

dott. geol. Gianluca Ferioli

Studio: Via A. Zucchini, 69 – CAP 44100 Ferrara

tel. 0532/56771, fax 0532/56119, e-mail info@elletipi.it

iscritto al n° 503 all'Albo Professionale dell'Ordine dei Geologi della Regione Emilia Romagna

Committente:	COMUNE DI VIGARANO MAINARDA via Municipio 1 - 44049 Vigarano Mainarda, Ferrara
--------------	---



Oggetto:	Indagini geognostiche per la caratterizzazione geotecnica e sismica dei terreni su cui è prevista l'edificazione del Nuovo Polo Scolastico, Vigarano Mainarda (FE).
----------	--

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

dott. geol. Gianluca FERIOLI

INDICE

Nome file:	Cod. Doc	N° Comm.	Rev.	bm	Rif. segreteria	Pag. 1 di 31
RELgeo-11517-12-COMUNE VIGARANO MAINARDA.doc	Rel_01	11517/12	00	06/11/12	bb	

<u>1.</u>	<u>PREMESSA.....</u>	<u>3</u>
<u>2.</u>	<u>INQUADRAMENTO DELL'AREA.....</u>	<u>3</u>
<u>3.</u>	<u>GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA</u>	<u>4</u>
<u>4.</u>	<u>PIANO DELLE INDAGINI.....</u>	<u>9</u>
<u>5.</u>	<u>CARATTERI STRATIGRAFICI DEL SITO</u>	<u>13</u>
<u>6.</u>	<u>PARAMETRI GEOTECNICI: VALORI CARATTERISTICI.....</u>	<u>14</u>
<u>7.</u>	<u>PARAMETRI SISMICI.....</u>	<u>16</u>
<u>8.</u>	<u>CEDIMENTI POST-SISMICI.....</u>	<u>23</u>
<u>9.</u>	<u>VALUTAZIONE DELLA LIQUEFACIBILITA' DEI TERRENI</u>	<u>25</u>
<u>10.</u>	<u>ALLEGATI</u>	<u>31</u>

1. PREMESSA

Su incarico della Committenza, il Comune di Vigarano Mainarda con sede in via Municipio 1 - 44049 Vigarano Mainarda, Ferrara, la scrivente ha eseguito una campagna di indagini geognostiche finalizzata alla caratterizzazione geologica e sismica del terreno dei terreni su cui verrà edificato il Nuovo Polo Scolastico del Comune di Vigarano.

Per la stesura della seguente relazione e per l'esecuzione delle relative indagini in situ e prove di laboratorio, si sono seguite le disposizioni delle seguenti normative:

O.P.C.M. 20.03.2003 n°3274 *“Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”* e O.P.C.M 2.10.2003 n° 3316, *“Modifiche ed integrazioni all' n°3274 O.P.C.M. del 20.03.2003”* ;

D.M. 14.01.2008 *“Nuove norme tecniche per le costruzioni”*;

Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16 c. 1, della L.R. 20/2000 per *“Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica”*;

Associazione Geotecnica Italiana: *“Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - 1977”*;

Associazione Geotecnica Italiana: *“Raccomandazioni sull'esecuzione delle prove di laboratorio geotecnico – 1994”*;

Associazione Geotecnica Italiana: *“Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica, Linee Guida – 2005”*;

Varie norme di prova ASTM, UNI, CNR, DIN e BS, richiamate nei relativi certificati di prova allegati.

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA

L'area oggetto di indagine è ubicata a nord – est dell'abitato di Vigarano Mainarda, tra le vie L. Ariosto, P. Borsellino e Amendola, come mostrato dalla figura 1, e si estende su di una superficie di oltre un ettaro, per circa 13000 m².

Le coordinate geografiche del sito, e che verranno utilizzate per la valutazioni sismiche sono:

44.846215 ° N - 11.499655 ° E (WGS 84) = 44.847144° N – 11.50065° E (ED50)



Figura 1: Foto aerea di via Ariosto, Vigarano Mainarda (FE).

3. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

Da un punto di vista geologico il territorio del ferrarese fa parte del più ampio bacino subsidente padano, formatosi dall'interazione delle dinamiche di deposizione fluvio-palustre, lagunari, deltizie e marine. I depositi alluvionali dello spessore di qualche migliaio di metri, poggiano su falde geologiche profonde, che sono le propaggini settentrionali dell'Appennino emiliano-romagnolo. Il paesaggio della bassa Pianura Padana è infatti dominato dalle dinamiche fluviali. Le divagazioni del fiume Po e dei suoi affluenti, nonché dei fiumi appenninici, hanno colmato di sedimenti il bacino padano.

La topografia di questa parte della pianura degrada lievemente da ovest verso est, fino alla linea di costa, alternando alti topografici con sedimenti sabbiosi depositati lungo le aste fluviali a depressioni con sedimenti più fini, limoso-argillosi, formati da acque stagnanti, quali quelle delle paludi e dei meandri abbandonati.

I dislivelli topografici tra questi due famiglie di depositi sono limitati a pochi metri, e anche se ancora percepibili, modificati dall'attività dell'uomo.

La stessa viabilità interurbana, come il collocamento dei centri abitati scelto dai loro antichi fondatori, sfrutta il naturale rilievo degli alvei abbandonati, come anche la suddetta SS 255, che proprio nei pressi dell'abitato di Vigarano Mainarda corre lungo l'antico tracciato del fiume Reno, il quale è responsabile dei depositi sabbiosi che si rinvencono nei primi metri del sottosuolo.

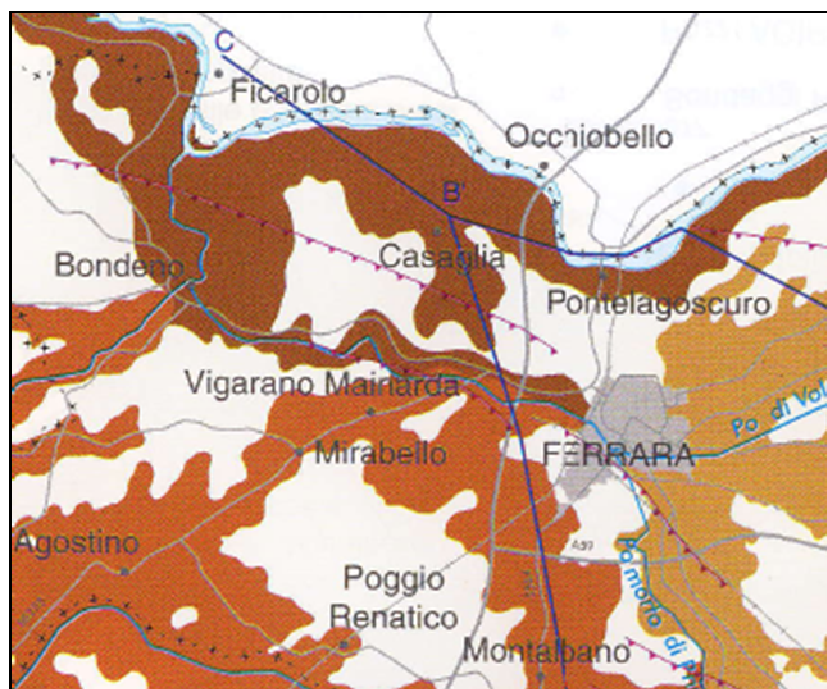


Figura 2: carta dei depositi fluviali del ferrarese.

La figura 2 evidenzia in marrone, i depositi sabbiosi fluviali recenti, sede dell'acquifero più superficiale.

In marrone più scuro sono rappresentate le sabbie depositate del ramo principale del Po e del Po di Volano.

In tonalità intermedia invece sono rappresentati i depositi dei fiumi appenninici ed in particolare, lungo la direttrice Sant Agostino – Vigarano Mainarda, del fiume Reno. Le aree più chiare rappresentano i depositi più fini indifferenziati.

L'Appennino settentrionale è una catena a falde (Fig. 3) formata dal corrugamento di prismi di rocce sedimentarie, depositi nel paleo-oceano ligure-piemontese e sul margine continentale della microplacca dell'Adria, durante la collisione tra la placca africana e quella europea. L'orogenesi dell'Appennino comincia con la fase eo-mesoalpina, durante l'Eocene medio (45 MA), e si sviluppa soprattutto a partire dall'Oligocene (30 MA). Più nel dettaglio, si osserva che le successioni geologiche sono deformate da pieghe e

sovrascorrimenti lungo faglie inverse con trasporto generale verso nord-est. L'inizio della formazione di queste strutture è databile al Tortoniano (10-8 MA).

I sovrascorrimenti e le pieghe più antichi, affioranti nel medio e alto Appennino romagnolo, sono ritagliati da faglie estensionali, in generale orientate parallelamente all'asse della catena e probabile propagazione verso nord-est della distensione del versante tirrenico della catena. Il fronte della catena vero e proprio non coincide con il margine morfologico appenninico-padano ma è identificabile con l'alto strutturale della dorsale ferrarese, sepolta dai sedimenti della Pianura padana, dove il fronte appenninico sovrascorre sulla placca padano-veneta. Il sollevamento dell'Appennino, tuttora attivo, è dovuto probabilmente ai sovrascorrimenti che determinano raddoppi del basamento cristallino, il cui tetto è individuato ad una profondità di circa 8 km nella parte alta della catena e a circa 12 km in prossimità del margine morfologico appennino-padano.

