

COMUNE DI CASTEL MAGGIORE

3° SETTORE LL. PP. E AMBIENTE

NUOVO POLO SCOLASTICO

PROGETTO ESECUTIVO ai sensi del DPR 207/2010



SCUOLA DELL'INFANZIA

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Geom. LUCIA CAMPANA

RTP

COORDINAMENTO E PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA

1AX
ARCHITETTI ASSOCIATI

PROGETTISTI

via dei Marsi 10 - 00185 Roma
tel / fax 06 97613086
www.1ax.it - info@1ax.it
Arch. Antonello Piccirillo
Arch. Luca Piccirillo

STRUTTURE E STUDI SISMICI

VIA
INGEGNERIA

PROGETTISTA
CONSULENTI

via Flaminia Vecchia 999 - 00189 Roma
tel 06 3327441 fax 0633219798
www.via.it - via@via.it

Ing. Francesco Nicchiarelli
Ing. Marco Ottavio Tarquini
Ing. Guido Pietropaoli

IMPIANTI

1AX
ARCHITETTI ASSOCIATI

CONSULENTE

Proimpianti s.r.l.
Ing. Carlo Granata

ELABORATO

Relazione Geologica

TAVOLA

SR.13

SCALA

DATA Dicembre 2017

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. INQUADRAMENTO IDRO-GEO-MORFOLOGICO.....	4
2.1 Ubicazione, geomorfologia.....	4
2.2 Geologia.....	6
2.3 Idrogeologia.....	9
3. INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	11
4. STRATIGRAFIA.....	13
4.1 Modello geologico	20
5. IDROGEOLOGIA.....	22
6. SISMICITA'	23
6.1 Caratteri macrosismici	23
6.2 Risposta sismica locale	26
7. PROBLEMATICHE GEOLOGICHE	41
8. BIBLIOGRAFIA.....	43
9. TABULATI DI VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE.....	44

Allegato: Indagini geognostiche e geofisiche (AURELISOIL, srl, AQ)

1. PREMESSA

La presente relazione esamina gli aspetti geologici, stratigrafici, geomorfologici, idrogeologici e sismici in relazione alla Progettazione Definitiva del Complesso Scolastico contemplante alcuni fabbricati relativi alla Scuola Primaria, dell'Infanzia, mensa, palestra e biblioteca, nel Comune di Castel Maggiore (BO).

Il presente rapporto viene sviluppato in base a dati geologici, stratigrafici e sismici di letteratura e con riferimento ad indagini geognostiche e geofisiche appositamente eseguite.

Si sono inoltre esaminati gli elaborati testuali e cartografici relativi al PSC - ASSOCIAZIONE RENO-GALLIERA – Terre di Pianura – Elaborato in forma associata - *Quadro Conoscitivo – Sistema Ambientale* (2006) e del Piano Strutturale del Comune di Castel Maggiore (2007).

L'analisi della sismicità generale e locale viene sviluppata con riferimento all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 e con le modifiche presenti nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) emanato il 14/1/2008 e nella Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni".

Gli aspetti geotecnici sono discussi nella Relazione Geotecnica.

Il presente rapporto analizza e discute i seguenti argomenti:

- inquadramento idro-geo-morfologico generale dell'area;
- descrizione delle indagini geognostiche eseguite;
- analisi delle caratteristiche litostratigrafiche dell'area;
- analisi delle caratteristiche idrogeologiche locali;
- analisi dei caratteri macrosismici e della risposta sismica locale;
- problematiche geologiche e geomeccaniche in relazione al progetto

2. INQUADRAMENTO IDRO-GEO-MORFOLOGICO

Si descrivono qui di seguito i principali aspetti geomorfologici, geologici, idrogeologici e sismici utili per l'analisi geotecnica dei terreni, rimandando alla relazione Geologico per una più approfondita disamina.

2.1 Ubicazione, geomorfologia

L'area in esame è localizzata nel settore sud-ovest dell'abitato di Castel Maggiore (BO), come mostra la Figura 1.

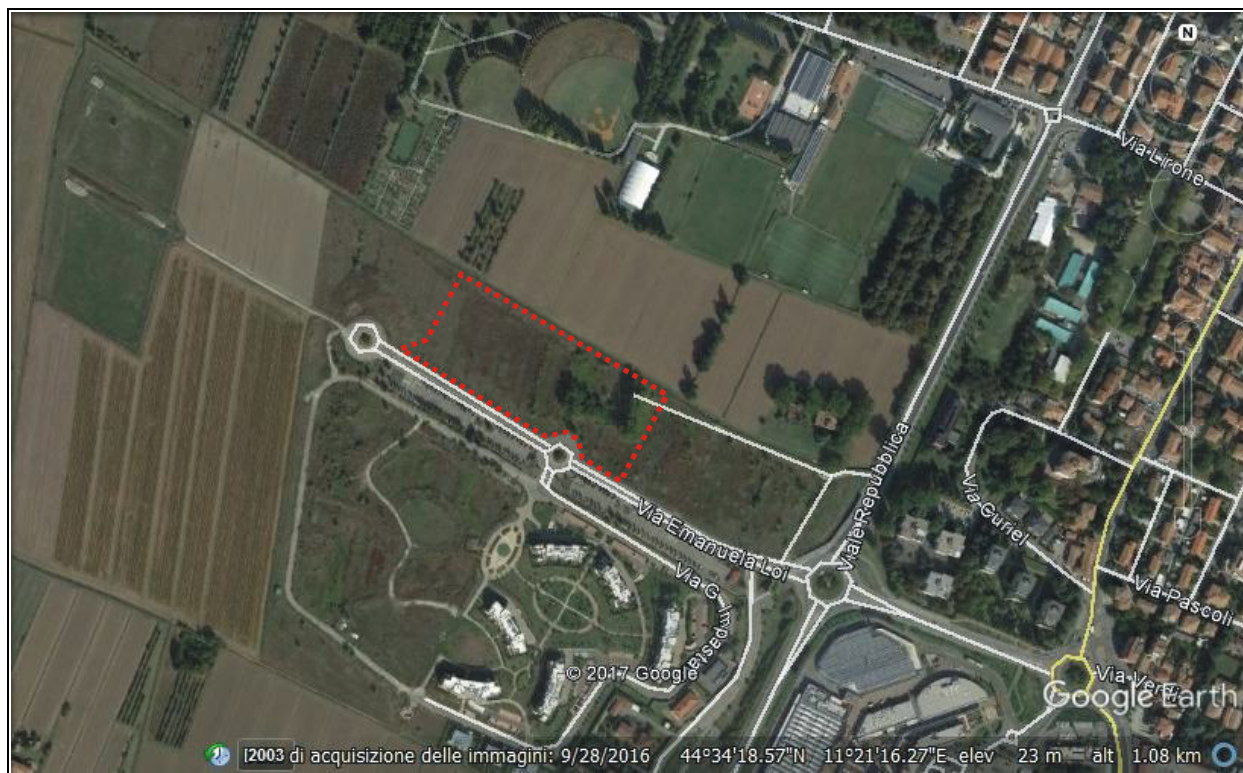


Figura 1 – ubicazione area in esame

Dal punto di vista della evoluzione geomorfologica l'area in esame si trova entro la zona di influenza dei corsi d'acqua di origine appenninica che hanno dato origine alla pianura padana, con riferimento specifico al Fiume Reno che scorre più ad ovest a circa 5 Km di distanza.

Nel contesto della evoluzione geomorfologica locale l'area in studio è localizzata immediatamente ad ovest dei paleoalvei del Reno, denominati in letteratura RENO 1 e RENO 2 (PSC – Quadro Conoscitivo Ambientale, 2006) (Figura 2).

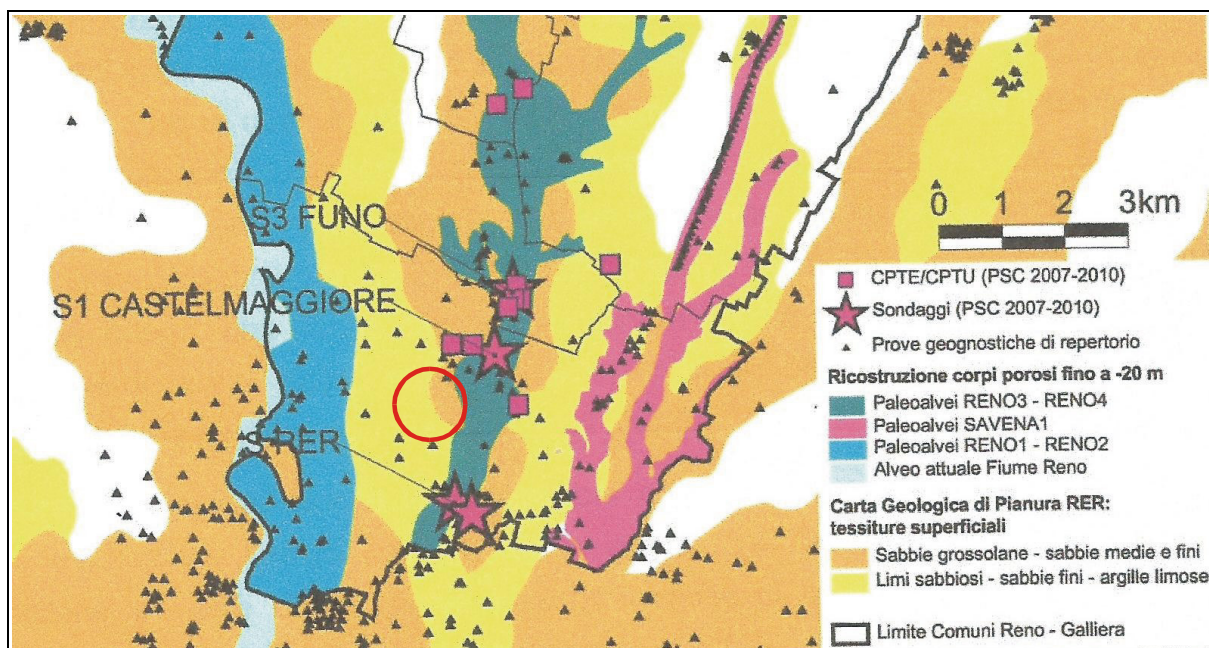


Figura 2 – ubicazione area in esame nel contesto evolutivo del Fiume Reno

(PSC – Quadro Conoscitivo Ambientale, 2006)

In tale contesto l'area in esame è localizzata nel settore centro-orientale della pianura padana, immediatamente a nord della città di Bologna e delle prime propaggini appenniniche.

Il sito in esame è caratterizzato da una morfologia sostanzialmente pianeggiante e quote intorno a 25 m slm; in particolare l'abitato di Castel Maggiore è localizzato su una blanda dorsale con quote intorno a 27-28 m slm, delimitata ad est dal corso del canale Navile e ad ovest dallo scolo Riolo e dallo Scolo Bondanello.

Dal punto di vista geomorfologico e morfodinamico, si segnala che l'area in esame è inclusa in una zona ove sono storicamente verificati fenomeni di subsidenza, con valori superiori a 3 cm/anno (PSC – Quadro Conoscitivo Ambientale – terre di pianura, 2006) (Figura 3)

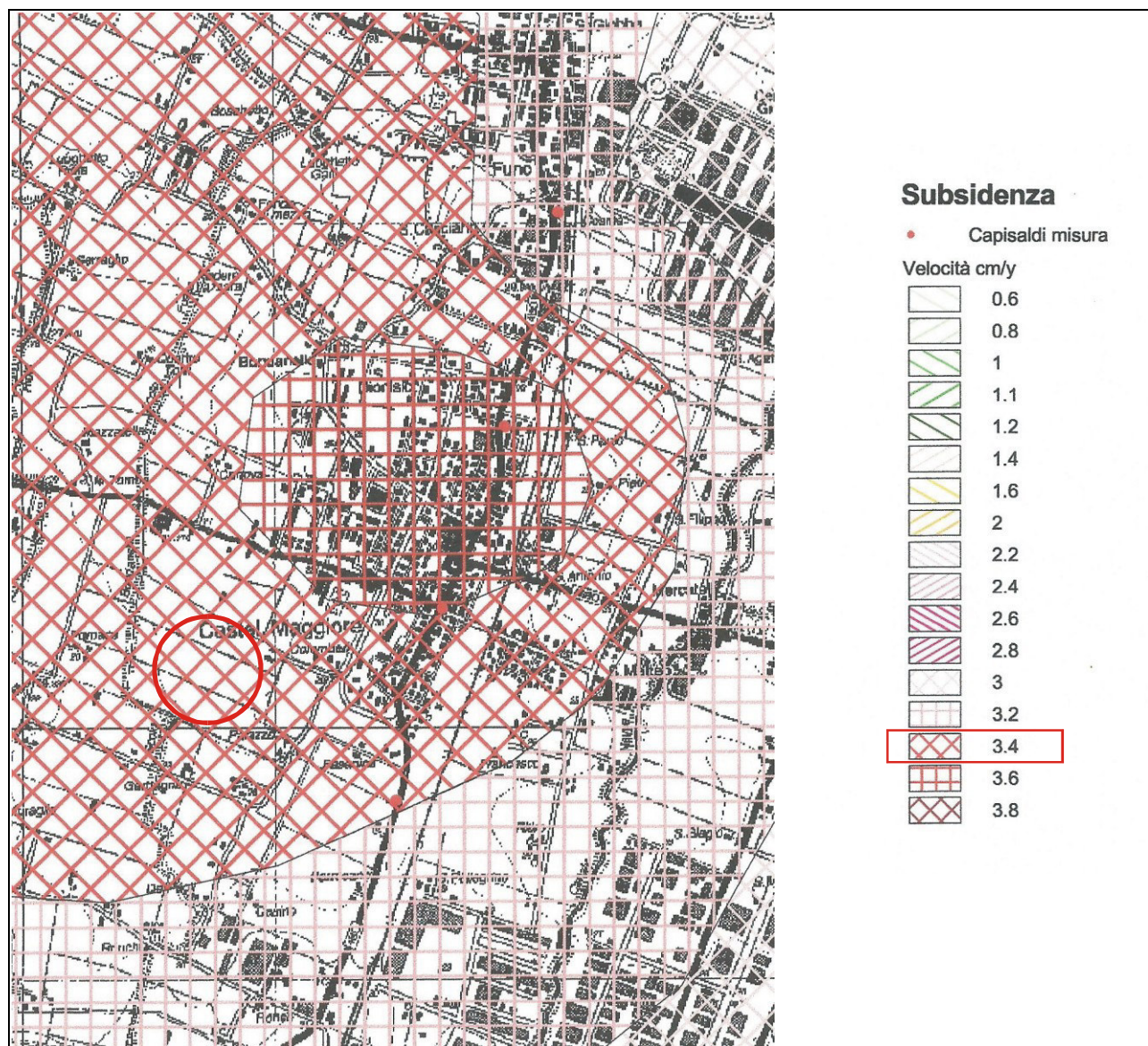


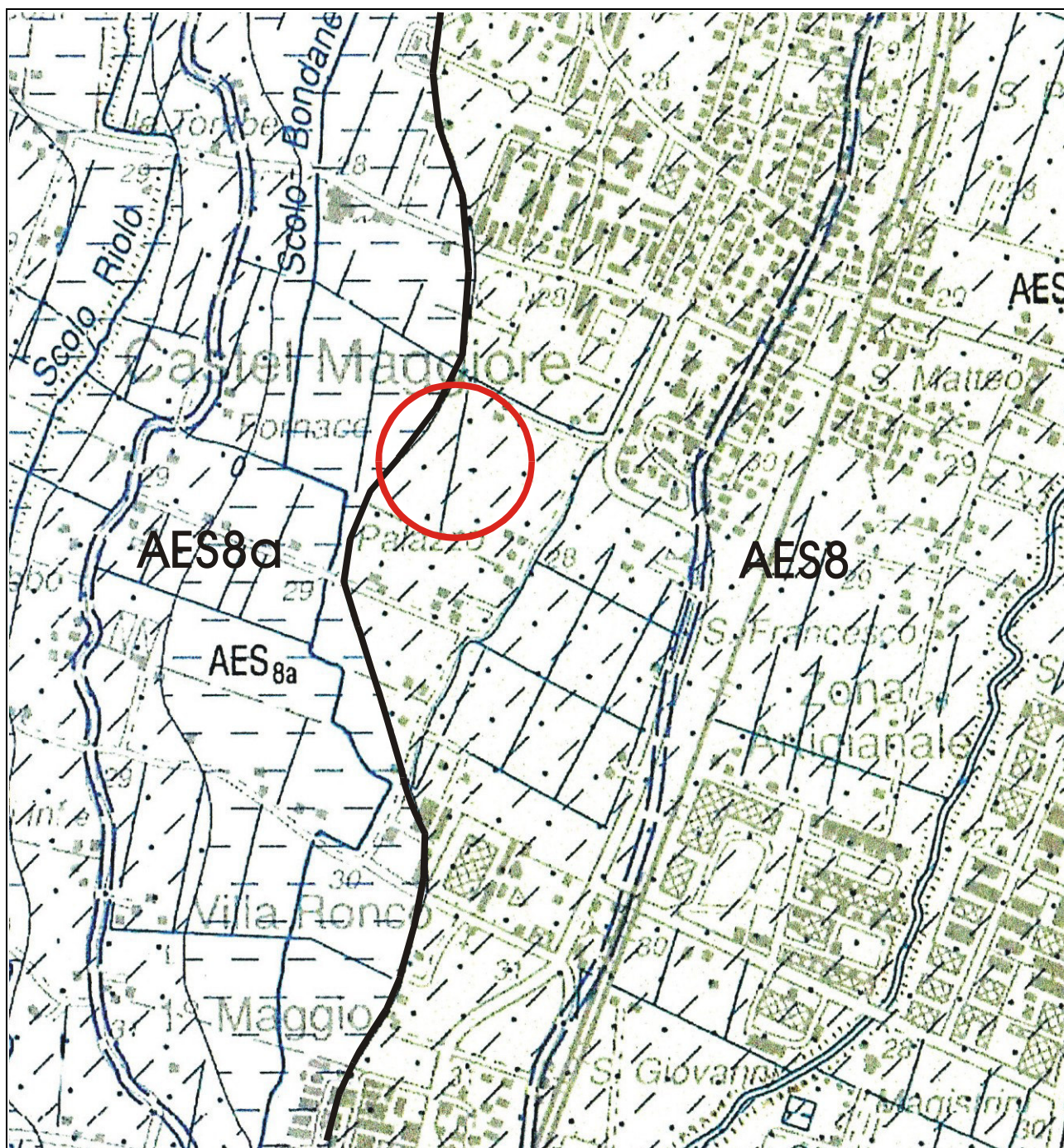
Figura 3 – ubicazione area in esame in un settore con fenomeni di subsidenza storica

(PSC – Quadro conoscitivo – terre di pianura, 2006)

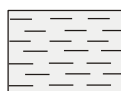
2.2 Geologia

L'area di Castel Maggiore è localizzata in un settore pedeappennino in cui si sono messi in posto in età pleistocenica-olocenica depositi di conoide e intravallivi terrazzati, provenienti dai corsi d'acqua provenienti dai rilievi appenninici stessi, con termini riferibili al Sintema Emiliano-Romagnolo superiore (AES).

L'esame del Foglio 221-Bologna della Carta Geologica d'Italia scala 1:50.000 evidenzia che l'area in esame affiorano terreni di origine olocenica-recente, appartenenti al frutto della dinamica dei corsi d'acqua che interessavano l'area dal periodo post glaciale wurmiano ad oggi (Figura 4).



CARG
221



AES8a - Unità di Modena (Olocene - IV-VI sec. dC - attuale)

Limi e argille di piana inondabile, con rari livelli sabbiosi.



AES8 - Subsistema di Ravenna (Olocene - 14.000 anni-attuale)

Sabbie e limi di canale, con rari ciottoli

Figura 4 – Rielaborazione da Foglio 221-Bologna
(scala 1:50.000 - Progetto CARG – fonte sito ISPRA)

Dalla carta geologica CARG emerge che l'area in esame è localizzata in corrispondenza di depositi alluvionali fluvio-lacustri appartenenti al Subsistema di Ravenna (AES8) e datati da 14.000 anni bP sino all'attuale; nel settore ovest dell'area si passa a depositi appartenenti l'Unità di Modena (AES8a), più recenti e datati dal IV-VII secolo d.C. all'attuale (datazioni a ^{14}C).

I depositi alluvionali fluvio-lacustri AES8 sono costituiti da litologie prevalentemente sabbiose e limose con rari sottili orizzonti con ghiaietto; più ad ovest l'unità AES8a è caratterizzata da terreni a granulometria fine limo-argillosa.

I depositi AES8 e AES8a sono sovrapposti ad un substrato sabbioso-ghiaioso riferibili al Subsistema di Villa Verucchio (AES7 – Pleistocene sup.), posto alla profondità di alcune decine di metri, come mostra la sezione di seguito mostrata la cui traccia è ubicata a circa 1 Km a nord dell'area in studio (Figura 5)

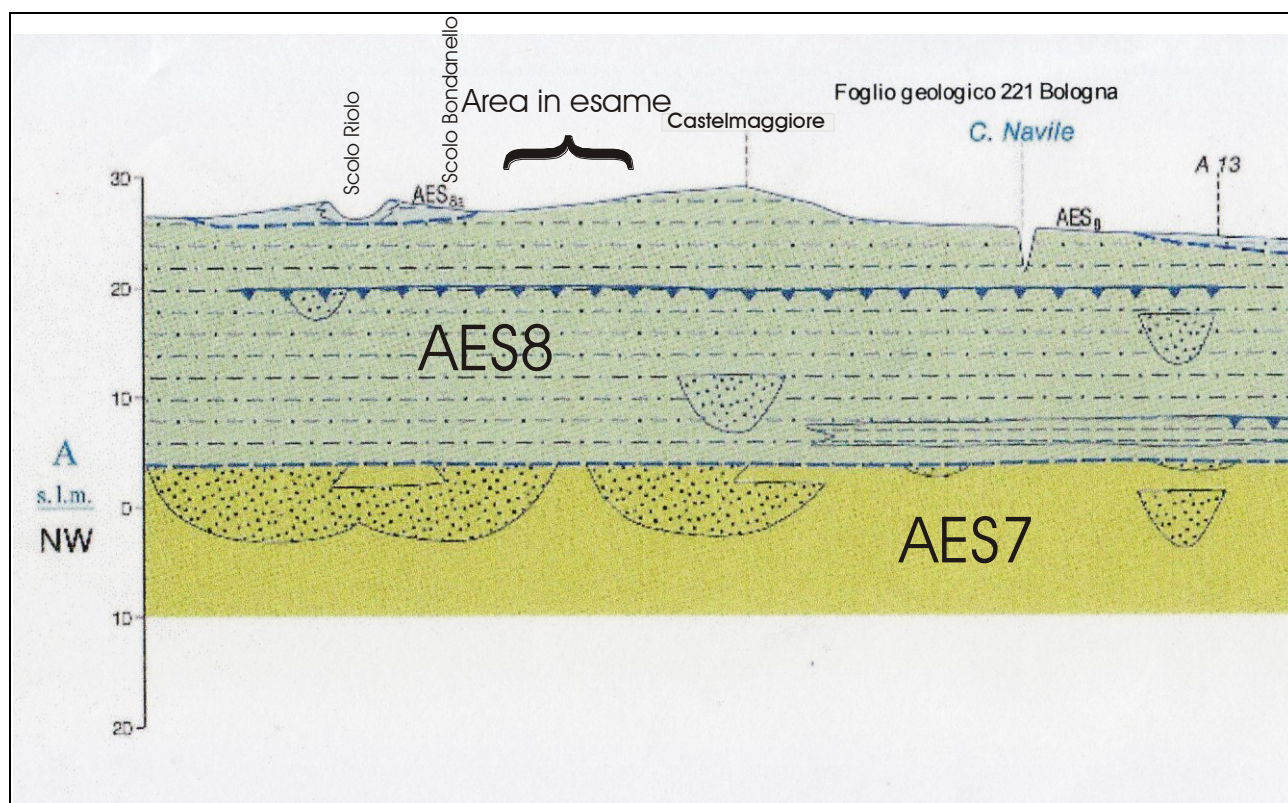


Figura 5 – localizzazione dell'area nella sezione geologica da Foglio 212-Bologna
(scala 1:50.000 - Progetto CARG – fonte sito ISPRA)

Con riferimento alla suddetta figura si evidenzia come nell'area in esame i sondaggi geognostici hanno rilevato la presenza di sabbie grossolane e ghiaia a circa 27-28 m di profondità.

2.3 Idrogeologia

Nel contesto geomorfologico e stratigrafico generale la circolazione idrica sotterranea è condizionata dalla complessa alternanza fra depositi relativamente più permeabili (sabbie, ghiaie) e poco a nulla permeabili (limi, argille) caratterizzati anche da frequenti eteropie di facies.

In particolare si segnala che il confine nord dell'area ove è localizzato il progetto è delimitato da un canale largo circa 1,5-2,0 m e profondo circa 1,5 m che scorre verso ovest e si immette nella rete del vicino Scolo Bondanello (FOTO 1).



FOTO 1 – visuale del fosso che delimita il confine nord dell'area in progetto.

Dalla letteratura idrogeologica (PSC – Quadro Conoscitivo Ambientale, 2006) si individua una piezometrica intorno a 24-25 m slm, come dimostra la presenza del canale drenante di cui sopra, e pertanto a piccola profondità dal piano campagna, con gradiente da sud verso nord (Figura 6).

Tale livello piezometrico è caratterizzato da una escursione direttamente relata all'andamento delle precipitazioni atmosferiche.

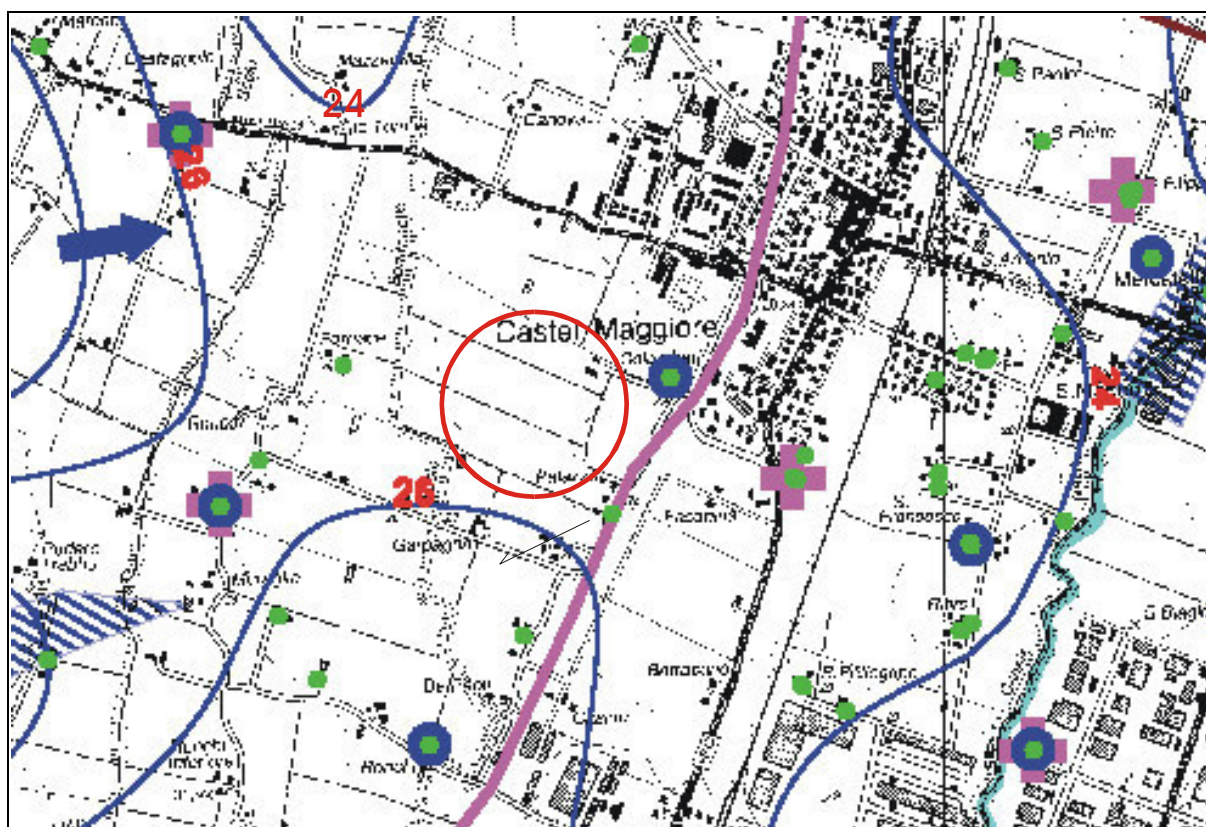


Figura 6 – ubicazione area in esame nel contesto idrogeologico locale

[PSC – Quadro Conoscitivo Ambientale, 2006]

3. INDAGINI GEOGNOSTICHE

L'indagine geognostica è consistita nella esecuzione di sondaggi geognostici, prove penetrometriche statiche CPTU e indagini geofisiche.

