 – Involucro spettri finali calcolati per Tresigallo e Final di Rero**



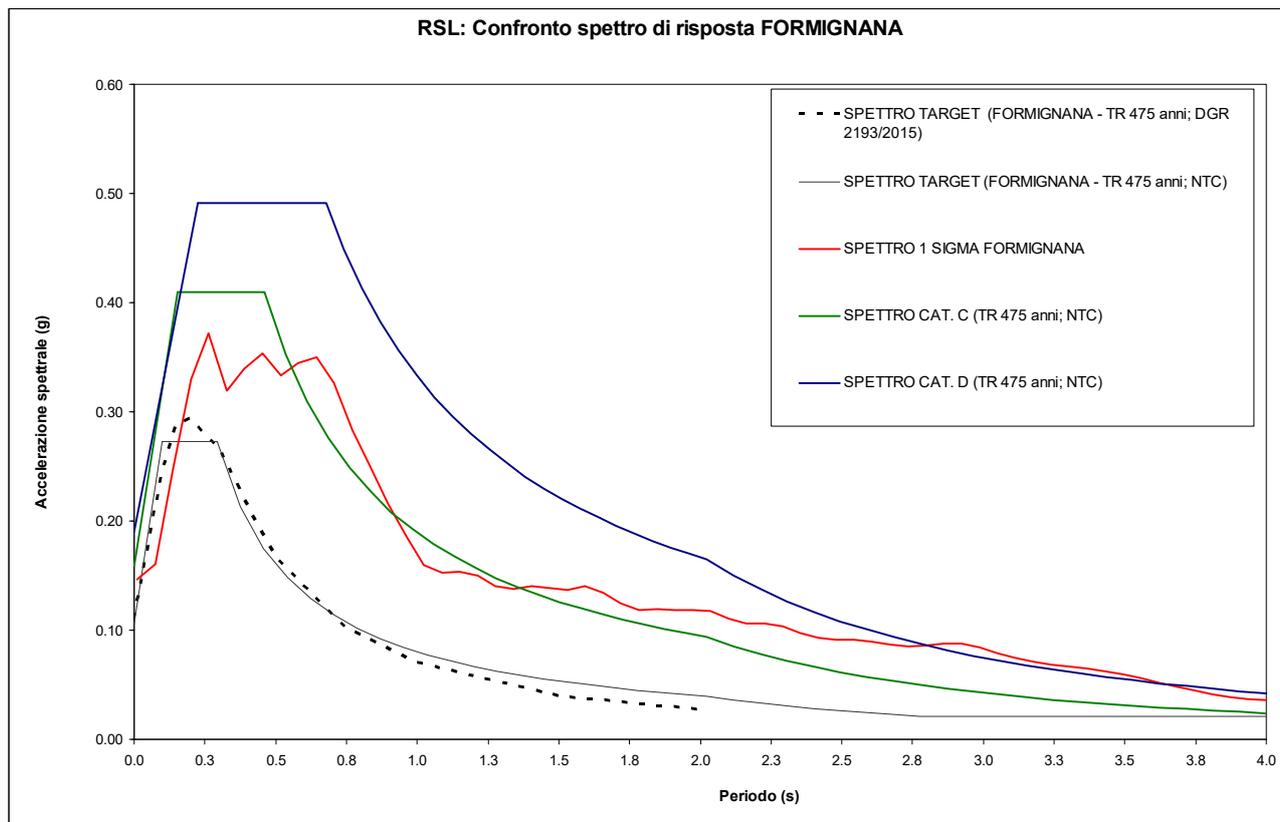
**Figura 8.4.1-9 – Involucro spettri finali calcolati per Rero e Roncodigà**



**Figura 8.4.1-10 – Involuppo spettri finali calcolati per Formignana**



**Figura 8.4.1-11 Spettro 1-sigma prescelto come rappresentativo del sito in esame confronto con spettri di normativa sia per Tresigallo-Final di Rero che per Rero-Roncodigà.**



**Figura 8.4.1-12 Spettro 1-sigma prescelto come rappresentativo del sito in esame confronto con spettri di normativa per Formignana**

Gli spettri prescelti sono **spettri 1-sigma**, ovvero spettro medi + la deviazione standard associata alla media. Pertanto nella figura 8.4.1-11 è riportato lo spettro con linea blu tratteggiata rappresentato nelle figure 8.4.1-8 e 8.4.1-9 (linea blu tratteggiata in alto), mentre nella figura 8.4.1-12 è riportato lo spettro con linea blu tratteggiata rappresentato nella figura 8.4.1-10 (linea blu tratteggiata in alto).