La formazione della coltre alluvionale dell'attuale pianura padana ha inizio alla fine del Pliocene e prosegue fino ai giorni nostri con la combinazione dei fenomeni deposizionali e della subsidenza.

Il complesso plio-quadernario è costituito da un'alternanza di strati sabbiosi con strati limoso-argillosi, variamente ondulati, con frequenti passaggi laterali di facies.

Gli spessori delle colti alluvionali che ricoprono le falde appenniniche sepolte, vanno dai circa 150 metri della dorsale ferrarese (Casaglia) ai 3000 metri. Nella reale comacchiese la potenza della coltre sedimentaria plio-quadernaria è circa 2000 – 3000 metri.

La subsidenza è un importante e caratteristico fenomeno della bassa pianura Padana. In effetti si tratta di un fenomeno che in tutto il territorio ha avuto molta rilevanza e prodotto anche notevoli danni. Nella fascia costiera, come è noto, provoca un arretramento delle spiagge, aumentando la pericolosità delle mareggiate, produce una maggior risalita del cuneo salino nei fiumi e l'infiltrazione nelle falde acquifere di acque del mare (ERSA, 1978; Montori, 1983). Le più recenti misure altimetriche indicano valori medi di abbassamento del suolo intorno a 1 cm/anno nel periodo 1987-1999 per la costa cesenate, ravennate e ferrarese. Anche nell'entroterra, d'altronde, e quindi anche nel territorio comunale, esso rappresenta un importante fattore di rischio. Infatti, a causa delle basse pendenze in gioco, esso ostacola il deflusso delle acque superficiali, alterando il profilo longitudinale degli alvei fluviali e, soprattutto, dei canali di scolo e dei collettori fognari; modifica inoltre i dislivelli che gli impianti idrovori debbono vincere per avviare le acque verso mare, ostacola l'irrigazione e riduce i franchi di coltivazione.

I fenomeni di subsidenza accertati nel territorio comunale sono di carattere sia naturale che artificiale.

Con il termine di subsidenza naturale, vengono comprensivamente indicati tutti quei movimenti di abbassamento del suolo imputabili a cause naturali; nel territorio in esame tali cause consistono sia nel costipamento dei sedimenti più recenti, sia nella risposta isostatica della crosta al variare dei carichi superficiali (soprattutto depositi sedimentari) o comunque in movimenti di neotettonica.

Va ricordato, d'altronde, che, a sud dell'attuale posizione del fiume Po, l'orogene appenninico continua, sotto la Pianura Padana, nelle pieghe dell'Appennino sepolto (Pieri, Groppi, 1981; CNR, 1992), e che il territorio comunale si sviluppa interamente su tale orogene; a nord è invece presente una omoclinale che arriva ai piedi delle Alpi.

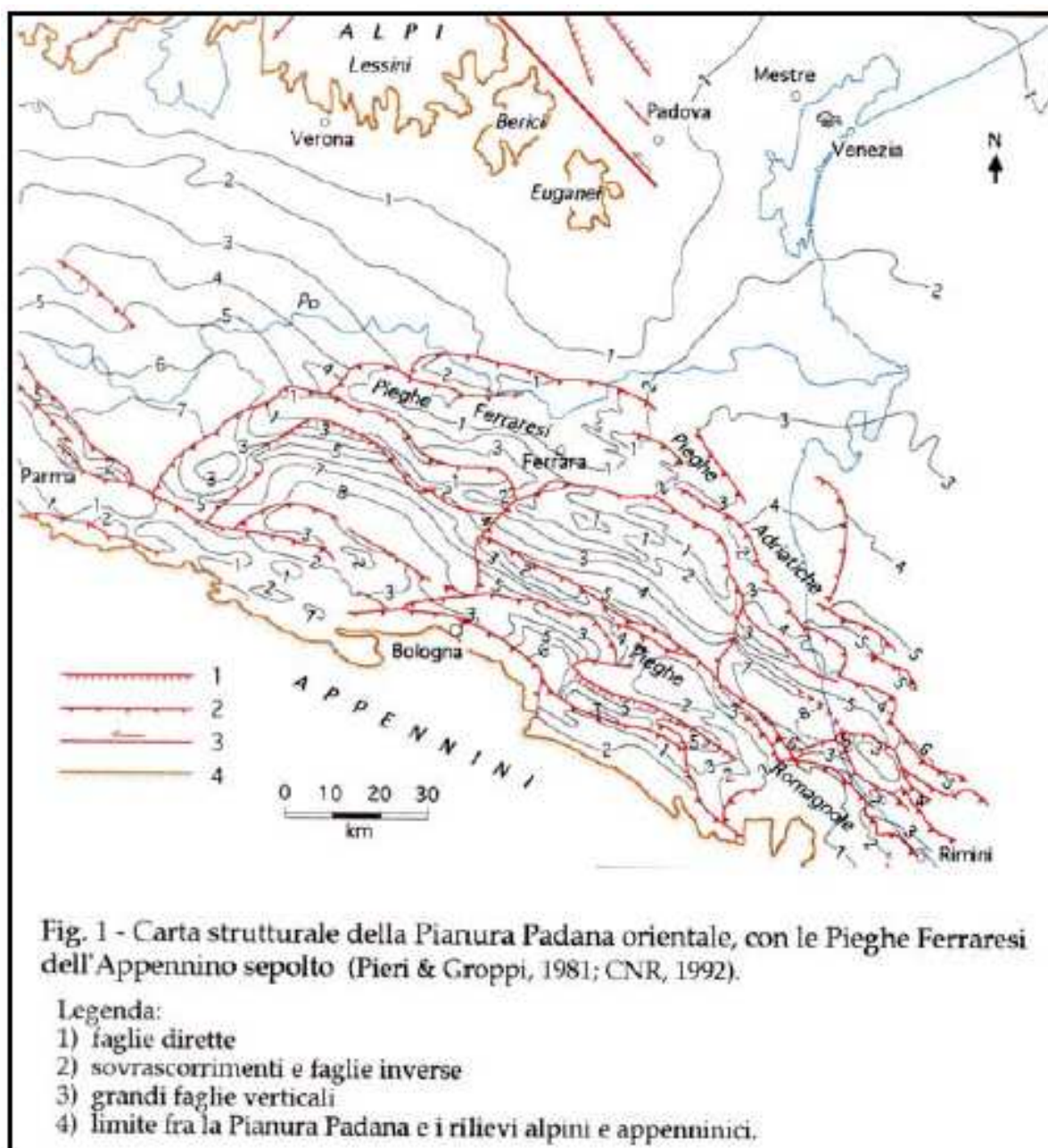


Figura 3: carta strutturale della Pianura Padana.

La forma di tale substrato in generale condiziona i tassi di costipamento dei terreni sovrapposti, producendo una loro attenuazione nelle zone corrispondenti agli alti strutturali sepolti; il substrato stesso, inoltre, è ancora sottoposto a movimenti sia orizzontali che verticali.

Vengono comunemente indicati col termine di «subsidenza artificiale» o «antropica», i fenomeni di abbassamento del suolo imputabili a varie attività dell'uomo.

Nella Pianura Padana orientale questi abbassamenti per subsidenza hanno avuto ed hanno anche attualmente una notevole importanza. E' evidente, ad esempio, che essi stanno alla base dell'attuale assetto altimetrico della sua fascia orientale, che comprende un'area di oltre 2300 Km² al di sotto del livello medio del mare.

Essi sono riconducibili soprattutto all'estrazione di fluidi dal sottosuolo: un caso classico è rappresentato dalla estrazione di metano misto ad acqua attuata nel Polesine e nel settore nord-orientale del Ferrarese, fra il 1938 e il 1964, da strati del Quaternario di profondità generalmente inferiori ai 200 m.

3.1 SISMICITA'

I sovrascorrimenti delle falde profonde appenniniche sono ancora attivi, e sono la zona di origine dei terremoti, i cui ipocentri sono collocati tra i 5 e gli 8 km di profondità, e con meccanismo di fagliazione prevalentemente compressivo.

La sismicità dell'Emilia Romagna può essere definita media relativamente alla sismicità nazionale, poiché i terremoti storici hanno avuto magnitudo massima compresa tra 5,5 e 6 della scala Richter e intensità del IX-X grado della scala MCS. I maggiori terremoti (Magnitudo > 5,5) si sono verificati nel settore sud-orientale, in particolare nell'Appennino Romagnolo e lungo la costa riminese. Altri settori interessati da sismicità frequente ma generalmente di minore energia (Magnitudo < 5,5) sono il margine appenninico-padano tra la Val d'Arda e Bologna, l'arco della dorsale ferrarese e il crinale appenninico.

I maggiori terremoti occorsi in epoca storica nel ferrarese sono stati il terremoto di Ferrara del 1346 e con una intensità di 7.5 gradi della scala Mercalli, stimata di magnitudo 5,81 della scala Richter; ed il terremoto del Emilia orientale del 1796 con una intensità di 7.0 gradi della scala Mercalli, stimata di magnitudo 5,63 della scala Richter.

Tali eventi storici sono perfettamente congruenti con i recenti sismi del 20 e 29 maggio 2012, che confermano l'intensità sismica dell'areale emiliano romagnolo.