Sondaggi geognostici

L'indagine geognostica si è sviluppata con l'esecuzione di n. 3 sondaggi geognostici a rotazione ed a carotaggio continuo, prelievo di campioni indisturbati, esecuzione di penetrometrie dinamiche SPT ed esecuzione di prove di laboratorio.

La tabella seguente riassume le quantità relative alla suddetta indagine geognostica.

SONDAGGIO n.	PROF. (m)	CAMPIONI IND. n.	SPT n.	PIEZOM.
1	30	3	3	TA
2	30	3	3	-
3	30	3	3	-

I carotaggi sono stati raccolti in cassette catalogatrici ed opportunamente fotografate.

Nel corso dei sondaggi sono stati eseguite prove geotecniche in foro (SPT) e sono stati prelevati campioni indisturbati con campionatore Shelby per l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio, i cui risultati saranno discussi nella Relazione Geotecnica.

I campioni indisturbati sono stati prelevati alle seguenti profondità:

SONDAGGIO n.	CAMPIONI IND. n.	PROF, (m da p.c.)
1	1	4,00-4,50
1	2	6,50-7,00
1	3	12,50-13,00
2	1	1,50-2,00
2	2	5,50-6,00
2	3	11,00-11,50
3	1	6,00-6,50
3	2	12,00-12,50
3	3	22,0-22,50

Prove penetrometriche statiche CPTU

I sondaggi geognostici sono state associate n. 3 prove penetrometriche statiche CPTU, con misura delle pressioni interstiziali, spinte fino a valori di rifiuto, come da tabella seguente:

CPT n.	PROF. (m)
CPTU-1	27,80
CPTU-2	27,20
CPTU-3	27,90

Indagine geofisica

Inoltre per eseguire valutazioni circa la risposta sismica locale si sono eseguite 2 prove sismiche tipo MASW associate a 2 prove di sismica passiva con modalità HVSr.

oooooooooooo

Le indagini geognostiche sono state eseguite dalla Soc. AURELISOIL srl (AQ); le modalità di prova, la descrizione delle attrezzature, la documentazione fotografica ed i dati stratigrafici e geotecnici relativi alle indagini geognostiche sono assemblati in un elaborato al quale si rimanda: La Figura 7 mostra l'ubicazione delle indagini geognostiche.



Figura 7 – ubicazione indagini geognostiche

4. STRATIGRAFIA

La successione stratigrafica locale è caratterizzata da litologie essenzialmente sabbiose medio-fini limose e limi argillosi di età olocenica-recente riferibili al Subsintema di Ravenna (AES8); in profondità si passa a depositi ghiaioso-sabbiosi attribuibili al pleistocene superiore (AES7 - Subsintema di Villa Verucchio).

Si è costruita una sezione litostratigrafica con direzione ovest-est, dalla quale emerge, al di sotto di uno strato continuo di argille limose grigio-verdastre, un settore occidentale in cui prevalgono litologie sabbiose medio-fini limose ed un settore orientale in cui sono maggiormente presenti limi argillosi intercalati a strati sabbiosi fini.

Si descrive la situazione stratigrafica locale in base ai risultati delle indagini geognostiche, con riferimento alla sezione geologico-tecnica allegata (scala 1:500/1:100).

Terreno vegetale e Riporti

Nell'area si rileva prevalentemente la presenza di una coltre pedogenizzata dello spessore di alcuni decimetri.

Soltanto in corrispondenza del sondaggio S 1 si sono carotati, per uno spessore di circa 2 m, terreni di riporto essenzialmente ghiaiosi-sabbiosi, con sparsi elementi di origine antropica (FOTO 2).



FOTO 2 –riporti carotati nei primi 2 metri nel sondaggio S1

Argille limose grigio-verdastre

Al di sotto dei riporti sono presenti con continuità argille limose di colore grigio-verdastro fino alla profondità di circa 6 m dal p.c. in corrispondenza del sondaggio S3 e fino a circa 10 m di profondità in corrispondenza del sondaggio S1.

Si individua pertanto una giacitura del letto delle argille limose debolmente degradante verso est. Dal punto di vista granulometrico prevale decisamente la frazione argillosa (55-60%), con limo intorno al 35%; la frazione sabbiosa non supera il 5% (Figura 8).

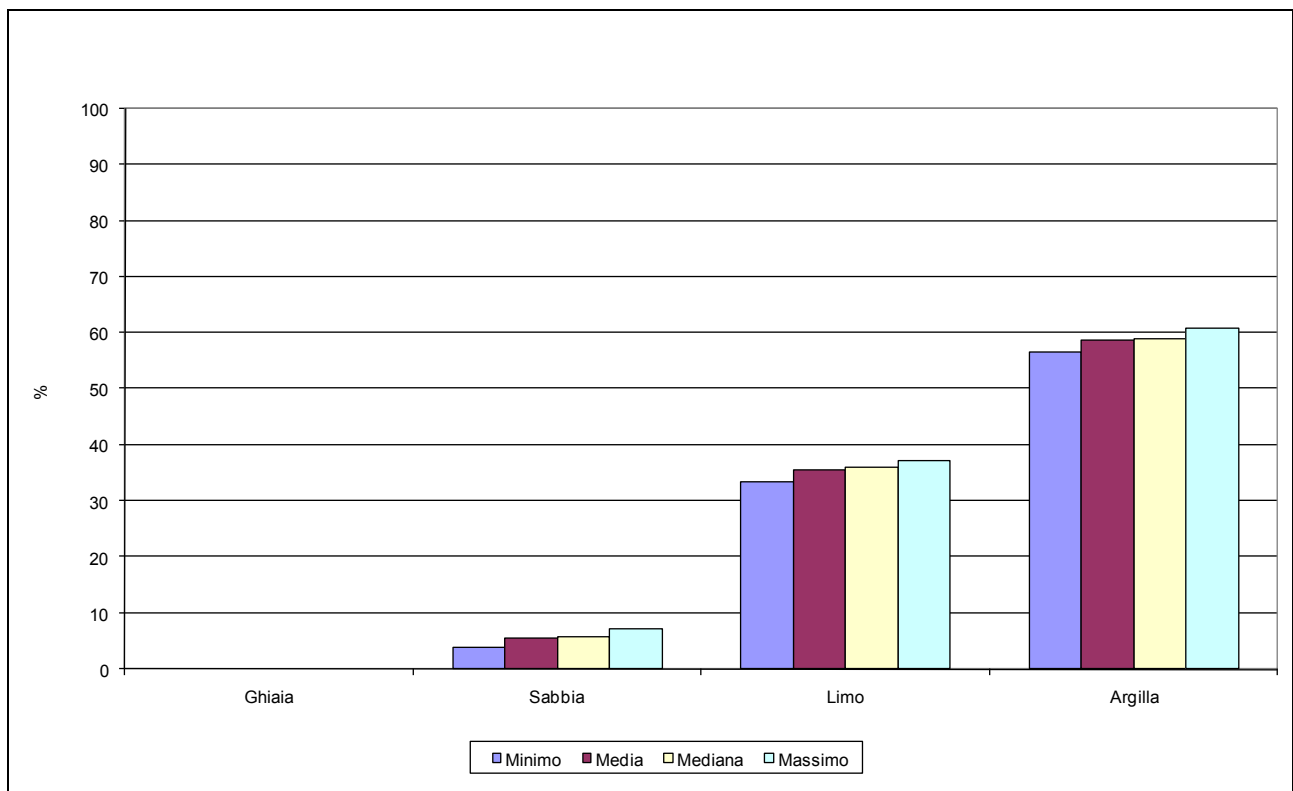


Figura 8 – frazioni granulometriche delle argille limose grigio-verdastre

Sabbie medio-fini, limose, grigiastre

Inferiormente alle argille verdastre sono state carotate sabbie medio-fini limose con continuità fino a circa 20-22 m di profondità dal p.c. nei sondaggi S2 e S3 (settore ovest dell'area), mentre nel sondaggio S1 (settore est dell'area) le sabbie limose presentano una maggiore interstratificazione con limi argillosi grigiastri.

Dal punto di vista granulometrico prevale decisamente la frazione sabbiosa (60-70%), con le frazioni limosa e argillosa che non superano rispettivamente il 20 ed il 10 % (Figura 9).

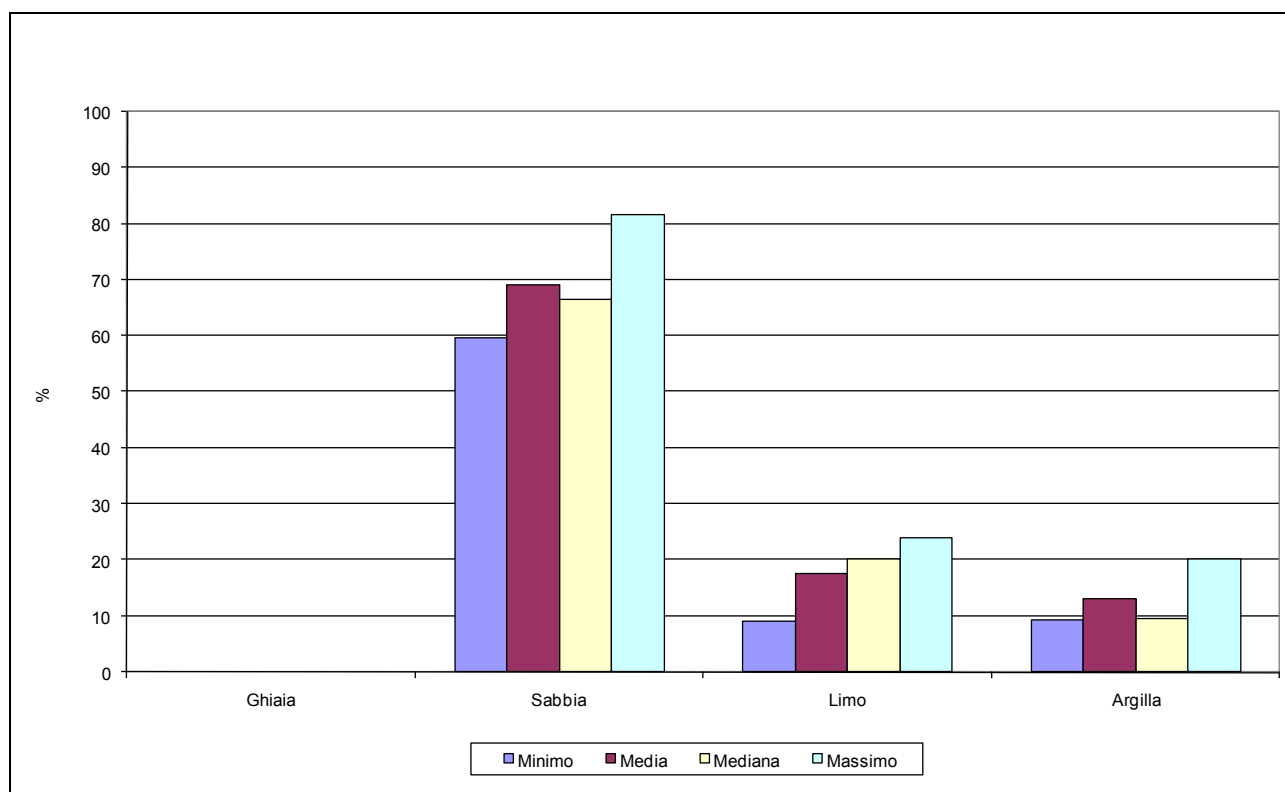


Figura 9 – frazioni granulometriche delle sabbie medio-fini grigiastre

Limi argillosi grigiastri

Nel sondaggio S1 sono stati carotati depositi limo-argillosi grigiastri, con spessori intorno a 3-6 metri, a varie profondità e fino a circa 26 m di profondità dal p.c., in alternanza a alle sabbie limose grigie sopra descritte.

Tale situazione stratigrafica, presente prevalentemente nel settore orientale dell'area, è stata confermata anche dalle penetrometrie CPTU-2 e CPTU-3; nel settore ovest invece, ove prevalgono le sabbie fini grigiastre, due strati limo-argillosi grigiastri sono presenti soltanto a quote variabili da 22 a 28 m dal p.c., con spessori di 1-2 metri.

Dal punto di vista granulometrico prevale la frazione argillosa (50%), con limo intorno al 30%; la frazione sabbiosa arriva a percentuali intorno al 20% (Figura 10).

Rispetto alle argille limose grigio-verdastre superficiali, si individua una relativa minore percentuale della frazione argillosa (50%) ed una maggiore percentuale delle frazioni limosa e sabbiosa fine (totale 50%); per tale motivo, in considerazione della variabilità granulometrica, si definisce questa unità come "limo-argillosa".

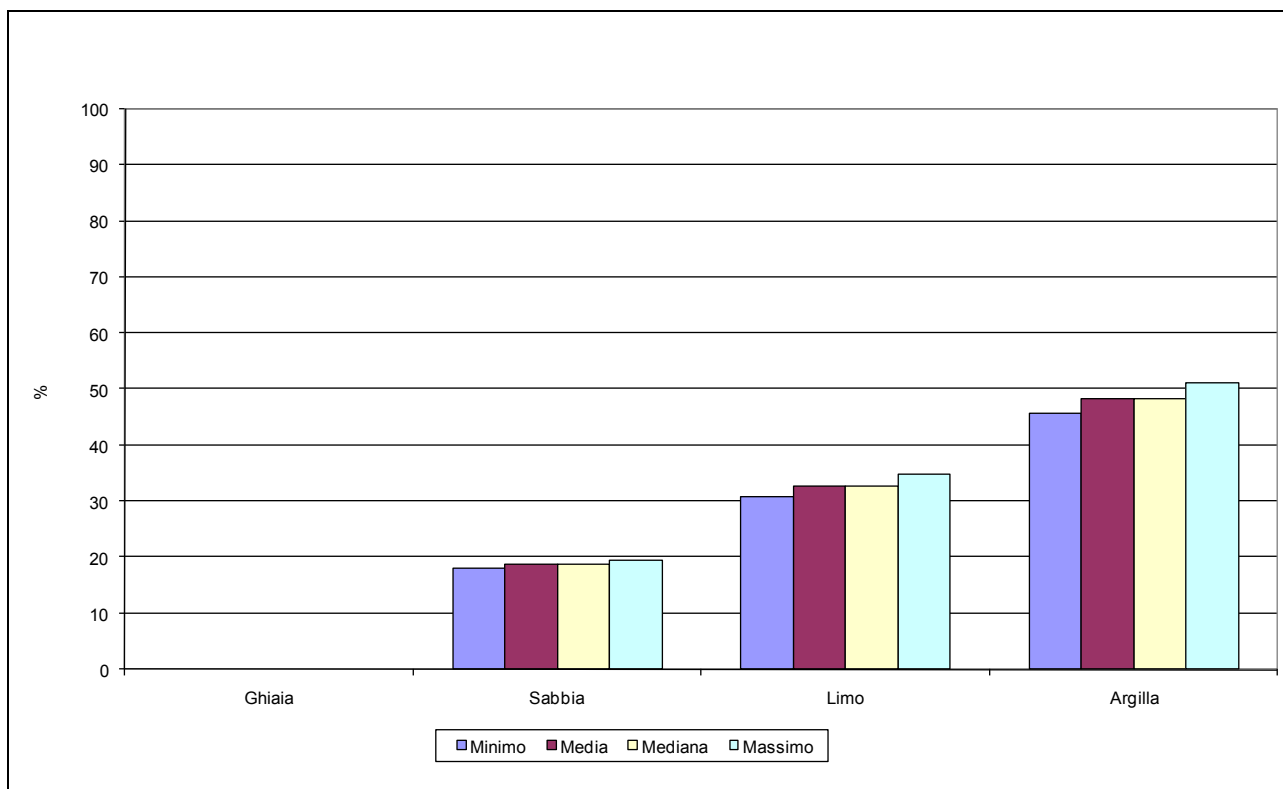


Figura 10 – frazioni granulometriche dei limi argillosi grigiastri

Sabbie grossolane con ghiaietto, grigiastre

Alla base delle sabbie medio-fini, intercettate dai sondaggi S1 e S2 e dalle penetrometrie CPTU-1 e CPTU-2, sono presenti sabbie grossolane, con sparso ghiaietto e con spessori intorno a 3-4 metri.

Ghiaie e sabbie ghiaiose

In tutti i sondaggi e nelle penetrometrie statiche alla profondità di circa 26-28 m dal p.c. sono state intercettate ghiaie sabbiose.

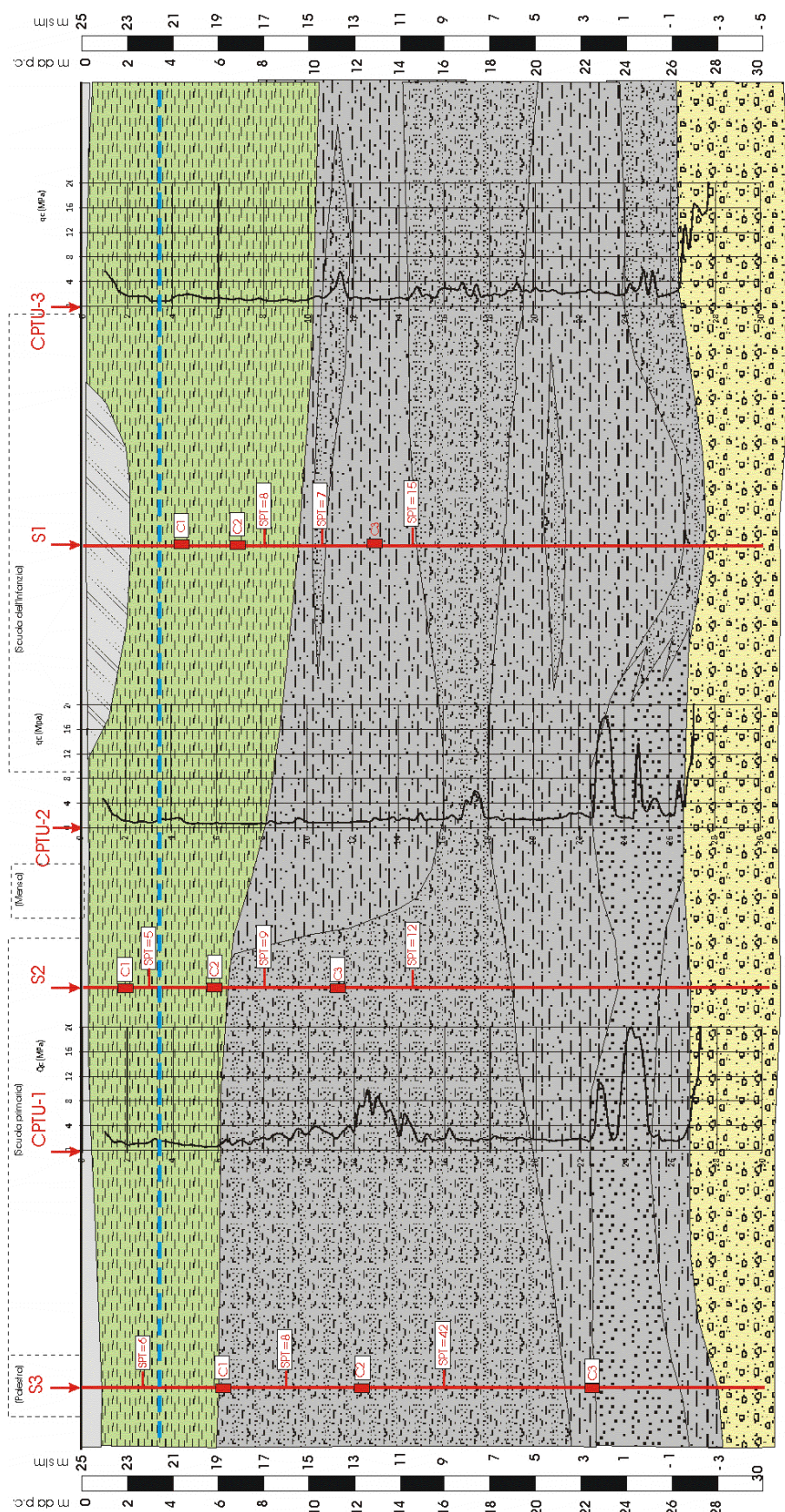
Questo strato è riferibile alla unità AES7 (Subsintema di Villa Verucchio) del pleistocene superiore, in accordo con la Figura 5.

oooooooo

E' stata costruita una sezione stratigrafica dell'intera area la cui traccia è mostrata nella Figura 11; la Figura 11 mostra la suddetta sezione stratigrafica in formato ridotto:



Figura 11– traccia della sezione stratigrafica



SUBSISTEMA VILLA VERRUCCHIO - Pleistocene sup.

SUBSISTEMA RAVENNA - Olocene

Recente

0 10 20
metri

Figura 12– sezione stratigrafica

4.1 Modello geologico

Sulla base dell'andamento stratigrafico precedentemente descritto, nella Figura 13 viene mostrato il modello geologico locale, che evidenzia l'eteropia fra la zona ovest ed est.

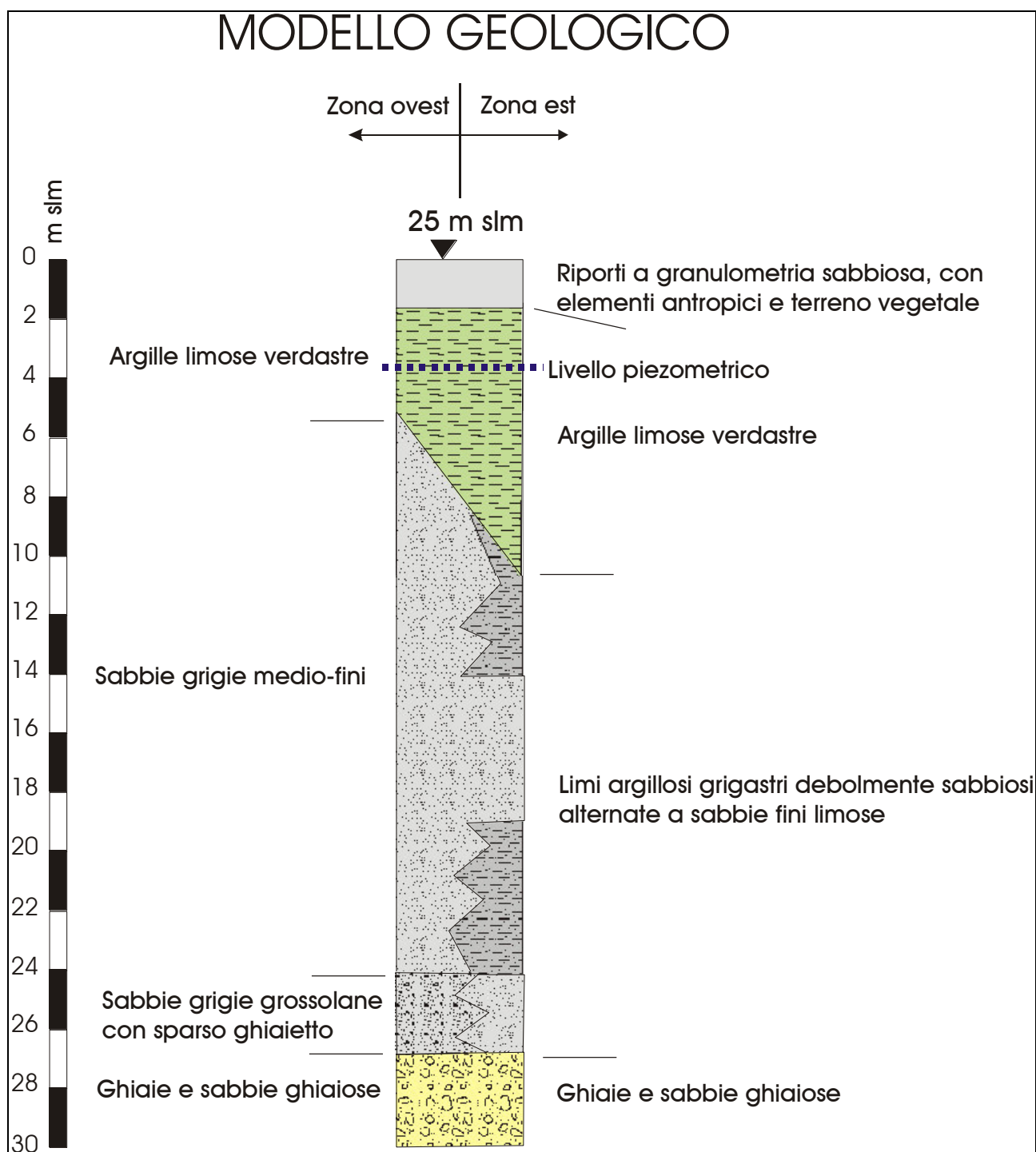


Figura 13 – modello geologico

5. IDROGEOLOGIA

Come già detto, l'area in esame è localizzata in un settore con una piezometrica a limitata profondità dal p.c. e con gradiente verso nord.

La circolazione idrica sotterranea è condizionata dalla complessa alternanza fra depositi relativamente più permeabili (sabbie, ghiaie) e poco a nulla permeabili (limi, argille) caratterizzati anche da frequenti eteropie di facies.

Il piezometro a TA alloggiato nel sondaggio S1 ha rilevato un livello piezometrico a 3,4 m dal p..c. (21,5 m slm).

6. SISMICITA'

Nel presente progetto l'analisi della sismicità generale e locale viene sviluppata secondo quanto previsto dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 e con le modifiche presenti nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) emanato il 14/1/2008.

6.1 Caratteri macrosismici

In base all' Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, il comune di Castel Maggiore appartiene alla Zona Sismica 3, con valori di accelerazione di norma come da tabella seguente:

<i>Zona sismica</i>	<i>Descrizione</i>	<i>accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni [ag]</i>	<i>accelerazione orizzontale massima convenzionale (Norme Tecniche) [ag]</i>
3	Zona che può essere soggetta a forti terremoti ma rari.	$0,05 < a_g \leq 0,15 \text{ g}$	0,15 g

Tale classificazione è stata confermata con la Delibera della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 1435 del 21.07.2003:.

Zona sismica 3	Zona con pericolosità sismica bassa, che può essere soggetta a scuotimenti modesti.
-----------------------	---

Un'ulteriore verifica dei caratteri macrosismici dell'area può essere ricercata in un lavoro del GNDT (2004) che suddivide l'Italia in Zone Sismogenetiche (ZS9), basate su dati geologico-strutturali, tettonici e della sismicità storica; si fa qui riferimento alla zonazione ZS9 che ha rivisto la precedente edizione ZS4 (1999).

In base a tali dati i comuni di cui sopra ricadono all'interno della zona sismogenetica 912 (Figura 14).