Alla luce dei risultati ottenuti dall'analisi è possibile fornire le seguenti stime circa i rapporti  $PGA/PGA_0$ ,  $SA/SA_0$  nei quattro intervalli di periodo richiesti dalla normativa,  $SI/SI_0$  (Intensità spettrale di Housner sullo spettro in pseudo-velocità) nei tre intervalli di periodo richiesti dalla normativa, HSM e H0408, H0711, H0515, ovvero lo scuotimento in accelerazione ( $cm/s^2$ ) atteso al sito per gli intervalli di periodi  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ :

TABELLA 8.4.1-5: MAPPE DI AMPLIFICAZIONE PER TRESIGNANA E FRAZIONI

SITO	TRESIGALLO – FINAL DI RERO	RERO - RONCODIGÁ	FORMIGNANA
$a_{refg} = PGA_0$ (g)	0.1105	0.1256	0.0934
PGA (g)	0.171	0.186	0.146
PGA/PGA <sub>0</sub> (F <sub>PGA</sub> )	1.54	1.48	1.32
SA1 (0.1-0.5 s)	1.52	1.42	1.32
SA2 (0.4-0.8 s)	1.85	1.90	2.17
SA3 (0.7-1.1 s)	2.59	2.45	2.84
SA4 (0.5-1.5 s)	2.50	2.47	2.68
SI1 (0.1-0.5 s)	1.59	1.49	1.40
SI2 (0.5-1.0 s)	2.81	2.85	3.30
SI3 (0.5-1.5 s)	3.07	3.01	3.10
H <sub>5M</sub>	257.61	250.37	326.32
H <sub>0408</sub>	279.74	327.09	328.46
H <sub>0711</sub>	198.77	213.99	217.87
H <sub>0515</sub>	197.16	221.54	211.23

Si ricorda che il fattore di amplificazione topografica per l'area è posto = 1 (area pianeggiante).

#### 8.4.2 Stima dell'indice di liquefazione IL terreni incoerenti

Con le metodologie descritte nel capitolo 7, nella tabella sottostante si riportano i valori degli Indici di Liquefazione per le aree investigate relativamente ai terreni incoerenti in falda rilevati. Le prove sono distinte tra quelle eseguite per il presente studio (2018) e quelle provenienti da archivio interno scriventi:

TABELLA 8.4.2-1 INDICE DI LIQUEFAZIONE E CLASSE DI PERICOLOSITA' (SONMEZ, 2003)

SITO	Prova di riferimento	Prof. falda (m)	PGA Utilizzata (g)	Magnitudo di riferimento	I <sub>L</sub>	Classe di pericolosità (Sonmez, 2003)
TRESIGALLO	CPTU1 (2018)	1.555	0.171	6.14	0.570	Basso
TRESIGALLO	CPTU2 (2018)	1.50	0.171	6.14	0.952	Basso
TRESIGALLO	CPTU3 (2018)	2.00	0.171	6.14	0.197	Basso
TRESIGALLO	CPTU4 (2018)	1.90	0.171	6.14	0.722	Basso
FINAL DI RERO	CPTU5 (2018)	1.20	0.171	6.14	1.234	Basso

RONCODIGA'	CPTU6 (2018)	0.30	0.186	6.14	1.631	Basso
TRESIGALLO	SCPTU1-ANS-T-001 (ARCHIVIO)	0.75	0.171	6.14	0.901	Basso
FINAL DI RERO	SCPTU2-ANS-T-005 (ARCHIVIO)	0.85	0.171	6.14	1.581	Basso
FINAL DI RERO	SCPTU1 (099/17_ES) (ARCHIVIO)	1.80	0.171	6.14	0.180	Basso
RERO	CPTU1 (106/17_ES) (ARCHIVIO)	1.47	0.186	6.14	1.642	Basso
FINAL DI RERO	CPTU2 (175/17_ES) (ARCHIVIO)	1.85	0.171	6.14	0.354	Basso
FINAL DI RERO	CPTU1 (109/16_RL) (ARCHIVIO)	1.80	0.171	6.14	6.458	alto
FORMIGNANA	CPTU5	1.67	0.146	6.14	0.670	Basso
FORMIGNANA	CPTU6	1.29	0.146	6.14	0.350	Basso
FORMIGNANA	SPTU4	1.68	0.146	6.14	0.323	Basso
FORMIGNANA	SCPTU_ASP_C2_F001	1.60	0.146	6.14	1.900	Basso
BRAZZOLO	CPTU7	1.50	0.146	6.14	0.787	Basso