Nella tabella sottostante sono riportati i terremoti più intensi verificatisi in un raggio di 50 chilometri dal baricentro del sito oggetto di studio, come registrati nel Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2004.

Anno	Areale	Lat	Lon	Maw	Io
1346	Ferrara	44.920	11.020	5.81	75
1796	Emilia orientale	44.620	11.670	5.63	70
1929	Bolognese	44.470	11.130	5.55	70
1570	Ferrara	44.820	11.630	5.48	75
1505	Bologna	44.480	11.250	5.47	70
1624	Argenta	44.650	11.850	5.43	75
1399	Modenese	44.470	11.070	5.4	70
1455	Bolognese	44.400	11.250	5.37	75
1455	Media valle del Reno	44.420	11.270	5.18	70

La il territorio del comune di Vigarano Mainarda è classificato secondo l'OPCM 3274 del 20.03.2003, in zona 3, le cui azioni sismiche sono governate dalle accelerazioni riportate nella tabella sottostante.

ZONA	a _g = accelerazione orizzontale massima su suolo di categoria A
1	0,35 g
2	0,25 g
3	0,15 g
4	0,05 g

Tale classificazione ora è utilizzata solo a fini amministrativi per la pianificazione territoriale.

Per la definizione dei parametri sismici di progetto verrà utilizzata la carta della pericolosità sismica dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

4. PIANO DELLE INDAGINI

Sulla base della normativa vigente e delle relative informazioni geotecniche e sismiche necessarie ad una sufficiente modellazione dei terreni oggetto di indagine è stato eseguito il seguente piano di indagini:

n.° 1 prova penetrometrica statica con sismocono a 31 metri di profondità;

n.° 4 prova penetrometrica statica con piezocono a 30 metri di profondità,



Figura 4: Ubicazione prove penetrometriche.

4.1 PENETROMETRIA STATICA CON PIEZOCONO E SISMOCONO

La prova penetrometrica è stata eseguita utilizzando un penetrometro GeoMill da 200 kN di spinta massima, dotato di punta elettrica, montato su autocarro Mercedes Unimog 4 X 4.

La prova SCPTU (S = Seismic; CPT = Cone Penetration Test; U = con misura della pressione neutra U) consiste, come per le prove CPTU standard, nell'infissione nel terreno del piezocono per la misura, ogni 2 cm, dei classici parametri q_c (resistenza di punta), f_s (resistenza laterale) ed U (pressione neutra).

Ad ogni metro di profondità (od eventualmente a profondità prestabilite a seconda delle necessità progettuali) viene sospesa l'infissione del piezocono ed a piano campagna, tramite adeguato sistema di energizzazione, vengono generate delle vibrazioni artificiali nel terreno.

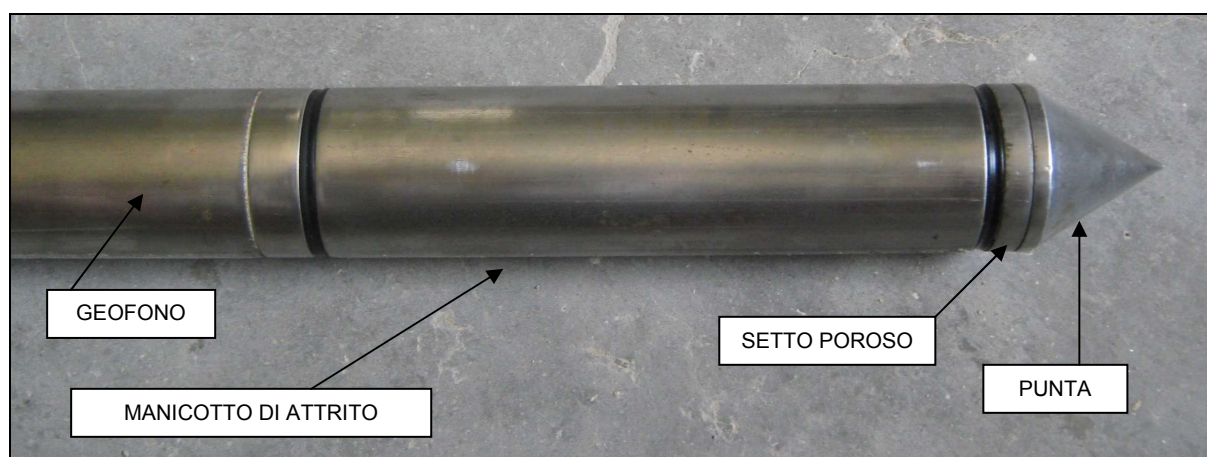
Tramite i sensori sismici (geofoni) presenti all'interno del piezocono ed adeguato acquisitore sismico è possibile quindi rilevare e registrare tali segnali sismici e di conseguenza determinare i tempi necessari alle onde sismiche per percorrere il tratto da piano campagna fino alla profondità a cui si trova il piezocono (tempi di arrivo).

Grazie alla presenza di tre geofoni o accelerometri disposti all'intero del piezocono lungo le tre direzioni X, Y e Z ed al tipo di sistema di energizzazione utilizzato è possibile discriminare nei sismogrammi i segnali generati dalle onde di taglio S e dalle onde di compressione P (solo in terreni privi di falda freatica).

Ottenuti i tempi di arrivo è possibile quindi calcolare la velocità di propagazione delle onde S e P. La prova penetrometrica statica SCPTU consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta elettrica dotata di piezocono, di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ($V = 2 \text{ cm/s} \pm 0.5 \text{ cm/s}$).

La punta sismica è una punta penetrometrica elettrica dotata, oltre che dei geofoni succitati, di un trasduttore di pressione per la misura della pressione interstiziale dei pori, cioè il carico idraulico istantaneo presente nell'intorno della punta. La pressione dell'acqua interstiziale del terreno viene trasmessa al trasduttore attraverso un filtro, che è posto tra la base dell'estremità conica della punta ed il manicotto di attrito.

La penetrazione avviene attraverso un dispositivo di spinta, che agisce su una batteria di aste (aste cave con il cavo di trasmissione dati all'interno), alla cui estremità inferiore è collegata la punta con piezocono.



Lo sforzo necessario per l'infissione viene determinato a mezzo di un opportuno sistema di misura estensimetrico collegato alla punta ed al manicotto dell'attrito laterale, e da un trasduttore di pressione che registra le pressioni dell'acqua di falda durante l'infissione della punta, attraverso un setto poroso opportunamente saturato e disareato.

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

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

- diametro di base del cono $f = 35.7 \text{ mm}$
- area della punta conica $A_p = 10 \text{ cm}^2$
- angolo apertura del cono $B = 60^\circ$
- superficie laterale manicotto $A_m = 150 \text{ cm}^2$

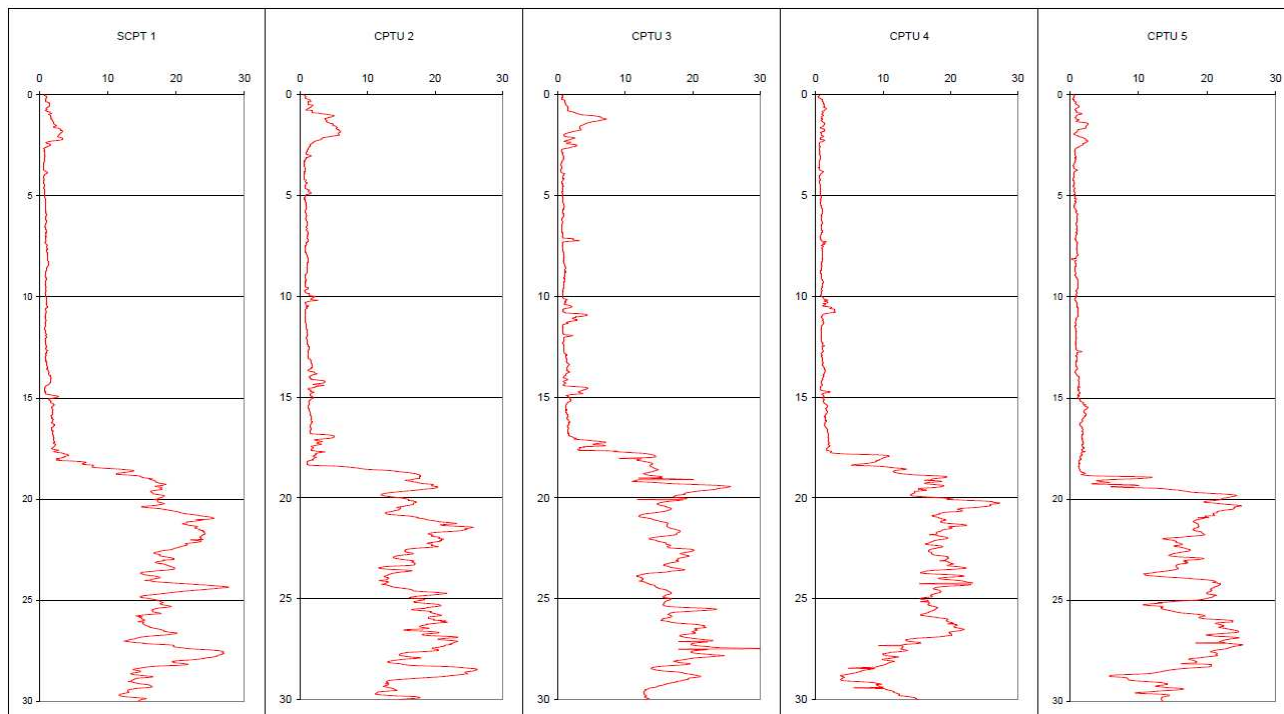
Nei diagrammi e tabelle allegate sono riportati i seguenti valori di resistenza (rilevati dalle letture di campagna, durante l'infissione dello strumento):

- $q_c \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ = resistenza alla punta (conica);
- $f_s \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ = resistenza laterale (manicotto);
- $U \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ = pressione dei pori (setto poroso);
- $f_s/q_c \text{ (\%)}$ = rapporto attrito laterale / resistenza alla punta;
- $\Delta U/q_c$ = variazione pressione dei pori in funzione della resistenza alla punta.