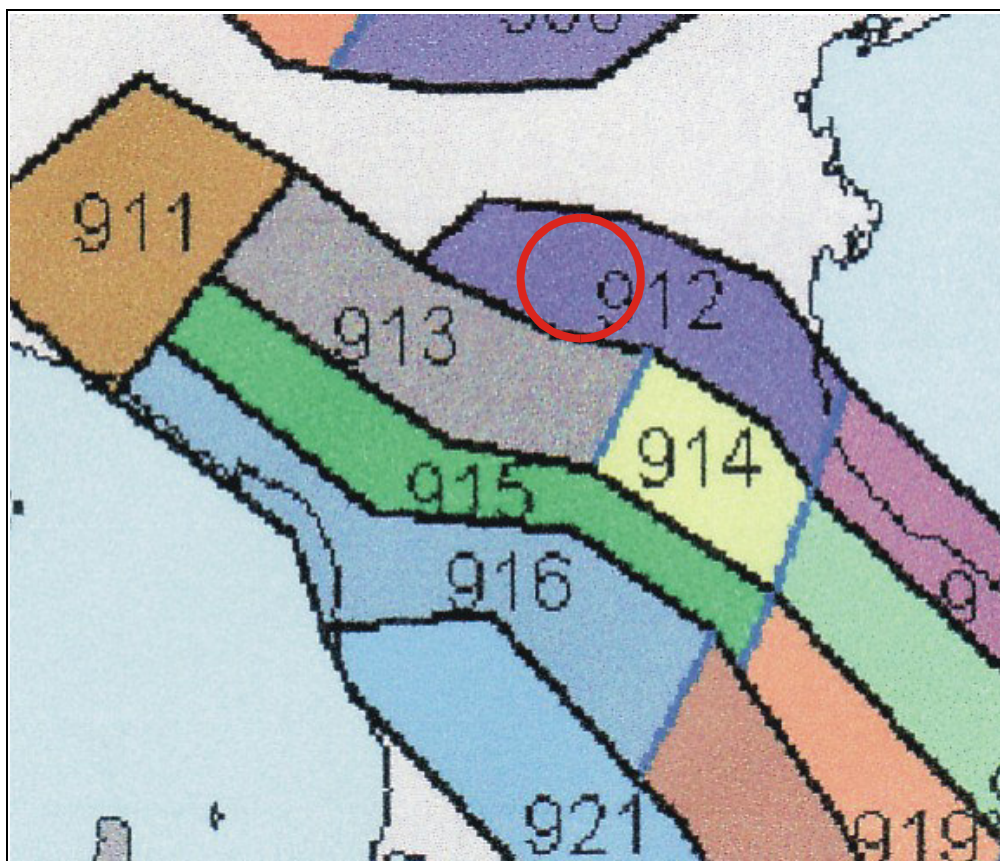


Figura 14-. Zonazione sismogenetica ZS9 (INGV, 2004)

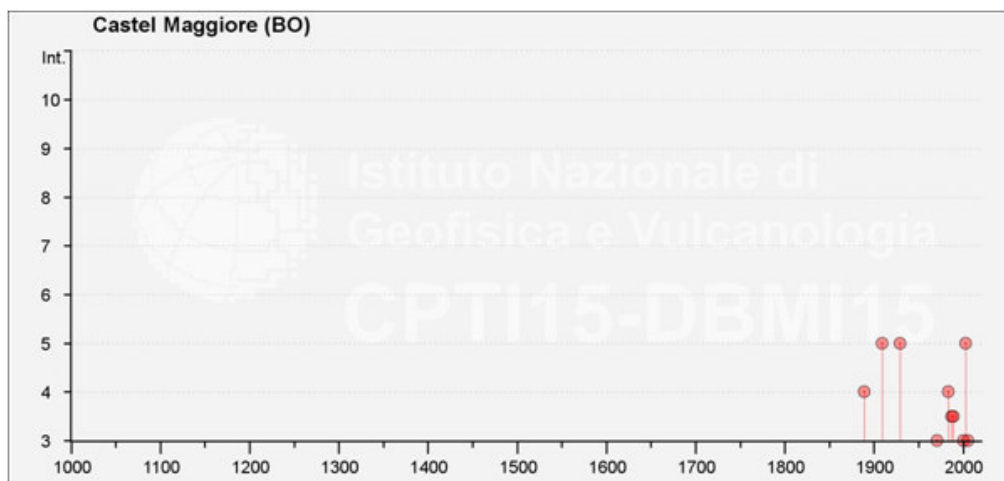
La Zona sismica 912 è rappresentativa della porzione più esterna della fascia di compressione dell'arco appenninico settentrionale; si riportano qui di seguito le caratteristiche sismo-genetiche della zona 912.

nome ZS	Zona	Tettonica - meccanismo di fagliazione prevalente	Profondità ipocentro - Km	Magnitudo max - Mw	Magnitudo max freq - Mw
Dorsale ferrarese	912	Faglia inversa	5-8	5,91	4,76

Nella tabella di cui sopra il valore di $M = 5,91$ rappresenta la magnitudo massima verificata (2 eventi), mentre il valore di $M = 4,76$ rappresenta il valore di magnitudo più frequente (12 eventi).

Si mostra qui di seguito in forma tabellare e grafica la storia sismica del Comune di Castel Maggiore con le Intensità Macrosismiche risentite nel comune (I_s) ed i riferimenti alle Intensità (I_o) e di Magnitudo (M_w) (Catalogo sismico DBM15, INGV).

File downloaded from CPTI15 - DBMI15				
Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 - Database Macrosismico Italiano 2015				
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia				
	Seismic history of	Castel Maggiore		
	PlaceID	IT_39511		
	Coordinates (lat, lon)	44.575, 11.363		
	Municipality (ISTAT 2015)	Castel Maggiore		
	Province	Bologna		
	Region	Emilia-Romagna		
	No. of reported earthquakes	20		
Intensity - Is	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	Io	Mw
4	1889 03 08 02 57 04.00	Bolognese	5	4,53
NF	1898 01 16 13 10	Romagna settentrionale	6	4,59
NF	1908 06 02 22 30	Frignano	4-5	4,5
5	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	6-7	5,36
5	1929 04 20 01 10	Bolognese	7	5,36
NF	1956 04 26 03 00 03.00	Appennino bolognese	6	4,74
NF	1965 11 09 15 35	Appennino reggiano	5	4,17
3	1971 07 15 01 33 23.00	Parmense	8	5,51
4	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	6-7	5,04
NF	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	6	4,43
3-4	1987 05 02 20 43 53.32	Reggiano	6	4,71
3-4	1989 09 13 21 54 01.50	Prealpi Vicentine	6-7	4,85
NF	1992 04 17 11 59 07.29	Appennino bolognese	4-5	4,11
NF	2000 05 06 22 07 03.78	Faentino	5	4,08
NF	2000 05 08 12 29 56.20	Faentino	5	4,67
NF	2000 05 10 16 52 11.60	Faentino	5-6	4,82
3	2000 06 18 07 42 07.68	Pianura emiliana	5-6	4,4
NF	2002 06 18 22 23 38.10	Frignano	4	4,3
5	2003 09 14 21 42 53.18	Appennino bolognese	6	5,24
3	2005 07 15 15 17 18.00	Forlivese	4-5	4,29



Dall'analisi statistica della storia sismica risulta, in definitiva, che si sono risentiti terremoti fino al IV-V grado MCS in relazione prevalente a sismi con epicentro nell'area appenninica; si segnalano comunque eventi massimi (I_s =V-VII) riferiti ai secoli XV-XIX.

Dalle ricerche risulta che nel comune di Castel Maggiore è in corso di studio, e quindi ancora non terminato e validato, l'analisi di Microzonazione Sismica di livello 1.

6.2 Risposta sismica locale

I dati sopra riportati sono di carattere macrosismico e/o validi per l'intero territorio comunale, mentre particolare rilevanza hanno i parametri geologici, geomorfologici ed idrogeologici che determinano la pericolosità sismica locale (amplificazione sismica, liquefazione dei terreni, ecc.).

In questa sede le condizioni sismiche locali dell'area in esame sono verificate secondo quanto previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) emanato il 14/1/2008, che prevede sostanzialmente le seguenti individuazione dei seguenti elementi relativi alla risposta sismica locale:

- Valutazione del fattore di amplificazione stratigrafica (**S_s**);
- Valutazione del fattore di amplificazione topografico (**S_T**);
- Valutazione del rischio di liquefazione dei terreni

A) Amplificazione Stratigrafica

Per la valutazione dell'amplificazione stratigrafica le nuove norme sismiche suddividono i diversi terreni in 5 Categorie di Sottosuolo, in relazione alla risposta sismica locale, come qui di seguito riportato:

CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	DESCRIZIONE
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s30} >$

	800 m/sec, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30} = 360-800$ m/sec ($N_{spt30} > 50$ nei terreni a grana grossa o $Cu_{30} > 250$ kPa nei terreni a grana fine).
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensate o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiore a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30} = 180-360$ m/sec ($15 < N_{spt30} < 50$ nei terreni a grana grossa, $70 < Cu_{30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	Depositi a grana grossa scarsamente addensati oppure terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30} < 180$ m/sec ($N_{spt} < 15$ nei terreni a grana grossa, $Cu_{30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	Terreni di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, giacenti su un substrato di riferimento ($V_{s30} > 800$ m/sec).

Tale classifica individua anche due tipi di terreno S1 e S2 sono caratterizzati da parametri geotecnici particolarmente scadenti ($V_s < 100$ m/sec; terreni liquefacibili, argille sensitive, ecc.), nei quali sono necessari studi specifici, ma che comunque non sono presenti nell'area in esame.

Le prove sismiche MASW hanno evidenziato un andamento dei valori di V_s coerenti con la stratigrafia locale, con un valori di $V_{s30} = 212-244$ m/sec a cui fa riferimento una **Classe di sottosuolo C** (Figura 15).

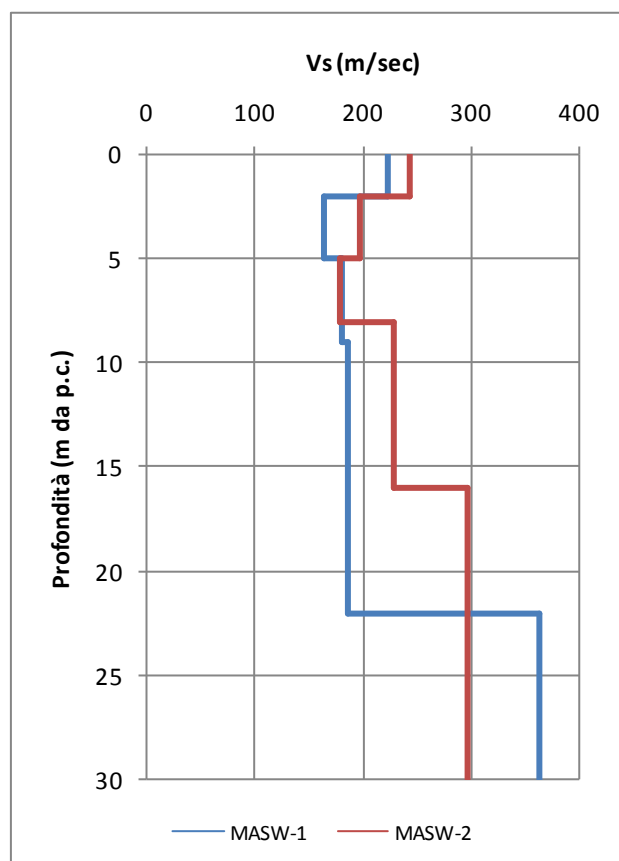


Figura 14 -. Andamento dei valori di Vs (da MASW)

Dalle 2 prove HVSR si sono stimati i relativi valori del picco di frequenza di $f_0=1,2$ Hz (HVSR1) e di $f_0=13$ Hz (HVSR2).

Il valore di 1,2 Hz individua un substrato con differenziale di impedenza significativo a circa 40-45 m dal p.c. (probabilmente ghiaie grossolane), mentre il valore di 13 Hz individua un differenziale di impedenza a limitata profondità dal p.c. (circa 3-5 metri) probabilmente da mettere in relazione a riporti antropici grossolani (tale ultima ipotesi potrebbe essere messa in relazione ai recenti lavori della adiacente nuova rete stradale).

B) Amplificazione Topografica

In base alla situazione topografica le norme vigenti individuano 4 condizioni con relativi valori del Coefficiente di Amplificazione Topografica S_T :

CATEGORIA TOPOGRAFICA	CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA	COEFFICIENTE DI AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA - S_T
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi con	1,0

	inclinazione media $i < 15^\circ$	
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1,2
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione $15^\circ < i < 30^\circ$	1,2
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione $i > 30^\circ$	1,4

Nel caso in esame sono presenti morfologie sub pianeggianti e pertanto si può assumere una Categoria Topografica T1, con **Coefficiente di Amplificazione Topografica $St = 1,0$** .

C) Liquefazione dei terreni

Problematiche relative al rischio di liquefazione dei terreni sono possibili in presenza di strati sabbiosi, in falda ed a profondità inferiori a 15-20 m dal p.c.

Nel caso in esame, data la presenza di depositi sabbiosi medio-fini in falda, fino alla profondità di circa 20-22 metri porta ad affermare che siano potenzialmente possibili fenomeni di liquefazione dei terreni.

Tale potenzialità è suffragata dalle curve granulometriche ricavate dalle prove di laboratorio dei 3 campioni prelevati nelle sabbie limose, le quali sono caratterizzate da Coefficienti di Uniformità (CU) variabili da CU=28-52.

Con riferimento ai limiti granulometrici di rischio per $CU > 3,5$, le granulometrie risultano in gran parte all'interno del fuso "*molto facilmente liquefacibile*" e con parte del fuso a granulometria limosa incluso nel campo "*facilmente liquefacibile*" (*Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – protezione Civile Naz., 2008*). (Figura 15).

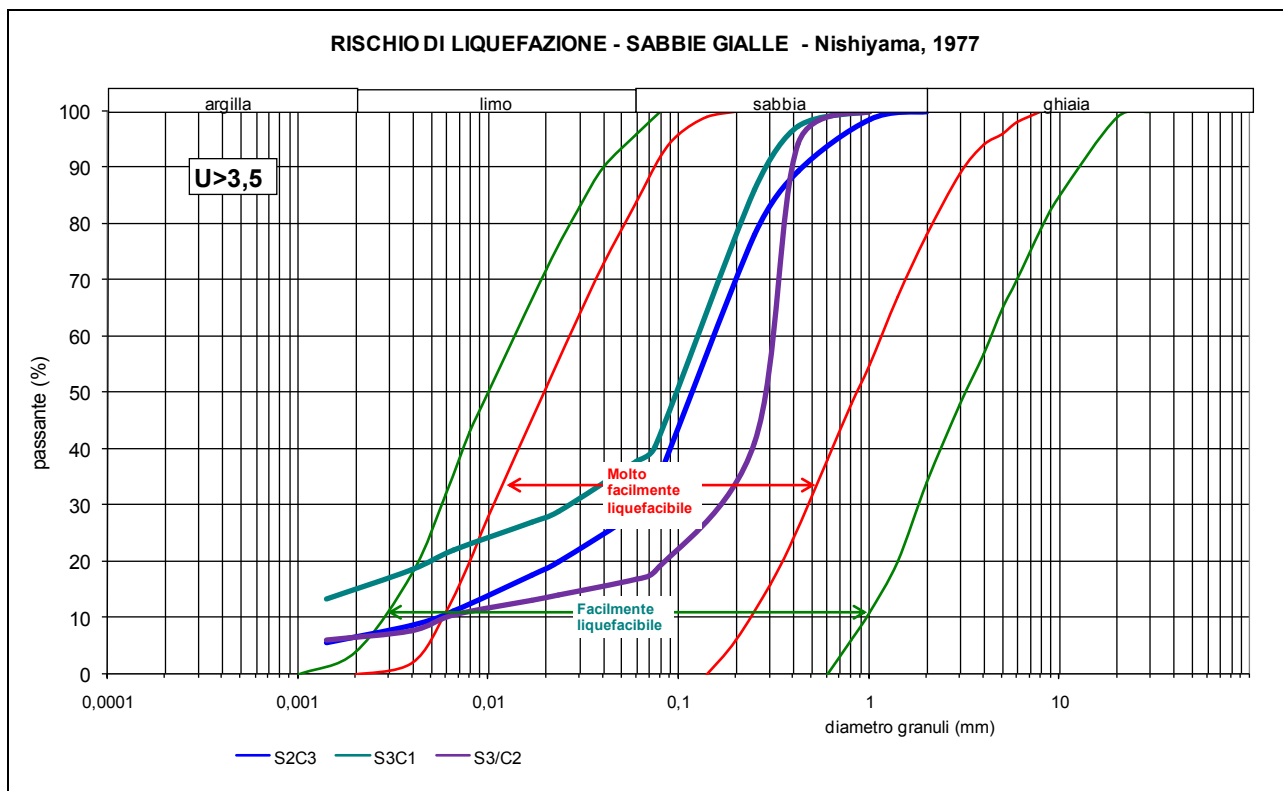


Figura 15 -. Fusi granulometrici delle sabbie fini grigiastre (Indirizzi e criteri di Microzonazione Sismica - Protezione Civile Naz., 2008)

Altro elemento significativo è che, indipendentemente dalla granulometria, fenomeni di liquefazione sono possibili soltanto con magnitudo attese $M > 5$ (*Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome – protezione Civile Naz., 2008*). . La verifica della massima magnitudo attesa è sviluppata analizzando le caratteristiche sismiche del nodo 16509, più prossimo al comune di Castel Maggiore che si prende come riferimento (Figura 16).

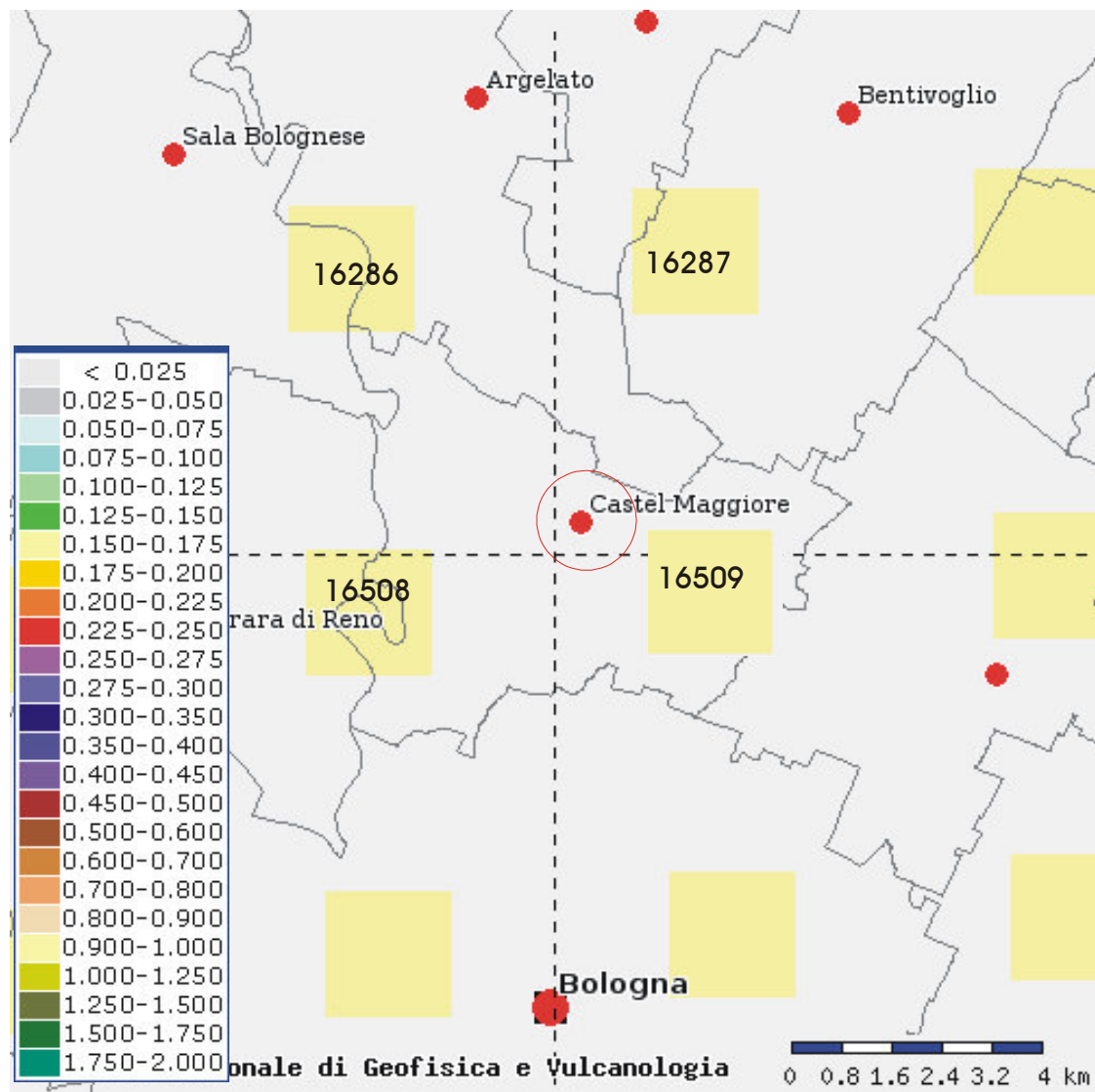


Figura 16 -. Localizzazione di Castel Maggiore (INGV)

In corrispondenza del nodo 16509 si sviluppa una analisi di disaggregazione dei terremoti storici (INGV- *Pericolosità di sito – progetto S1*, 2001) che evidenzia la percentuale di eccedenza con probabilità di superamento del 10% in 50 anni. Considerando il 90 % della curva di probabilità cumulata risulta una Magnitudo massima attesa $M = 5,5 > M = 5$ (Figura 17).

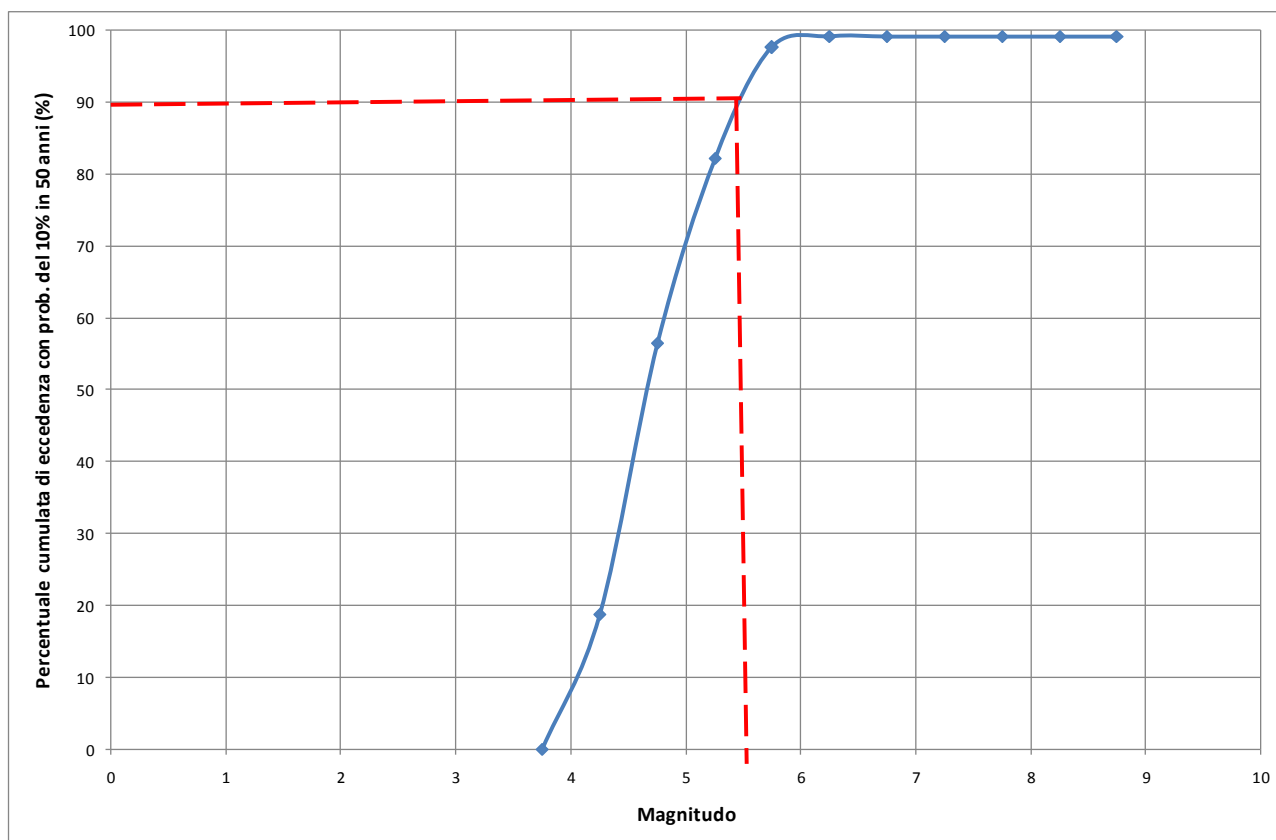


Figura 17 -. analisi di disaggregazione dei dati sismici del nodo 16509

Il valore di Magnitudo di riferimento sopra calcolato prescinde dalla distanza (R) dall'epicentro; analizzando i dati del nodo 16509 in relazione al rapporto Magnitudo/Distanza risulta che a distanze di epicentri entro 10 Km si ha una probabilità del 28% di eventi con magnitudo $M = 4,5-5,0$, mentre eventi con magnitudo $M = 5,0-5,5$ (come quello sopra valutato) sono meno probabili (prob. 14%) (Figura 18).

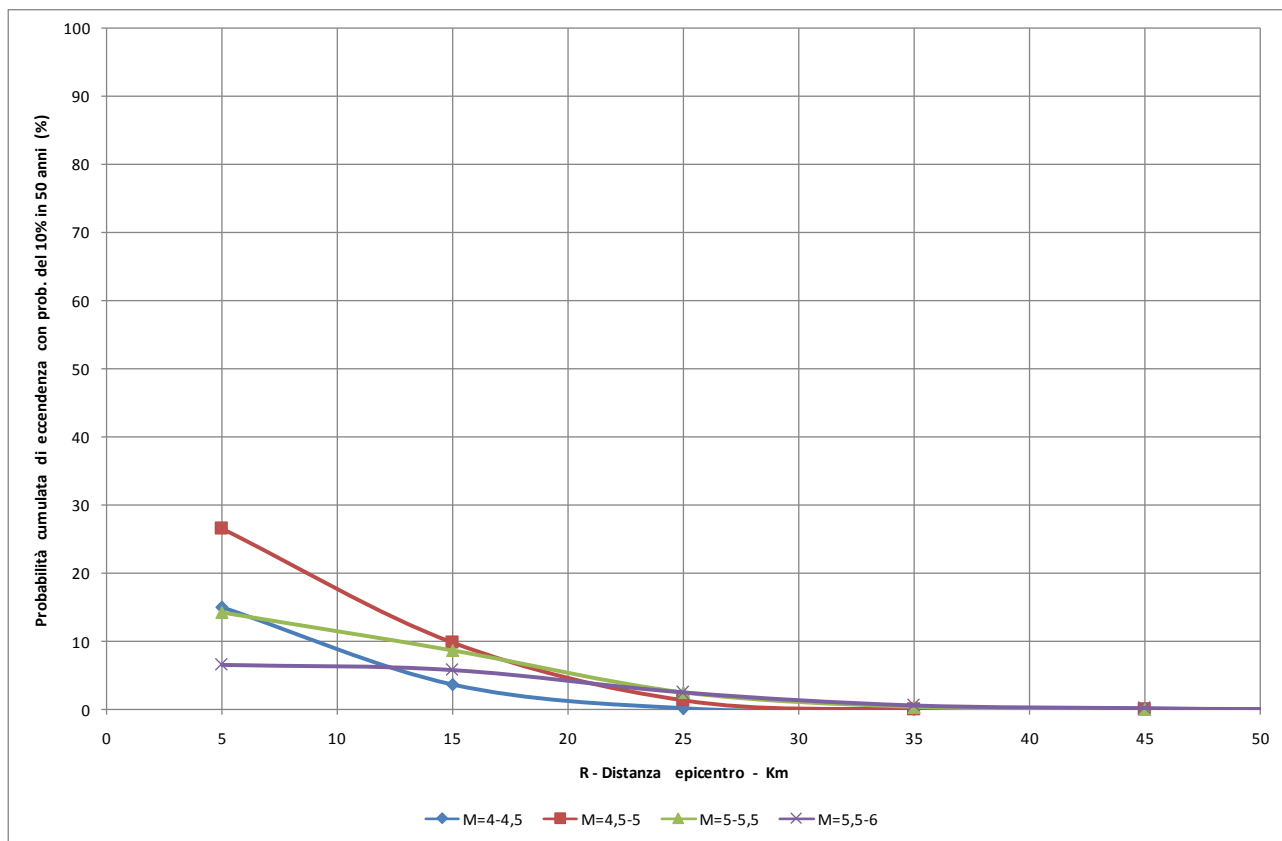


Figura 18 -. analisi di disaggregazione dei dati sismici del nodo 16509 – rapporto M/R

Cautelativamente in questa sede si adotta comunque un valore di Massima Magnitudo attesa $M = 5,5$ è in accordo anche con le valutazioni sul rischio di liquefazione sviluppate nell'ambito degli elaborati PSC – Associazione Reno–Galliera (2006-2007).

Una prima verifica del rischio di liquefazione delle sabbie limose è eseguita con metodi empirici basati su parametri granulometrici (senza riferimenti alla profondità ed a dati sismici), utilizzando il software dedicato Sgeo (Figura 19).

Committente:	Comune di Castelmaggiore (BO)
Riferimento:	
Località:	Castelmaggiore
Opera:	Progetto Nuovo Polo Scolastico

POTENZIALITA' ALLA FLUIDIFICAZIONE - METODI EMPIRICI

METODO DI KISHIDA - 1969

D 10 (mm):	0,0050	Densità relativa (%):	30,0
D 60 (mm):	0,2200	Carico litostatico efficace (kg/cm²):	1,00
Coefficiente di uniformità:	44,00		

POTENZIALITA' ALLA FLUIDIFICAZIONE: SI

METODO DI OHSAKI - 1970

D 10 (mm):	0,0050	Frazione minore di 2 micron (%):	6,0
D 60 (mm):	0,2200	N SPT (colpi):	10
Coefficiente di uniformità:	44,00	Profondità SPT (m):	12,00

POTENZIALITA' ALLA FLUIDIFICAZIONE: SI

METODO DI DURVILLE et AL. - 1985

D 10 (mm):	0,0050	Umidità naturale (%):	27,0
D 15 (mm):	0,0280	Limite liquido (%):	37,0
D 50 (mm):	0,1900	Limite plastico (%):	27,0
D 60 (mm):	0,2200	Indice plastico (%):	10,0
Coefficiente di uniformità:	44,00	Grado di saturazione (%):	88,0

POTENZIALITA' ALLA FLUIDIFICAZIONE: SI

Figura 19 – analisi potenzialità alla liquefazione – metodi empirici (SW Sgeo)

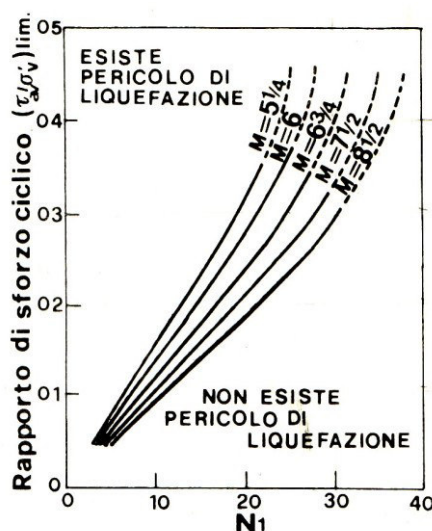
Dalla suddetta verifica emerge che i depositi sabbioso-limosi presenti, per motivi granulometrici e idrogeologici, sono potenzialmente soggetti a fenomeni di liquefazione, per cui si ritiene opportuno eseguire una verifica utilizzando modelli di calcolo accreditati (Seed e Idriss, 1982; Tokimatsu e Yoshimi, 1983), qui di seguito descritti.