Sono inoltre state analizzate n. 10 CPT provenienti da archivio che hanno dato come risultato  $I_L = 0$

Dove:

$I_L = 0$  Non liquefacibile (Fattore di sicurezza  $\geq 1.2$ )

$0 < I_L \leq 2$  Potenziale basso

$2 < I_L \leq 5$  Potenziale moderato

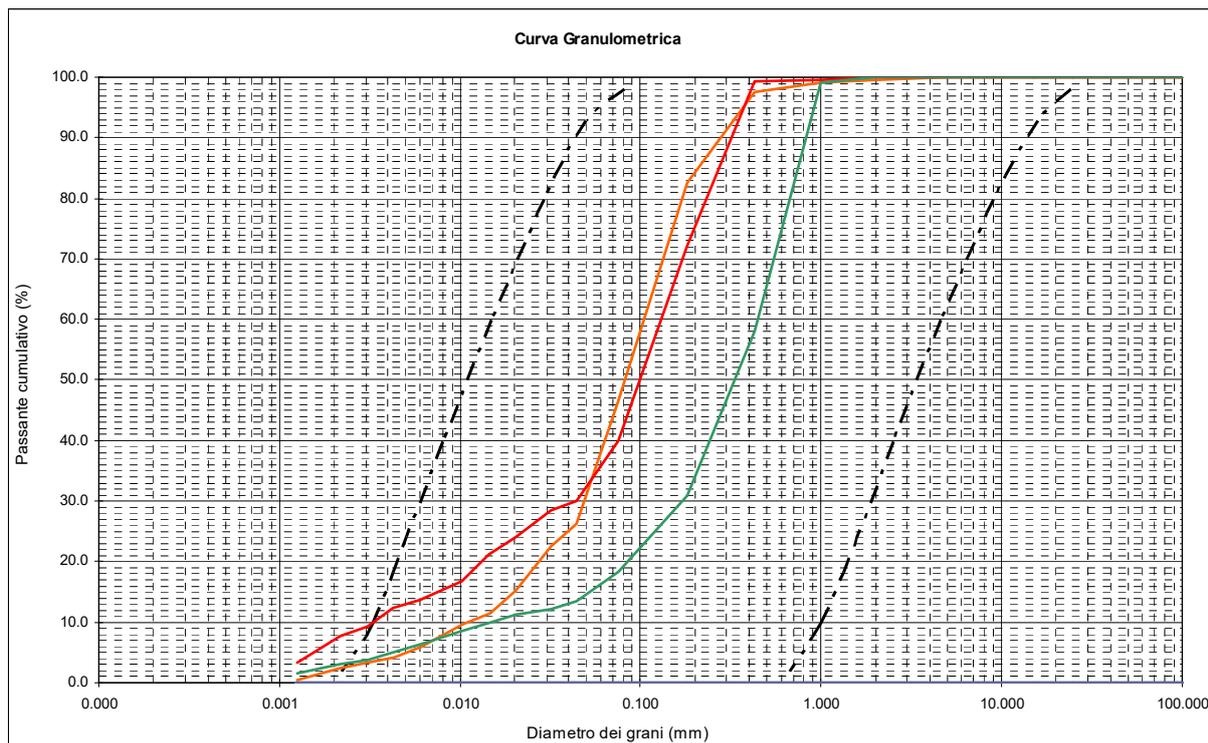
$5 < I_L \leq 15$  Potenziale alto

$15 < I_L$  Potenziale molto alto

Il metodo di analisi come già detto è stato quello di Boulanger & Idriss (2014)