Oltre all'elaborazione dei valori di resistenza del sottosuolo, vengono fornite utili informazioni per il riconoscimento di massima dei terreni attraversati (stratigrafia), in base al rapporto q_c/f_s fra la resistenza alla punta e la resistenza laterale del penetrometro, ovvero in base ai valori di q_c e del rapporto $FR = (f_s/q_c) \%$.

Sempre con riferimento alle prove penetrometriche statiche con piezocono CPTU, nelle tavole allegate sono riportate indicazioni concernenti i principali parametri geotecnici (coesione non drenata C_u , angolo di attrito interno efficace, densità relativa D_r , peso di volume Y , ecc).

5. CARATTERI STRATIGRAFICI DEL SITO



Nella figura sopra riportata viene rappresentato il grafico di resistenza alla punta ricavato dalle prove penetrometriche eseguite. Nel grafico l'approfondimento della prova viene rappresentato sull'asse delle ascisse in metri, mentre in ordinata la resistenza alla punta espressa in MPa.

Valori bassi di resistenza alla punta solitamente indicano la presenza di terreni fini (argille e limi), mentre i valori più alti (oltre i 3/5 MPa) indicano la presenza di terreni sabbiosi.

Le cinque penetrometrie mostrano un'ottima concordanza ed omogeneità dei terreni incontrati.

Escludendo i primi 2 / 3 metri di terreno, composto da argille limose indurite dall'essiccamento e dall'azione antropica (calpestio, passaggio di automezzi, rullature, ecc.), sinteticamente i terreni incontrati si possono dividere nei tre seguenti gruppi:

1. da – 2.50 a – 17.00/18.00 m argille limose;
2. da – 18.00 a – 31.00 m sabbie limose probabilmente wurmiane

La profondità della falda è stata rilevata nei fori di prova della penetrometrica come indicato nella tabella sottostante.

Punto di rilievo	Profondità da p.c. (m)	Data rilievo
SCPTU 1	– 4.50 m	05.12.2012
CPTU 2	– 4.00 m	05.12.2012
CPTU 3	– 5.50 m	06.12.2012
CPTU 4	– 4.10 m	06.12.2012
CPTU 5	– 2.40 m	05.12.2012

6. PARAMETRI GEOTECNICI: VALORI CARATTERISTICI

L'Eurocodice 7 definisce il valore caratteristico di una particolare grandezza del terreno nel seguente modo: " Il valore caratteristico di un parametro geotecnico sarà scelto come stima cautelativa del valore che influenza l'insorgere dello stato limite".

L'approccio che si segue in questo lavoro per la stima dei valori caratteristici è quello statistico suggerito dall'EC7. In particolare , essendo previste fondazioni superficiali a platea, siamo in presenza di struttura rigida che agisce su di un volume di terreno grande, e quindi all'interno delle singole unità stratigrafiche individuate si può ipotizzare una compensazione spaziale e strutturale dei carichi da punti di debolezza a punti di maggiore resistenza. Perciò i valori caratteristici verranno selezionati come 5° percentile della distribuzione della media.

La distribuzione del valor medio, nel caso di distribuzione normale, viene calcolata utilizzando la 't' di Student ad n-1 gradi di libertà ed ipotizzando che la media del campione coincida con la media della popolazione, usando la seguente relazione:

Dove:

x_k è il valore caratteristico desiderato;

\bar{x} con barra il valore medio (ignoto) della popolazione, ipotizzato essere uguale al valore medio del campione.

Ipotesi che si ritiene corretta dato l'alto numero di campioni che si ottengono dalla prova penetrometrica elettrica (1 ogni 2 centimetri);

t è il valore della distribuzione di student ad n-1 gradi di libertà con probabilità $u = 95\%$ (ossia, $1-a = 0.95$ o alternativamente, $a = 0.05$)

s è la deviazione standard del campione

n il numero di dati.

Come si può notare, la grande mole di dati che si ricavano da un penetrometria elettrica (10 volte quella meccanica) rende il metodo statistico più affidabile, e consentono di ottenere valori caratteristici prossimi alla media, cioè non eccessivamente cautelativi.

Un altro vantaggio dato da un numero di dati sufficientemente elevato è la coincidenza di valori ricavata da una distribuzione normale rispetto una distribuzione lognormale.

Le tabelle sottostanti riportano i valori caratteristici dei parametri geotecnici. Detti parametri sono calcolati sulla base delle correlazioni proposte da P. K. Robertson in "Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering" (3rd edition, 2009).

Molta cautela va posta nell'utilizzare i parametri geotecnici ricavati dalle penetrometrie in terreni non saturi. Le correlazioni di letteratura per la stima di detti parametri sono scarsamente attendibili in assenza di falda.

SCPTU 1, CPTU 2 - 3 - 4 - 5	UNITA' INSATURA SOVRACONSOLIDATA	UNITA' 1 ARGILLE E LIMI	UNITA' 2 SABBIE E LIMI
Limite sup. (m)	0.0	2.5	18.0
Limite inf. (m)	2.5	18.0	30
γ (Mg/m ³)	1.86	1.88	1.97
media dati	1.86	1.88	1.97
dev. Stand	0.00	0.01	0.04
n° dati	86	2970	3686
Cu (kPa)	67	56	-
media dati	72	57	-
dev. Stand	26	19	-
n° dati	86	2970	-
Φ (°)	-	-	35.1
media dati	-	-	35.2
dev. Stand	-	-	5.6
n° dati	-	-	3686
G ₀ (Mpa)	29.8	40.8	177.5
media dati	31.8	41.1	179.2
dev. Stand	10.9	10.8	61.8
n° dati	86	2970	3686
M (MPa)	14.0	6.8	154.2
media dati	15.0	7.0	156.3
dev. Stand	5.5	4.3	78.9
n° dati	86	2970	3686
Eu (MPa)	39.0	28.2	134.5
media dati	42.4	28.8	135.8
dev. Stand	18.6	19.1	45.6
n° dati	86	2970	3686
Dr (%)	-	-	58.5
media dati	-	-	59.6
dev. Stand	-	-	37.8
n° dati	-	-	3686
OCR	5.4	1.6	-
media dati	6.0	1.6	-
dev. Stand	2.8	0.5	-
n° dati	86	2970	-

7. PARAMETRI SISMICI

7.1. CATEGORIA SISMICA DEL SOTTOSUOLO

L'NTC 2008 ha cambiato l'approccio alla valutazione del rischio sismico, introducendo la necessità della sua valutazione in funzione del sito.

La Vs30, cioè la velocità delle onde di taglio nei primi trenta metri di sottosuolo, è il parametro che classifica la risposta sismica del sottosuolo in funzione della stratigrafia presente nel sito.

La Vs30 è stata determinata attraverso misura diretta della velocità delle onde di taglio, ed è risultata essere di **194 m/s** che consente di attribuire al **sottosuolo la categoria sismica "C"**.

7.2. AZIONE SISMICA

La categoria di suolo sismico consente di definire l'amplificazione sito dipendente che un sisma di riferimento può sviluppare, la pericolosità sismica del sito fornisce le intensità delle azioni sismiche da attendersi.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR nel periodo di riferimento V_R .

Nell'NTC 2008 le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

a_g : accelerazione orizzontale massima al sito;

F_0 : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T^*C : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella successiva tabella.

Stati Limite		P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

I suddetti parametri si possono ricavare dalla mappa della pericolosità sismica realizzata dall'INGV, e che si compone di una maglia di 16000 punti i cui essi sono definiti, attraverso la media pesata alle coordinate geografiche del sito in esame rispetto ai vertici della maglia entro cui esso si trova.

Il periodo di riferimento VR è dato da: $VR = VN \times CU$

Dove VN è la vita nominale di un'opera strutturale, intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata, ed è definita dalla tabella sottostante.

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

CU è il valore del coefficiente d'uso, definito al variare della classe d'uso come indicato nella sottostante tabella.

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

Quale che sia la probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR considerata, lo spettro di risposta elastico in accelerazione, della componente orizzontale, è definito dalle espressioni seguenti:

$$\begin{aligned} 0 \leq T < T_B & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\ T_B \leq T < T_C & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \\ T_C \leq T < T_D & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\ T_D \leq T & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right) \end{aligned}$$

nelle quali T ed S_e sono, rispettivamente, periodo di vibrazione ed accelerazione spettrale orizzontale.