Seed e Idriss (1982)

Il metodo si basa sulla determinazione di 2 quantità:

- il fattore di resistenza (R)
- il fattore di liquefazione (L)

Il parametro R, che esprime il rapporto di sforzo ciclico, viene valutato sulla base del grafico seguente, in funzione della Magnitudo (M) e numero di colpi SPT.



Il parametro L è dato dalla seguente relazione:

$$L = 0.65 \cdot \frac{a_{\max} \cdot \sigma}{g \cdot \sigma} \cdot r_d = 0.65 \cdot C \cdot \frac{\sigma}{\sigma} \cdot r_d$$

dove:

- a_{\max} è l'accelerazione massima al suolo (cm/sec^2)
- g è l'accelerazione di gravità (980 cm/sec^2)
- σ_v' è la pressione verticale efficace (Kg/cm^2)
- σ_v è la pressione verticale totale (Kg/cm^2)
- r_d è un fattore di riduzione per tener conto della deformabilità del terreno ($r_d = 1 - 0.015 \cdot Z$; con Z uguale alla profondità in metri dello strato considerato)

L'indice di Liquefazione (IL) è dato dal seguente rapporto:

$$IL = \frac{R}{L}$$

Il terreno o lo strato interessato non è liquefacibile se $IL > 1.3$.

Tokimatsu e Yoshimi (1983)

Questo metodo, che è quello consigliato nella proposta di nuove norme sismiche (PFG-CNR, 1984), si basa sulla determinazione di 2 quantità:

- il fattore di resistenza (R)
- il fattore di liquefazione (L)

Il parametro R viene valutato sulla base della seguente relazione:

$$R = a \cdot Cr \cdot \left[\frac{16 \cdot \sqrt{N_1 + \Delta N_f}}{100} + \left(\frac{16 \cdot \sqrt{N_1 + \Delta N_f}}{C_s} \right)^n \right]$$

dove:

- $a = 0,45$
- $Cr = 0,57$
- $n = 14$
- $C_s = 75$
- $\Delta N_f = 0$ (per sabbie pulite)
- $\Delta N_f = 5$ (per sabbie limose)
- $N_1 = \left[\frac{1.7}{\sigma' + 0.7} \right] N_{spt}$

La quantità σ_v' è espressa in Kg/cmq.

Il parametro L è dato dalla seguente relazione:

$$L = \frac{a_{\max} \cdot \sigma}{g \cdot \sigma} \cdot r_d \cdot r_n = \gamma \cdot \frac{\sigma}{\sigma} \cdot r_d \cdot r_n$$

dove:

- a_{\max} è l'accelerazione massima al suolo (cm/sec^2)
- g è l'accelerazione di gravità (980 cm/sec^2)
- σ_v' è la pressione verticale efficace (Kg/cm^2)
- σ_v è la pressione verticale totale (Kg/cm^2)
- r_d è un fattore di riduzione per tener conto della deformabilità del terreno ($r_d = 1 - 0.015 \cdot Z$; con Z uguale alla profondità in metri dello strato considerato)
- r_n è un fattore legato alla magnitudo; $r_n = 0.1 (M-1)$

L'indice di Liquefazione (IL) è dato dal seguente rapporto:

$$IL = \frac{R}{L}$$

Il terreno o lo strato interessato non è liquefacibile se $IL > 1.5$.

oooooooooooooooooooo

Nel caso in esame si adotta una profondità di falda di 3,5 m dal p.c. (come rilevato nel corso delle indagini) ed una Magnitudo Massima attesa $M = 5,5$ (in accordo con quanto risulta negli elaborati PSC – Associazione Reno-Galliera - Microzonazione Sismica, Comune di Castel Maggiore, 2007). Sono analizzate le litologie fino a circa 25-26 metri di profondità dal p.c., al di sopra del substrato ghiaioso; i valori SPT e del diametro D50 oltre i 16-17 m di profondità sono stimati in base all'analisi delle carote estratte.

Inoltre, poiché dall'analisi dell'andamento stratigrafico si è individuata una differenza fra una zona occidentale in cui prevalgono litologie sabbiose medio-fini limose (da 6 m a 25 m dal p.c.) ed un settore orientale in cui è presente una alternanza di strati di 4-5 m di limi argillosi e di sabbie limose (da 14 a 26 m dal p.c.), si ritiene opportuno eseguire le verifiche di liquefazione separatamente per le due suddette zone (vedi modello geologico - Fig.13).

Le verifiche sono implementate con calcolo automatico utilizzando il software dedicato *Sgeo*.

Per quanto riguarda il settore ovest, litostratigraficamente più critico, ove sono localizzati la Scuola Primaria, la mensa, la palestra e la biblioteca con strutture in c.a., i risultati fanno emergere una differenziazione fra i due modelli di calcolo implementati.

Il modello di *Seed & Idriss* individua una potenziale liquefazione nelle sabbie presenti a 6-11 m ed a 15-20 m, mentre il modello di *Tokimatsu & Yoshimi* non evidenzia rischio di liquefazione delle sabbie.

In relazione a tale differenza di analisi si deve sottolineare che nel modello di *Seed & Idriss* lo strato a 6-11 metri risulta con un Indice di Liquefazione decisamente basso ($IL = 0,8$) mentre lo strato sabbioso a 15-25 m l'Indice di Liquefazione è di poco al di sotto del limite di $IL = 1,2$. Risulta pertanto che, in base ai calcoli, soltanto lo strato superiore viene valutato con elevato rischio di liquefazione, mentre lo strato inferiore mantiene una certa indecisione statistica.

Invece per quanto riguarda il modello di *Tokimatsu & Yoshimi*, che non evidenzia potenziali fenomeni di liquefazione, lo strato superiore di sabbie è di poco al di sopra del limite ($IL = 1,6$ a fronte del limite $IL = 1,5$), mentre lo strato sabbioso inferiore è più decisamente al di sopra del limite ($IL = 1,7-2,0$).

Confrontando i due modelli emerge pertanto che il rischio di liquefazione è potenzialmente elevato per lo strato sabbioso presente a 6-11 m dal p.c., mentre è potenzialmente basso nello strato sabbioso sottostante a 15-25 m dal p.c. (d'altra parte i fenomeni di liquefazione acquistano significatività soltanto a profondità inferiori a 15-20 m dal p.c.).

Tenendo conto del grado di approssimazione, delle differenze fra i due suddetti modelli di calcolo, e dei valori dell'Indice di Liquefazione ottenuti, cautelativamente si farà riferimento ai risultati ottenuti dal modello di Seed&Idriss.

A tale proposito si sottolinea che anche nella Relazione Geologica di Microzonazione Sismica del Comune di Castel Maggiore (PSC, 2007) si evidenzia un certo grado di incertezza circa il rischio di Liquefazione di depositi sabbiosi, con valutazione al limite fra basso-nullo rischio e medio-elevato rischio; infatti nella suddetta Relazione si afferma testualmente *“Rimane pertanto un grado di incertezza che consiglia di assumere cautele strutturali adeguate, almeno per gli edifici di nuova edificazione, in tutte le aree perimetrate nella carta di microzonazione sismica con possibilità di liquefazione. Anche perché l'espansione insediativa di questi ultimi 50 anni ha occupato amplissime superfici in precedenza agricole, che sono quindi sfuggite all'osservazione nei casi censiti di terremoti storici.”*

Pertanto alla luce dei risultati ottenuti viene in questa sede assunto come presente il rischio di liquefazione delle sabbie, con maggiore rischio nelle sabbie presenti alla profondità da 6 a 11 metri dal p.c.

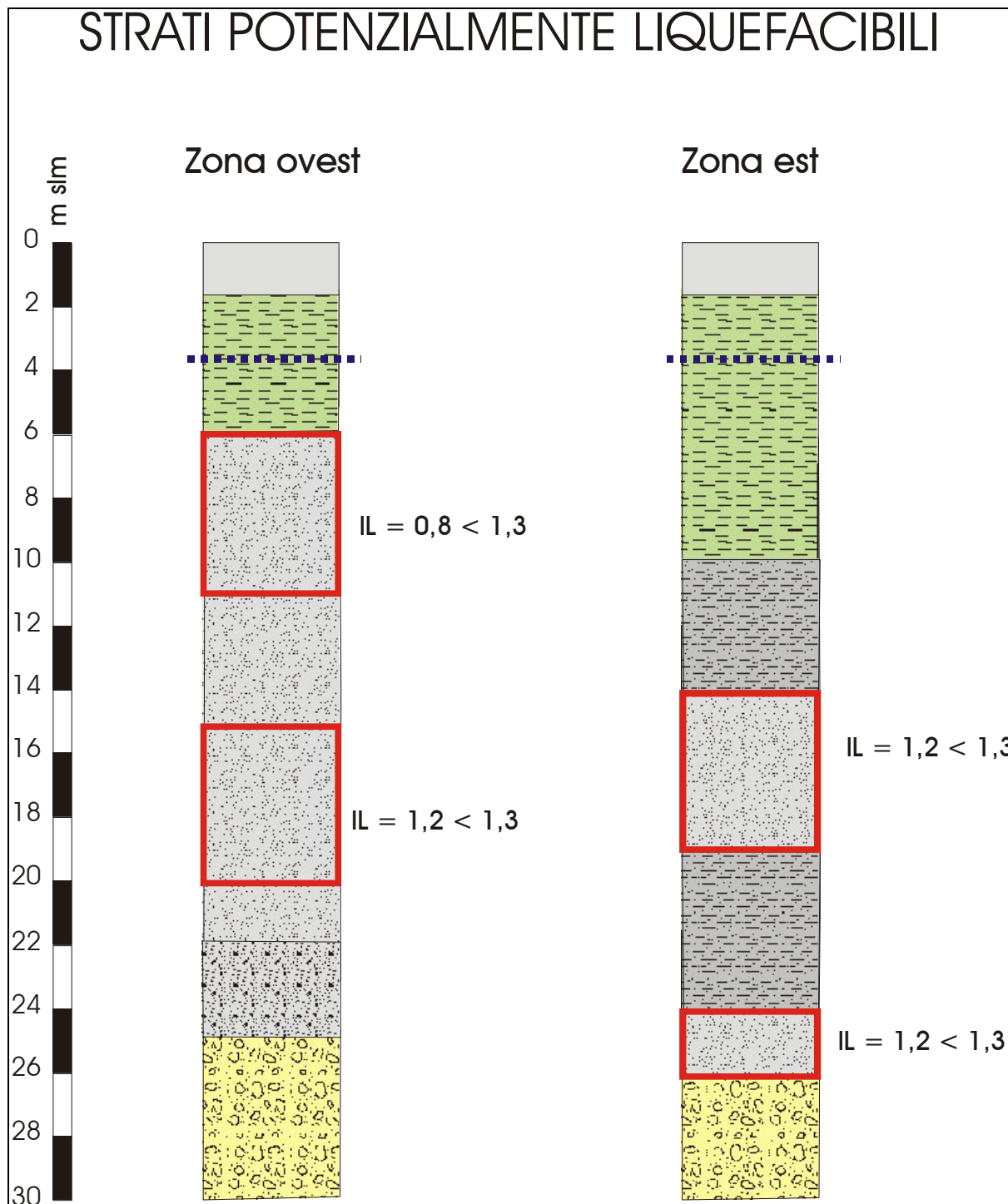
Per quanto riguarda il settore est, litostratigraficamente meno critico, ove è localizzata la Scuola dell'Infanzia prevista con strutture lignee, i risultati, considerando il modello di Seed & Idriss, fanno emergere una potenziale liquefazione nelle sabbie presenti a 14-19 m dal p.c., con un valore di $IL=1,2$ leggermente inferiore a quello limite di 1,3; si individua inoltre una seconda zona di circa 2 m di spessore potenzialmente liquefacibile oltre i 24 m di profondità (quest'ultima trascurabile data la profondità).

Il modello di Tokimatsu & Yoshimi , come nel caso del settore ovest, non evidenzia rischio di liquefazione delle sabbie.

In conclusione si può affermare che fenomeni di liquefazione sono potenzialmente probabili nel settore ovest dell'area ove lo strato sabbioso interessato è localizzato a profondità di 6-11 m dal p.c. e con valori di $IL = 0,8 < 1,3$; nel settore est invece lo strato potenzialmente liquefacibile è a profondità maggiori (14-19 m da p.c.) e con valori di $IL = 1,2$ (leggermente inferiore al valore limite di 1,3). Inoltre mente nel settore ovest in superficie è presente uno strato argilloso potente circa 6 metri, nel settore est tale spessore arriva a 14 metri. Tale valutazione è confortata anche dalle considerazioni precedentemente svolte circa il valori di magnitudo assunta ($M=5,5$) con riferimento alle distanze degli epicentri.

I grafici di calcolo dei due modelli implementati e delle due zone esaminate sono allegati alla fine del presente rapporto.

La Figura 20 mostra graficamente i risultati ottenuti nelle due zone evidenziando gli strati potenzialmente liquefacibili ed i differenti valori di IL



.Figura 20 – confronto fra il rischio di liquefazione fra le due zone (modello Seed&Idriss)

7. PROBLEMATICHE GEOLOGICHE

Il progetto del Nuovo Polo Scolastico del Comune di Castel Maggiore (BO), contempla alcuni fabbricati relativi alla Scuola Primaria, Scuola dell'Infanzia, mensa, palestra e biblioteca. Trattasi di strutture in c.a. di altezza limitata a 6-7 metri, tranne la Scuola dell'Infanzia, localizzata nel settore est dell'area, che è prevista con strutture lignee (Figura 21).

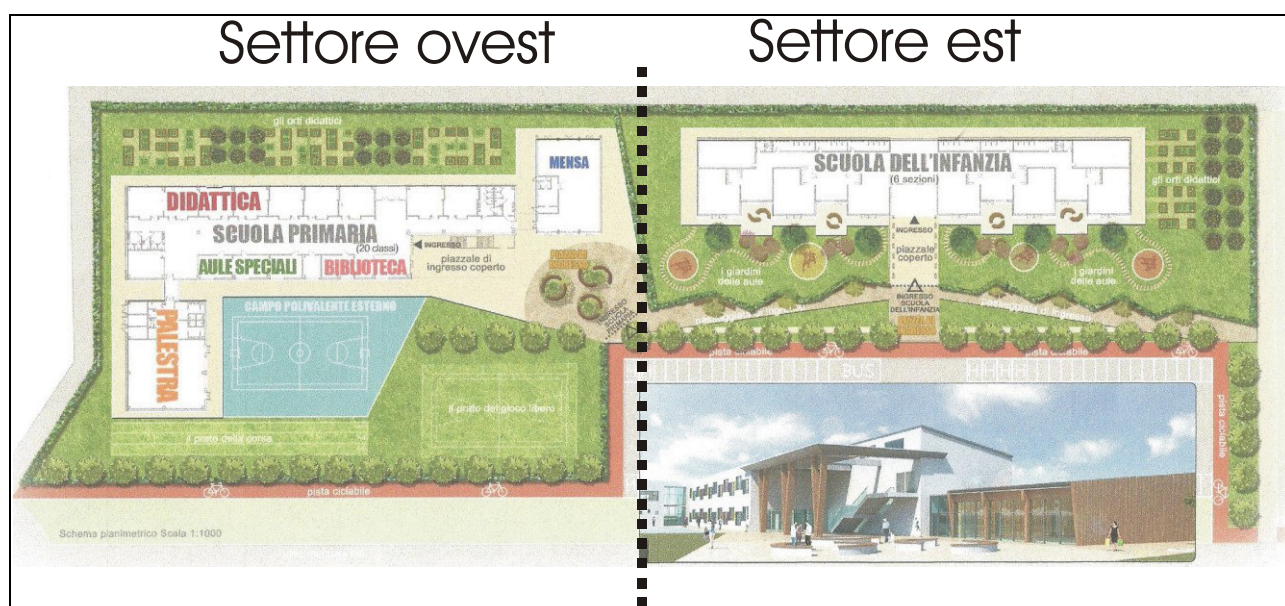


Figura 21 – Localizzazione degli edifici del Nuovo Polo Scolastico

Dalle analisi idro-geo-morfologiche precedentemente descritte emergono le seguenti problematiche che

- Fino alla profondità di circa 27-27 m da p.c. sono presenti depositi olocenici-recenti da sabbioso-limosi e limo argillosi con frequenti interstratificazioni ed eteropie di facies, sovrimposti ad un substrato pleistocenico ghiaioso-sabbioso; tali terreni sono caratterizzati da bassi valori di addensamento e/o consistenza;
- E' presente un livello piezometrico a limitata profondità dal p.c. (3,5 m da p.c. misurata con probabili escursioni)
- Si segnala la presenza di fenomeni generali di subsidenza che, in base alla cartografia ufficiale (PSA – Associazione Reno-Galliera), risultano di circa 3 cm/anno

- La presenza di sabbie fini limose a profondità variabile da 6-10 m sino a 26-27 metri determina potenziali fenomeni di liquefazione, che impongono scelte cautelative dal punto di vista fondale dei manufatti
- In relazione al rischio di liquefazione la successione stratigrafica emersa individua maggiori rischi nei settori occidentali dell'area, mentre nel settore orientale (ove è prevista la Scuola dell'Infanzia con struttura lignea) il rischio è decisamente più basso e, data la profondità degli strati a rischio liquefazione (15-20 m da p.c.), e può essere considerato nullo;
- In relazione alle fondazioni della Scuola dell'Infanzia con struttura lignea, va tenuto conto della locale presenza di riporti grossolani con spessore individuato di circa 2 metri; nelle successive fasi progettuali sarà opportuno indagare l'estensione areale di tali riporti.

8. BIBLIOGRAFIA

CNR - PROGETTO FINALIZZATO GEODINAMICA (1985), *Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980*, Roma

CONFERENZA DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME – PROTEZIONE CIVILE NAZ., (2008) - *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*

GNDT, (2004), Zone Sismogenetiche (ZS9)

INGV- ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA. (2001), *DISS-2, Database of Potenzial Sources for Earthquakes*, 2001

INGV- ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA. (2001), *Pericolosità di sito – progetto S1*, 2001

ISPRA - (2009), *Carta geologica – scala 1:50.000, Note illustrative della carta geologica d'Italia, Foglio n. 221-Bologna*

ASSOCIAZIONE RENO-GALLIERA – PSC - TERRE DI PIANURA - – ELABORATO IN FORMA ASSOCIATA (2006), *Quadro Conoscitivo – Sistema Ambientale*, 2006

ASSOCIAZIONE RENO-GALLIERA – PSC – ELABORATO IN FORMA ASSOCIATA (2007), *Relazione Geologica – Microzonazione Sismica – Piano Strutturale Comunale – Comune di Castel Maggiore – BO*, 2007

9. TABULATI DI VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

Committente:	Comune di Castelmaggiore (BO)
Riferimento:	
Località:	Castelmaggiore
Opera:	Progetto Nuovo Polo Scolastico - settore ovest

POTENZIALITA' ALLA FLUIDIFICAZIONE **METODO DI SEED E IDRIS (1982)**

Grado di sismicità:	7	Coefficiente di intensità sismica (Norme italiane):	0,04
Intensità sismica (Io):	4	Coefficiente di intensità sismica (PFG-CNR):	0,15
Magnitudo (M):	5,5	Accelerazione al suolo (a) [cm²/sec]:	147,0

Profondità m	Densità g/cm³	D 50 mm	N spt colpi	Potenz. Fluidif.	Descrizione
0,00 ÷ 6,00	1,80	0,0036	7	NO	argilla limosa grigio-verdastra
6,00 ÷ 11,00	1,80	0,0960	8	SI	Sabbia limosa grigia
11,00 ÷ 20,00	1,80	0,1940	14	SI	Sabbia limosa grigia
20,00 ÷ 22,00	1,90	0,0036	12	NO	Limo argilloso grigio
22,00 ÷ 25,00	1,90	0,2700	30	SI	Sabbia grossolana

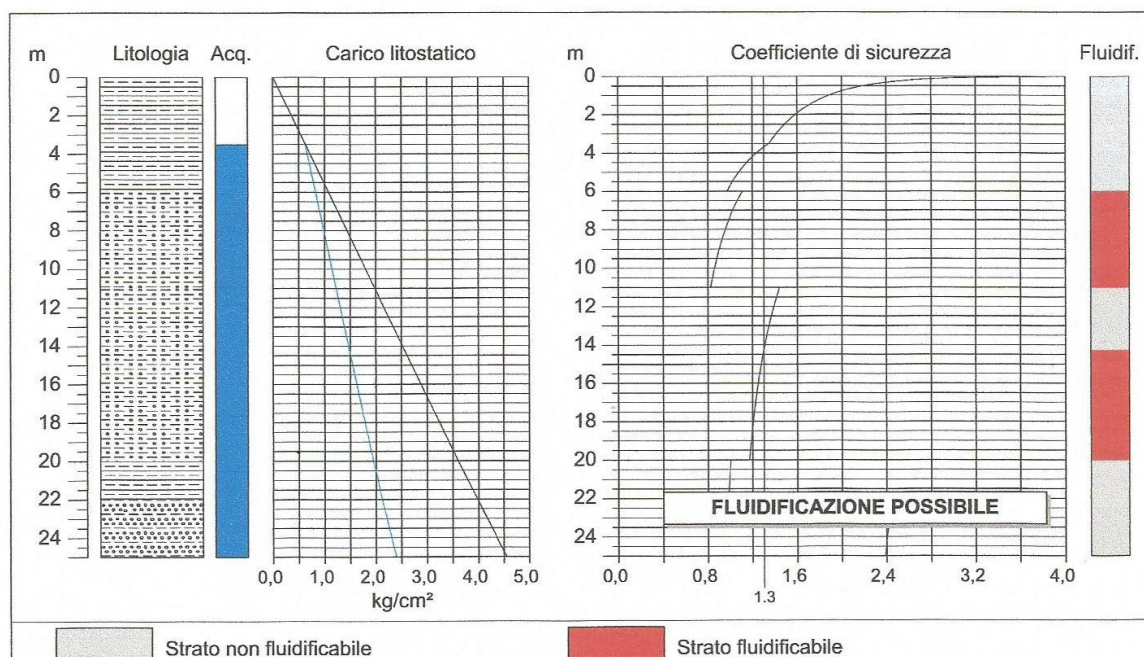


Figura 1 – Elaborazione rischio di liquefazione dei terreni – settore ovest
(metodo Seed&Idriss, 1982)

Committente:	Comune di Castelmaggiore (BO)
Riferimento:	
Località:	Castelmaggiore
Opera:	Progetto Nuovo Polo Scolastico - settore ovest

POTENZIALITA' ALLA FLUIDIFICAZIONE
METODO DI TOKIMATSU E YOSHIMI (1983)

Grado di sismicità:	7	Coefficiente di intensità sismica (Norme italiane):	0,04
Intensità sismica (I ₀):	4	Coefficiente di intensità sismica (PFG-CNR):	0,15
Magnitudo (M):	5,5	Accelerazione al suolo (a) [cm²/sec]:	147,0

Profondità m	Densità g/cm³	D 50 mm	N spt colpi	Potenz. Fluidif.	Descrizione
0,00 ÷ 6,00	1,80	0,0036	7	NO	argilla limosa grigio-verdastra
6,00 ÷ 11,00	1,80	0,0960	8	SI	Sabbia limosa grigia
11,00 ÷ 20,00	1,80	0,1940	14	SI	Sabbia limosa grigia
20,00 ÷ 22,00	1,90	0,0036	12	NO	Limo argilloso grigio
22,00 ÷ 25,00	1,90	0,2700	30	SI	Sabbia grossolana

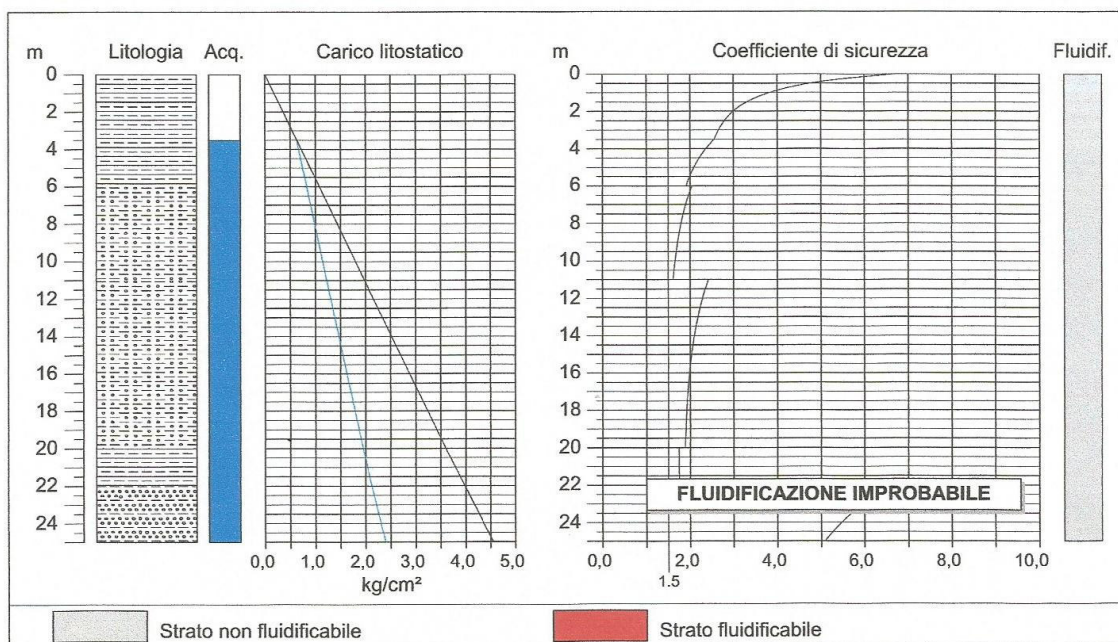


Figura 20 – Elaborazione rischio di liquefazione dei terreni – settore ovest
(metodo Tokimatsu & Yoshimi, 1983)

Committente:	Comune di Castelmaggiore (BO)
Riferimento:	
Località:	Castelmaggiore
Opera:	Progetto Nuovo Polo Scolastico - settore est

POTENZIALITA' ALLA FLUIDIFICAZIONE
METODO DI SEED E IDRIS (1982)

Grado di sismicità:	7	Coefficiente di intensità sismica (Norme italiane):	0,04
Intensità sismica (I ₀):	4	Coefficiente di intensità sismica (PFG-CNR):	0,15
Magnitudo (M):	5,5	Accelerazione al suolo (a) [cm ² /sec]:	147,0

Profondità m	Densità g/cm ³	D 50 mm	N spt colpi	Potenz. Fluidif.	Descrizione
0,00 ÷ 10,00	1,80	0,0026	7	NO	argilla limosa grigio-verdastra
10,00 ÷ 14,00	1,90	0,0067	7	NO	Limo argilloso grigio
14,00 ÷ 19,00	1,80	0,1940	14	SI	Sabbia limosa
19,00 ÷ 24,00	1,90	0,0067	12	NO	Limo argilloso grigio
24,00 ÷ 26,00	1,80	0,1940	15	SI	Sabbia limosa grigia