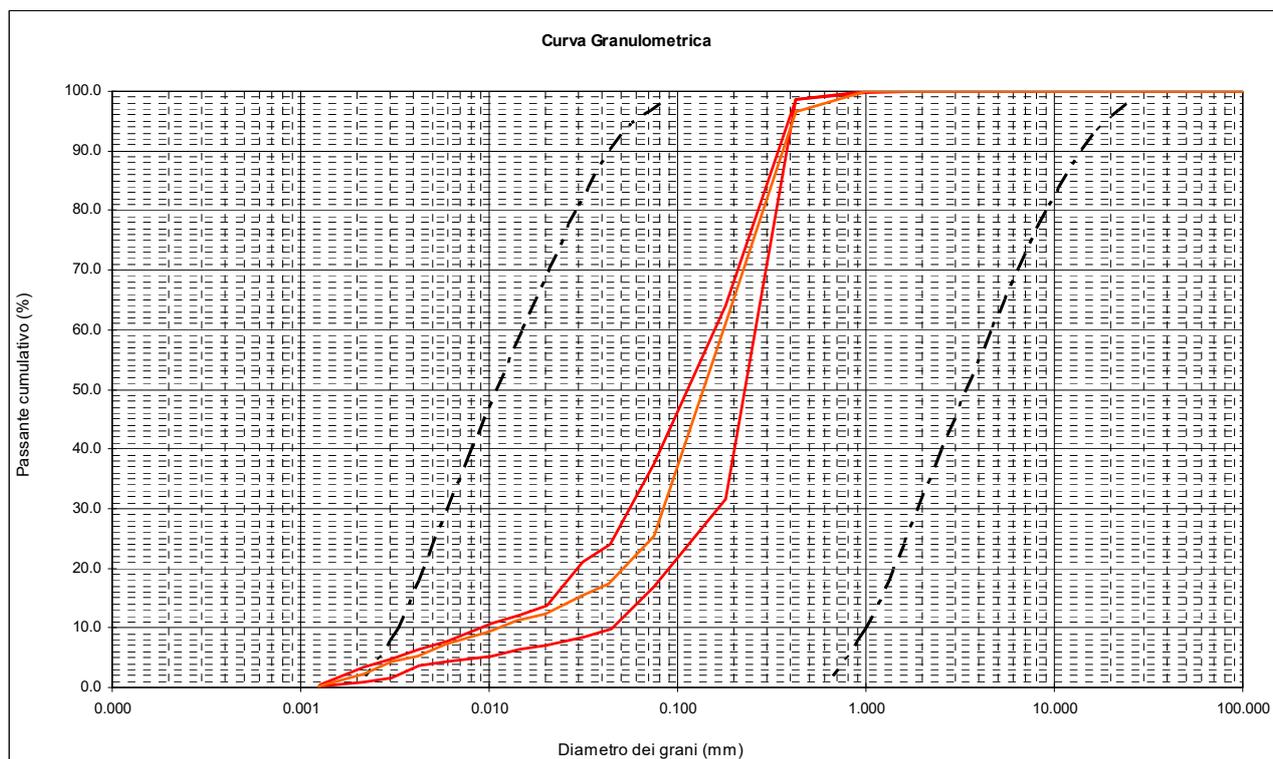
Nel complesso l'area di Tresignana e frazioni si caratterizza per una **bassa pericolosità alla liquefazione** (fa eccezione una sola prova con  $I_L$  alto nella zona di Final di Rero).

Unitamente alla stima di  $I_L$  nelle figure seguenti si mostra il confronto tra le curve granulometriche ottenute in laboratorio sui campioni di sabbia prelevati nell'ex territorio comunale di Tresigallo (S1-C1; S4-C1; S5-C1; si veda tabella 4.1-1 per le profondità dei campioni) e nell'ex territorio comunale di Formignana (S5-C1; S6-C1; S14-C1; si veda tabella 4.1-1 per le profondità dei campioni) e i fusi di riferimento indicati nella DGR 630/2019.