Inoltre:

S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione seguente

$$S = SS \times ST,$$

essendo SS il coefficiente di amplificazione stratigrafica e ST il coefficiente di amplificazione topografica;

η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ diversi dal 5%, mediante la relazione

$$\eta = 10 / (5 + \xi)^3 \cdot 0,55$$

dove ξ (espresso in percentuale) è valutato sulla base di materiali, tipologia strutturale e terreno di fondazione;

F_0 è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale, ed ha valore minimo pari a 2,2;

T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, dato da

$$T^*C = CC \cdot T_C,$$

dove T^*C è definito al § 3.2 delle NTC e CC è un coefficiente funzione della categoria di sottosuolo ;

T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante,

$$T_B = T_C / 3,$$

T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, espresso in secondi mediante la relazione:

$$T_D = 4,0 \cdot \frac{a_g}{g} + 1,6.$$

L'amplificazione stratigrafica è definita dai coefficienti S_s e C_c , per le varie categorie di suolo sismico come riportato nella tabella sottostante.

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Mentre l'amplificazione topografica è dimensionata secondo le seguenti tabelle.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Con la definizione delle componenti spettrali ricavata dalle correlazioni sito dipendenti, si possono così calcolare i valori dello spostamento orizzontale d_g e della velocità orizzontale v_g massimo dalle seguenti espressioni:

$$d_g = 0,025 \times a_g \times S \times TC \times TD$$

$$v_g = 0,16 \times a_g \times S \times TC$$

7.3. PARAMETRI DELL'AZIONE SISMICA

Dalla mappa della pericolosità sismica dell'INGV, considerando:

vita nominale dell'opera, $V_n = 50$ anni;

Classe d'uso, $C_u = III$ (scuola);

vita di riferimento, $V_r = 75$ anni

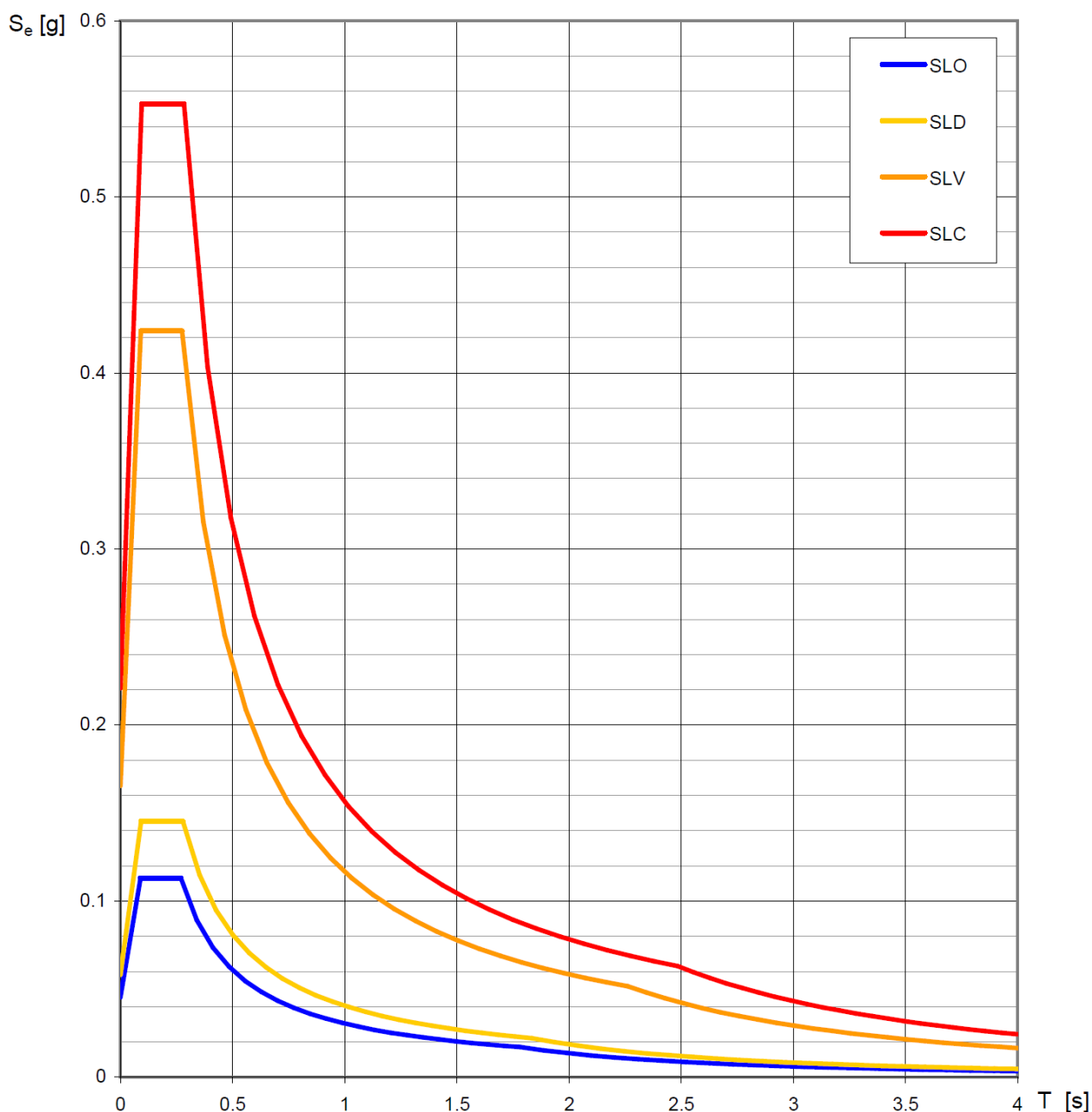
si ricavano i seguenti parametri dell'azione sismica per ciascuna delle verticali indagate:

Valori dei parametri a_g , F_o , T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno SL

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	45	0.045	2.495	0.269
SLD	75	0.058	2.493	0.279
SLV	712	0.165	2.563	0.275
SLC	1462	0.221	2.502	0.283

Gli spettri elastici che si ricavano dai suddetti parametri al substrato di riferimento e per i diversi Stati Limite sono i seguenti:

Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite



In particolare per gli SLD e SLV per il suolo di categoria "C":

Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite: SLD

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLD
a_g	0.058 g
F_o	2.493
T_C^*	0.279 s
S_S	1.500
C_C	1.600
S_T	1.000
q	1.000

Parametri dipendenti

S	1.500
η	1.000
T_B	0.149 s
T_C	0.446 s
T_D	1.833 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_e(T)$ sostituendo η con $1/q$, dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.087
$T_B \leftarrow$	0.149	0.218
$T_C \leftarrow$	0.446	0.218
	0.512	0.190
	0.578	0.168
	0.644	0.151
	0.710	0.137
	0.776	0.125
	0.843	0.115
	0.909	0.107
	0.975	0.100
	1.041	0.093
	1.107	0.088
	1.173	0.083
	1.239	0.079
	1.305	0.075
	1.371	0.071
	1.437	0.068
	1.503	0.065
	1.569	0.062
	1.635	0.059
	1.701	0.057
	1.767	0.055
$T_D \leftarrow$	1.833	0.053
	1.936	0.048
	2.039	0.043
	2.143	0.039
	2.246	0.035
	2.349	0.032
	2.452	0.030
	2.555	0.027
	2.659	0.025
	2.762	0.023
	2.865	0.022
	2.968	0.020
	3.071	0.019
	3.174	0.018
	3.278	0.017
	3.381	0.016
	3.484	0.015
	3.587	0.014
	3.690	0.013
	3.794	0.012
	3.897	0.012
	4.000	0.011

Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite: SLV**Parametri indipendenti**

STATO LIMITE	SLV
a_g	0.165 g
F_o	2.563
T_C^*	0.275 s
S_S	1.446
C_C	1.608
S_T	1.000
q	1.000

Parametri dipendenti

S	1.446
η	1.000
T_B	0.147 s
T_C	0.442 s
T_D	2.262 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_e(T)$ sostituendo η con $1/q$, dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.239
$T_B \leftarrow$	0.147	0.613
$T_C \leftarrow$	0.442	0.613
	0.529	0.512
	0.616	0.440
	0.702	0.386
	0.789	0.344
	0.875	0.310
	0.962	0.282
	1.049	0.258
	1.135	0.239
	1.222	0.222
	1.309	0.207
	1.395	0.194
	1.482	0.183
	1.569	0.173
	1.655	0.164
	1.742	0.156
	1.828	0.148
	1.915	0.142
	2.002	0.135
	2.088	0.130
	2.175	0.125
$T_D \leftarrow$	2.262	0.120
	2.344	0.112
	2.427	0.104
	2.510	0.097
	2.593	0.091
	2.676	0.086
	2.758	0.081
	2.841	0.076
	2.924	0.072
	3.007	0.068
	3.089	0.064
	3.172	0.061
	3.255	0.058
	3.338	0.055
	3.421	0.052
	3.503	0.050
	3.586	0.048
	3.669	0.046
	3.752	0.044
	3.834	0.042
	3.917	0.040
	4.000	0.038

8. CEDIMENTI POST-SISMICI

La valutazione dei cedimenti post sismici viene eseguita secondo l'allegato 3 dell'atto di indirizzo per la microzonazione sismica in Emilia Romagna (Delibera n. 112, 2 maggio 2007).