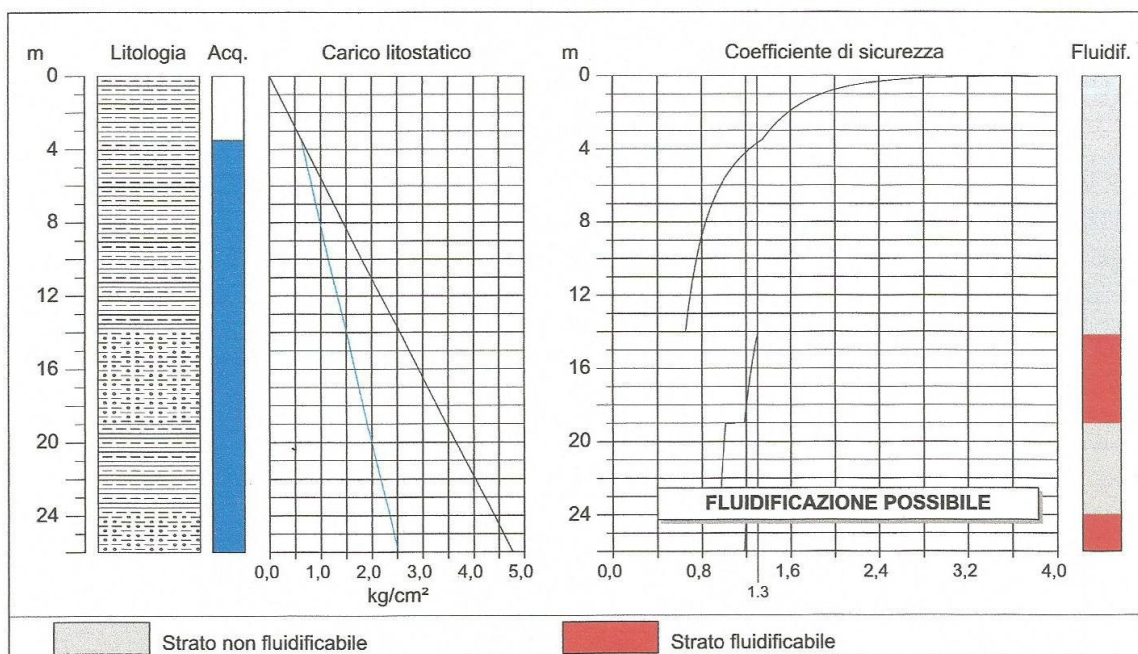


Figura 21 – Elaborazione rischio di liquefazione dei terreni – settore est
(metodo Seed&Idriss, 1982)

Committente:	Comune di Castelmaggiore (BO)
Riferimento:	
Località:	Castelmaggiore
Opera:	Progetto Nuovo Polo Scolastico - settore est

POTENZIALITA' ALLA FLUIDIFICAZIONE
METODO DI TOKIMATSU E YOSHIMI (1983)

Grado di sismicità:	7	Coefficiente di intensità sismica (Norme italiane):	0,04
Intensità sismica (Io):	4	Coefficiente di intensità sismica (PFG-CNR):	0,15
Magnitudo (M):	5,5	Accelerazione al suolo (a) [cm²/sec]:	147,0

Profondità m	Densità g/cm³	D 50 mm	N spt colpi	Potenz. Fluidif.	Descrizione
0,00 ÷ 10,00	1,80	0,0026	7	NO	argilla limosa grigio-verdastra
10,00 ÷ 14,00	1,90	0,0067	7	NO	Limo argilloso grigio
14,00 ÷ 19,00	1,80	0,1940	14	SI	Sabbia limosa
19,00 ÷ 24,00	1,90	0,0067	12	NO	Limo argilloso grigio
24,00 ÷ 26,00	1,80	0,1940	15	SI	Sabbia limosa grigia

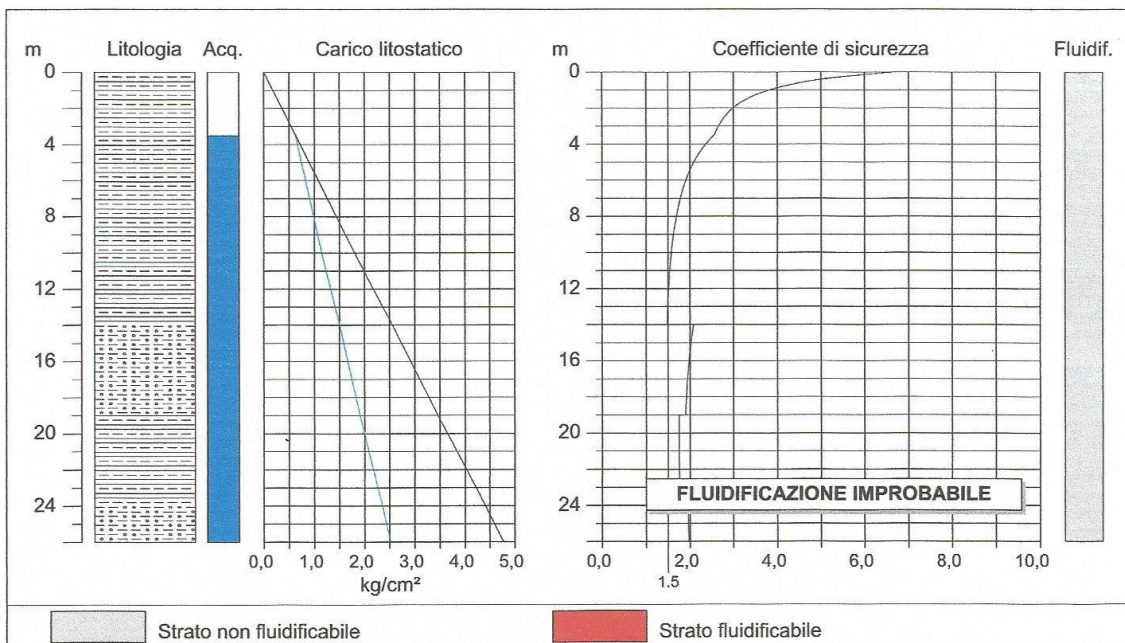


Figura 22 – Elaborazione rischio di liquefazione dei terreni – settore est
(metodo Tokimatsu&Yoshimi, 1983)

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. INQUADRAMENTO IDRO-GEO-MORFOLOGICO.....	4
2.1 Ubicazione, geomorfologia.....	4
2.2 Geologia.....	5
2.3 Idrogeologia.....	9
2.4 Sismicità.....	10
3. INDAGINI GEOTECNICHE	13
3. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI.....	16
4.1 Modelli di interpretazione geotecnica	16
4.2 Caratteristiche geotecniche.....	17
4. PROBLEMATICHE GEOTECNICHE INERENTI IL PROGETTO.....	28
5. BIBLIOGRAFIA	30
6. GRAFICI E TABULATI GEOTECNICI (LABORATORIO, SPT, CPTU)	31

Allegato: Indagini geognostiche e geofisiche (AURELISOIL, srl, AQ)

1. PREMESSA

La presente relazione esamina gli aspetti geotecnici in relazione alla Progettazione Definitiva del Complesso Scolastico contemplante alcuni fabbricati relativi alla Scuola Primaria, dell'Infanzia, mensa, palestra e biblioteca, nel Comune di Castel Maggiore (BO).

Il presente rapporto, relativo al progetto definitivo, viene sviluppato in base a dati geotecnici con riferimento ad indagini geognostiche appositamente eseguite.

Gli aspetti geologici, geomorfologici, idrogeologici e sismici sono discussi nella Relazione Geologica.

Il presente rapporto analizza e discute i seguenti argomenti:

- inquadramento idro-geo-morfologico generale dell'area;
- descrizione delle indagini geotecniche eseguite;
- modelli di interpretazione dei dati geotecnici;
- analisi dei caratteri fisico-meccanici delle varie unità litotecniche
- problematiche geotecniche in relazione agli interventi di progetto

2. INQUADRAMENTO IDRO-GEO-MORFOLOGICO

Rimandando alla relazione Geologica per una più approfondita disamina, si riassumono qui di seguito i principali aspetti geologici, idrogeologici e sismici.

2.1 Ubicazione, geomorfologia

L'area in esame è localizzata nel settore sud-ovest dell'abitato di Castel Maggiore (BO), come mostra la Figura 1.

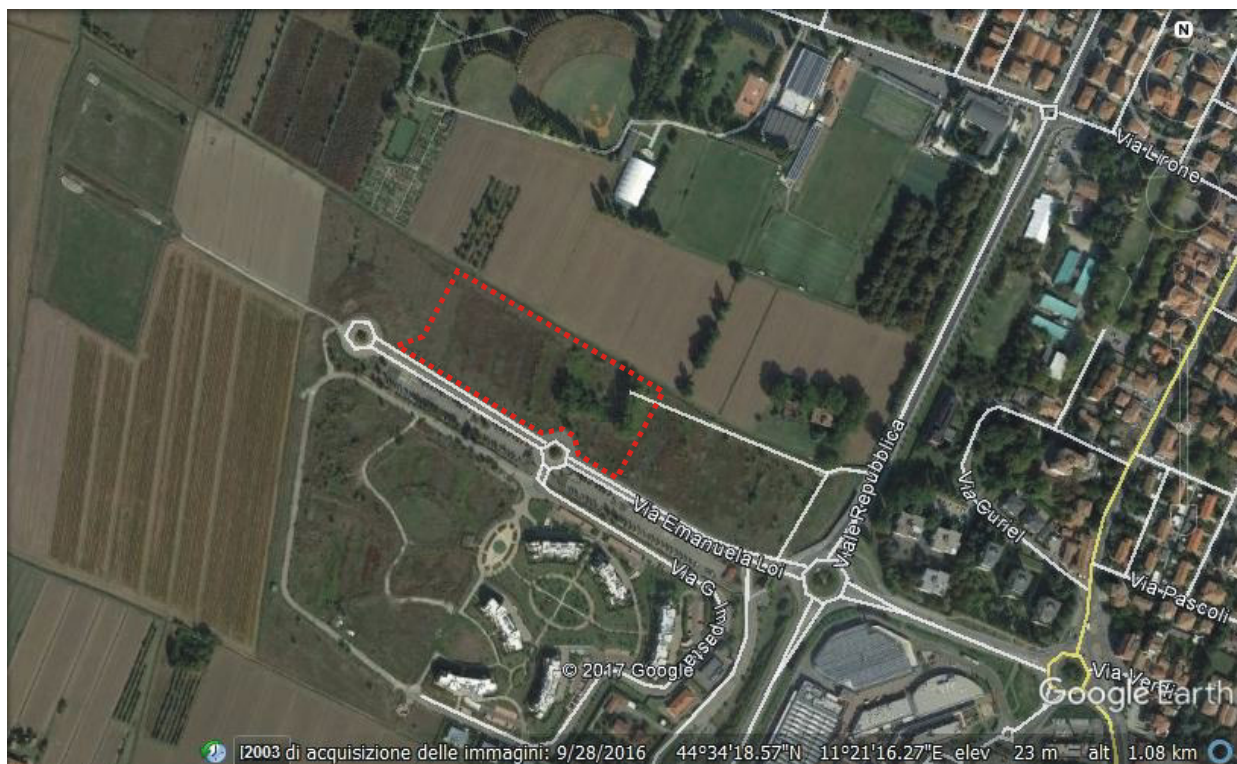


Figura 1 – ubicazione area in esame

Dal punto di vista della evoluzione geomorfologica l'area in esame si trova entro la zona di influenza dei corsi d'acqua di origine appenninica che hanno dato origine alla pianura padana, con riferimento specifico al Fiume Reno che scorre più ad ovest a circa 5 Km di distanza.

In tale contesto l'area in esame è localizzata nel settore centro-orientale della pianura padana, immediatamente a nord della città di Bologna e delle prime propaggini appenniniche.

Il sito in esame è caratterizzato da una morfologia sostanzialmente pianeggiante e quote intorno a 25 m slm; in particolare l'abitato di Castel Maggiore è localizzato su una blanda dorsale delimitato ad est dal corso del canale Navile e ad ovest dallo scolo Riolo e dallo Scolo Bondanello.

Si segnala che il confine nord dell'area ove è localizzato il progetto è delimitato da un fosso.

Dal punto di vista geomorfologico e morfodinamico, si segnala che l'area in esame è inclusa in una zona ove sono storicamente verificati fenomeni di subsidenza, con valori superiori a 3 cm/anno (PSC – Quadro Conoscitivo Ambientale – terre di pianura, 2006) (Figura 2)

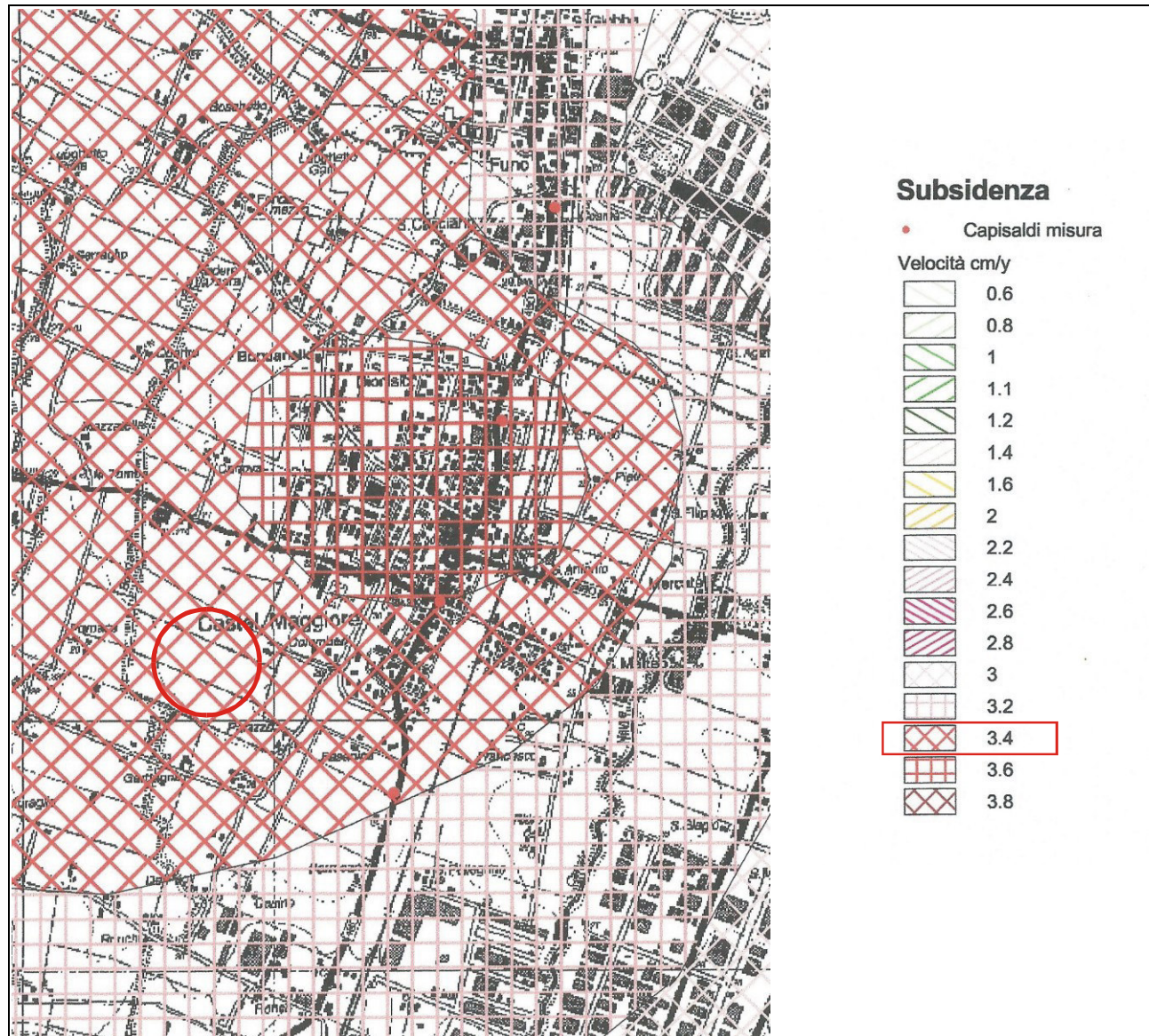


Figura 2 – ubicazione area in esame in un settore con fenomeni di subsidenza storica

(PSC – Quadro conoscitivo – terre di pianura, 2006)

2.2 Geologia

L'area di Castel Maggiore è localizzata in un settore pedeappennino in cui si sono messi in posto in età pleistocenica-olocenica depositi di conoide e intravallivi terrazzati, provenienti dai corsi

d'acqua provenienti dai rilievi appenninici stessi, con termini riferibili al Sintema Emiliano-Romagnolo superiore (AES).

L'esame del Foglio 221-Bologna della Carta Geologica d'Italia scala 1:50.000 evidenzia che l'area in esame affiorano terreni di origine olocenica-recente, appartenenti al frutto della dinamica dei corsi d'acqua che interessavano l'area dal periodo post glaciale wurmiano ad oggi (Figura 3).

anni bP sino all'attuale; nel settore ovest dell'area si passa a depositi più appartenenti l'Unità di Modena (AES8a), più recenti e datati dal IV-VII secolo d.C. all'attuale (datazioni a ^{14}C).

I depositi alluvionali fluvio-lacustri AES8 sono costituiti da litologie prevalentemente sabbiose con rari sottili orizzonti con ghiaietto; più ad ovest l'unità AES8a è caratterizzata da terreni a granulometria fine limo-argillosa.

I depositi AES8 e AES8a sono sovrapposti ad un substrato sabbioso-ghiaioso riferibili al Subsistema di Villa Verucchio (AES7 – Pleistocene sup.), posto alla profondità di alcune decine di metri, come mostra la sezione di seguito mostrata la cui traccia è ubicata a circa 1 Km a nord dell'area in studio (Figura 4)

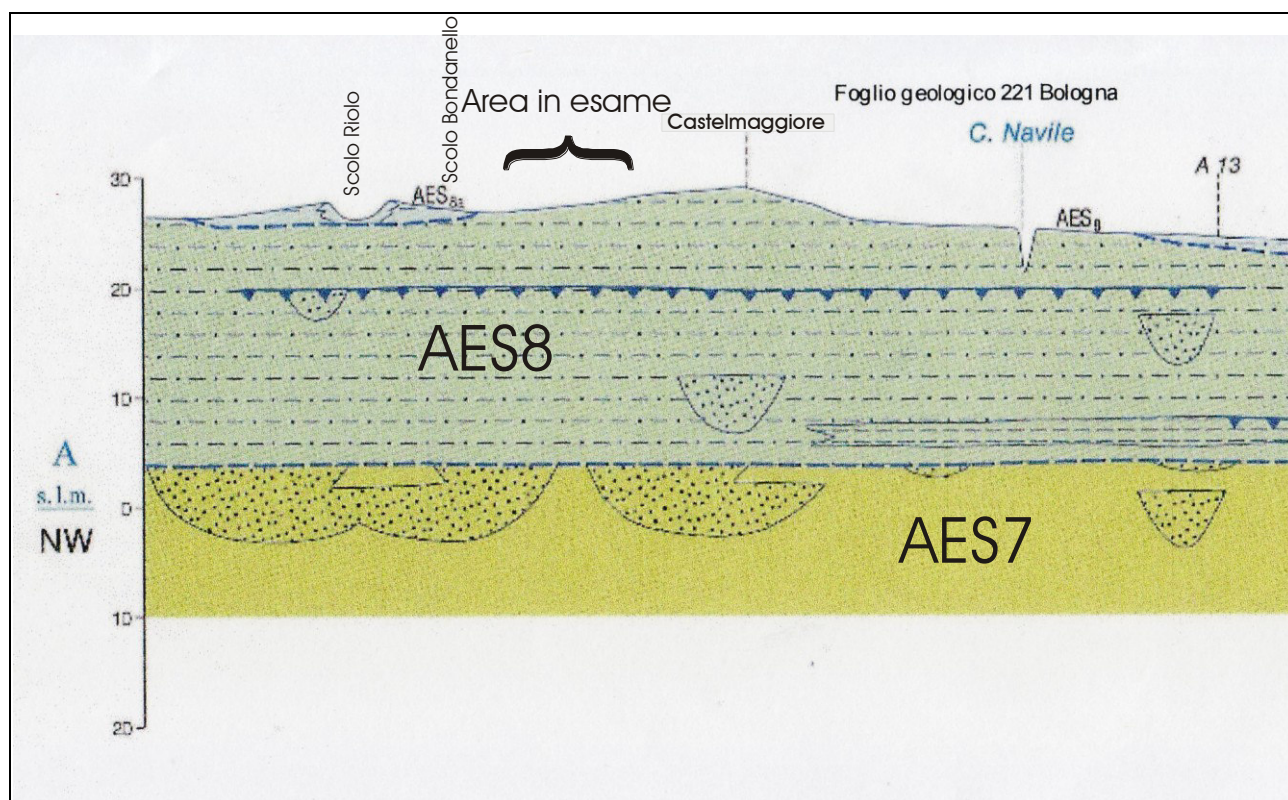


Figura 4 – localizzazione dell'area nella sezione geologica da Foglio 212-Bologna
(scala 1:50.000 - Progetto CARG – fonte sito ISPRA)

Con riferimento alla suddetta figura si evidenzia come nell'area in esame i sondaggi geognostici hanno rilevato la presenza di sabbie grossolane e ghiaia a circa 27-28 m di profondità.

2.3 Idrogeologia

Nel contesto geomorfologico e stratigrafico generale la circolazione idrica sotterranea è condizionata dalla complessa alternanza fra depositi relativamente più permeabili (sabbie, ghiaie) e poco a nulla permeabili (limi, argille) caratterizzati anche da frequenti eteropie di facies.

In particolare si segnala che il confine nord dell'area ove è localizzato il progetto è delimitato da un canale largo circa 1,5-2,0 m e profondo circa 1,5 m che scorre verso ovest e si immette nella rete del vicino Scolo Bondanello (FOTO 1).



FOTO 1 – visuale del fosso che delimita il confine nord dell'area in progetto.

Il piezometro a TA alloggiato nel sondaggio S1 ha rilevato un livello piezometrico a 3,4 m dal p..c. (21,5 m slm).

Dalla letteratura idrogeologica ((PSC – Unione Reno Galliera, Comune di Castel Maggiore) si individua una piezometrica intorno a 24-25 m slm, come dimostra la presenza del canale drenante di cui sopra, e pertanto a piccola profondità dal piano campagna, con gradiente da sud verso nord.

Tale livello piezometrico è caratterizzato da una escursione direttamente relata all'andamento delle precipitazioni atmosferiche.

La circolazione idrica sotterranea è condizionata dalla complessa alternanza fra depositi relativamente più permeabili (sabbie, ghiaie) e poco a nulla permeabili (limi, argille) caratterizzati anche da frequenti eteropie di facies.

2.4 Sismicità

In base all' Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, il comune di Castel Maggiore appartiene alla Zona Sismica 3; tale classificazione è stata confermata con la Delibera della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 1435 del 21.07.2003.

Le prove sismiche MASW hanno evidenziato un andamento dei valori di Vs coerenti con la stratigrafia locale, con un valori di VS30 = 212-244 m/sec a cui fa riferimento una **Classe di Sottosuolo C**.

Data la morfologia pianeggiante si assume una Categoria Topografica T1, con **Coefficiente di Amplificazione Topografica St = 1,0**.

Dall'analisi stratigrafica emerge la presenza di depositi sabbiosi medio-fini in falda, fino alla profondità di circa 20-22 metri e ciò porta ad affermare che siano potenzialmente possibili fenomeni di liquefazione dei terreni.

Infatti le granulometrie dei 3 campioni prelevati dalle sabbie limose sono in gran parte all'interno del fuso "molto facilmente liquefacibile", con parte del fuso a granulometria limosa che è incluso nel campo "facilmente liquefacibile" (Figura 5).

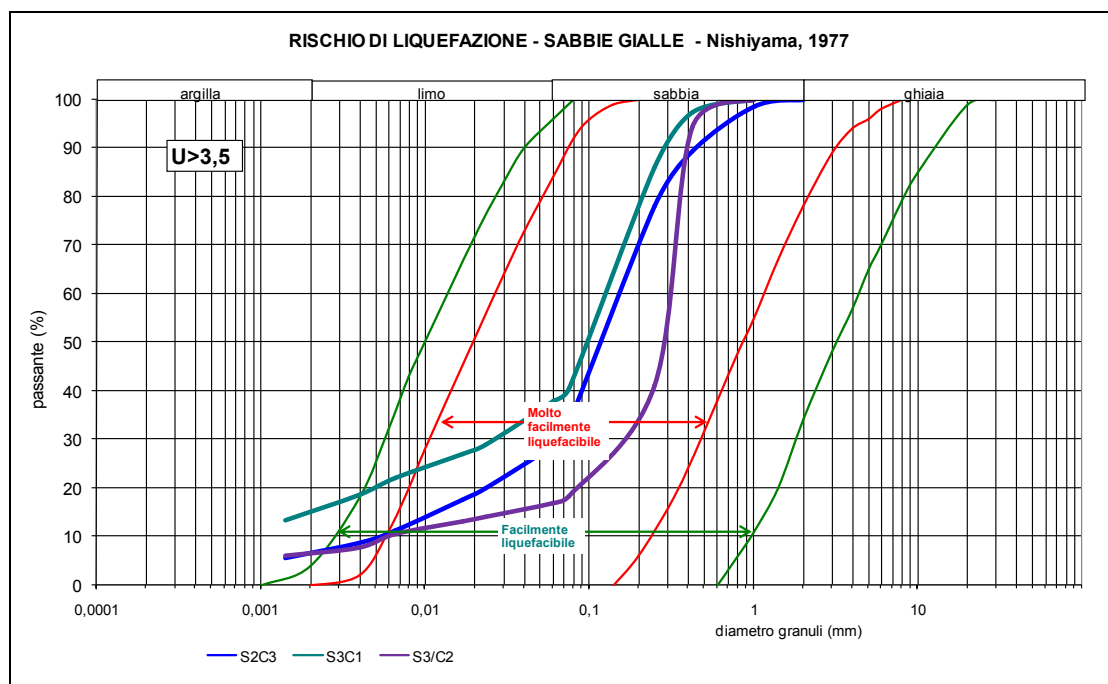


Figura 5 - Fusi granulometrici delle sabbie fini grigiastre (Indirizzi e criteri di Microzonazione Sismica - Protezione Civile Naz., 2008)

Al fine di valutare il rischio di liquefazione dei terreni si eseguite verifiche utilizzando modelli di calcolo accreditati (Seed e Idriss, 1982; Tokimatsu e Yoshimi, 1983), adottando una profondità di falda di 3,5 m dal p.c. (come rilevato nel corso delle indagini) ed una Magnitudo Massima attesa $M = 5,5$ (in accordo con quanto risulta negli elaborati PSC – Associazione Reno-Galliera - Microzonazione Sismica, Comune di Castel Maggiore, 2007).

Inoltre, poiché dall'analisi dell'andamento stratigrafico si è individuata una differenza fra una zona occidentale in cui prevalgono litologie sabbiose medio-fini limose (da 6 m a 25 m dal p.c.) ed un settore orientale in cui è presente una alternanza di strati di 4-5 m di limi argillosi e di sabbie limose (da 14 a 26 m dal p.c.), si sono eseguite verifiche di liquefazione separatamente per le due zone (Fig. 6).

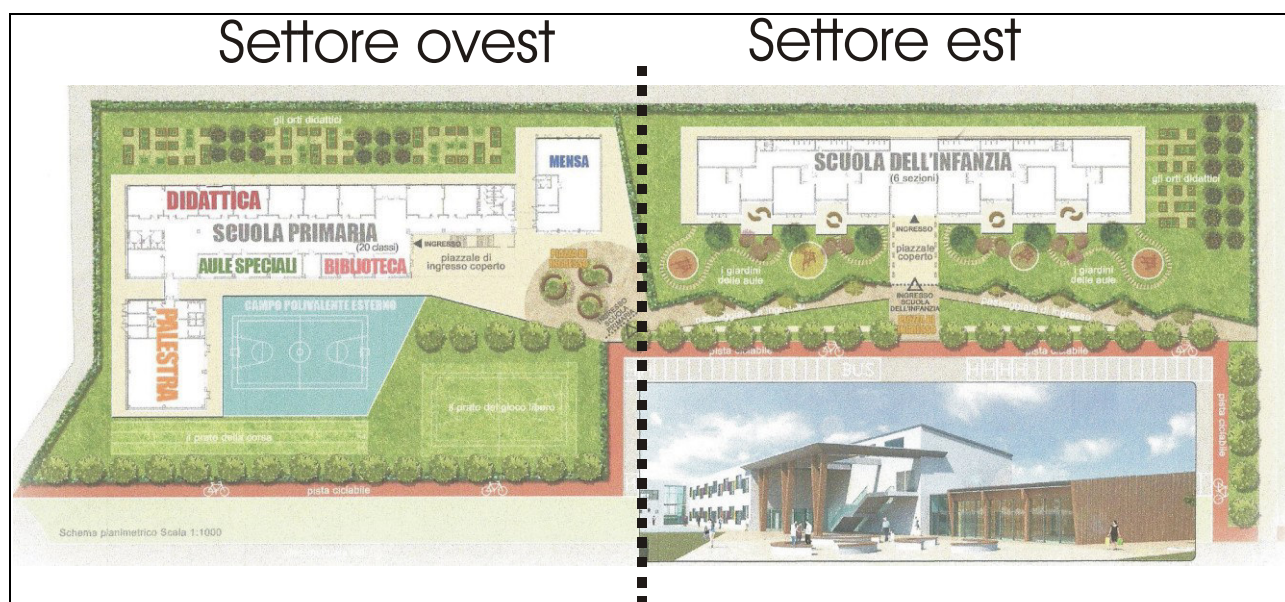


Figura 6 – Localizzazione degli edifici del Nuovo Polo Scolastico

Dall'analisi svolta emerge che fenomeni di liquefazione sono potenzialmente probabili nel settore ovest dell'area ove lo strato sabbioso interessato è localizzato a profondità di 6-11 m dal p.c. e con valori di $IL = 0,8 \ll 1,3$.