**Figura 8.4.2-1 Confronto curva granulometrica dei campioni di sabbia prelevati a Tresigallo e fusi di riferimento normativi (coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$ )**

Come si osserva nel grafico, il tratto di curva che fuoriesce dai fusi di riferimento, grosso modo corrispondente alla frazione fine (FC) passante al setaccio 200 ASTM, è risultata sempre  $< 10\%$ ; inoltre la distribuzione granulometrica dei campioni analizzati è compresa all'interno dei fusi di riferimento per oltre il 50%. Il basso grado di pericolosità a liquefazione è pertanto da attribuire allo spessore limitato dei livelli sabbiosi nei primi 15-20 m e al valore modesto di PGA.



**Figura 8.4-2 Confronto curva granulometrica dei campioni di sabbia prelevati a Formignana e fusi di riferimento normativi (coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$ )**

Come si osserva nel grafico, il tratto di curva che fuoriesce dai fusi di riferimento, grosso modo corrispondente alla frazione fine (FC) passante al setaccio 200 ASTM, è risultata  $< 5\%$ ; inoltre la distribuzione granulometrica dei campioni analizzati è compresa all'interno dei fusi di riferimento per oltre il 50%.

#### **8.4.3 Stima dei cedimenti post-sismici attesi terreni coesivi**

Con le metodologie descritte nel capitolo 7, si è proceduto alla stima dei cedimenti attesi a seguito del sisma sui livelli di terreno coesivo soffice dove sono state simultaneamente verificate le condizioni di:

- valori di coesione non drenata  $< 70$  KPa (da indagini dirette specie CPTU);
- valori di velocità di propagazione delle onde di taglio S ( $V_s$ )  $< 180$  m/s (da indagini geofisiche);
- valori di Indice Plastico  $> 30\%$  (da prove di laboratorio su campioni prelevati in sito).

Nel caso del territorio di Tresignana, essendo diffusamente verificate le prime 2 condizioni, e localmente anche la terza (si veda capitolo 4.1 e tabella 4.1-1), si è provveduto al prelievo di n. 2 campioni indisturbati per l'esecuzione di prove edometriche in laboratorio geotecnico al fine di ottenere i parametri di compressibilità del terreno per la stima dei cedimenti post-sismici attesi. Naturalmente i punti di prelievo sono stati scelti laddove le condizioni sopraespresse sono state tutte confermate:

TABELLA 8.4.3-1 CAMPIONI INDISTURBATI PER PROVE EDOMETRICHE

SITO	Prova di riferimento	Prof. Prelievo del campione (m)
RONCODIGA'	CPTU 6	Intervallo 2.60-3.10
BRAZZOLO	CPTU 7	Intervallo 5.90-6.80

Utilizzando i parametri di laboratorio e quelli ricavati dall'analisi di RSL, utilizzando la formulazione indicata sulla DGR 630/2019 al paragrafo B3 (Yasuhara e Andersen, 1991) si fornisce una stima indicativa dei cedimenti post-sismici attesi con particolare riferimento a primi 5-10 m di profondità da p.c. laddove i valori attesi di  $\Delta U/P'_0 \geq 30$  (rapporto tra l'incremento di pressione interstiziale nel terreno indotto dal sisma e tensione media efficace iniziale).

TABELLA 8.4.3-2 STIMA CEDIMENTI ATTESI POST-SISMICI TERRENI COESIVI SOFFICI RERO E RONCODIGA'

Intervall o di profondi tà	Litotipo prevalente	Indice di ricomprensione $C_r$ (da edometria)	$\Delta U/P'_0$	Deformazione volumetrica unitaria ( $\epsilon_v$ )	Cediment o atteso 0-5 m	Entità del cedimento post-sisma (0-10 m)
0-5 m	Limo argilloso con tracce di torba	0.027	0.4	0.0045	≈ 2.3 cm	≈ 6 cm
Intervall o di profondi tà	Litotipo prevalente	Indice di ricomprensione $C_r$ (da edometria)	$\Delta U/P'_0$	Deformazione volumetrica unitaria ( $\epsilon_v$ )	Cediment o atteso 5-10 m	
5-10 m	Limo argilloso con tracce di torba	0.034	0.5	0.0077	≈ 3.9 cm	