Dalle interpretazioni delle prove penetrometriche si individuano come orizzonti suscettibili di cedimenti post-sismici significativi, gli strati di terreno caratterizzati da terreni argillosi con C_u inferiore ai 70 KPa, e da sabbie con N_{SPT} equivalente stimato inferiore a 15 colpi.

Il cedimento di consolidazione post-sismica è dato dall'espressione:

$$\Delta H = \varepsilon_{vr} H$$

Dove: H = altezza dello strato omogeneo;

ε_{vr} = deformazione volumetrica post-ciclica percentuale, dove:

$$\varepsilon_{vr} = (\alpha Cr / (1 + e_0)) \log(1 / (1 - \Delta u / \sigma'_0))$$

α = costante sperimentale variabile da 1 a 1,5;

e_0 = indice dei vuoti iniziale;

Cr = indice di riconsolidazione, che può essere ipotizzato pari a $0,225 \cdot C_c$ (indice di consolidazione);

$\Delta u / \sigma'_0$ = rapporto di pressione interstiziale (aumento di pressione neutra indotta dal sisma di progetto).

Per il calcolo dei cedimenti verranno adottati i seguenti parametri:

α = compreso tra 1 e 1,5;

$e_0 = 1$: indice dei vuoti medio per terreni argilloso limosi con sostanza organica sparsa;

$e_0 = 0.6$: indice dei vuoti medio per terreni sabbioso limosi;

Indici di consolidazione calcolati dal modulo edometrico stimato dalle penetrometrie ($C_c = (1 + e_0) \sigma_{va} / 0,435 M$).

Il calcolo di $\Delta u / \sigma'_0$ (ru) richiede l'esecuzione di alcuni passaggi intermedi.

Determinazione ampiezza della deformazione di taglio massima indotta dal sisma:

$$\gamma_{max} = 0,65 a_{max,s} / g \cdot \sigma_v \cdot rd / G$$

dove:

$a_{max,s}$ = picco di accelerazione al piano campagna del sisma di riferimento;

g = accelerazione di gravità;

σ_v = tensione totale verticale;

rd = coefficiente riduttivo dell'azione sismica = $1 - 0,015 z$;

G = modulo di taglio corrispondente alla deformazione γ_{max} .

$$a_{max,s} = a_{ref,g} S_S S_T = 1.619 * 1.446 * 1 = 2.341 \text{ m/s}^2$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$r_d = 0,850$$

$$G/G_0 = 0.431 \text{ (tabella 3 allegato A3);}$$

essendo G_0 (medio)	(SCPTU 1)	= 36.46 MPa;
	(CPTU 2)	= 39.48 MPa;
	(CPTU 3)	= 39.74 MPa;
	(CPTU 4)	= 36.03 MPa;
	(CPTU 5)	= 34.17 MPa.

Inserendo le grandezze determinate precedentemente l'ampiezza delle deformazioni ricavate della prova penetrometrica è:

$$\text{SCPTU 1 } \gamma_{max} = 1.57 \times 10^{-3}$$

$$\text{CPTU 2 } \gamma_{max} = 1.45 \times 10^{-3}$$

$$\text{CPTU 3 } \gamma_{max} = 1.44 \times 10^{-3}$$

$$\text{CPTU 4 } \gamma_{max} = 1.58 \times 10^{-3}$$

$$\text{CPTU 5 } \gamma_{max} = 1.67 \times 10^{-3}$$

Inserendo i valori di deformazione ricavati nella tabella γ - $\gamma\%$ di (tabella 2 degli atti di indirizzo) si ricava un rapporto di incremento della pressione che varia da circa 0,49 a 0,55.

Utilizzando i parametri sopra riportati, i massimi cedimenti post sismici attesi sulla verticale indagata, per lo spessore di terreno comprimibile, sono quindi stimati in:

SCPTU 1	$\Delta H = \varepsilon_{vr} H =$	0,072 m
CPTU 2	$\Delta H = \varepsilon_{vr} H =$	0,046 m
CPTU 3	$\Delta H = \varepsilon_{vr} H =$	0,053 m
CPTU 4	$\Delta H = \varepsilon_{vr} H =$	0,086 m
CPTU 5	$\Delta H = \varepsilon_{vr} H =$	0,068 m

9. VALUTAZIONE DELLA LIQUEFACIBILITA' DEI TERRENI

La stima del potenziale di liquefazione è stata eseguita con metodi semplificati applicati ai dati alle penetrometrie eseguite, in particolare si è utilizzato il metodo di Robertson e Wride (1998) appositamente calibrato per le prove penetrometriche statiche, e consigliato negli atti di indirizzo per la micro zonazione sismica dell'Emilia Romagna.

Dalla verifica numerica della possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione sono stati escluse le unità argilloso limose incontrate.

L'accelerazione utilizzata per il calcolo del Cyclic Stress Ratio (CSR) è quella ricavata dalla mappa di pericolosità sismica dell'INGV per lo SLV, e corrispondente a 0,165g, mentre la magnitudo del sisma di progetto impiegata nel Magnitudo Scaling Factor (MSF) è 6.14, quella massima della zona sismogenetica 912 cui appartiene la provincia di Ferrara (utilizzando magnitudo di 5.9/5.8 sostanzialmente non mutano le considerazioni finali).

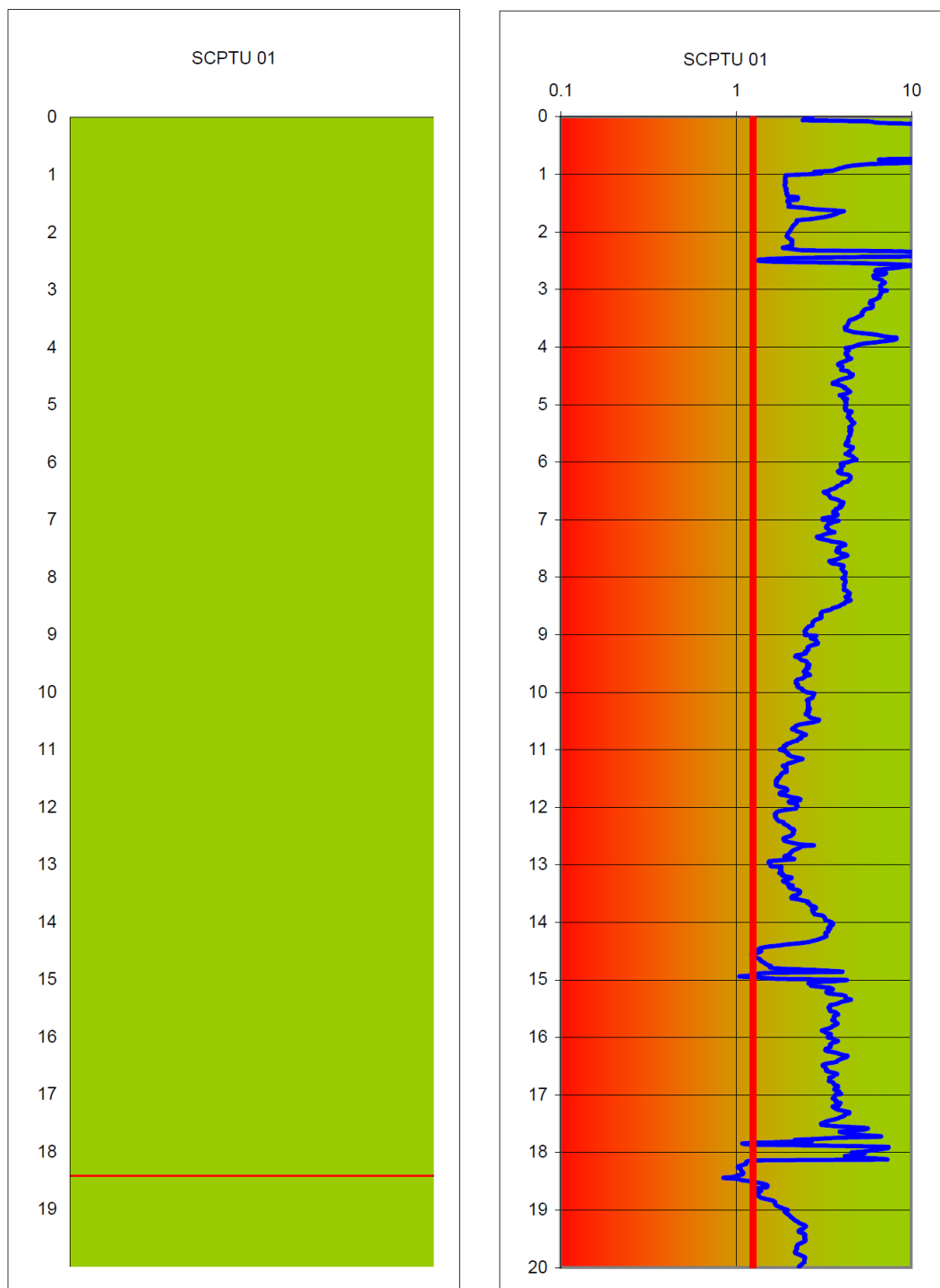
L'indice di liquefazione I_L del terreno (Iwasaki 1982), come da allegato 3 dagli atti di indirizzo della regione Emilia Romagna, è risultato, per le verticali indagate:

SCPTU 1	= 0.003 (basso);
CPTU 2	= 0.119 (basso);
CPTU 3	= 0.328 (basso);
CPTU 4	= 0.174 (basso);
CPTU 5	= 0.052 (basso).

Le cinque penetrometrie mostrano comportamenti simili tra loro. Gli orizzonti in cui FL (fattore di sicurezza alla liquefazione) è inferiore all'unità sono contraddistinti dal colore rosso, e come si può notare nel primo elaborato grafico sono presenti solo rarissimi e trascurabili livelli da centimetrici a decimetrici che mostrano superamenti del fattore di sicurezza unitario alla liquefazione.

Il secondo grafico mostra l'andamento del fattore di sicurezza confrontato con la soglia di attenzione di 1.25 indicata dall'Eurocodice 8. Anche in questo caso i livelli che non raggiungono il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione sono trascurabili, sia come numero che come spessore.

ANDAMENTO DI F_L PER TERREMOTI DI MAGNITUDO 6,14

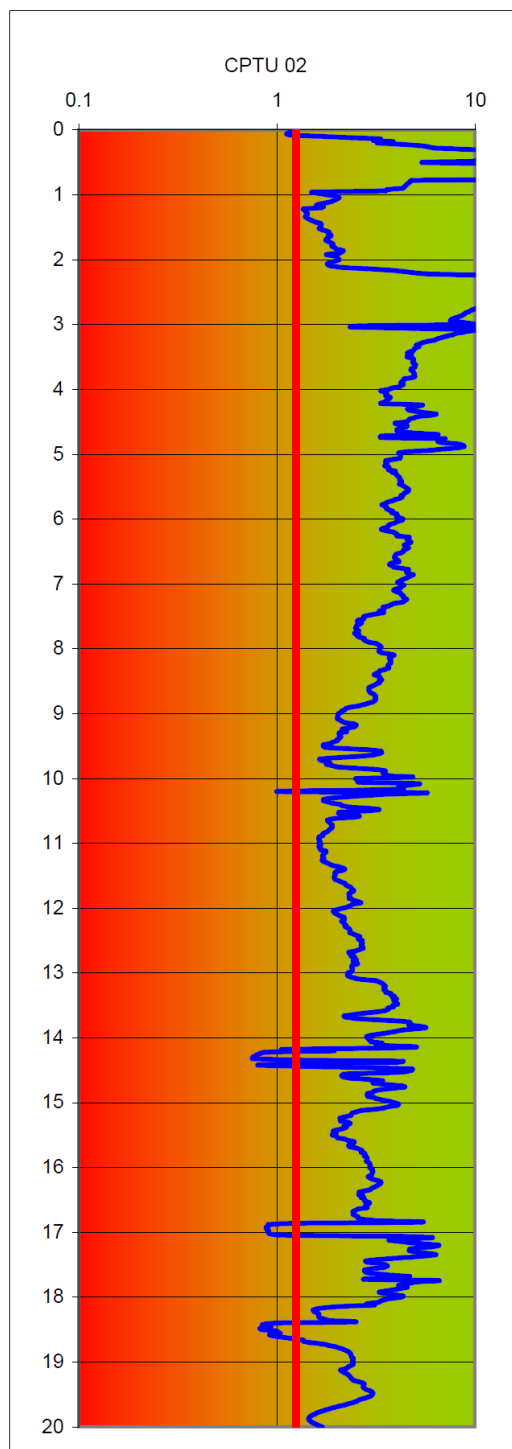
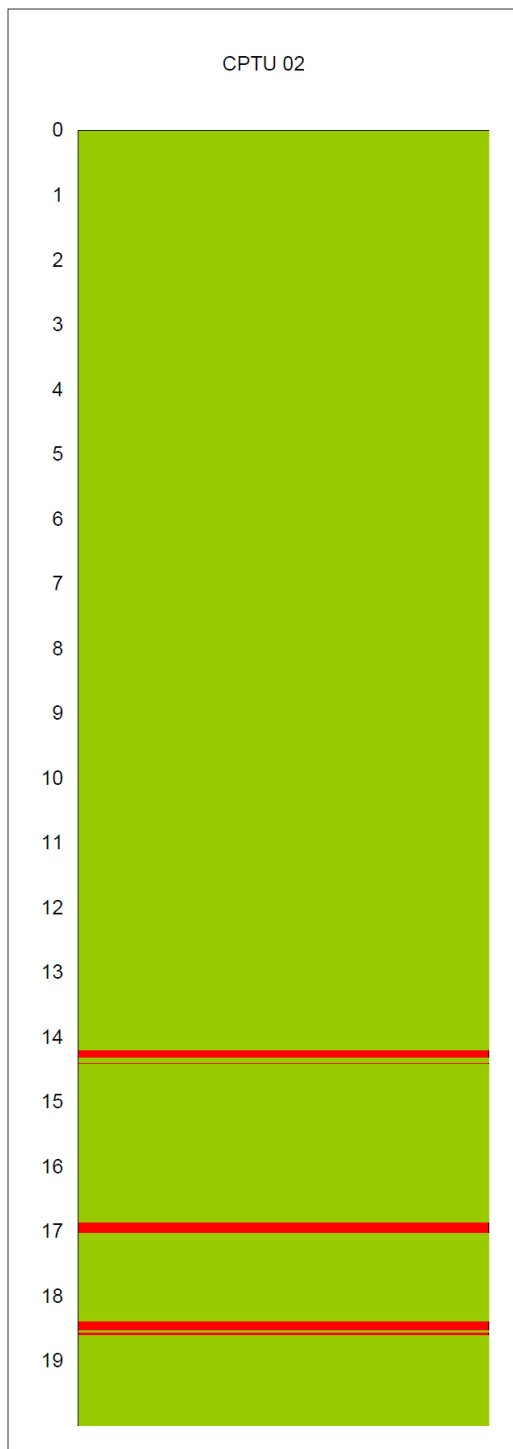


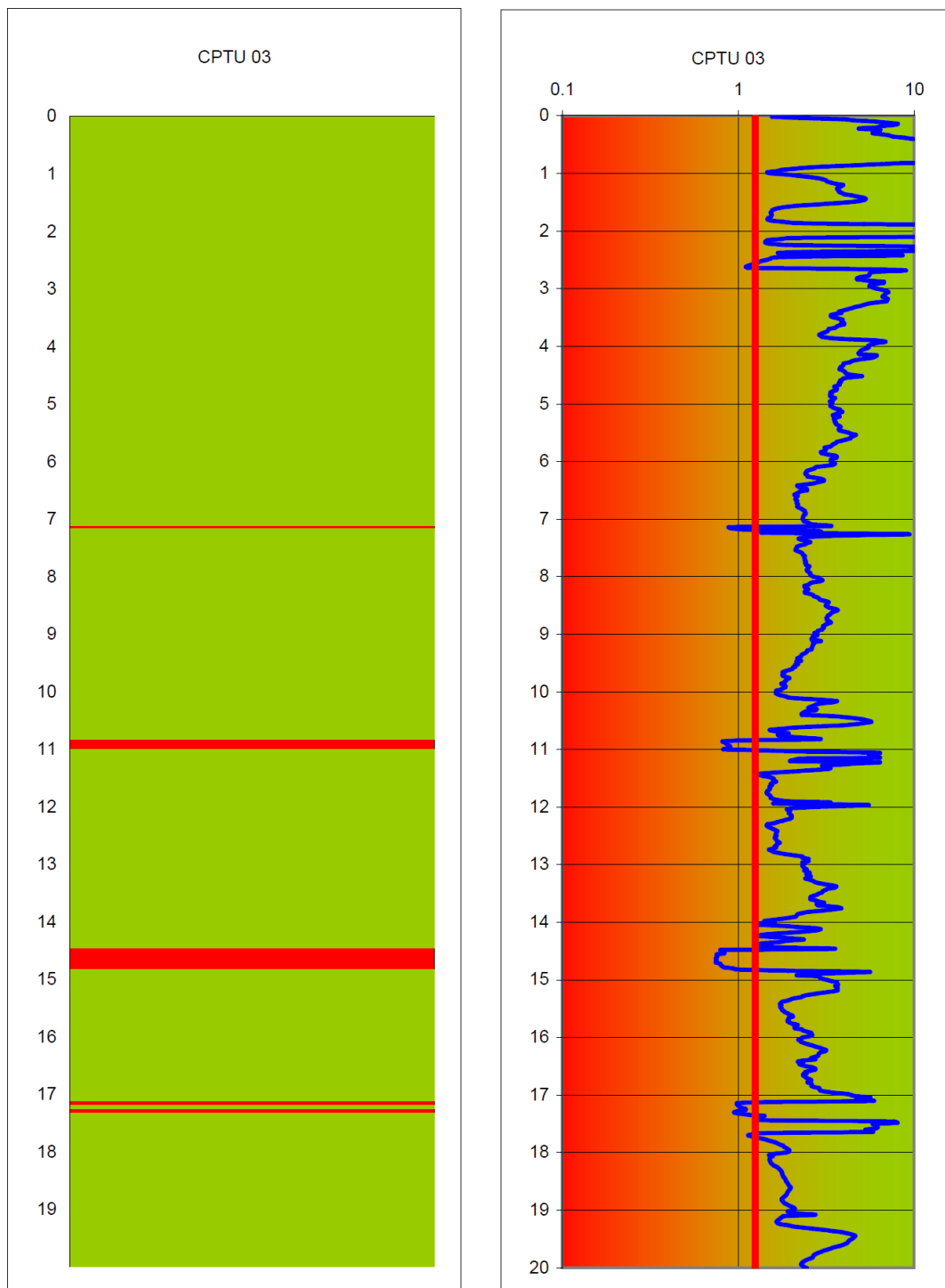
dott. geol. Gianluca Ferioli

Studio: Via A. Zucchini, 69 – CAP 44100 Ferrara

tel. 0532/56771, fax 0532/56119, e-mail info@elletipi.it

iscritto al n° 503 all'Albo Professionale dell'Ordine dei Geologi della Regione Emilia Romagna



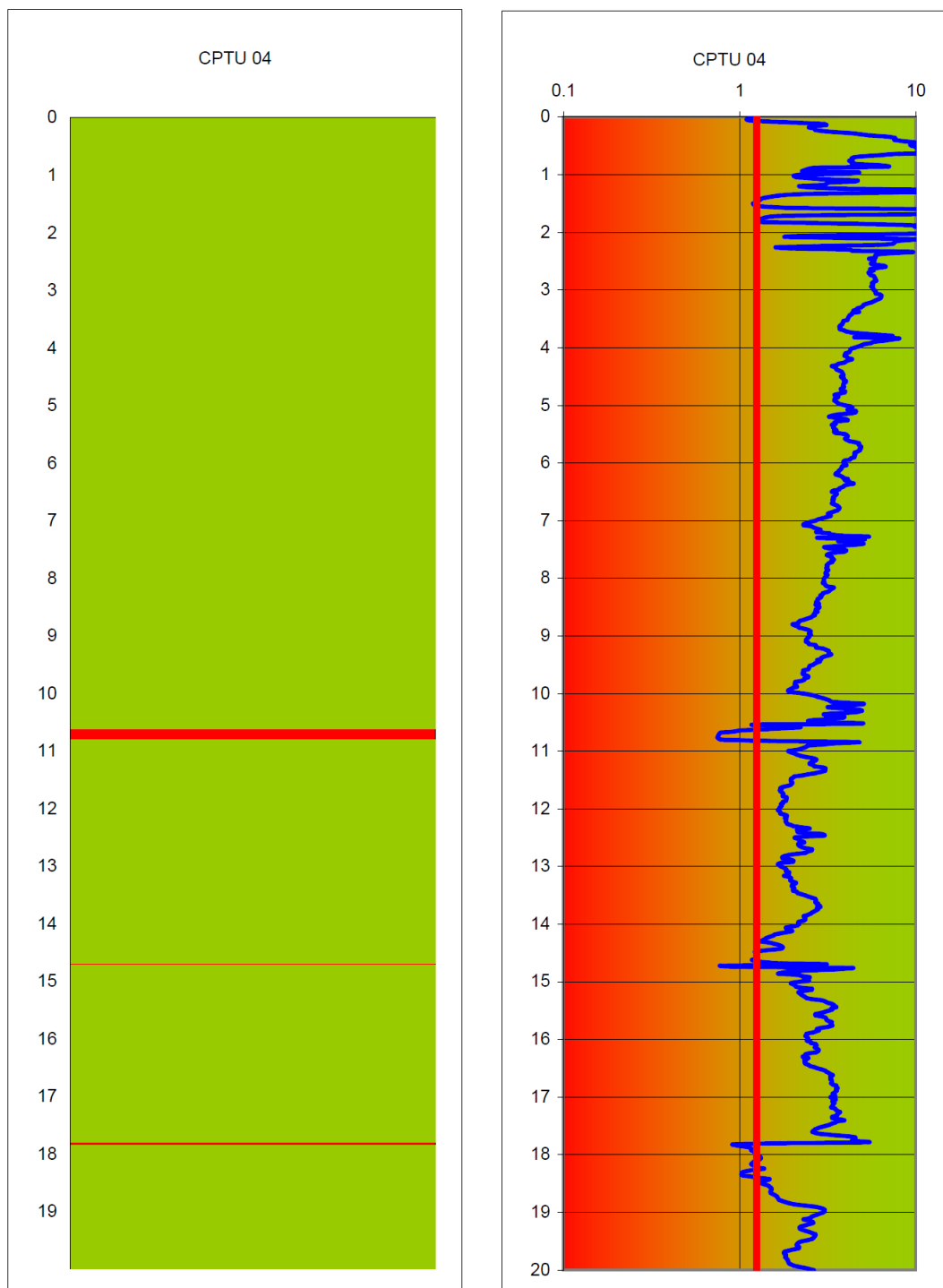


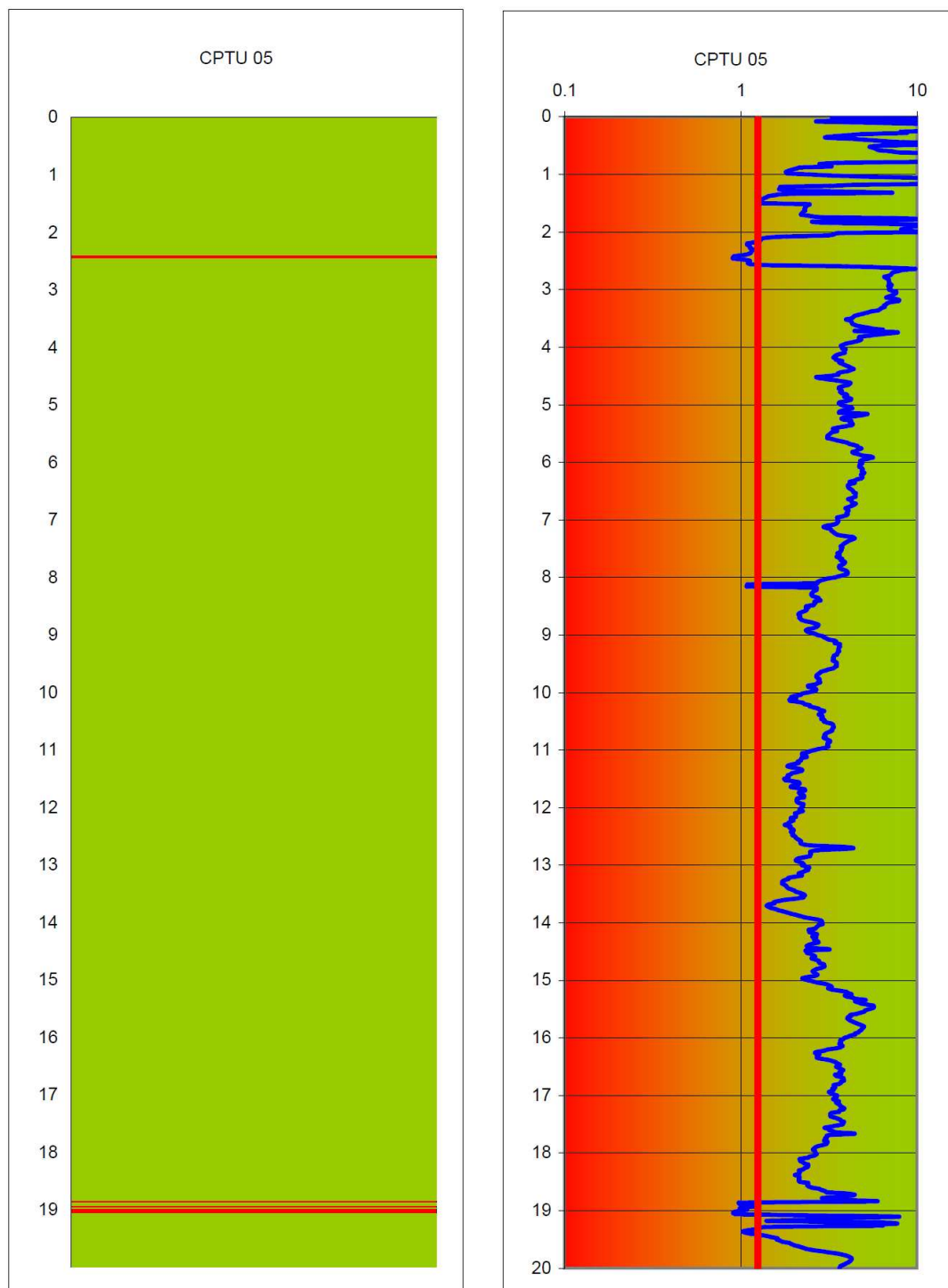
dott. geol. Gianluca Ferioli

Studio: Via A. Zucchini, 69 – CAP 44100 Ferrara

tel. 0532/56771, fax 0532/56119, e-mail info@elletipi.it

iscritto al n° 503 all'Albo Professionale dell'Ordine dei Geologi della Regione Emilia Romagna





dott. geol. Gianluca Ferioli

Studio: Via A. Zucchini, 69 – CAP 44100 Ferrara

tel. 0532/56771, fax 0532/56119, e-mail info@elletipi.it

iscritto al n° 503 all'Albo Professionale dell'Ordine dei Geologi della Regione Emilia Romagna

10. ALLEGATI

ALLEGATO 1	Certificati di prova penetrometrica
------------	-------------------------------------