Nel settore est invece lo strato potenzialmente liquefacibile è a profondità maggiori (14-19 m da p.c.) e con valori di $IL = 1,2$ (leggermente inferiore al valore limite di 1,3). Inoltre mente nel settore ovest in superficie è presente uno strato argilloso potente circa 6 metri, nel settore est tale spessore arriva a 14 metri.

La Figura 7 mostra graficamente i risultati ottenuti nelle due zone evidenziando gli strati potenzialmente liquefacibili ed i differenti valori di IL

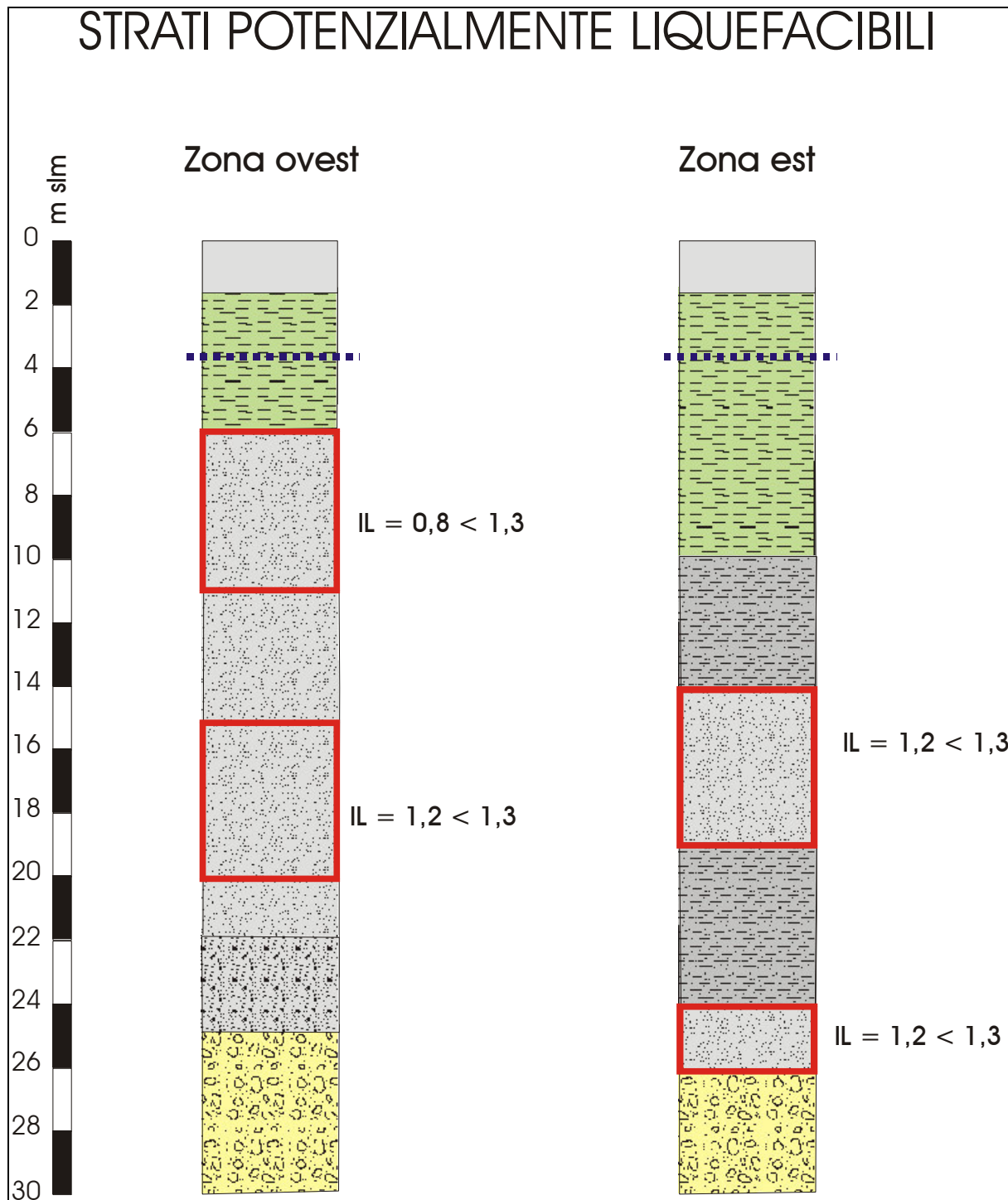


Figura 7 – confronto fra il rischio di liquefazione fra le due zone (modello Seed&Idriss)

In relazione al rischio di liquefazione l'analisi individua maggiori rischi nei settori occidentali dell'area, mentre nel settore orientale (ove è prevista la Scuola dell'Infanzia con struttura lignea) il rischio è decisamente più basso e può essere considerato nullo.

Si rimanda alla relazione Geologica per una più approfondita disamina dell'analisi di liquefazione dei terreni.

3. INDAGINI GEOTECNICHE

L'indagine geotecnica è consistita nella esecuzione di sondaggi geognostici, prove penetrometriche statiche CPTU e indagini geofisiche.

Sondaggi geognostici

L'indagine geognostica si è sviluppata con l'esecuzione di n. 3 sondaggi geognostici a rotazione ed a carotaggio continuo, prelievo di campioni indisturbati, esecuzione di penetrometrie dinamiche SPT ed esecuzione di prove di laboratorio.

La tabella seguente riassume le quantità relative alla suddetta indagine geognostica.

SONDAGGIO n.	PROF. (m)	CAMPIONI IND. n.	SPT n.	PIEZOM.
1	30	3	3	TA
2	30	3	3	-
3	30	3	3	-

I carotaggi sono stati raccolti in cassette catalogatrici ed opportunamente fotografate.

Nel corso dei sondaggi sono state eseguite prove geotecniche in foro (SPT) e sono stati prelevati campioni indisturbati con campionatore Shelby per l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio, i cui risultati saranno discussi nella Relazione Geotecnica.

I campioni indisturbati sono stati prelevati alle seguenti profondità:

SONDAGGIO n.	CAMPIONI IND. n.	PROF, (m da p.c.)
1	1	4,00-4,50
1	2	6,50-7,00
1	3	12,50-13,00
2	1	1,50-2,00

2	2	5,50-6,00
2	3	11,00-11,50
3	1	6,00-6,50
3	2	12,00-12,50
3	3	22,0-22,50

I suddetti campioni sono stati sottoposti alle seguenti prove di laboratorio:

SOND/CAMP	PROFONDITA' m. da p.c.	PROVE DI LABORATORIO
1/1	4,0-4,5	Peso di volume, peso specifico, Limiti Atterberg, Granulometria Taglio Diretto
1/2	6,5-7,0	Peso di volume, peso specifico, Limiti Atterberg, Granulometria
1/3	12,5-13,0	Peso di volume, peso specifico, Limiti Atterberg, Granulometria Taglio Diretto, Prova Edometrica
2/2	5,5-6,0	Peso di volume, peso specifico, Limiti Atterberg, Granulometria
2/3	11,0-11,5	Peso di volume, peso specifico, Limiti Atterberg, Granulometria Taglio Diretto
3/1	6,0-6,5	Peso di volume, peso specifico, Limiti Atterberg, Granulometria
3/2	12,0-12,5	Peso di volume, peso specifico, Limiti Atterberg, Granulometria Taglio Diretto
3/3	22,00-22,50	Peso di volume, peso specifico, Limiti Atterberg, Granulometria Taglio Diretto, Prova Edometrica

Prove penetrometriche statiche CPTU

I sondaggi geognostici sono state associate n. 3 prove penetrometriche statiche CPTU, con misura delle pressioni interstiziali, spinte fino a valori di rifiuto, come da tabella seguente:

CPT n.	PROF. (m)
CPTU-1	27,80

CPTU-2	27,20
CPTU-3	27,90

Indagine geofisica

Inoltre per eseguire valutazioni circa la risposta sismica locale si sono eseguite 2 prove sismiche tipo MASW associate a 2 prove di sismica passiva con modalità HVSr.

oooooooooooo

Le indagini geognostiche sono state eseguite dalla AURELISOIL srl (AQ); le modalità di prova, la descrizione delle attrezzature, la documentazione fotografica ed i dati stratigrafici e geotecnici relativi alle indagini geognostiche sono assemblati in un elaborato al quale si rimanda:

La Figura 8 mostra l'ubicazione delle indagini geognostiche.



Figura 8 – ubicazione indagini geognostiche

3. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI

4.1 Modelli di interpretazione geotecnica

Si descrivono qui di seguito le modalità esecutive delle prove geotecniche di laboratorio ed i modelli interpretativi delle prove in sito.

Prove di laboratorio

Le prove di laboratorio sono consistite, oltre alle usuali procedure di riconoscimento (peso specifico, densità, granulometrie e Limiti di Atterberg), a prove meccaniche per la definizione della resistenza al taglio a lungo termine, per la verifica del comportamento in condizioni drenate. Le caratteristiche di deformabilità, concentrate nei litotipi più spiccatamente pelitici, sono state investigate con prove di Compressione Edometrica.

Alla fine del presente rapporto sono allegati in forma tabellare i parametri fisico-meccanici relative tutte le indagini di laboratorio eseguite.

Prove penetrometriche dinamiche SPT

Nel corso dei sondaggi sono state eseguite prove penetrometriche dinamiche tipo SPT, a varie profondità ed in corrispondenza dei terreni incoerenti.

Per terreni tendenzialmente incoerenti, i valori di N_{spt} sono significativi per la stima delle densità relative (D_r), dell'angolo di attrito di picco (ϕ_p) e di Moduli di Deformazione (E' , E_{25}).

I riferimenti interpretativi fanno riferimento a Bolton (1976), Jamiolkowski (1988), Webb (1970), Stroud (1974).

Alla fine del presente rapporto sono allegati in forma tabellare e grafica i dati penetrometrici dinamici SPT e le relative interpretazioni.

Prove Penetrometriche Statiche CPTU

Le prove penetrometriche statiche CPTU, attraverso la misura della resistenza di punta (q_c) e laterale (f_s), permettono la definizione della litologia attraverso vari indici legati al Rapporto di Frizione fra q_c e f_s (Robertson, 1990; Jefferies&Davies, 1988). Nel corso della prova sono misurate nel contempo le pressioni interstiziali.

Per i litotipi limoso-argillosi si può stimare la coesione non drenata (C_u), il Modulo Edometrico (E_d), il Rapporto di Sovraconsolidazione (OCR), il Modulo di Taglio (G_0); si fa riferimento alle interpretazioni di Mayne&Holtz (1988), Kulhawy&Mayne (1990), Mayne&Rix (1993).

Nei terreni sabbiosi sciolti è possibile stimare la Densità Relativa (D_r), l'angolo di attrito di picco (ϕ'), il Modulo Elastico (E') ed il Modulo di Taglio (G_0); si fa riferimento alle interpretazioni di Jamiolkowski (1987, 1995), Schmertmann (1978), Burland (1989), Rix&Stokoe (1992).

Alla fine del presente rapporto sono allegati in forma grafica i parametri fisico-meccanici interpretati delle 3 CPTU eseguite.

4.2 Caratteristiche geotecniche

La successione stratigrafica locale è caratterizzata da litologie essenzialmente sabbiose medio-fini limose e limi argillosi di età olocenica-recente riferibili al Subsintema di Ravenna (AES8); in profondità si passa a depositi ghiaioso-sabbiosi attribuibili al pleistocene superiore (AES7 - Subsintema di Villa Verucchio).

Si è costruita una sezione litostratigrafica con direzione ovest-est, dalla quale emerge, al di sotto di uno strato continuo di argille limose grigio-verdastre, un settore occidentale in cui prevalgono litologie sabbiose-medio-fini limose ed un settore orientale in cui sono maggiormente presenti limi argillosi intercalati a strati sabbiosi fini.

Si descrivono le caratteristiche geotecniche dei terreni, con riferimento alla successione stratigrafica descritta nella Relazione Geologica, e facendo riferimento alla sezione geologico-tecnica allegata (scala 1:500/1:100).

Terreno vegetale e Riporti

Nell'area si rileva prevalentemente la presenza di una coltre pedogenizzata dello spessore di alcuni decimetri.

Soltanto in corrispondenza del sondaggio S 1 si sono carotati, per uno spessore di circa 2 m, terreni di riporto essenzialmente ghiaiosi-sabbiosi, di colore rossastro per ossidazione, con sparsi elementi di origine antropica (FOTO 2).



FOTO 2 – riporti carotati nei primi 2 metri nel sondaggio S1

Questa unità, dato il limitato spessore, non sono sottoposti a specifiche prove geotecniche, ma dall'analisi visuale delle carotaggi si stimano i seguenti parametri geotecnici con criterio cautelativo:

Peso di Volume - γ (kN/m ³)	17-18
Angolo di attrito - ϕ' (°)	33-35
Coesione drenata - C' (kPa)	0
Modulo di Deformazione - E (MPa)	10-15

Il comportamento geomeccanico è frizionale, con medi termini di deformazione.

Argille limose grigio-verdastre

Al di sotto dei riporti sono presenti con continuità argille limose di colore grigio-verdastro fino alla profondità di circa 6 m dal p.c. in corrispondenza del sondaggio S3 e fino a circa 10 m di profondità in corrispondenza del sondaggio S1.

Si individua pertanto una giacitura del letto delle argille limose debolmente degradante verso est. Dal punto di vista granulometrico prevale decisamente la frazione argillosa (55-60%), con limo intorno al 35%; la frazione sabbiosa non supera il 5% (Figura 8).

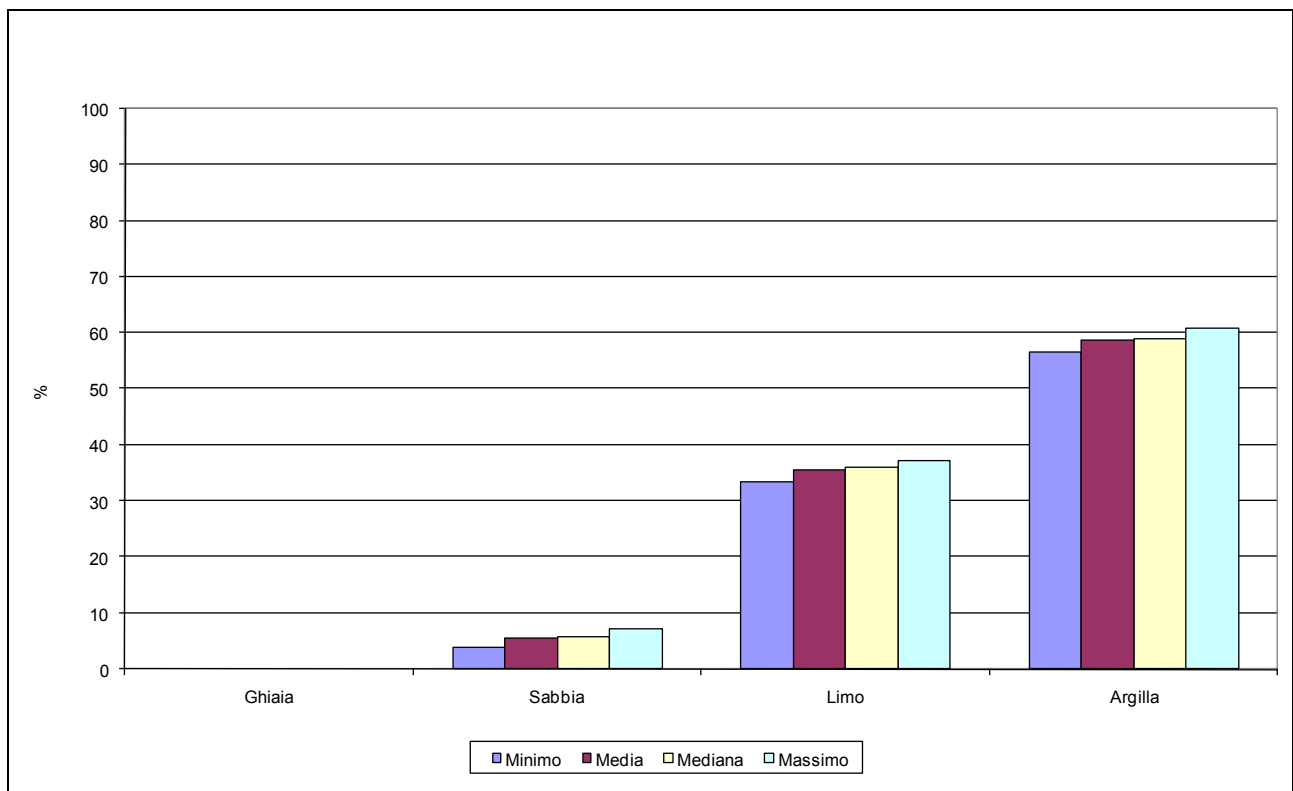


Figura 8 – frazioni granulometriche delle argille limose grigio-verdastre

Le prove di laboratorio individuano umidità naturale $W_n = 27-31\%$ e pesi di volume intorno a $\gamma = 18,4-19,1 \text{ kN/m}^3$.

Il contenuto argilloso determina valori dei Limiti di Atterberg medio-elevati con $LL = 57,7-63,4 \%$ e $IP = 36-40$; dall'Abaco di Casagrande si individuano termini relativi ad argille inorganiche di alta plasticità (CH) (Figura 9)

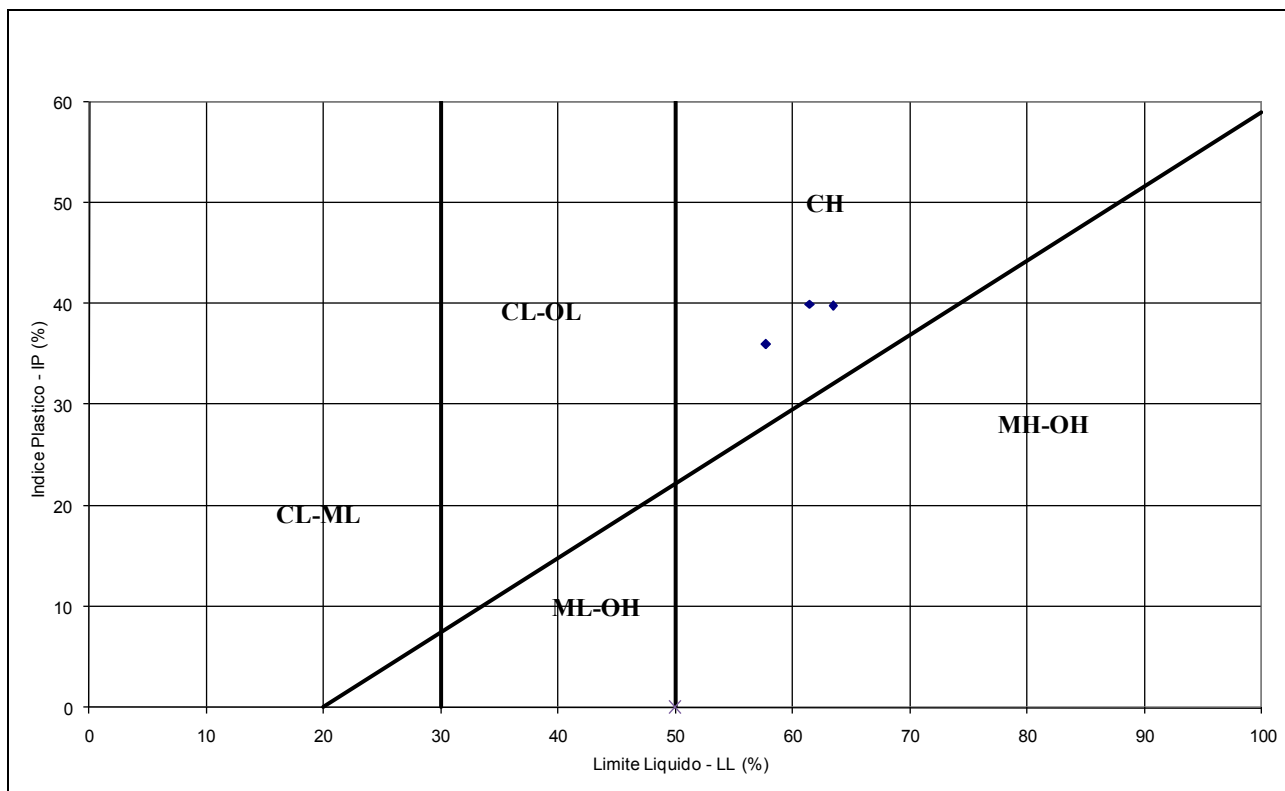


Figura 9 – Caratteristiche di plasticità

L'indice di Consistenza è intorno a $I_c = 0,80-0,85$, caratteristico di stati "solido-plastici", mentre l'attività colloidale individua terreni "normalmente attivi" ($A = 0,8-1,0$).

Il grado di Saturazione è $S_r = 90-100\%$.

Da una prova di taglio diretto si è definito un angolo di attrito $\varphi = 26,6^\circ$ con coesione $C' = 14,2$ kPa. Data la giacitura superficiale di questa unità, si sottolinea che gli stati di consistenza sono variabili in funzione della variazione del contenuto in acqua legato all'andamento delle precipitazioni meteorologiche.

Dalle prove CPTU si sono rilevati valori di resistenza alla punta $q_c = 1-4$ MPa.

Da tali valori si stimano i seguenti parametri meccanici:

- Coesione non drenata - $C_u = 50-100$ kPa
- Modulo Edometrico - $E_{ed} = 8-12$ MPa
- Modulo di Elast. - $E' = 5-10$ Mpa
- Modulo di taglio - $G_o = 20-80$ MPa

Alla luce dei suddetti risultati di laboratorio ed in sito si valutano i seguenti parametri fisico-meccanici per le argille grigio-verdastre:

Peso di volume - γ (kN/m ³)	18-19
Angolo di attrito - ϕ'	24-26
Coesione drenata - C' (kPa)	10-15
Coesione non drenata - C_u (kPa)	50-100
Modulo Edometrico - E_{ed} (MPa)	8-12
Modulo Elast. - E' (MPa)	5-10

Il comportamento geomeccanico è coesivo, con media consistenza e media deformabilità.

Sabbie medio-fini, limose, grigiastre

Inferiormente alle argille verdastre sono state carotate sabbie medio-fini limose con continuità fino a circa 20-22 m di profondità dal p.c. nei sondaggi S2 e S3 (settore ovest dell'area), mentre nel sondaggio S1 (settore est dell'area) le sabbie limose presentano una maggiore interstratificazione con limi argillosi grigiastri (vedi oltre).

Dal punto di vista granulometrico prevale decisamente la frazione sabbiosa (60-70%), con le frazioni limosa e argillosa che non superano rispettivamente il 20 ed il 10 % (Figura 10).

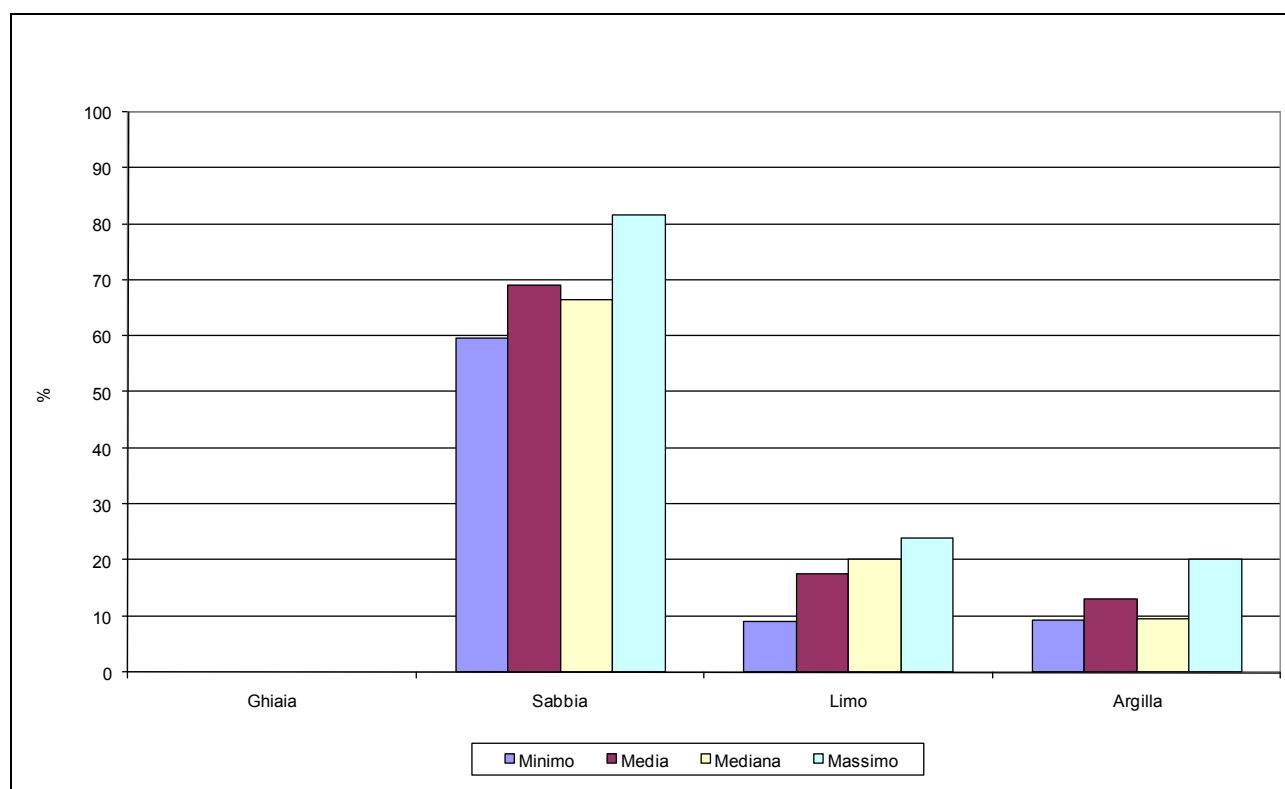


Figura 10 – frazioni granulometriche delle sabbie medio-fini grigiastre

Le prove di laboratorio individuano umidità naturale molto variabile $W_n = 17-34\%$ e pesi di volume intorno a $\gamma = 18,3-19,8 \text{ kN/m}^3$.

Nonostante la maggiore percentuale di sabbie, la frazione argillosa-limosa del 20 % ha reso possibile la determinazione dei Limiti di Atterberg con valori di $LL = 31,5-43,5 \%$ e $IP = 6,5-11,2$, dall'Abaco di Casagrande si individuano termini relativi a "limi di bassa compressibilità" (ML-OH) (Figura 11)

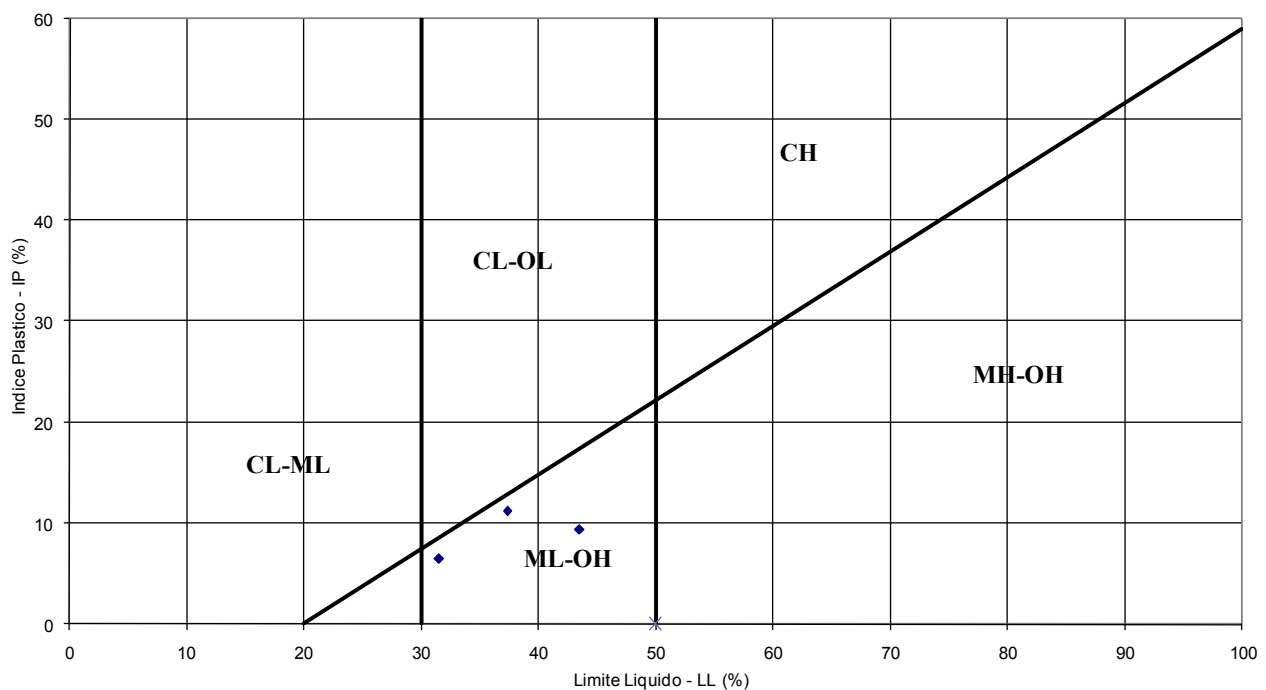


Figura 11 – Caratteristiche di plasticità

L'indice di Consistenza è intorno a $I_c = 0,68-1,8$, caratteristico di stati da "solido-plastici" a "semisolidi", mentre l'attività colloidale risulta molto variabile ($A = 0,63-1,8$), da stati "inattivi" ad "attivi". Il Grado di saturazione è $S_r = 85-100\%$

Da una prova di taglio diretto si è definito un angolo di attrito $\phi = 28-29^\circ$ con coesione $C' = 6,6-10,7 \text{ kPa}$; si individua pertanto un comportamento geomeccanico prevalentemente frizionale, pur con l'apporto marginale di resistenza coesiva e ciò è coerente con i valori di plasticità sopra descritti a fronte della bassa percentuale della frazione limo-argillosa.