TABELLA 8.4.3-3 STIMA CEDIMENTI ATTESI POST-SISMICI TERRENI COESIVI SOFFICI BRAZZOLO

Intervallo di profondità	Litotipo prevalente	Indice di ricomprensione $C_r$ (da edometria)	$\Delta U/P'_0$	Deformazione volumetrica unitaria ( $\epsilon_v$ )	Cediment o atteso 0-5 m	Entità del cedimen to post- sisma (0-10 m)
0-5 m	Limo argilloso con tracce di torba	0.028	0.3	0.0026	≈ 1.3 cm	≈ 5 cm

Intervallo di profondità	Litotipo prevalente	Indice di ricompressione $C_r$ (da edometria)	$\Delta U/P'_0$	Deformazione volumetrica unitaria ( $\epsilon_v$ )	Cedimento atteso 5-10 m
5-10 m	Limo argilloso con tracce di torba	0.054	0.4	0.0073	≈ 3.6 cm

## 9. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DI DANNI PER EVENTI PASSATI

Non sono a disposizione dati relativi a danni per eventi passati.

## 10. BIBLIOGRAFIA

Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. 24/2017)

Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica; DGR 2193/2015 ;Regione Emilia-Romagna

F. Brammerini, G. di Pasquale, G. Naso, M. Severino, 2008. Protezione Nazionale Civile. Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica.

M. Bondesan. L'area deltizia Padana: caratteri geografici e geomorfologici.

Regione Emilia-Romagna, Provincia di Ferrara, Università degli studi di Ferrara 2007. Riserve idriche sotterranee della Provincia di Ferrara.

Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Database Macrosismico dei Terremoti Italiani (DBMI15) e Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Cartografia:

- Edizioni S.E.L.C.A. 1997, Carta Geomorfologica della Pianura Padana.
- Edizione 1999 – Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna
- Edizioni S.E.L.C.A. 2004. Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna



## 11. ALLEGATI

Carta delle indagini - scala 1:20.000 – Comune di Tresignana

- *Carta delle indagini - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*
- *Carta delle indagini - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta delle frequenze naturali dei terreni - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta delle frequenze naturali dei terreni - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*
- *Carta delle frequenze naturali dei terreni - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*
- *Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione “Accelerazione massima orizzontale” ( $F.A._{PGA} = PGA/PGA_0$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione “Accelerazione massima orizzontale” ( $F.A._{PGA} = PGA/PGA_0$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*
- *Carta dei fattori di amplificazione “Accelerazione massima orizzontale” ( $F.A._{PGA} = PGA/PGA_0$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*
- *Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*
- *Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*
- *Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione ( $F.A. = SA/SA_0$ ) ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

	<b>Synthesis s.r.l.</b> Piazza del Popolo civ. 13 – int. 5 44034 – Copparo – Fe Tel. 0532 860546 – Fax 0532 091680 www.synthesisr.com – info@synthesisr.com	STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO <b>Relazione Illustrativa</b>	RIF. 020/20-EB-REV00 DEL 04/2020
--	---	---	-------------------------------------

Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione (F.A. =  $SA/SA_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione (F.A. =  $SA/SA_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*

- *Carta dei fattori di amplificazione – Integrale dello Spettro di Risposta in Accelerazione (F.A. =  $SA/SA_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*

- *Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,0s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,0s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*

- *Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,0s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*

- *Carta dei fattori di amplificazione – Intensità di Housner (F.H. =  $SI/SI_0$ ) ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $cm/s^2$ )  $H_{SM}$  ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $cm/s^2$ )  $H_{SM}$  ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*

- *Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $cm/s^2$ )  $H_{SM}$  ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $cm/s^2$ )  $H$  ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $cm/s^2$ )  $H$  ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*

- *Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $cm/s^2$ )  $H$  ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

	<b>Synthesis s.r.l.</b> Piazza del Popolo civ. 13 – int. 5 44034 – Copparo – Fe Tel. 0532 860546 – Fax 0532 091680 www.synthesisr.com – info@synthesisr.com	STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO <b>Relazione Illustrativa</b>	RIF. 020/20-EB-REV00 DEL 04/2020
--	---	---	-------------------------------------

Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*

- *Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*

Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:15.000 – Comune di Tresignana

- *Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:10.000 – Comune di Tresignana (1° di 2)*

- *Carta dei fattori di amplificazione – Scuotimento in Accelerazione ( $\text{cm/s}^2$ ) H ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ) - scala 1:5.000 – Comune di Tresignana (2° di 2)*