Dalle prove CPTU si sono rilevati valori di resistenza alla punta $q_c = 2-4 \text{ MPa}$.

Da tali valori, interpretati come terreni incoerenti, si stimano i seguenti parametri meccanici:

- Densità relativa – $Dr = 30-50 \%$

- Angolo di attrito - $\varphi = 30-32^\circ$
- Coesione drenata - $C' = 0$
- Modulo Edometrico – $E_{ed} = 12-20 \text{ MPa}$
- Modulo di Elast. – $E' = 10-15 \text{ Mpa}$
- Modulo di taglio - $G_o = 80-100 \text{ MPa}$

I valori penetrometrici dinamici SPT hanno dato valori variabili da 8 a 15 colpi/30cm, da cui si stimano i seguenti parametri fisico-meccanici:

- Densità relativa – $D_r = 25-30 \%$
- Angolo di attrito - $\varphi = 30-31^\circ$
- Coesione drenata - $C' = 0$
- Modulo di Deformazione - $E_{25} = 8-15 \text{ MPa}$ (valore al 25% della deformazione)

Alla profondità di circa 16 metri, nel sondaggio S3, si è misurato un valore di SPT = 42, da ricondurre ad uno strato sabbioso medio-grossolano che cautelativamente, a fronte dei dati generali delle sabbie limose grigiastre, non viene qui considerato.

Alla luce dei suddetti risultati di laboratorio ed in sito si valutano i seguenti parametri fisico-meccanici per le sabbie limose grigiastre:

Peso di volume - $\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	18-19
Densità Relativa - $D_r \text{ (%)}$	25-50
Angolo di attrito - φ'	28-32
Coesione drenata – $C' \text{ (kPa)}$	0-10
Modulo Edometrico – $E_{ed} \text{ (MPa)}$	12-20
Modulo di Elast. $E' \text{ (MPa)}$	10-15
Modulo di Taglio – $G_o \text{ (MPa)}$	80-100

Il comportamento geomeccanico è frizionale pur con l'apporto locale di una certa coesione, con bassi addensamenti e deformabilità medio-elevata.

Limi argillosi grigiastri

Nel sondaggio S1 sono stati carotati depositi limo-argillosi grigiastri, con spessori intorno a 3-6 metri, a varie profondità e fino a circa 26 m di profondità dal p.c., in alternanza a alle sabbie limose grigie sopra descritte.

Tale situazione stratigrafica, presente nel prevalentemente nel settore orientale dell'area, è stata confermata anche dalle penetrometrie CPTU-2 e CPTU-3; nel settore ovest invece, ove

prevalgono le sabbie fini grigiastre, due strati limo-argillosi grigiastri sono presenti soltanto a quote variabili da 22 a 28 m dal p.c., con spessori di 1-2 metri.

Dal punto di vista granulometrico prevale la frazione argillosa (50%), con limo intorno al 30%; la frazione sabbiosa arriva a percentuali intorno al 20% (Figura 12).

Rispetto alle argille limose grigio-verdastre superficiali, si individua una relativa minore percentuale della frazione argillosa (50%) ed una maggiore percentuale delle frazioni limosa e sabbiosa fine (totale 50%); per tale motivo, in considerazione della variabilità granulometrica, si definisce questa unità come “limo-argillosa”; ciò è coerente anche con la presenza di rapporti eteropici e stratigrafici con le suddescritte sabbie limose grigiastre..

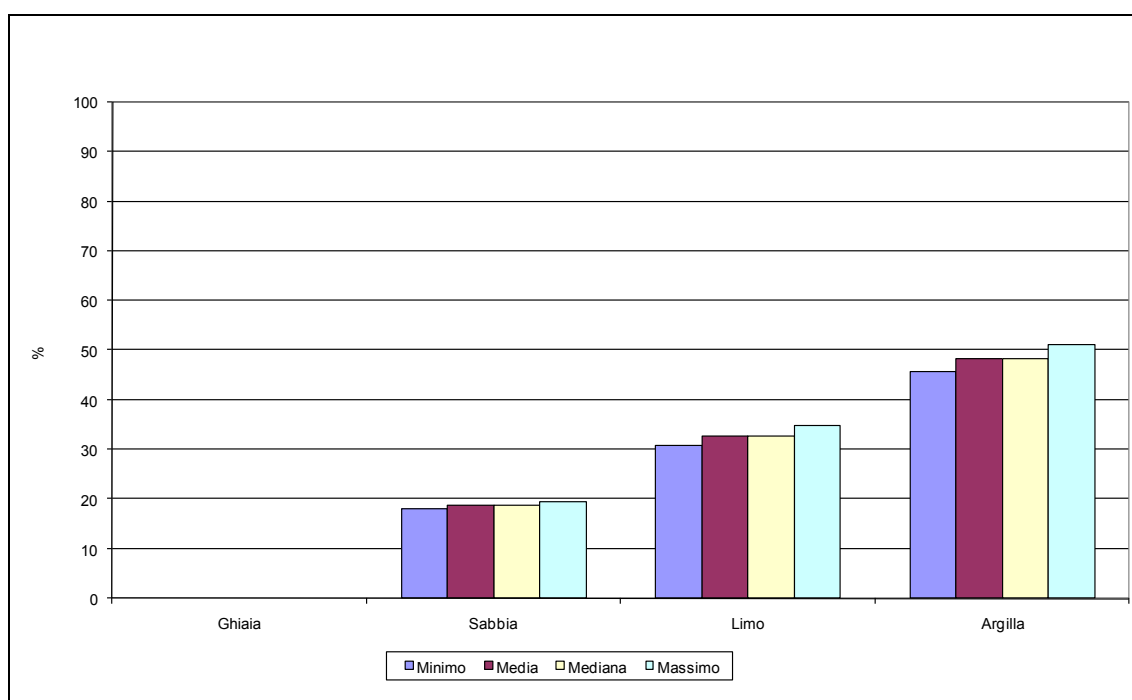


Figura 12 – frazioni granulometriche dei limi argillosi grigiastri

Le prove di laboratorio individuano umidità naturale $W_n = 26,9\%$ e pesi di volume intorno a $\gamma = 18,8-19,3 \text{ kN/m}^3$; il Grado di Saturazione è $S_r = 97-98\%$

Il contenuto argilloso determina valori dei Limiti di Atterberg medio-elevati con $LL = 49,9-58,5 \%$ e $IP = 29,4-33,0$; dall'Abaco di Casagrande si individuano termini relativi ad argille inorganiche di alta plasticità (CH) (Figura 13)

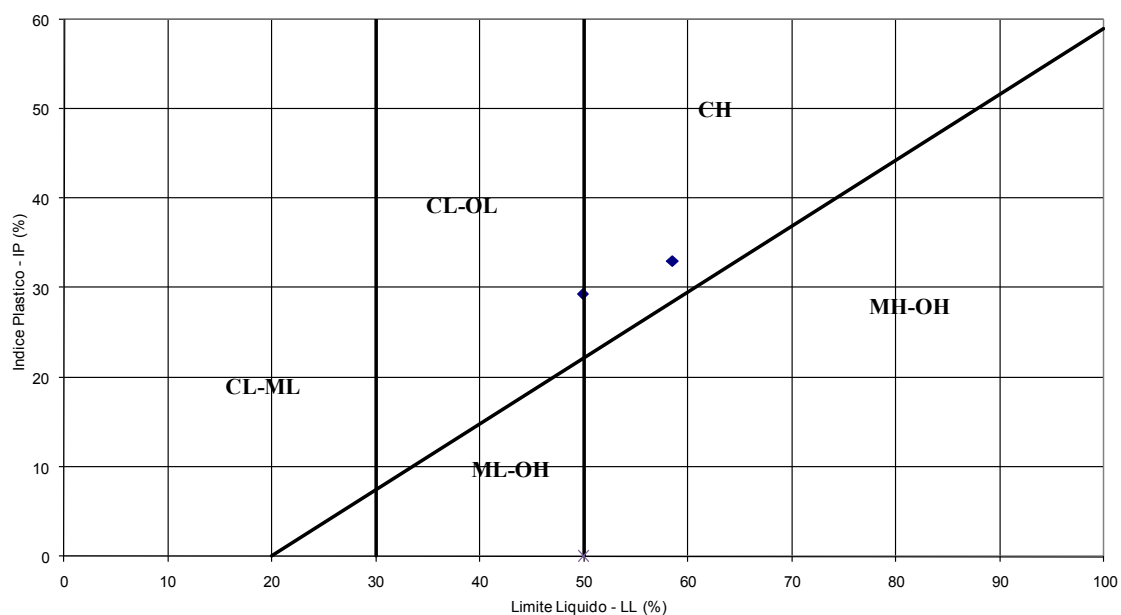


Figura 13 – Caratteristiche di plasticità

L'indice di Consistenza è intorno a $I_c = 0,78-0,96$, caratteristico di stati "solido-plastici", mentre l'attività colloidale individua terreni "normalmente attivi" ($A = 0,75-0,84$).

Da una prova di taglio diretto si è definito un angolo di attrito $\varphi = 25,7^\circ$ con coesione $C' = 16,6$ kPa.

Da punto di vista della deformabilità, da 2 prove edometriche si sono ottenuti valori di $E_{ed} = 1,63-4,0$ MPa, riferiti al carico geostatico esistente alla quota di campionamento.

Dalle prove CPTU si sono rilevati valori di resistenza alla punta $q_c = 1-2$ MPa.

Da tali valori si stimano i seguenti parametri meccanici:

- Coesione non drenata - $C_u = 20-60$ kPa
- Modulo Edometrico - $E_{ed} = 8-15$ MPa
- Modulo di Elast. - $E' \text{ (MPa)} = 5-10$ MPa
- Modulo di taglio - $G_o = 20-50$ MPa

Alla luce dei suddetti risultati di laboratorio ed in sito si valutano i seguenti parametri fisico-meccanici per le argille grigio-verdastre:

Peso di volume - $\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	19
Angolo di attrito - φ'	24-26
Coesione drenata - $C' \text{ (kPa)}$	10-15
Coesione non drenata - $C_u \text{ (kPa)}$	25-80
Modulo Edometrico - $E_{ed} \text{ (MPa)}$	8-15

Modulo Elast. – E' (MPa)	5-12
Modulo di taglio. – G_0 (MPa)	20-50

Il comportamento geomeccanico è coesivo, con media consistenza e media deformabilità.

Sabbie grossolane con ghiaietto, grigiastre

Alla base delle sabbie medio-fini, intercettate soltanto dai sondaggi S2 e S3 e dalle penetrometrie CPTU-1 e CPTU-2, sono presenti sabbie grossolane, con sparso ghiaietto e con spessori intorno a 3-4 metri.

Una prima valutazione è sviluppata utilizzando il valore di SPT = 42 colpi/30 cm, misurato nel livello di sabbie grossolane all'interno delle sabbie fini limose sopra descritte, a profondità superiore (16 m da p.c.); da tale valore si stimano i seguenti parametri meccanici:

- Densità relativa – D_r = 50 %
- Angolo di attrito - φ = 33°
- Coesione drenata - $C' = 0$
- Modulo di Deformazione - $E_{25} = 36$ MPa (valore al 25% della deformazione)

L'unità sabbiosa grossolana è anche parametrizzata con i valori penetrometrici statici delle prove CPTU, con valori di resistenza alla punta $q_c = 10-20$ MPa, da cui si stimano i seguenti parametri meccanici:

- Densità relativa – $D_r = 50-80\%$
- Angolo di attrito - $\varphi = 34-38^\circ$
- Coesione drenata - $C' = 0$
- Modulo di Taglio – $G_0 = 100-150$ MPa

Alla luce dei suddetti risultati in sito si valutano i seguenti parametri fisico-meccanici per le sabbie grossolane, con sparso ghiaietto.

Peso di volume - γ (kN/m ³)	19-20
Densità Relativa - D_r (%)	50-80
Angolo di attrito - φ'	33-35
Coesione drenata – C' (kPa)	0
Modulo di Elast. – E' (MPa)	10-25
Modulo di Taglio – G_0 (MPa)	100-150

Il comportamento geomeccanico è decisamente frizionale, con bassa deformabilità.

Ghiaie e sabbie ghiaiose

In tutti i sondaggi e nelle penetrometrie statiche alla profondità di circa 26-28 m dal p.c. sono state intercettate ghiaie sabbiose.

Questo strato è riferibile alla unità AES7 (Subsintema di Villa Verucchio) del pleistocene superiore e pertanto più antico dei depositi olocenici-recenti sopra descritti..

Dalle prove CPTU si sono rilevati valori di resistenza alla punta $q_c > 30$ MPa

Da tali valori, interpretati come terreni incoerenti, si stimano i seguenti parametri meccanici:

- Densità relativa – $D_r = 80-100$ %
- Angolo di attrito - $\varphi = 35-40^\circ$
- Coesione drenata - $C' = 0$
- Modulo di Elast. – $E' = 30-45$ MPa
- Modulo di taglio - $G_o = 150-200$ MPa

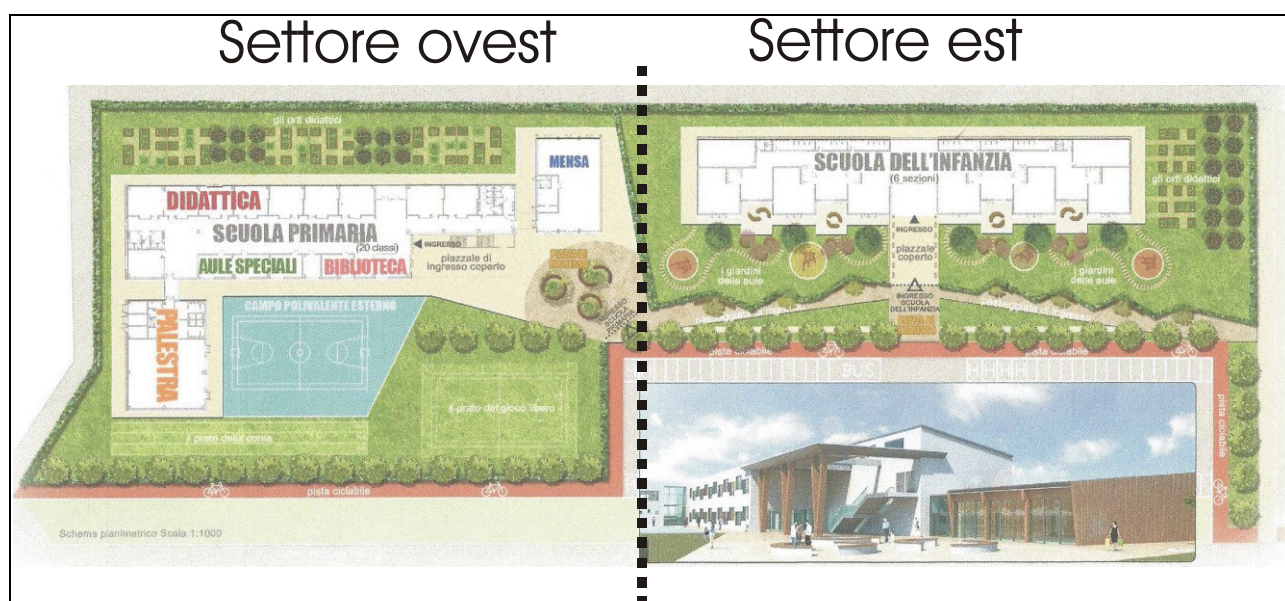
Alla luce dei suddetti risultati in sito si valutano i seguenti parametri fisico-meccanici per le sabbie limose grigiastre:

Peso di volume - γ (kN/m ³)	20
Densità Relativa - D_r (%)	80-100
Angolo di attrito - φ'	35-38
Coesione drenata – C' (kPa)	0
Modulo di Elast. – E' (MPa)	30-40
Modulo di Taglio – G_o (MPa)	150-200

Il comportamento geomeccanico è frizionale, con elevati addensamenti e deformabilità bassissima.

4. PROBLEMATICHE GEOTECNICHE INERENTI IL PROGETTO

Il progetto del Nuovo Polo Scolastico del Comune di Castel Maggiore (BO), contempla alcuni fabbricati relativi alla Scuola Primaria, Scuola dell'Infanzia, mensa, palestra e biblioteca. Trattasi di strutture in c.a. di altezza limitata a 6-7 metri, tranne la Scuola dell'Infanzia, localizzata nel settore est dell'area, che è prevista con strutture lignee (Figura 14).



.Figura 14 – Localizzazione degli edifici del Nuovo Polo Scolastico

Dalle analisi delle caratteristiche fisico-meccaniche precedentemente descritte emergono le seguenti problematiche che

- Fino alla profondità di circa 27-27 m da p.c. sono presenti depositi olocenici-recenti da sabbioso-limosi e limo argillosi con frequenti interstratificazioni ed eteropie di facies, sovrimposti ad un substrato pleistocenico ghiaioso-sabbioso; tali terreni sono caratterizzati da bassi valori di addensamento e/o consistenza e medio-elevata deformabilità;
- In corrispondenza delle unità sabbioso limose il comportamento geomeccanico è tendenzialmente frizionale pur con locale/marginale apporto di coesione; nelle unità argillose e limo-argillose il comportamento geomeccanico è coesivo con medio-bassi valori della coesione.

- E' presente un livello piezometrico a limitata profondità dal p.c. (3,5 m da p.c. misurata con probabili escursioni);
- Si segnala la presenza di fenomeni generali di subsidenza che, in base alla cartografia ufficiale (PSA – Associazione Reno-Galliera), risultano di circa 3 cm/anno;
- La presenza di sabbie fini limose a profondità variabile da 6-10 m sino a 26-27 metri determina potenziali fenomeni di liquefazione, che impongono scelte cautelative dal punto di vista fondale dei manufatti;
- In relazione al rischio di liquefazione la successione stratigrafica emersa individua maggiori rischi nei settori occidentali dell'area, mentre nel settore orientale (ove è prevista la Scuola dell'Infanzia con struttura lignea) il rischio è decisamente più basso e, data la profondità degli strati a rischio liquefazione (15-20 m da p.c.), può essere considerato nullo;
- In relazione alle fondazioni della Scuola dell'Infanzia con struttura lignea, va tenuto conto della locale presenza di riporti grossolani con spessore individuato di circa 2 metri; nelle successive fasi progettuali sarà opportuno indagare l'estensione areale di tali riporti.

5. BIBLIOGRAFIA

BOWLES J.E., (1981) - *Fondazioni - Progetto e analisi*, 1991

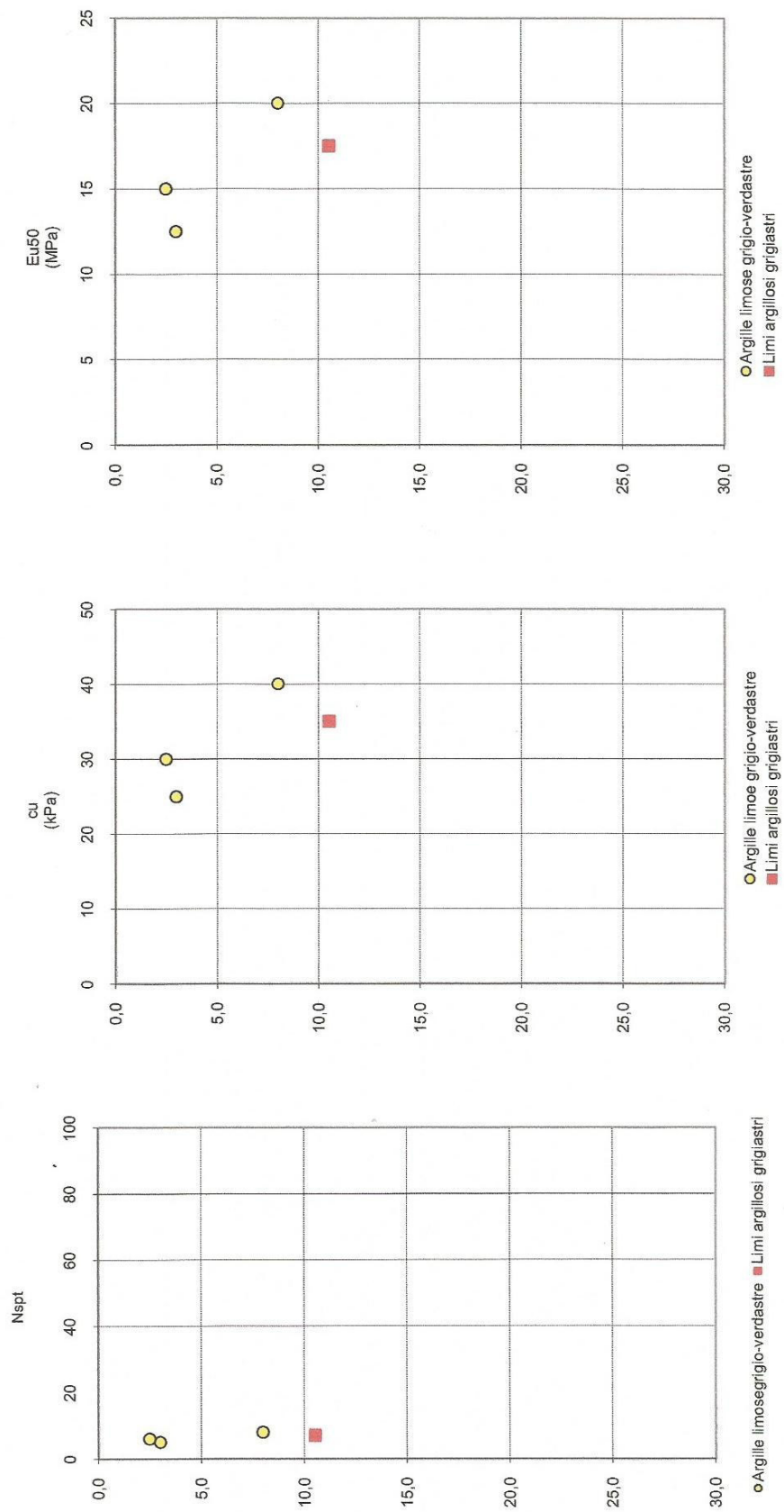
CREPELLANI T., NARDI R., SIMONCINI C., (1988), *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Ed Zanichelli,

LANCELLOTTA R. (1983) - *Meccanica dei terreni e fondazioni*. Ed. Levrotto & Bella, Torino

6. GRAFICI E TABULATI GEOTECNICI (LABORATORIO, SPT, CPTU)

LAVORO: POLO SCOLASTICO - CASTELMAGGIORE (BO)
SPT - TERRENI COESIVI - ALLUVIONI

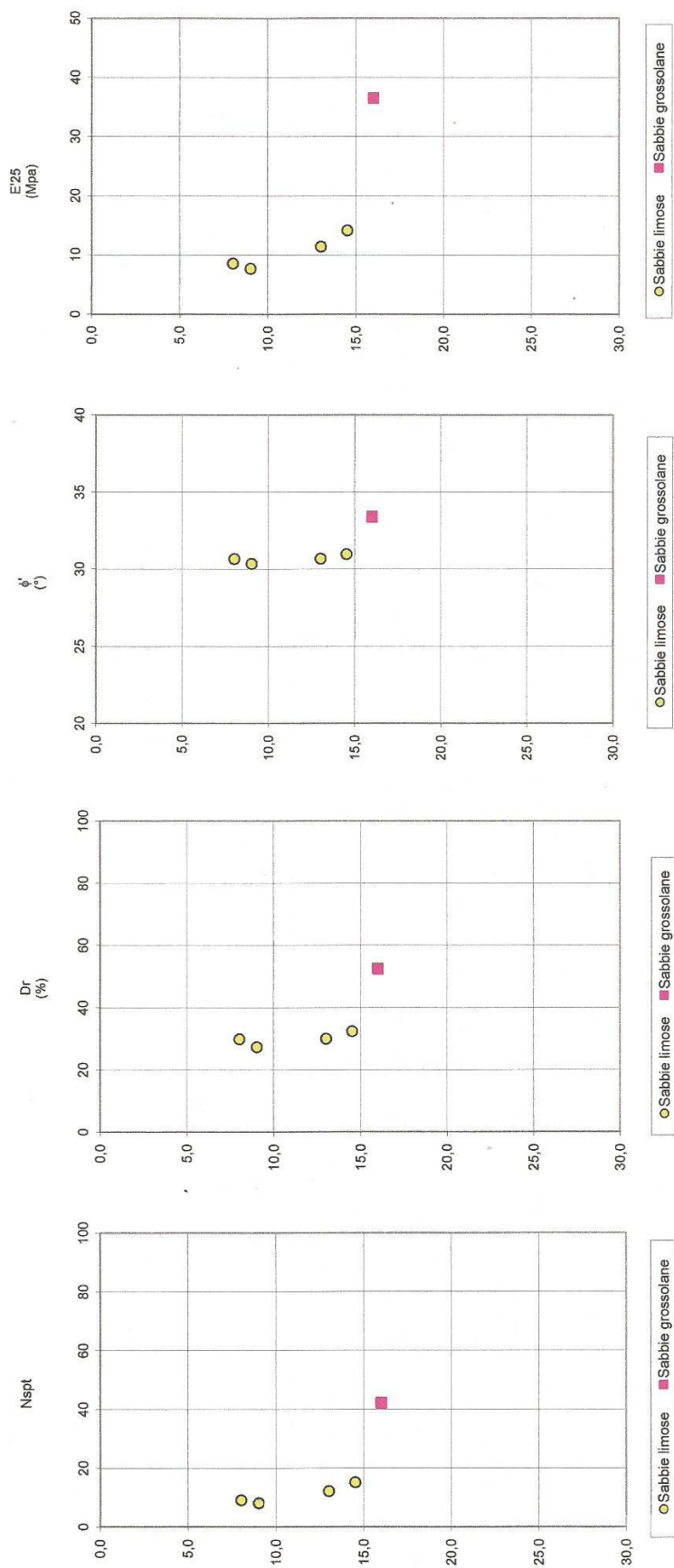
litotipo Argille limose

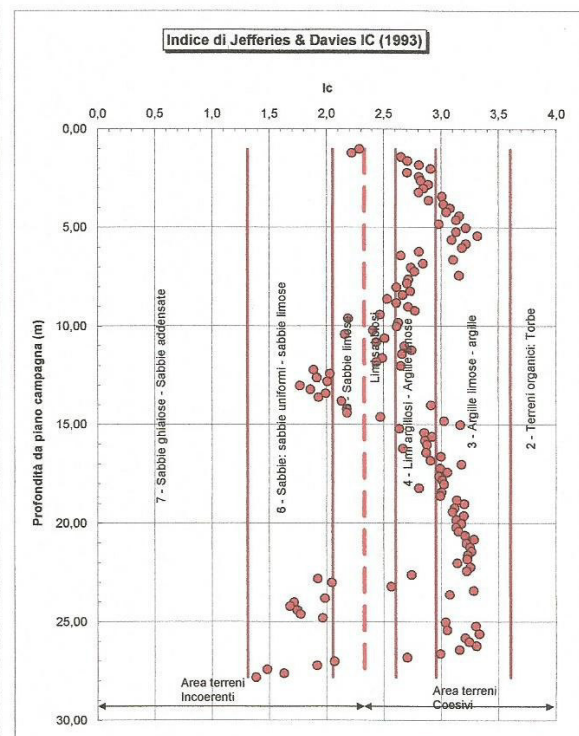
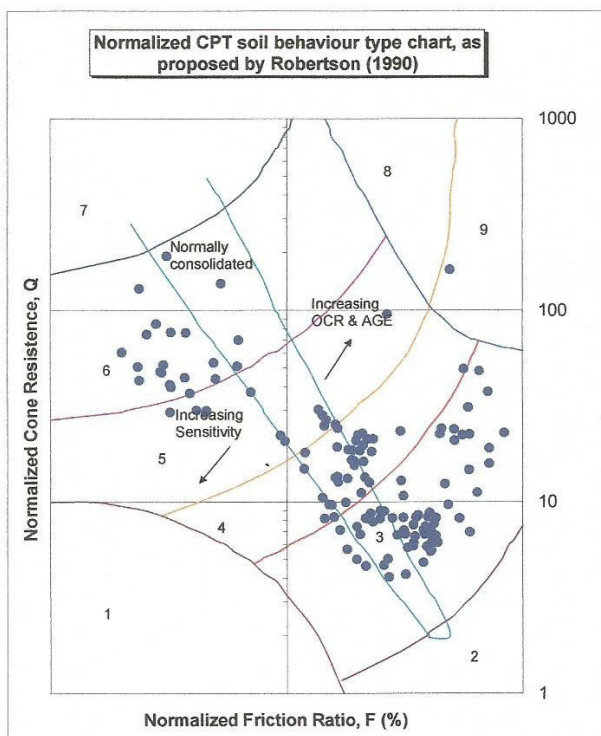
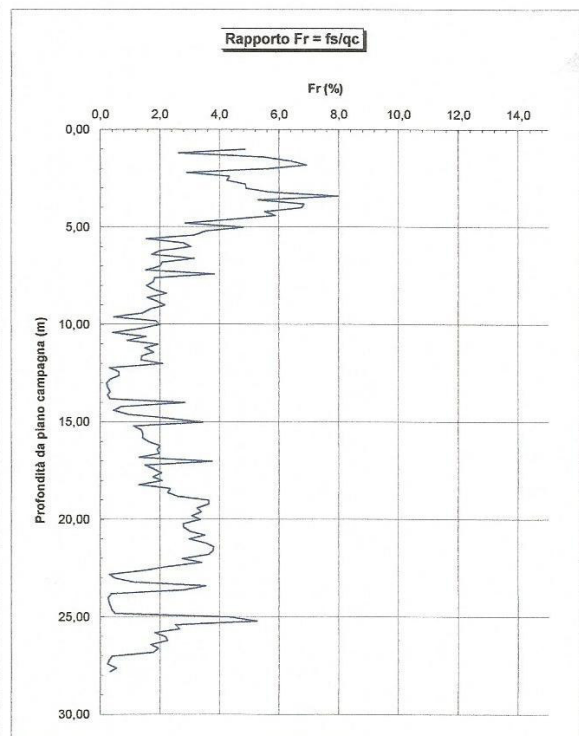
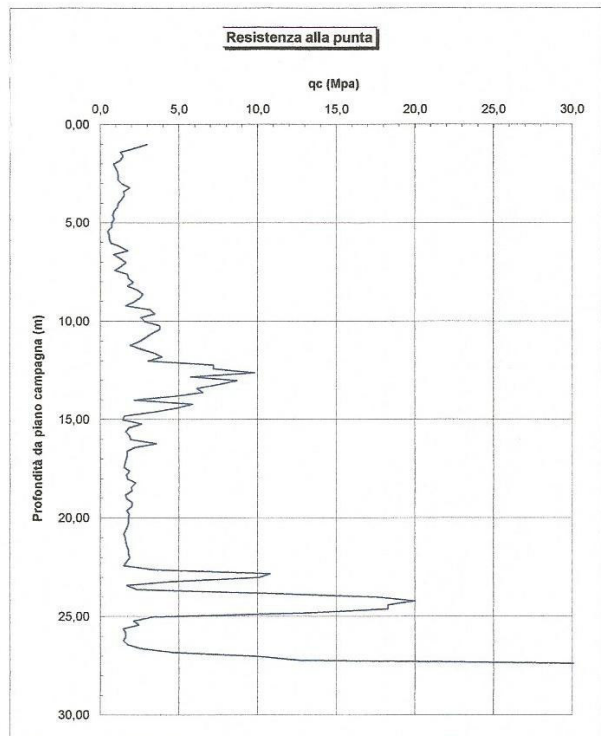


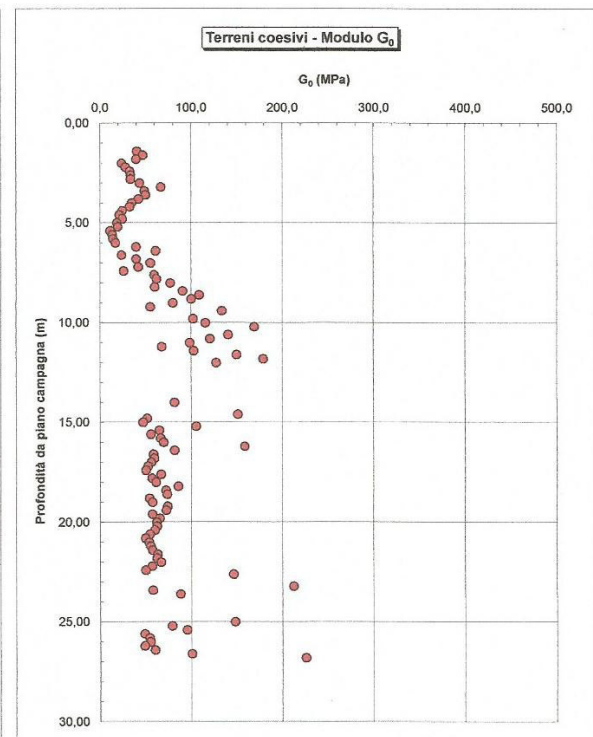
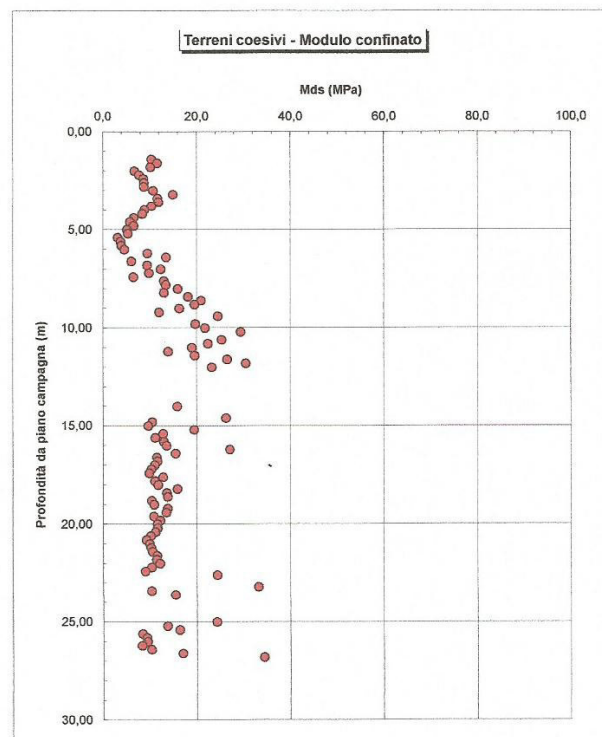
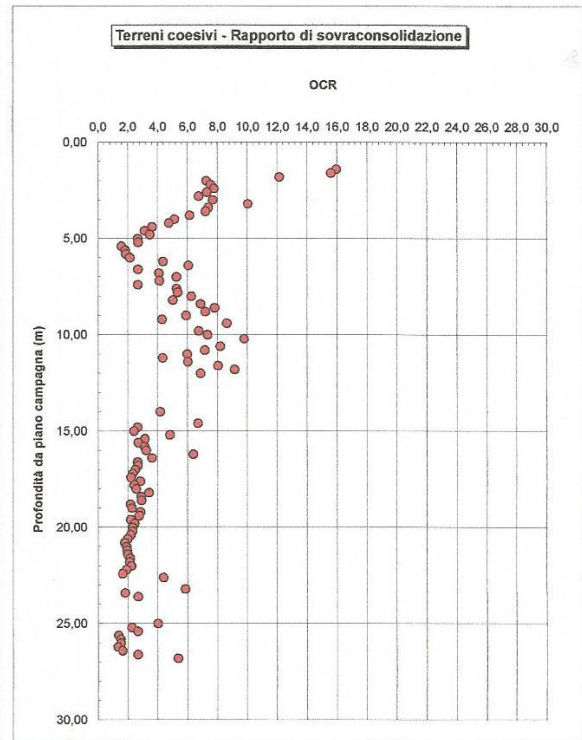
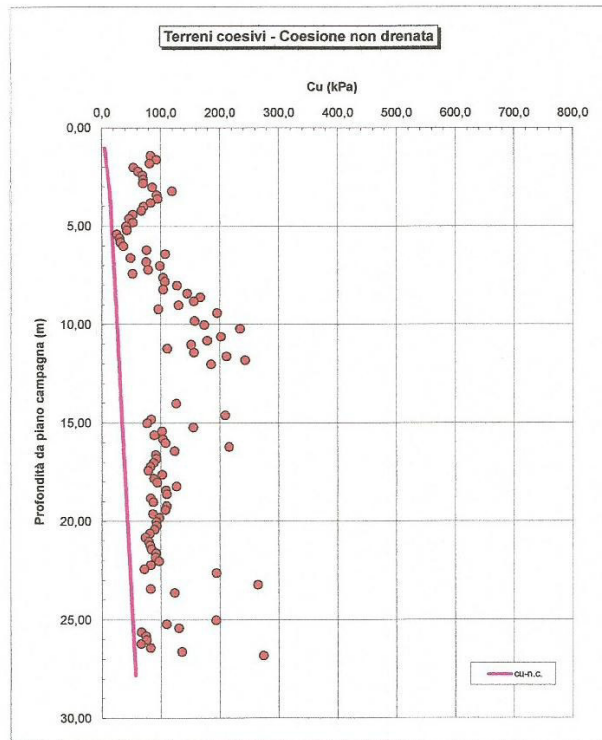
LAVORO: POLO SCOLASTICO - CASTELMAGGIORE (BO)

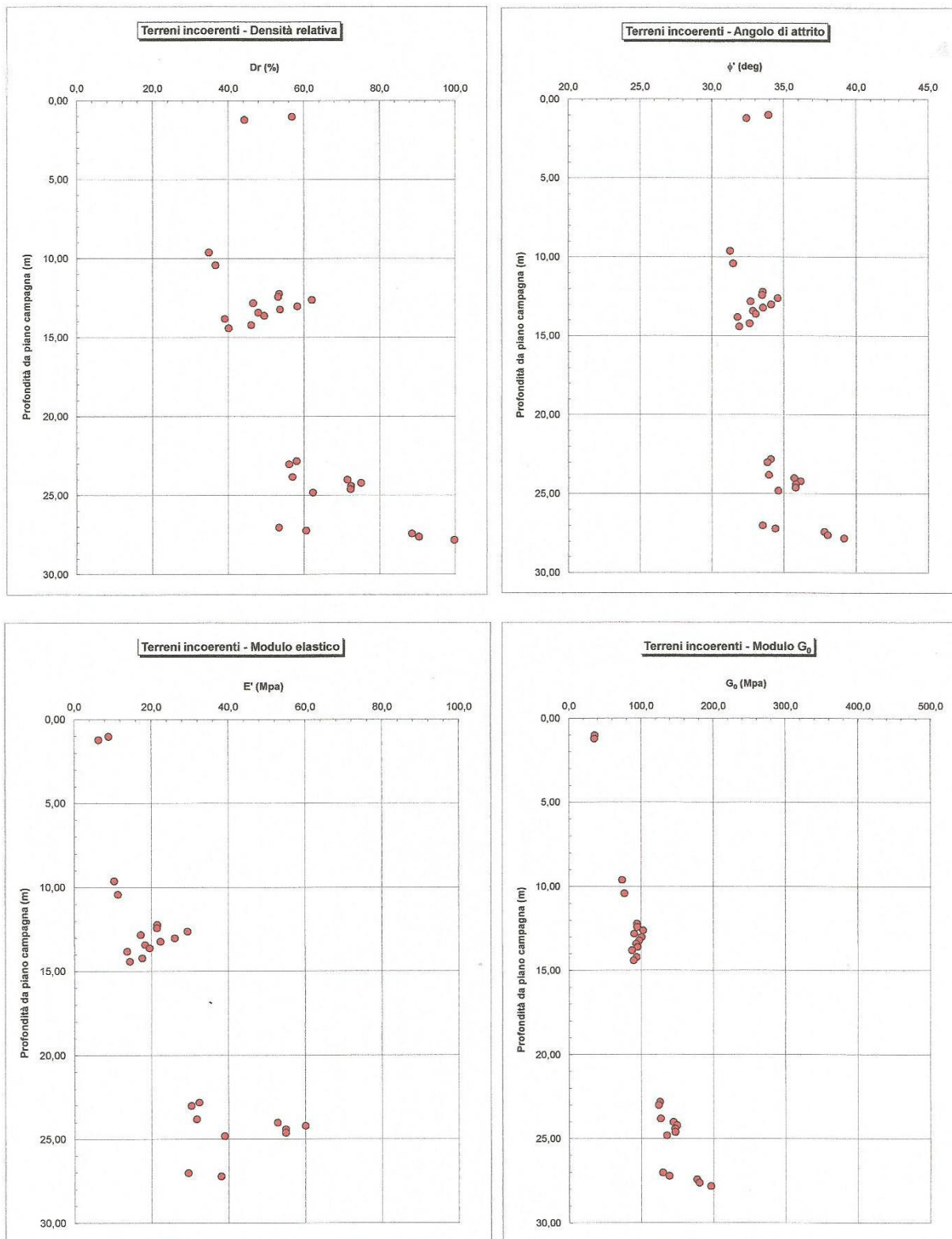
PROVE SPT - TERRENI INCOERENTI -ALLUVIONI

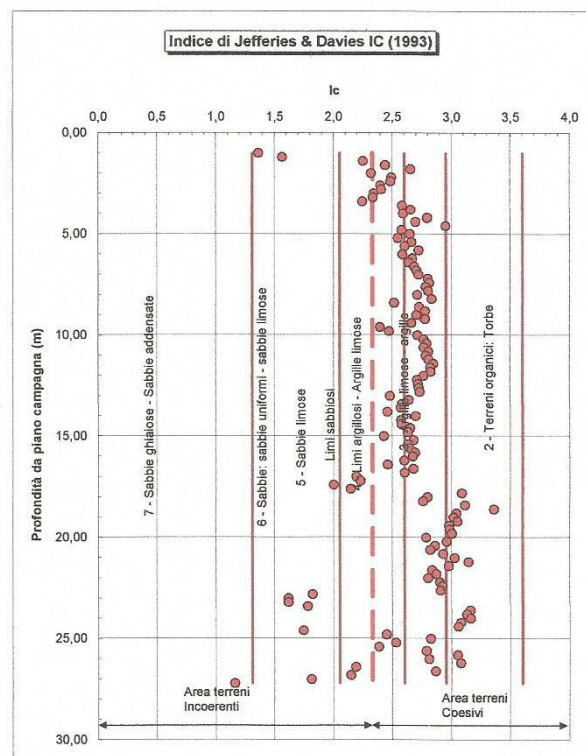
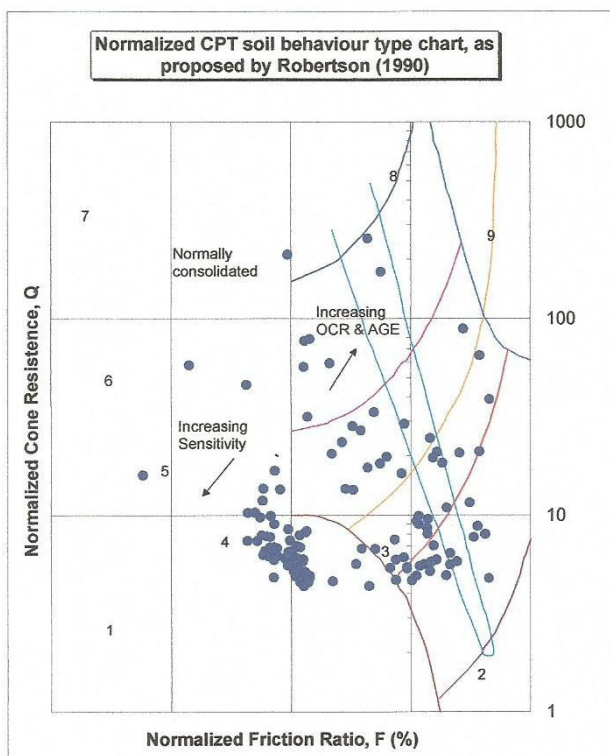
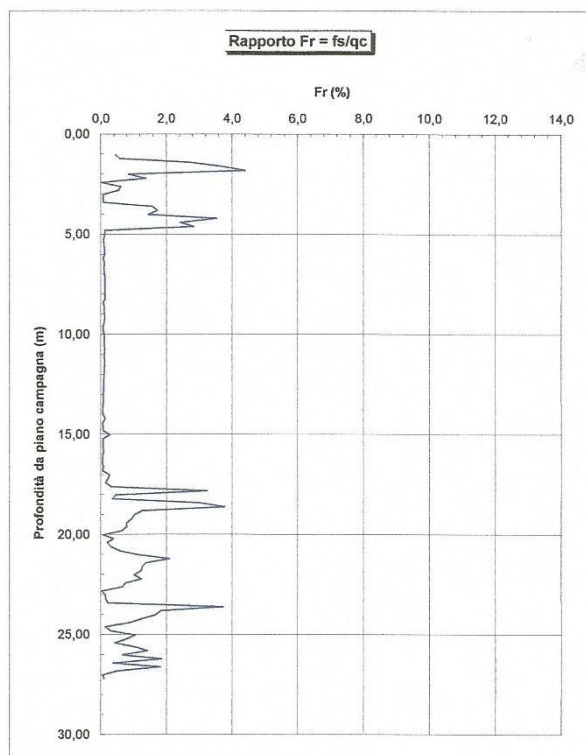
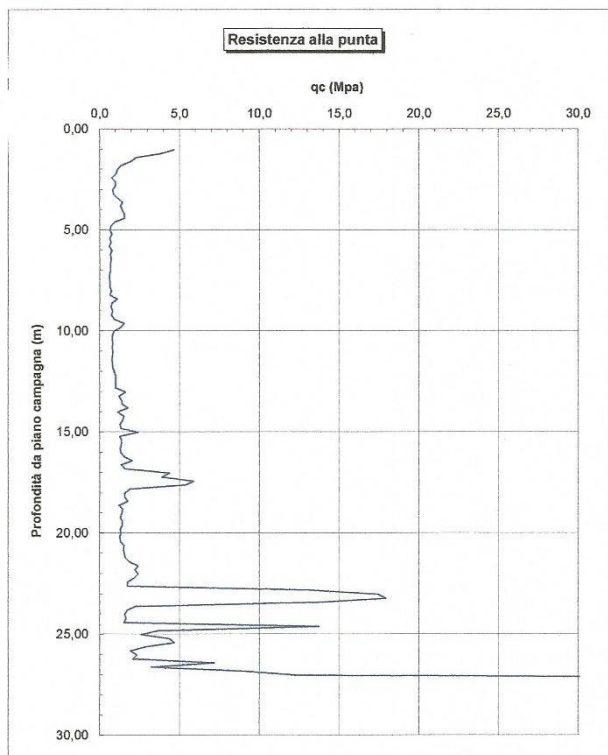
litotipo Sabbie limose e sabbie grossolane

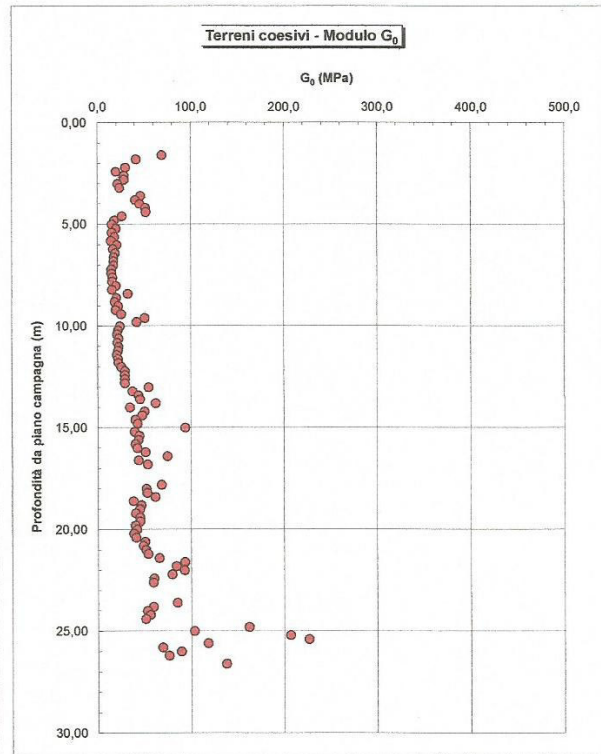
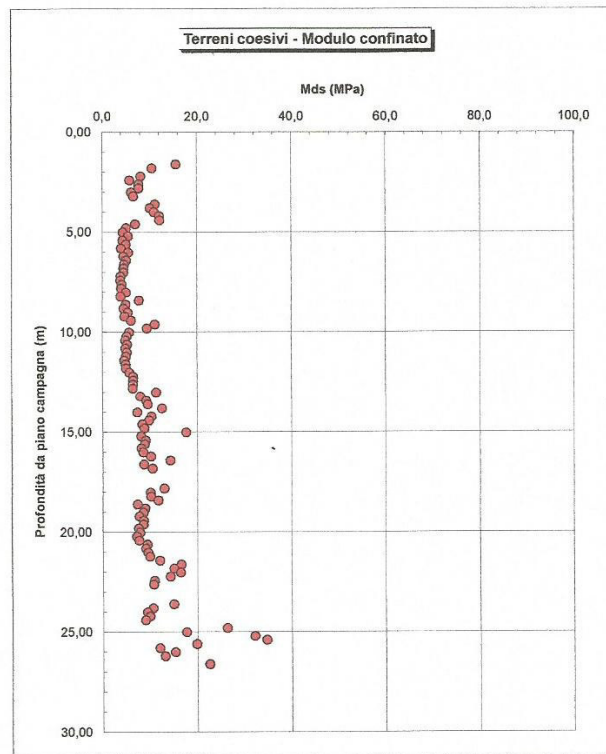
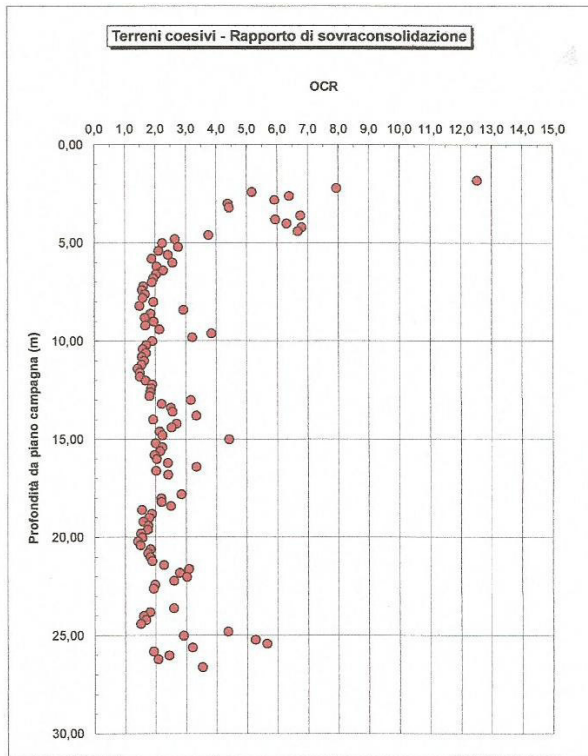
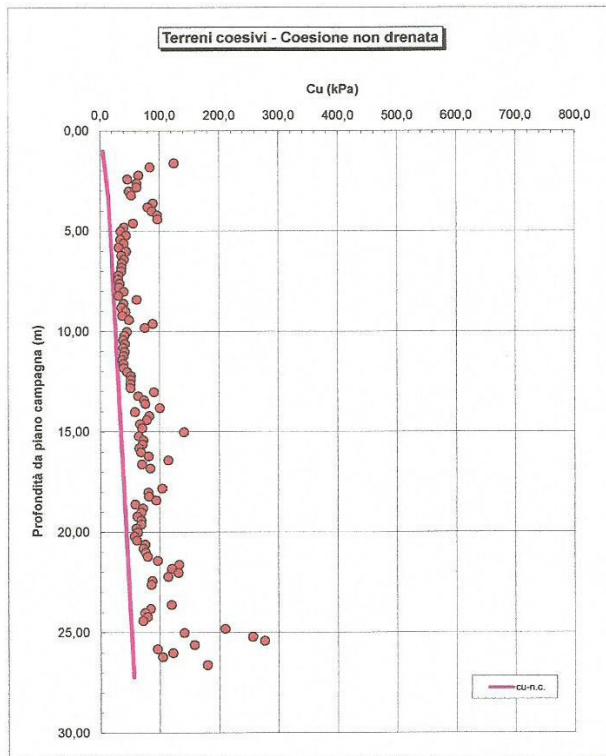


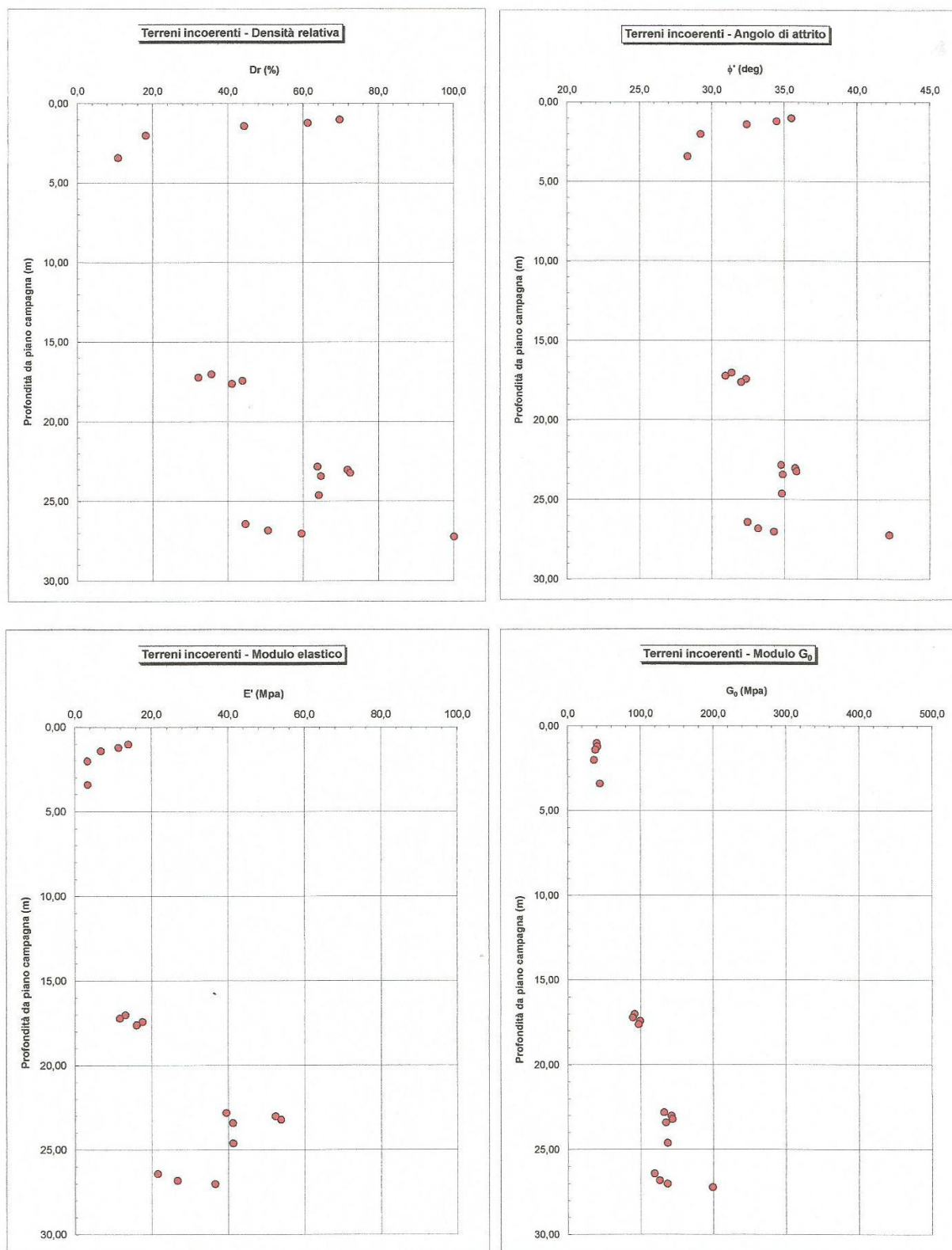












OPERA:

