

COMUNE DI ARGELATO
PROVINCIA DI BOLOGNA

INTEGRAZIONE TECNICA

INTEGRAZIONE E APPROFONDIMENTO DI CARATTERE SISMICO FINALIZZATA ALL'APPROVAZIONE DEL POC COME RICHIESTO DA AUTORITA' COMPETENTI PROT. 2015/0005993 DEL 04/05/2015 (AI SENSI DELLA DEL. REG 112/07) ATTRAVERSO UNA INDAGINE DI TIPO SISMICA APPLICANDO IL METODO MASW (MULTI-CHANELL ANALYSIS OF SURFACE WAVES)



PROPRIETA': SIGG. BOLELLI CLAUDIO E VALERIO

LOCALITA': FUNO, VIA FUNO

DATA: GIUGNO 2015

IL TECNICO
DOTT. GEOL. S. FANO MARRESTA



SOMMARIO

1	PREMESSA.....	3
2	RIFERIMENTI NORMATIVI	3
3	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	4
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	5
4.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE	7
5	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	11
6	PIANO DELLE INDAGINI IN SITO EFFETTUATE	13
7	INTERPRETAZIONE STRATIGRAFICA.....	13
8	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI	14
9	CARATTERIZZAZIONE SISMICA	16
9.1	PROSPEZIONE SISMICA IN SITO	16
9.1.1	Strumentazione utilizzata e modalità di acquisizione dati	17
9.1.2	Risultati indagine sismica MASW	17
9.2	PARAMETRI SISMICI E SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI AI SENSI DELLE NTC 08	20
9.3	SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO DA DEL. REG. 112/07	24
10	ANALISI DEL RISCHIO ALLA LIQUEFAZIONE.....	25
10.1	PROCEDURA DI CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA A LIQUEFAZIONE	25
10.2	RISULTATI VERIFICA LIQUEFAZIONE	27
11	CEDIMENTI POST-SISMICI.....	29
11.1	PROCEDURA PER TERRENI COESIVI.....	29
11.1.1	Ipotesi sui parametri di calcolo da utilizzare.....	30
11.2	PROCEDURA PER TERRENI GRANULARI SATURI	31
11.3	CEDIMENTO POST-SISMICO TOTALE.....	32
12	CONCLUSIONI.....	

TAVOLE ED ALLEGATI

Tavola 1: Stralcio di planimetria catastale con ubicazione prove geognosiche

Allegato 1: Tavole dati CPT anno 2009

Allegato 2: Report verifica a liquefazione

1 PREMESSA

Su incarico dei Sigg. Bolelli Alessandro, Bolelli Andrea, Bolelli Claudio, Cacciari Silvia, Bolelli Valerio, Bolelli Albertina e Giorni Paolo è stata redatta la presente relazione geologica e geotecnica al fine di integrare la caratterizzazione geotecnica e sismica eseguita nell'anno 2009, con ulteriori ed approfondite valutazioni, ai sensi della Del. Reg. 112/07, così come richiesto dalle autorità competenti (Prot. 2015/0005993 del 04/05/2015).

In particolare lo studio intende integrare le considerazioni geotecniche emerse nell'anno 2009 con indicazioni sismiche ai sensi della Del. Reg. 112/07. Le valutazioni sismiche verranno supportate dall'esecuzione di una prova sismica in sito. Inoltre si procederà alla verifica a liquefazione per determinazione del potenziale a liquefazione, utilizzando la prova più profonda (e quindi rappresentativa) eseguita nell'anno 2009.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

UNI EN 1998 (Eurocodice 8): "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica"

OPCM 3274/2003 e OPCM 3519/2006

D.M. del 14.01.2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni"

Circolare Cons. Sup. LL. PP. N°617 del 02.02.09: "Istruzioni per l'applicazione delle NT di cui al D.M 14.01.08"

D. Reg. 112/07 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"

Linee Guida NTC08 redatto da Gruppo Interregionale Ordine dei Geologi, Luglio 2010

3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area oggetto di caratterizzazione è situata nel comune di Argelato (BO), località Funo, nel settore nord-occidentale del centro abitato, in via Funo. Il sito di intervento è posto a circa 5 km a sud-ovest rispetto al capoluogo comunale.

In **Figura 3.1** si riportano due immagini satellitari, a diverso grado di dettaglio, che individuano l'area di indagine, mentre in **Tavola 1** si riporta uno stralcio di progetto indicante l'area indagata, unitamente all'ubicazione delle indagini geognostiche eseguite.



Figura 3.1. Immagine satellitare della zona di studio, a diverso dettaglio (fonte: Google Earth)

Come accennato lo scopo del presente documento è la caratterizzazione sismica dell'area di indagine, nell'ambito della proposta di inserimento dell'area nel 1° P.O.C..

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il contesto geologico in cui si inserisce l'area in esame è stato definito mediante consultazione di cartografica esistente, in particolare della Carta Geologica di Pianura della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000, di cui si riporta uno stralcio in **Figura 4.1**.

Tale operazione ha avuto l'intento di ricostruire, a livello generale, la disposizione delle formazioni geologiche presenti nell'area di intervento, per disporre di preliminari informazioni sulla probabile natura tessiturale dei terreni superficiali.

L'assetto geologico dell'Emilia-Romagna è il risultato dei movimenti crostali che, a partire dal Terziario, hanno coinvolto due placche continentali: il blocco sardo-corso da una parte e la microplacca Padano-Adriatica dall'altra. Questo movimento ha condotto all'orogenesi dell'Appennino Settentrionale, avvenuta nel Terziario, e alla successiva formazione dell'avanfossa padana, chiusa a nord dalla catena alpina meridionale (Sudalpino), già sollevatasi a partire dall'era Mesozoica.

Il progressivo riempimento del bacino marino, fino alle condizioni di continentalità, avviene attraverso eventi tettonico-sedimentari separati nel tempo da periodi di forte subsidenza bacinale. Queste alternanze di eventi è testimoniato da numerose superfici di discontinuità stratigrafica che "marcano" le diverse fasi ed affiorano sul margine appenninico.

La fase deposizionale di riferimento è rappresentata dal **Supersistema Emiliano – Romagnolo**, o Allogruppo Emiliano-Romagnolo, che viene descritta come *"Depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini organizzati in successioni cicliche di vario ordine gerarchico. Comprende due alloformazioni (Alloformazione Emiliano-Romagnola Inferiore e Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore). Spessore massimo: ~ 700 m. Età: ~ 700.000 a – Attuale.*

La sua componente più recente (**Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore**) è caratterizzata da *"Depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini organizzati in successioni cicliche di alcune decine di metri di spessore. Limite superiore coincidente col piano topografico". Spessore massimo: ~ 300 m. Età: ~ 400.000 a – Attuale*

La parte sommitale dell'Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore è denominata **Allomembro (o Subsistema) di Ravenna (AES8)** e comprende *"Unità costituita da ghiaie sabbiose, sabbie e limi ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, in contesti di conoide alluvionale, canale fluviale e piana alluvionale intravalliva; da limi, limi sabbiosi e limi argillosi, in contesti di piana inondabile; da alternanze di sabbie, limi ed argille, in contesti di piana deltizia; da sabbie prevalenti passanti ad argille e limi e localmente a sabbie ghiaiose, in contesti di piana litorale. Al tetto l'unità presenta spesso un suolo parzialmente*

decarbonatato non molto sviluppato di colore giallo-bruno". Spessore massimo: ~ 30 m. Età: ~ 9.000 a – Attuale

La porzione sommitale dell'Allomembro di Ravenna è denominata **Unità di Modena (AES8a)**, così definita: "Unità costituita da ghiaie e ghiaie sabbiose o da sabbie con livelli e lenti di ghiaie ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, in contesti di conoide alluvionale, canale fluviale e piana alluvionale intravalliva; da argille e limi, in contesti di piana inondabile; da alternanze di sabbie, limi ed argille, in contesti di piana deltizia; da sabbie prevalenti passanti ad argille e limi e localmente a sabbie ghiaiose, in contesti di piana litorale. Al tetto l'unità presenta localmente un suolo calcareo poco sviluppato di colore grigio-giallastro". Spessore massimo: ~ 5,5 m. Età: Post-Romana (IV- VI sec. d.C. – Attuale).

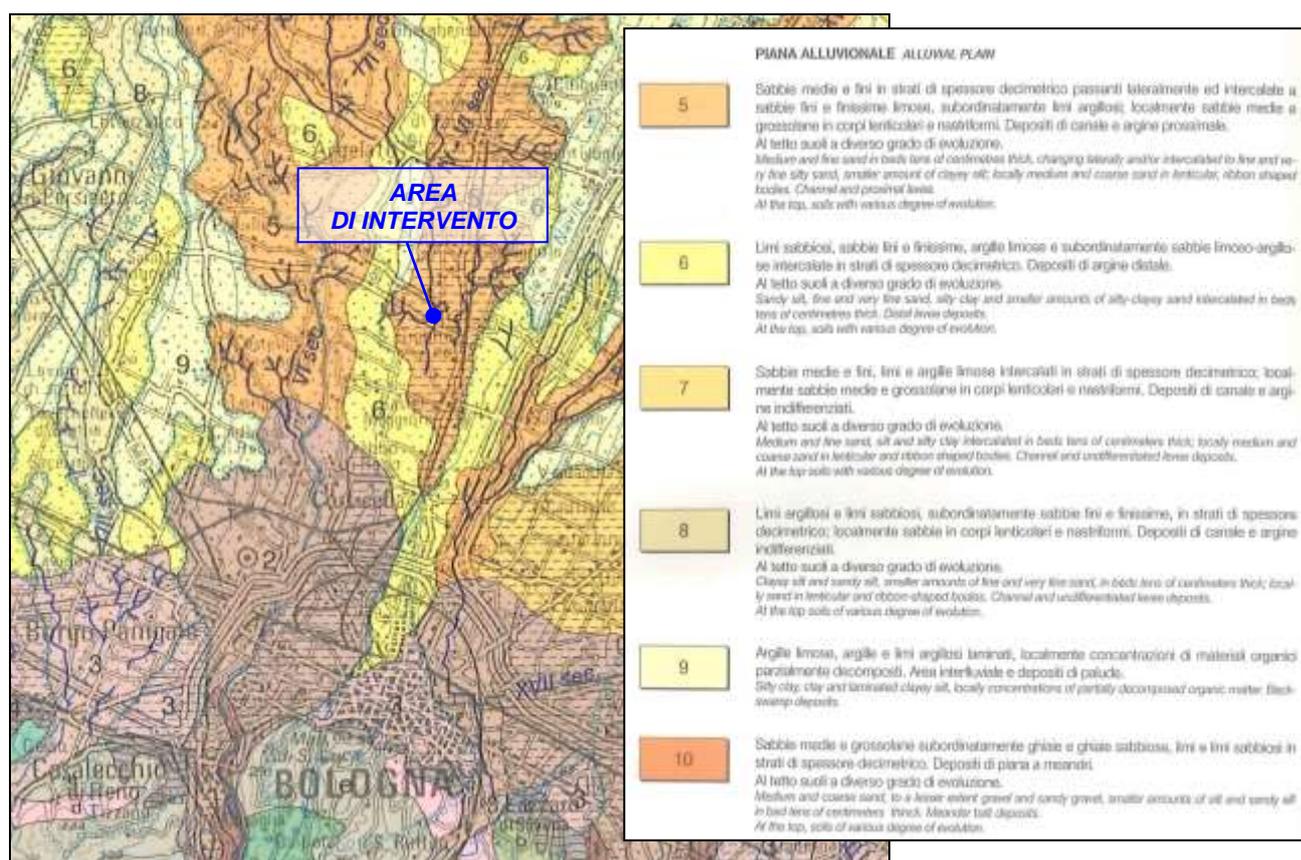


Figura 4.1. Estratto di carta Geologica di Pianura dell'Emilia Romagna indicante le formazioni presenti in corrispondenza e prossimità dell'area di intervento

La cartografia proposta mostra come l'area oggetto di indagine si collochi in una zona che può essere considerata di transizione tra depositi di canale e argine prossimale (litotipo 5), caratterizzati da "sabbie medie e fini in strati di spessore decimetrico, passanti lateralmente ed intercalate a sabbie fini e finissime limose, subordinatamente limi argillosi", e depositi di argine distale (litotipo 6), costituiti da "limi sabbiosi, sabbie fini e finissime, argille limose e subordinatamente sabbie limoso-argillose intercalate in strati di spessore decimetrico". I settori orientale ed occidentale rispetto l'area di studio sono caratterizzati dalla presenza di

depositi di canale ed argine indifferenziati (litotipo 8) ed aree interfluviali e depositi di palude (litotipo 9); i primi sono costituiti da limi argillosi e limi sabbiosi, subordinatamente sabbie fini e finissime, in strati di spessore decimetrico e solo localmente da sabbie in corpi lenticolari e nastriformi, mentre le aree interfluviali ed i depositi di palude sono costituiti da argille limose, argille e limi argillosi laminati e locali concentrazioni di materiali organici localmente decomposti.

Ulteriore documentazione cartografica consultata nello specifico è la Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna disponibile on line (**Figura 4.2**), per una caratterizzazione di maggior dettaglio.



Figura 4.2. Estratto di carta Geologica Interattiva della Regione Emilia Romagna (Immagine fuori scala); in giallo l'area di studio

L'estratto mostra come l'area di intervento sia caratterizzata dalla presenza di depositi limo-sabbiosi di canale, argine e rotta fluviale (depositi di piana alluvionale), associati ad argille limose e depositi di piana inondabile in area interfluviale, entrambi associati all'Unità di Modena (AES8a); il settore orientale presenta invece depositi di canale, argine e rotta fluviale, sempre a carattere sabbioso-limoso, associate all'Allomembro di Ravenna- AES8.

4.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

Il contesto geologico-strutturale in cui si inserisce l'area in esame è stato definito mediante consultazione delle note illustrative allegate alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia

Romagna (scala 1:250.000) di cui si riporta un estratto con riferimento all'area di indagine in **Figura 4.3**; in **Figura 4.4** si riporta inoltre estratto di Cartografia Geologica regionale recante i principali elementi strutturali in riferimento all'area di studio.

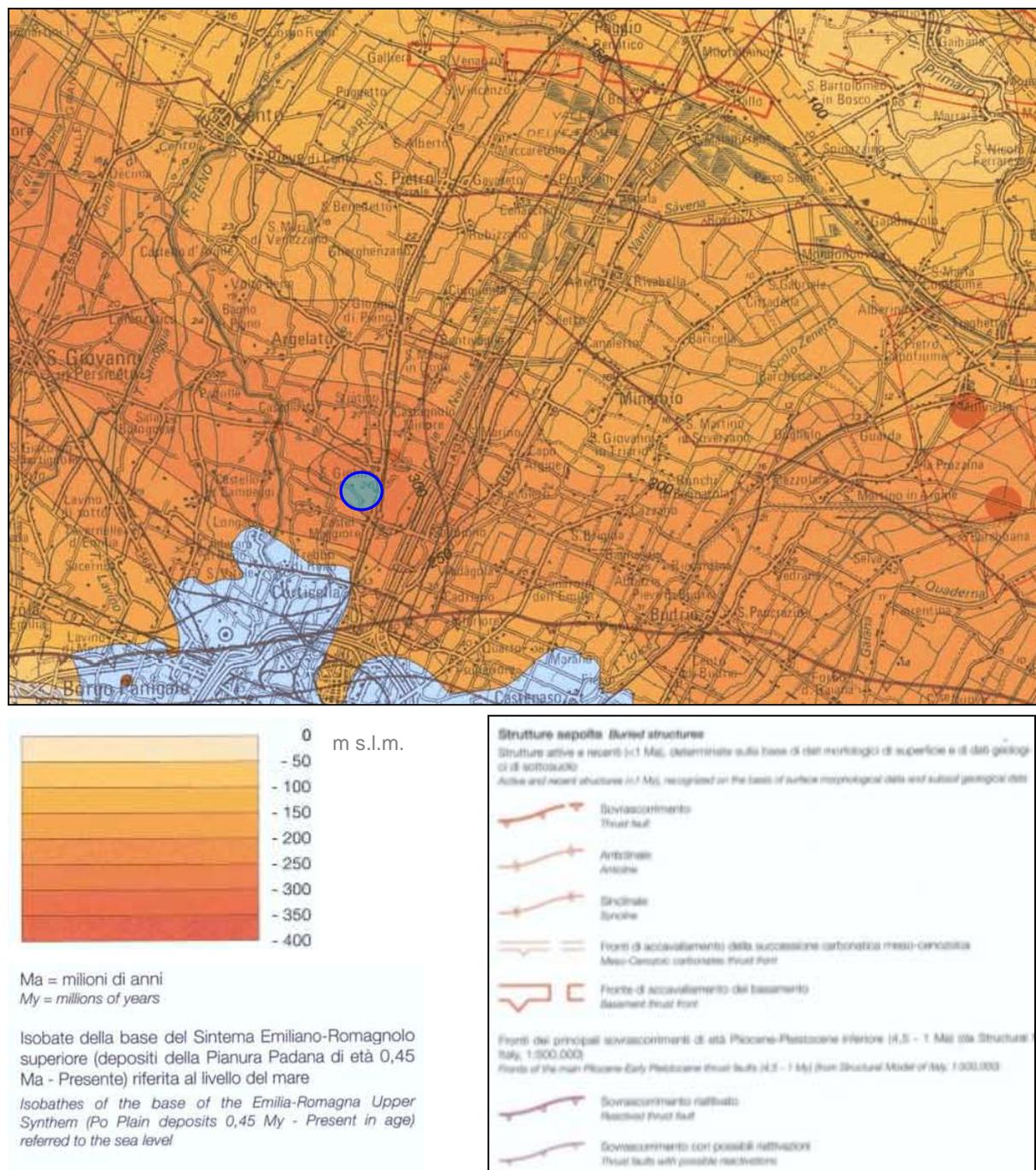


Figura 4.3. Estratto di Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna indicante i principali elementi strutturali. In blu l'area di intervento (Immagine fuori scala)

Dal punto di vista geologico-strutturale la pianura padana presenta, al di sotto della potente coltre sedimentaria quaternaria (riempimento di avanfossa delle catene appenninica e alpina), un complesso sistema di elementi tettonici, indice dei movimenti compressivi in

direzione NNE, che a partire dal Terziario (65 Ma) hanno condotto alla formazione della catena appenninica.

Il territorio dell'Emilia-Romagna è costituito dal versante padano dell'Appennino settentrionale e dalla Pianura Padana a sud del Po che, pur essendo due ambienti geomorfologici ben distinguibili, risultano essere strettamente correlati. Il fronte della catena appenninica non coincide con il limite morfologico catena-pianura (margine appenninico-padano) ma è individuabile negli archi esterni delle Pieghe Emiliane e Ferraresi sepolte dai sedimenti quaternari padani. Quindi, il vero fronte appenninico, circa all'altezza del Po, sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta. L'analisi della sismotettonica dell'Emilia-Romagna ha messo in evidenza come parte delle strutture individuate da profili sismici che interessano il riempimento sedimentario Plio-Pleistocenico siano caratterizzate da attività molto recente ed attuale. In particolare, risultano attivi i sovrascorrimenti sepolti che danno luogo agli archi di Piacenza-Parma, Reggio Emilia e di Ferrara. A tali strutture (in particolare alla dorsale Ferrarese) possono essere associati i fenomeni di fagliazione superficiale osservati in alcune aree di Pianura Padana.



Figura 4.4. Estratto di Carta Geologica Interattiva della Regione Emilia Romagna Romagna (Immagine fuori scala); in giallo l'area di studio

Il settore di pianura in cui ricade l'area di indagine, indicata in **Figura 4.3**, risulta essere fortemente interessata da strutture sepolte attive e recenti tra le quali si identificano, diversi sovrascorrimenti (attivi o riattivati) con andamento medio ONO-ESE e, con direzione sub-parallela, fronti di accavallamento della successione carbonatica meso-cenozoica e del basamento. In direzione sub-ortogonale al sistema di dislocazioni citate è identificabile, poco a est dell'area indagata, un sovrascorrimento di età plio-pleistocenica.

In **Figura 4.4** è riportato uno stralcio della Carta Geologica Regionale (scala 1:50.000) disponibile on line, nella quale è evidenziata la presenza degli elementi tettonici più rilevanti già trattati. Si nota infatti la presenza di un sistema di "Sovrascorrimenti profondi post-tortoniani dedotti" (thrust) e "Faglie profonde dirette dedotte", con sviluppo locale prevalente ONO-ESE. Si ritrova anche nella cartografia di dettaglio il sovrascorrimento con direzione N-S, che si sviluppa poco a est dell'area indagata.

Si precisa come la posizione degli elementi tettonici sepolti sia "dedotta", ovvero ricavata generalmente dai risultati di prospezioni sismiche a riflessione e dall'interpolazione di stratigrafie di perforazioni profonde (pozzi Agip).

5 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il contesto geomorfologico in cui si inserisce l'area in esame è stato definito dalla consultazione di cartografica esistente. Tale operazione ha avuto l'intento di ricostruire, a livello generale, la disposizione degli elementi geomorfologici più rilevanti in relazione all'ubicazione del sito di interesse, per disporre di preliminari informazioni sulla probabile natura tessiturale dei terreni. Per l'inquadramento geomorfologico generale è stata consultata la Carta geomorfologica della Pianura Padana scala 1:250.000 (AA. VV.), di cui si riporta uno stralcio comprendente l'area di studio in **Figura 5.1**.

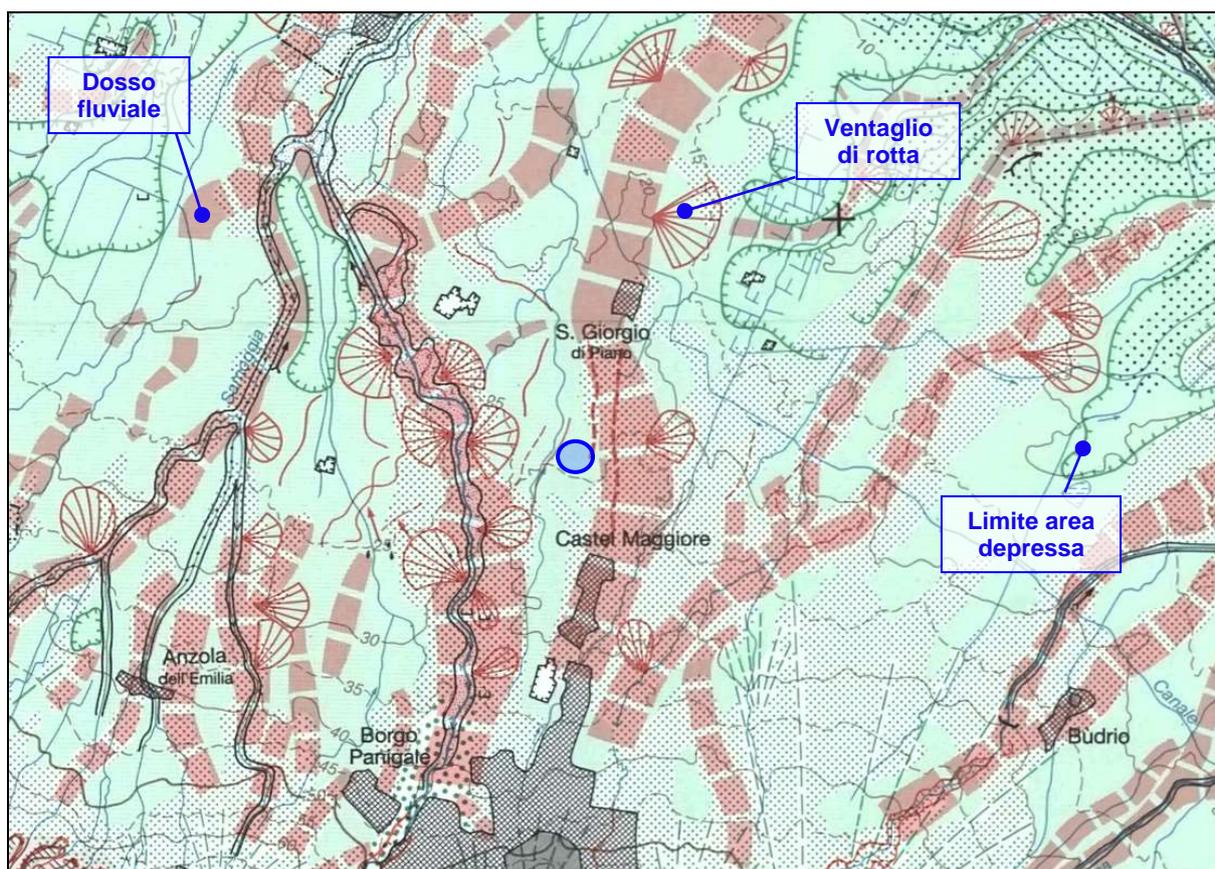


Figura 5.1. Estratto di Carta Geomorfologica della Pianura Padana; in blu è evidenziata l'area di studio

Questo settore della Pianura Padana è fortemente caratterizzata dalla presenza di diversi elementi geomorfologici, legati principalmente alla dinamica fluviale dei corsi d'acqua di derivazione appenninica (Reno, Samoggia, Savena, Idice) e, più a nord (fuori dall'estratto proposto), dal Po, di derivazione alpina, oltre ai processi di naturale assestamento dei depositi più recenti. In particolare si nota la presenza di diverse aree depresse racchiuse dai dossi fluviali citati (con andamento medio SO-NE); tali corpi, rappresentando degli alti morfologici, hanno comportato nel tempo la deposizione di sedimenti fini, talora organici

(bassa energia deposizionale), nelle valli citate. Si segnala infine la presenza di numerosi depositi di rotta (ventagli di esondazione), con canali distributori generalmente di ridotte dimensioni, associati per lo più al tracciato storico e attuale del fiume Reno.

Il settore di pianura a nord-est (indicato con retino puntinato nero - area di bonifica) è stato oggetto dell'ampia bonifica che ha interessato diversi territori del ferrarese (in passato caratterizzate da valli e paludi) dal XIV° secolo al XVIII° secolo.

Nel dettaglio dell'area indagata è possibile notare come questa si collochi in destra idrografica del Reno, compresa tra due dossi fluviali.

La litologia di superficie indicata, in corrispondenza dell'area di indagine, è di tipo argilloso, che assume carattere sabbioso progredendo verso i dossi fluviali presenti a est e a ovest.

6 PIANO DELLE INDAGINI IN SITO EFFETTUATE

Per la caratterizzazione della zona in oggetto sono state effettuate, nell'anno 2009, n°2 prove CPT n°2 prove penetrometriche CPT, spinte alla profondità di 14,6 metri (CPT 1) e 8,0 m (CPT 2) da piano campagna locale.

Per adempiere alle richieste di integrazione avanzate dal Comune di Argelato è stata eseguita una prova sismica in sito di tipo Masw, in modo da stimare in maniera diretta la categoria di suolo. La tabella che segue riassume l'elenco delle prove eseguite sull'area.

SINTESI PROVE ESEGUITE		
PROVA	PROFONDITA' DI INDAGINE (m)	ANNO ESECUZIONE
CPT 1	14,6	2009
CPT 2	8,0	2009
MASW	~ 30	2015

L'ubicazione delle prove (anno 2009 e anno 2015) viene illustrata in **Tavola 1**.

7 INTERPRETAZIONE STRATIGRAFICA

Si riportano di seguito le considerazioni stratigrafiche e geotecniche emerse durante la fase di caratterizzazione eseguita nel 2009.

Il **modello stratigrafico**, ricostruito con l'ausilio delle indagini penetrometriche, segnala la presenza di terreni complessivamente coesivi lungo tutto il tratto investigato, con locale frazione limoso-sabbiosa.

Di seguito viene invece riportato il dettaglio dei vari orizzonti litologici intercettati nelle singole prove:

LIVELLI LITOLOGICI RILEVATI IN CPT 1 (anno 2009)		
PROFONDITA' da p.c. (m÷m)	LITOLOGIA (secondo Schmertmann)	FALDA DA P.C. (m)
0,0 – 2,0	Argilla inorganica molto compatta	3,15
2,0 – 3,4	Argille limo-sabbiose	
3,4 – 6,0	Argille organiche e terreni misti	
6,0 – 14,6	Argilla inorganica molto compatta	

LIVELLI LITOLOGICI RILEVATI IN CPT 2 (anno 2009)		
PROFONDITA' da p.c. (m÷m)	LITOLOGIA (secondo Schmertmann)	FALDA DA P.C. (m)
0,0 – 1,6	Argille limo-sabbiose	3,15
1,6 – 2,4	Argille organiche e terreni misti	
2,4 – 5,6	Argilla inorganica di media consistenza	
5,6 – 8,0	Argilla inorganica molto compatta	

Il livello della falda freatica rilevato dai fori di indagine è risultato pari a – 3,15 m dal piano campagna. Sono ad ogni modo prevedibili eventuali variazioni stagionali del livello piezometrico della falda e conseguentemente della frangia capillare ad essa associata. In **Allegato 1** si riporta, per completezza, il log stratigrafico delle due prove CPT eseguite nell'anno 2009.

8 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

Dall'analisi condotta emerge un terreno composto nel complesso da depositi a comportamento geomeccanico coesivo. La componente limoso-sabbiosa è stata rilevata abbastanza frequentemente negli orizzonti a matrice argillosa intercettati. La continuità litostratigrafica laterale può definirsi buona nel senso che lo stato d'addensamento e la potenza dei vari orizzonti risulta uniforme, in senso orizzontale, perlomeno fino alla profondità raggiunta da entrambe le prove e al di sotto del futuro piano campagna. Questo aspetto può rivelarsi particolarmente importante nell'analisi dei cedimenti in quanto caratteristiche di resistenza e deformabilità costanti lateralmente possono evitare, a breve e a lungo termine, la possibilità di cedimenti differenziali, a parità di altre condizioni. Le tabelle seguenti riassumono nel dettaglio le principali caratteristiche meccaniche:

PARAMETRI GEOTECNICI CPT 1 (anno 2009)							
PROF. (da mt a mt)	qc media		c_u media		Ed medio		φ (°)
	(kPa)	(kg/cm²)	(kPa)	(kg/cm²)	(kPa)	(kg/cm²)	
0,0 – 2,0	3237	33,0	162	1,65	6475	66,0	29
2,0 – 3,4	1030	10,5	51	0,52	4365	44,5	-
3,4 – 6,0	1687	17,2	84	0,86	4601	46,9	21
6,0 – 14,6	1422	14,5	71	0,72	4748	48,4	18

PARAMETRI GEOTECNICI CPT 2 (anno 2009)							
PROF. (da mt a mt)	qc media		c_u media		Ed medio		φ
	(kPa)	(kg/cm²)	(kPa)	(kg/cm²)	(kPa)	(kg/cm²)	(°)
0,0 – 1,6	3846	39,2	192	1,96	7691	78,4	31
1,6 – 2,4	2315	23,6	116	1,18	4630	47,2	25
2,4 – 5,6	1246	12,7	62	0,63	4670	47,6	-
5,6 – 8,0	1442	14,7	72	0,73	4748	48,4	20

In **Allegato 1** si riportano, per completezza, i tabulati dei parametri geotecnici delle due prove CPT eseguite nell'anno 2009.

9 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Le onde sismiche legate ad un evento tellurico, subiscono riflessioni e rifrazioni durante la loro propagazione, a causa delle eterogeneità crostali.

Negli strati più superficiali, dal punto di vista geotecnico, questo può causare variazioni della capacità portante, oppure dar luogo a incrementi della spinta sulle opere di sostegno, o ancora causare veri e propri fenomeni di instabilità, particolarmente nei terreni potenzialmente liquefacibili.

Le onde meccaniche generate da un terremoto inducono effetti diversi in relazione al tipo di terreno, a seconda che questo abbia un comportamento stabile o instabile sotto l'effetto del moto vibratorio legato al sisma.

Il terreno ha un comportamento stabile quando le sollecitazioni del sisma sono inferiori alla resistenza al taglio del terreno, quando i terreni sono costituiti da ghiaie, sabbie addensate e argille consistenti.

Il terreno ha un comportamento instabile quando le sollecitazioni del sisma superano la resistenza al taglio del terreno e questo si verifica in terreni caratterizzati dalla presenza di argille molli e in terreni saturi, con effetto di degradazione legati alla pressione interstiziale.

9.1 PROSPEZIONE SISMICA IN SITO

La prospezione sismica MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) è una tecnica non invasiva di indagine del sottosuolo, che consente la determinazione di alcune caratteristiche del terreno, prima tra tutte la velocità delle onde di taglio verticali (V_s) dei singoli sismostrati, in funzione della misura delle onde di superficie (principalmente onde di Rayleigh).

L'interazione congiunta di onde P e onde S che incidono la superficie libera comportano, oltre ad una parziale riflessione delle stesse, anche il generarsi di un'ulteriore onda (di superficie), formata dalla composizione vettoriale delle due: l'onda di Rayleigh. In un mezzo solido e isotropo le particelle di superficie attraversate da questa tipologia di onde si muovono secondo elissi con piano perpendicolare alla superficie e parallelo alla direzione di propagazione. In superficie e a profondità ridotte tale moto è retrogrado (**Figura 9.1**).

Quando le onde di Rayleigh attraversano un corpo la cui densità varia con la profondità diventano dispersive (per contro in un mezzo ideale, omogeneo e isotropo non presentano dispersione). Questo significa che onde con diverse frequenze viaggiano con diversa velocità di fase; in particolare onde ad alta frequenza si propagano nei livelli più superficiali, mentre onde a bassa frequenza (cioè elevata lunghezza d'onda) si propagano negli orizzonti profondi.

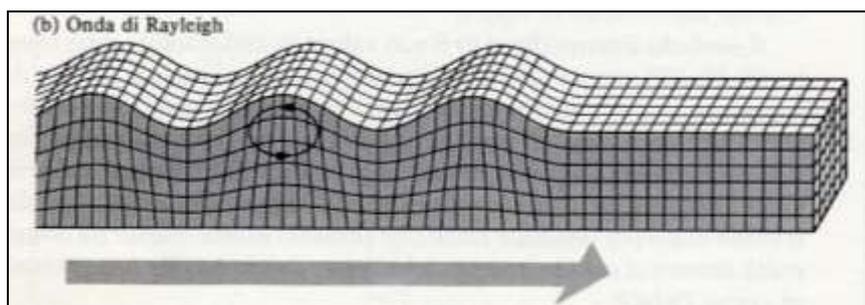


Figura 9.1. Moto e modalità di propagazione delle onde di Rayleigh

Per ottenere le velocità di propagazione delle onde nella sequenza stratigrafica del sottosuolo (primi 30 m, per determinazione V_{s30}) è necessario produrre un'energizzazione in superficie, attraverso massa battente, registrando i segnali prodotti ed elaborandoli opportunamente, attraverso software dedicato, al fine di ottenere la curva di dispersione e procedere poi all'individuazione del profilo delle velocità, in maniera iterativa, intervenendo di volta in volta sui parametri velocità onde di taglio (V_s), il coefficiente di Poisson (ν), densità di massa (ρ) e spessore (h).

9.1.1 Strumentazione utilizzata e modalità di acquisizione dati

L'indagine sismica condotta ha visto l'utilizzo di tromografo digitale Tromino Engy. Le diverse energizzazioni del substrato sono state effettuate a livello di un geofono mobile, connesso allo strumento, posizionato in modo progressivo a diversi step, ad interdistanza di 5,0 metri l'uno dall'altro, per una lunghezza complessiva di 50 metri di distanza dallo strumento (per un totale di 10 acquisizioni).

I dati raccolti per le diverse prove sono stati elaborati mediante uso del Software Grilla® ver. 6.4.2.

9.1.2 Risultati indagine sismica MASW

Di seguito (**Figura 9.2** e **Figura 9.3**) si riportano le immagini più rappresentative derivanti dall'elaborazione della prova sismica.

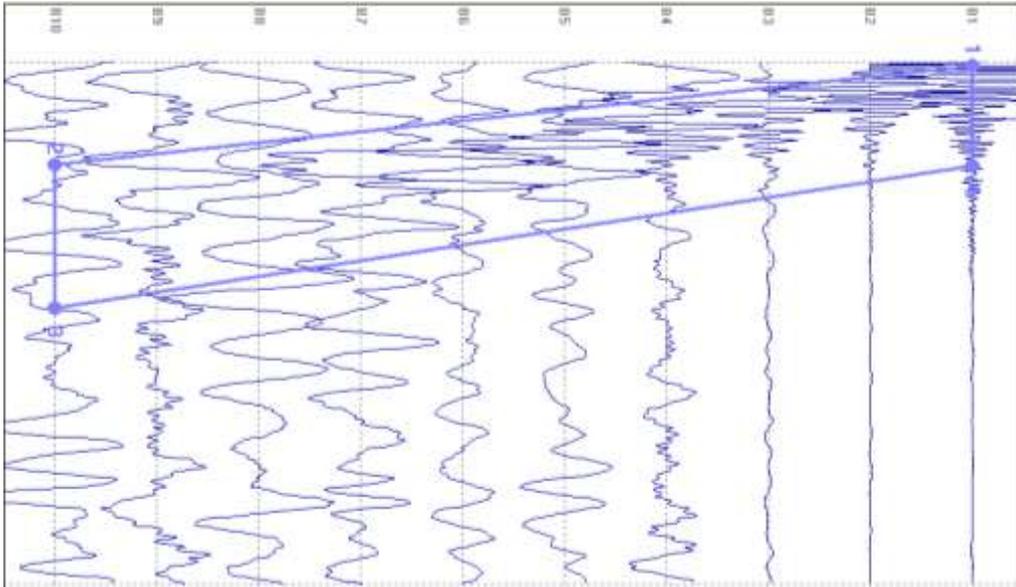


Figura 9.2. Segnali elaborati, con indicazione della finestra utilizzata per la determinazione della curva di dispersione (eliminazione disturbo)

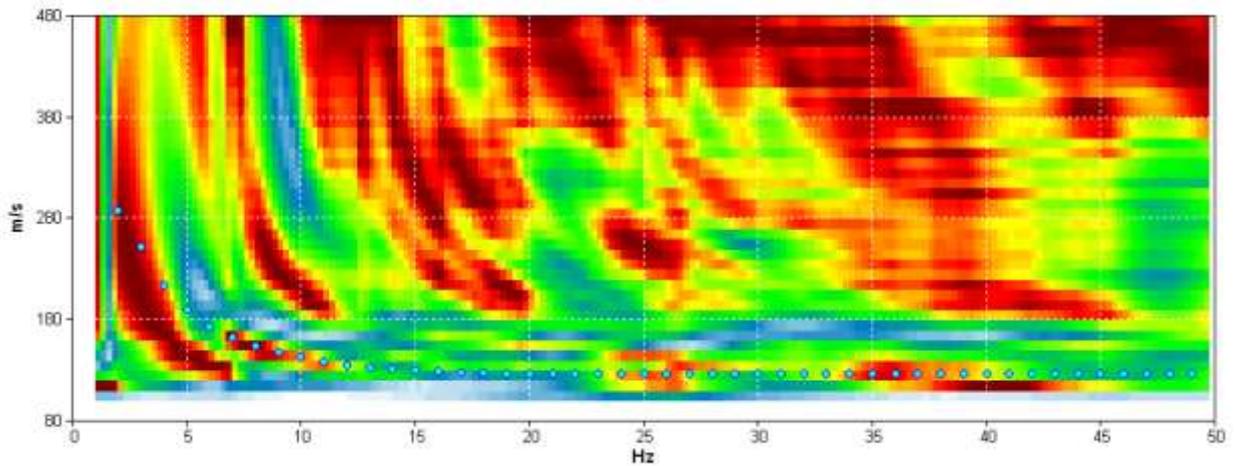


Figura 9.3. Curva di dispersione sperimentale e numerica

L'indagine sismica eseguita (prova Masw attiva), considerando la sismostratigrafia fino alla profondità di -31,0 metri da p.c., ha consentito la determinazione della velocità delle V_{s30} (**Figura 9.4**), ricavata dalla formula riportata nel D.M. del 14 Gennaio 2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" e di seguito riproposta:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}} \text{ [m/s].}$$

dove h_i e $V_{s,i}$ rappresentano rispettivamente lo spessore e la velocità di propagazione delle onde di taglio attraverso lo strato i -esimo entro 30 metri di profondità.

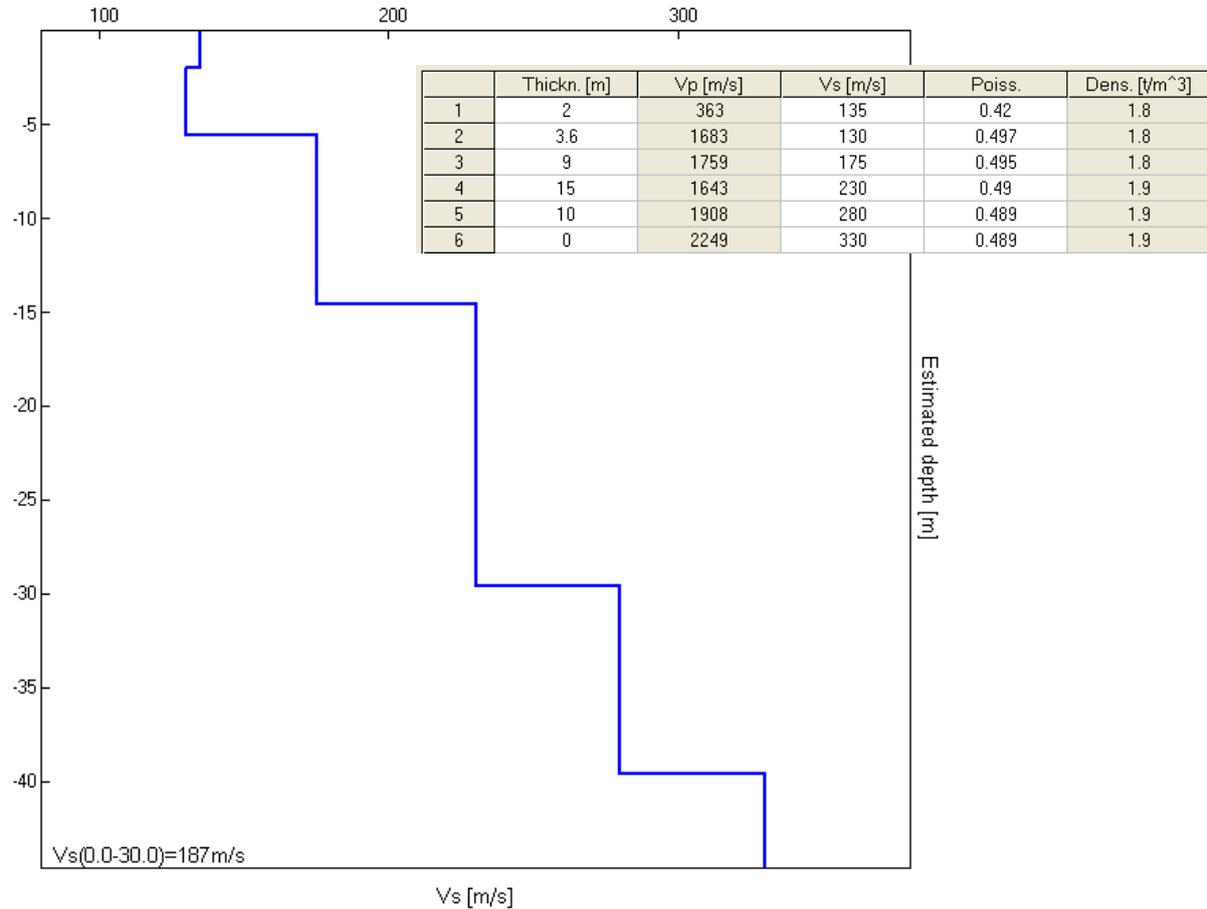


Figura 9.4. Profilo delle V_s , caratteristiche sismostrati e determinazione V_{s30}

Nel caso specifico si ottiene:

$$V_{s,30} = 187 \text{ m/s}$$

Tale valore associa pertanto i terreni di fondazione ad un suolo di categoria C, ovvero, come definito in tabella 3.2.II:

“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati, o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s ($15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa, $70 < c_{u,30} < 250 \text{ kPa}$ nei terreni a grana fina)”.

Secondo quanto riportato nelle prescrizioni della normativa vigente la sollecitazione sismica si traduce in un'accelerazione nelle tre direzioni (due orizzontali e una verticale), funzione delle caratteristiche del sito e della risposta delle componenti costitutive delle diverse strutture. La rappresentazione di riferimento per tali componenti è lo spettro di risposta elastico in accelerazione per uno smorzamento convenzionale del 5%.

L'approccio alla quantificazione dell'azione sismica attraverso l'analisi spettrale prevede la definizione di uno spettro orizzontale e uno verticale e ha origine dalla determinazione dei seguenti parametri:

- Categoria di suolo e categoria topografica
- T_c^0 : periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante
- a_g : accelerazione orizzontale massima del sito
- F_0 : massimo valore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale

da cui dedurre i coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_v , rispettivamente pari a:

$$k_h = \beta s * a_{max}/g$$

$$k_v = 0,5 k_h$$

9.2 PARAMETRI SISMICI E SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI AI SENSI DELLE NTC 08

La caratterizzazione sismica procede con la definizione dei parametri sismici relativi al sito di riferimento. Il sito di interesse viene dapprima localizzato all'interno del reticolo di riferimento proposto nell'Allegato B delle NTC08, compreso nei quattro nodi evidenziati (**Figura 9.5**).

Le coordinate geografiche dell'area di intervento, espresse nel sistema di riferimento ED50, vengono riportate nella tabella seguente:

COORDINATE SITO ED 50	
Latitudine	44,599358
Longitudine	11,361828

Di seguito vengono invece riportati i parametri identificativi dei quattro nodi del reticolo che includono il sito in esame.

PARAMETRI DEI NODI DEL RETICOLO ($T_r = 475$ anni)					
Nodo	ID	a_g (m/s^2)	F_0 (-)	T_c^0 (sec)	Distanza dal sito (m)
1	16286	1,626	2,55	0,28	4176
2	16287	1,628	2,56	0,28	2570
3	16509	1,687	2,43	0,29	4144
4	16508	1,664	2,44	0,29	5289

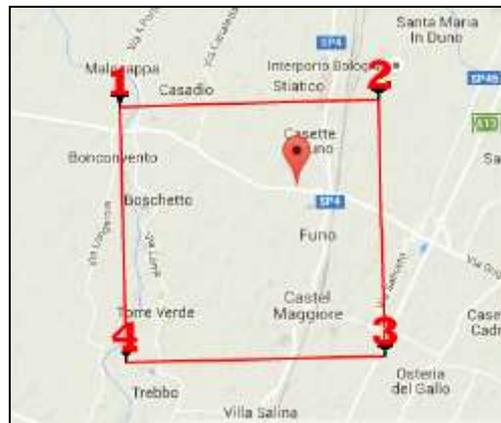


Figura 9.5. Ubicazione nodi reticolo di riferimento (Fonte: Geostru PS)

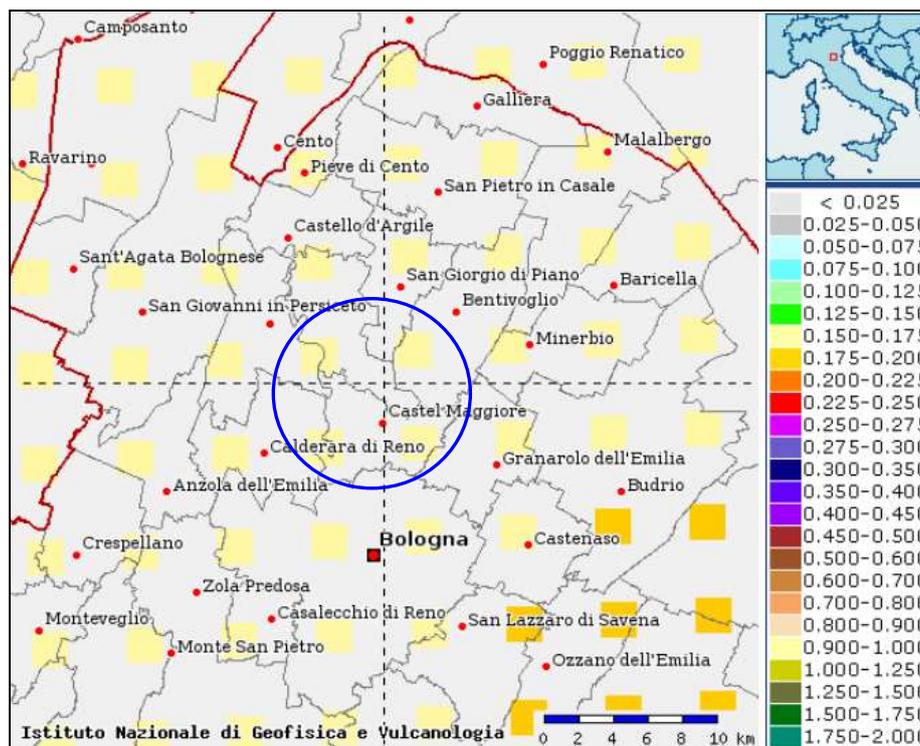


Figura 9.6. Estratto di mappa interattiva della pericolosità sismica (prob.: 10% in 50 anni, 50° percentile). Nel cerchio blu i nodi che includono l'area di intervento, localizzata al centro del crocino.

Graficamente i nodi di interesse si collocano come indicato nella **Figura 9.6**, in cui le diverse evidenze cromatiche illustrato l'intervallo di variazione dell'accelerazione attesa al sito per

una probabilità di accadimento del 10% in 50 anni, al 50° percentile (da *Mappa interattiva della pericolosità sismica*, INGV). A questo punto, sulla base dei seguenti dati di input introdotti nel software di calcolo GeoStru PS:

PARAMETRO	VALORE
Vita nominale	50
Classe d'uso	2
Categoria di suolo	C
Categoria topografica	T1

si riportano in forma tabellare i parametri e coefficienti sismici riferiti ai diversi stati limite da considerare.

PARAMETRI SISMICI					
STATO LIMITE	PROB. SUPERAM. (%)	Tr (anni)	a _g (g)	F ₀ (-)	T _c ⁰ (sec)
OPERATIVITA' (SLO)	81	30	0,050	2,475	0,258
DANNO (SLD)	63	50	0,061	2,507	0,273
SALVAGUARDIA VITA (SLV)	10	475	0,165	2,507	0,281
PREVENZIONE COLLASSO (SLC)	5	975	0,216	2,485	0,286

COEFFICIENTI SISMICI							
STATO LIMITE	S _s (-)	C _c (-)	S _t (-)	K _h (-)	K _v (-)	A _{max} (m/s ²)	Beta (-)
(SLO)	1,50	1,64	1,00	0,015	0,007	0,729	0,200
(SLD)	1,50	1,61	1,00	0,018	0,009	0,898	0,200
(SLV)	1,45	1,60	1,00	0,057	0,029	2,342	0,240
(SLC)	1,38	1,59	1,00	0,084	0,042	2,927	0,280

VALORI DI RIFERIMENTO DA NTC08	
PARAMETRO	VALORE
a _{refg}	0,165 g
F.A. di P.G.A.	1,45
F.A. topografico	1,00
Acc max di picco al suolo	0,239 g

S_s, C_c e S_t e Beta (=β_s) sono coefficienti rispettivamente di amplificazione stratigrafica, di categoria di suolo, di amplificazione topografica e di riduzione dell'accelerazione massima attesa. Chiaramente tali parametri sono suscettibili di variazioni qualora vengano modificati i dati di input definiti.

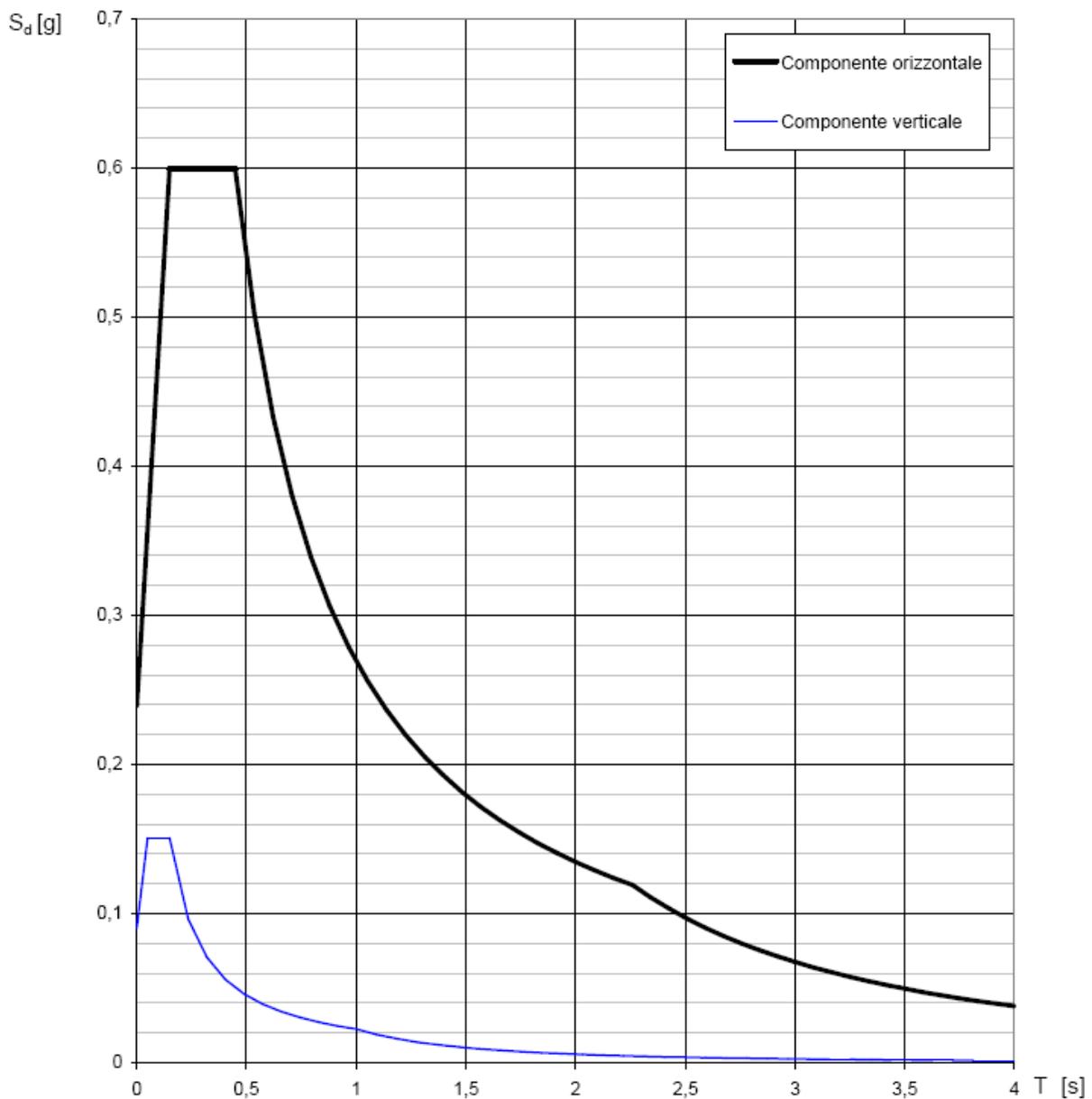


Figura 9.7. Spettro di progetto SLV in accelerazione – comp. orizzontale e verticale

Ora è possibile calcolare lo spettro di risposta elastico, così come illustrato in **Figura 9.7** (componente orizzontale e verticale).

L'elaborazione è stata effettuata attraverso il software Spettri NTC ver. 1.0.3 messo a disposizione dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Si specifica come la componente verticale sia in realtà uno spettro di progetto (fattore di struttura pari a $q=1,5$).

Noto il fattore di struttura orizzontale sarà possibile determinare lo spettro di progetto e da questo, in funzione del periodo T_1 , l'intercetta sullo spettro, ricavando il k_{hi} per il calcolo del taglio sismico nell'ambito della verifica a scorrimento, mentre sull'intercetta dello spettro verticale sarà possibile determinare il k_v per la stima della combinazione sismica.

9.3 SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO DA DEL. REG. 112/07

Facendo riferimento all'atto di indirizzo della Regione Emilia-Romagna n°112 del 02.05.2007, in merito a "Indirizzi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" si riporta in **Figura 9.8** lo spettro di risposta elastico relativo e l'accelerazione di picco massima, ottenuto a partire dallo spettro generico dell'Emilia-Romagna, normalizzato attraverso l'accelerazione del comune di Argelato e attraverso i fattori di amplificazione della stessa, associati alla categoria di suolo e alla topografia.

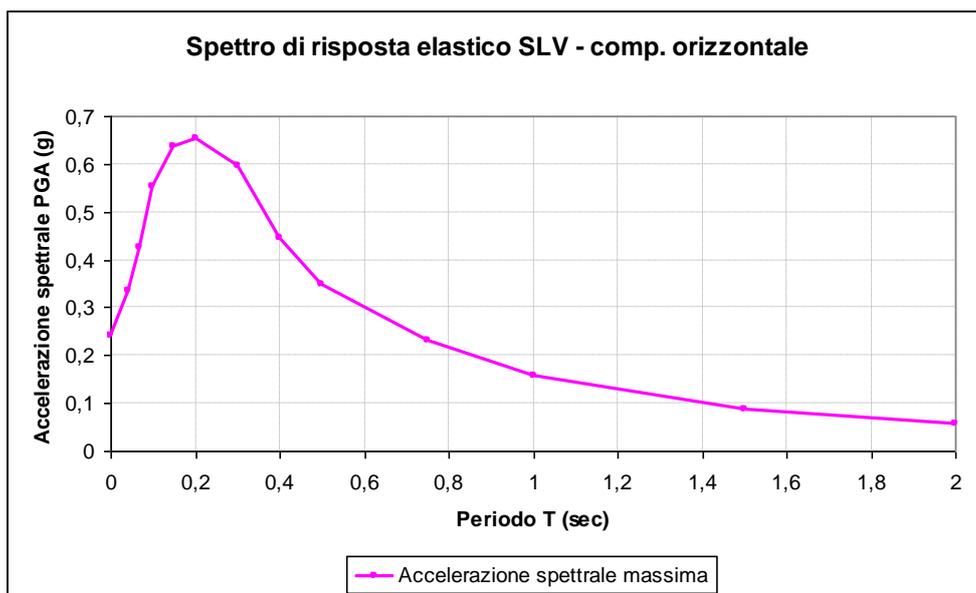


Figura 9.8. Spettro di risposta elastico SLV in accelerazione da Del Reg. 112/07

VALORI DI RIFERIMENTO DA D.REG. 112/07	
PARAMETRO	VALORE
AMBITO	PIANURA 2
a_{refg}	0,161 g
F.A. di P.G.A.	1,5
F.A. topografico	1,00
Acc max di picco al suolo	0,242 g
F.A. intensità spett. (0,1s < T ₀ < 0,5s)	1,8
F.A. intensità spett. (0,5s < T ₀ < 1,0s)	2,5

Pertanto, confrontando le accelerazioni massime di picco al suolo, calcolate ai sensi delle NTC08 e ai sensi della Del. Reg. 112/07, è possibile constatare che risulta leggermente più elevato (e quindi conservativo), il valore ottenuto secondo la normativa regionale.

10 ANALISI DEL RISCHIO ALLA LIQUEFAZIONE

La verifica di liquefazione dei suoli, è stata eseguita sui livelli potenzialmente liquefacibili, secondo il metodo di Robertson e Wride (1998), come prescritto anche dalla Del. Reg. 112/07. E' noto che nei sedimenti granulari la presenza di percentuali di argilla riduce in maniera rilevante la suscettibilità alla liquefazione dei depositi. Anche la presenza di strati superficiali non liquefacibili con spessore maggiore di 3 metri può ulteriormente contrastare la liquefazione degli strati sottostanti.

Nell'area la falda freatica è stata intercettata alla profondità media di **3,15 m** dal p.c. attuale. Con le indagini geognostiche eseguite sono state evidenziate le disomogeneità stratigrafiche verticali. Il calcolo del coefficiente di sicurezza F_s individua con $F_s < 1,0$ indica la possibilità che avvenga la liquefazione, mentre $F_s > 1,0$ esclude la possibilità del fenomeno.

Nel caso specifico la verifica alla liquefazione è stata effettuata sui livelli incoerenti intercettati in CPT 1, in quanto maggiormente rappresentativa per la profondità, e considerando cautelativamente un livello di falda pari a 1 m da p.c..

10.1 PROCEDURA DI CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA A LIQUEFAZIONE

La verifica è stata articolata secondo le seguenti fasi:

- Determinazione dei parametri necessari ai calcoli, dall'elaborazione della prova penetrometrica statica; nello specifico si tratta delle resistenze di punta q_c e laterale f_s , della pressione atmosferica P_a , della tensione litostatica totale σ_{v0} e tensione litostatica efficace σ'_{v0} .
- Definizione del tipo di suolo attraverso l'indice I_c (Robertson e Wride, 1998), definito come:

$$I_c = [(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2]^{0,5}$$

Con:

$$Q = [(q_c - \sigma_{v0}) / P_a] * [(P_a / \sigma'_{v0})^n]$$

$$F = [f_s / (q_c - \sigma_{v0})] * 100\%$$

- Calcolo della resistenza conica normalizzata Q , con adeguato esponente n .
- Calcolo della resistenza penetrometrica statica normalizzata q_{c1N}

$$(q_{c1N}) = C_q * (q_c / P_a)$$

Con $C_q = (P_a / \sigma'_{v0})^n$, in cui n = è l'esponente utilizzato per calcolare I_c .

- ☑ Trasformazione della resistenza penetrometrica statica normalizzata q_{c1N} in resistenza penetrometrica statica normalizzata equivalente a sabbia pulita $(q_{c1N})_{CS}$ attraverso la relazione:

$$(q_{c1N})_{CS} = K_c * (q_{c1N})$$

In cui K_c , nel caso $I_c > 1,64$ rispetta la seguente equazione, proposta da Robertson e Wride (1998):

$$K_c = -0,403 I_c^4 + 5,581 I_c^3 - 21,63 I_c^2 + 33,75 I_c - 17,88$$

- ☑ Calcolo della capacità del terreno di resistere alla liquefazione, CRR_M , a partire dalla definizione della resistenza a liquefazione per un terremoto di magnitudo 7,5 ($CRR_{7,5}$), dalla definizione del fattore di correzione della Magnitudo MSF (da Idriss, 1995):

$$CRR_{7,5} = 93 [(q_{c1N})_{CS} / 1000]^3 + 0,08$$

$$MSF = 10^{0,99} / M^{1,13}$$

$$CRR_M = CRR_{7,5} MSF$$

Dove M è la magnitudine di riferimento per l'area di intervento (nel caso specifico, è stata utilizzata la magnitudine massima regionale $M = 6,14$, senza ricorrere al processo di disaggregazione, anche alla luce dei recenti episodi sismici che hanno interessato la pianura padana emiliana nel maggio 2012)

- ☑ Correzione della CRR_M in CRR_{eq} per il fattore K_α (funzione della topografia) e K_σ (funzione della pressione litostatica efficace).

$$CRR_{eq} = CRR_M K_\alpha K_\sigma$$

- ☑ Calcolo del fattore di sicurezza a liquefazione come rapporto tra la capacità di resistenza a liquefazione e la domanda richiesta per il sito in esame:

$$F_s_{liq} = CRR_{eq} / CSR$$

In cui:

$$CSR = 0,65 (a_{max} / g) * (\sigma_{v0} / \sigma'_{v0}) * r_d$$

In cui, a sua volta, $a_{max} = a_g * (S_T * S_S)$. In questa formula a_g è l'accelerazione di riferimento (nel caso specifico $a_g = 0,24g$); S_T è il coefficiente di amplificazione topografico, S_S è il coefficiente di amplificazione dipendente dalla categoria di suolo, r_d è un coefficiente di riduzione con la profondità.

10.2 RISULTATI VERIFICA LIQUEFAZIONE

I risultati della verifica a liquefazione vengono riportati in **Allegato 2**; l'elaborazione è stata effettuata attraverso il software Cliq v. 1.7.6.49 della Geologismiki Geotechnical Engineers - Merarhias (Grecia). In particolare:

- ☑ Gli Fs, calcolati ogni 20 cm, risultano complessivamente sempre superiori all'unità, come mostra il log dell'andamento dell'Fs (**Figura 10.1, al centro**). Fa eccezione un isolato intervallo decimetrico.

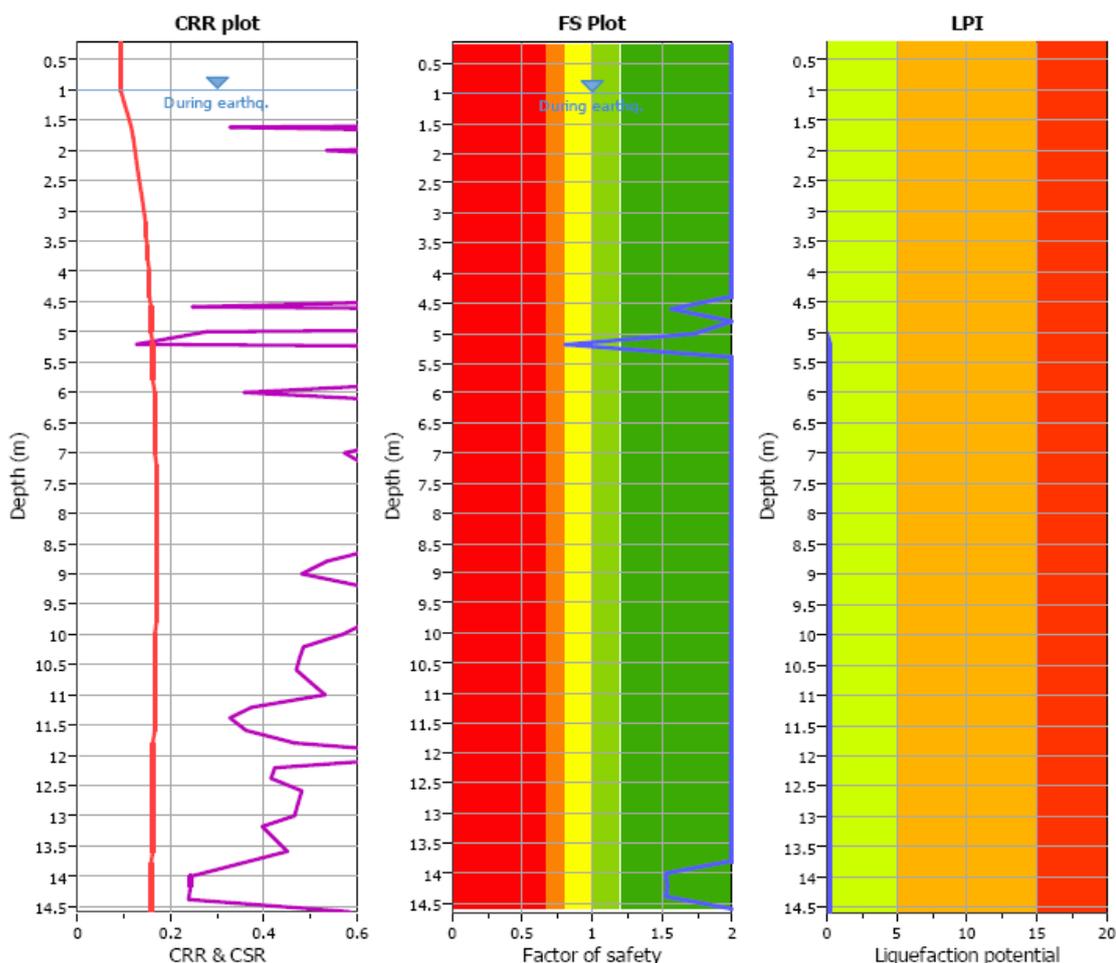


Figura 10.1. Grafici dell'andamento, in CPT 1, di CRR e CSR (a sinistra), di Fs (al centro) e di LPI (a destra)

In particolare, in **Figura 10.1, a sinistra** (e in **Allegato 2**), nel grafico “CRR plot”, si illustrano gli andamenti di CRR (resistenza offerta), in viola, e CSR (domanda di resistenza richiesta), in rosso. Come è possibile notare ogni punto del grafico della resistenza risulta superiore alla domanda richiesta, ad eccezione di una lettura, in cui la resistenza è inferiore alla domanda e per le quali il quoziente CRR/CSR, che rappresenta poi l'Fs, risulta <1 (**Figura 10,1, al centro**).

- ☑ Per quanto riguarda la quantificazione del potenziale a liquefazione (I_L o LPI), si ricorda che questo è formulabile come segue:

$$LPI = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

In cui:

z_{crit} è la profondità massima alla quale strati liquefatti producono effetti in superficie

$$w(z) = 10 - 0,5z$$

$F(z) = 1 - F_s$ se $F_s \leq 1$; $F(z) = 0$ se $F_s > 1$ (con F_s = fattore di sicurezza a liquefazione)

Dai valori risultanti di I_L si può stimare il rischio a liquefazione così come segue (Sonmez, 2003):

POTENZIALE	RISCHIO LIQUEFAZIONE
LPI = 0	Nulla
$0 < LPI \leq 2$	Basso
$2 < LPI \leq 5$	Moderato
$5 < LPI \leq 15$	Alto
LPI > 15	Molto alto

La cumulata dei singoli prodotti $F_s \cdot w$ fornisce un valore complessivo inferiore a 5, come mostrato in **Figura 10.1 (destra)** e come riportato, unitamente all'indicazione di rischio di liquefazione, nella tabella di sintesi che segue.

POTENZIALE A LIQUEFAZIONE		
PROVA	LPI	LIQUEFACIBILITA'
CPT 1	0,29	Rischio basso

- ☑ Il grafico "Summary of liquefaction potential" (**Allegato 2**), in cui sono plottate le coppie di punti rapporto d'attrito normalizzato - resistenza conica normalizzata, mostra che, complessivamente per entrambe le prove, tutti i punti ricadono a cavallo tra la Zona A1 (una minima parte di punti), in cui il potenziale a liquefazione dipende dall'entità e dalla durata del carico ciclico (anche se occorrerebbero prove specifiche per la verifica del rammollimento ciclico) e la Zona B (la quasi totalità delle letture), nella quale si ha liquefazione e perdita di resistenza post-sismica improbabile.
- ☑ La stratigrafia risultante con correlazioni di Robertson (in **Allegato 2**) risulta nel complesso in accordo con quella ricavata da correlazione di Schmertmann e utilizzata per il modello stratigrafico e geotecnico dell'area di intervento.

11 CEDIMENTI POST-SISMICI

Terreni incoerenti (saturi e non), se sottoposti a forze dinamiche temporanee, quali intense vibrazioni o eventi tellurici, subiscono un riordino delle particelle, che si traduce in una compattazione dello strato interessato, e quindi in un cedimento, denominato *post-sismico*. L'entità della deformazione verticale è funzione della densità iniziale del deposito (per le sabbie), del grado di sovraconsolidazione (per le argille), del suo spessore e della massima resistenza che si sviluppa nello strato.

In depositi incoerenti asciutti il cedimento post-sismico avviene pressoché immediatamente, mentre nei depositi incoerenti e coesivi saturi si completa quando le sovrappressioni interstiziali, generate dalle forze dinamiche, vengono interamente dissipate.

La valutazione dei cedimenti post-sismici viene usualmente fatta per i terreni incoerenti; effettivamente il riordino dei granuli in uno strato a seguito della dissipazione delle sovrappressioni è spesso legata al fenomeno della liquefazione, che interessa i soli depositi sabbiosi. Tuttavia anche depositi coesivi soffici e/o plastici, sotto carichi dinamici particolarmente intensi, possono subire un riassetto delle particelle.

L'allegato A3 della Delibera della Regione Emilia-Romagna n°112/07 fornisce le "Procedure di riferimento per analisi di terzo livello di approfondimento". In particolare stabilisce i criteri per una caratterizzazione sismica piuttosto spinta, quali la stima del potenziale di liquefazione, i cedimenti post-sismici in terreni granulari (saturi e non) e coesivi, l'identificazione dei pendii potenzialmente instabili.

Si precisa che nel caso in esame i cedimenti post-sismici sono stati calcolati sulla CPT 1 (in quanto maggiormente rappresentativa per la profondità), nei livelli argillosi e sabbiosi critici intercettati, utilizzando le relative procedure. Per quanto concerne i livelli granulari saturi si farà riferimento al cedimento calcolato automaticamente dal software Cliq (risultati in Allegato 2, nel grafico "vertical settlements"), dopo averne brevemente illustrato i fondamenti.

11.1 PROCEDURA PER TERRENI COESIVI

Il calcolo dei cedimenti post-sismici in terreni coesivi ha origine dalla seguente formula:

$$\Delta H = H_0 * \epsilon_{vr}$$

In cui H_0 è lo spessore dello strato interessato e ϵ_{vr} rappresenta la deformazione volumetrica percentuale post-ciclica che può subire.

A sua volta ϵ_{vr} è calcolabile dalla seguente espressione:

$$\varepsilon_{sv} = \frac{\alpha C_r}{1 + e_0} \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_0}} \right)$$

In cui α è una costante sperimentale, C_r è l'indice di riconsolidazione post-ciclica, derivabile da C_c , e $\Delta u/\sigma'_0$ indica il rapporto delle pressioni interstiziali, espresso dalla seguente formula:

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

In cui β è una costante, γ_{\max} è l'ampiezza della deformazione di taglio massima pari a:

$$\gamma_{\max} = 0.65 \frac{a_{\max s}}{g} \sigma_v r_d \frac{1}{G}$$

Funzione a sua volta del picco di accelerazione al piano campagna per il terremoto di riferimento, della tensione litostatica totale, della profondità media del deposito e del modulo di taglio corrispondente alla massima deformazione (deducibile, in via preliminare, come aliquota del modulo di taglio G_0);

γ_v è pari a

$$\gamma_v = A(\text{OCR}-1)+B$$

in cui A e B sono coefficienti sperimentali deducibili dall'indice di plasticità I_p e OCR è chiaramente il grado di sovraconsolidazione.

11.1.1 Ipotesi sui parametri di calcolo da utilizzare

Non disponendo, in via preliminare, della totalità dei parametri geotecnici richiesti per il calcolo dei cedimenti post-sismici di cui sopra, sono state fatte assunzioni, comunque cautelative, per una stima verosimile delle deformazioni.

Lo studio è stato articolato come segue:

- Il calcolo, secondo quanto prescritto, è stato effettuato sui livelli coesivi con $c_u < 70$ kPa intercettati fino a 20 m da p.c., includendo cautelativamente anche il livello con c_u pari a 71 kPa
- I parametri necessari al calcolo, ove possibile, sono stati desunti dalla prova CPT
- L'indice dei vuoti e_0 è stato assunto pari a 1,5 con $c_u > 60$ kPa e pari a 2,0 per depositi più soffici, con $c_u \leq 60$ kPa.
- I valori di indice di compressibilità C_c inseriti sono compresi tra un minimo di 0,30 per i terreni più consistenti e un massimo di 0,55 per i depositi più scadenti.

- I valori di OCR inseriti sono tutti pari 1. Non sono stati pertanto valutati gradi di sovraconsolidazione superiori all'unità.
- I coefficienti A e B sono stati assunti come riportati nella categoria intermedia tra le 3 proposte.
- Il coefficiente α , variabile tra 1,0 e 1,5, è stato assunto pari a 1,25.

11.2 PROCEDURA PER TERRENI GRANULARI SATURI

Il calcolo dei cedimenti post-sismici in terreni granulari saturi, secondo il metodo Tokimatsu e Seed (1987), ha origine dalla seguente formula:

$$\Delta H = H_0 * \varepsilon_v$$

In cui H_0 è la potenza dello strato e ε_v è la deformazione volumetrica

La procedura di calcolo è la seguente:

- Determinazione della $CSR_{7,5}$ come illustrato nel calcolo della liquefazione.
- Calcolo della $(N_1)_{60CS}$ dalla $(q_{c1N})_{CS}$ precedentemente calcolata per la liquefazione, attraverso la correlazione tra dati SPT e CPT (Robertson 1992, Hegazy e Mayne 1995)

$$(N_1)_{60CS} = B_1 * [(q_{c1N})_{CS}]^{B2}$$

In cui $B1 = 0,488$ e $B2 = 0,779$

- Determinazione della $(N_1)_{60}$ attraverso la relazione con $(N_1)_{60CS}$ (Youd e Idriss, 1997)

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta * (N_1)_{60}$$

cioè $(N_1)_{60} = [(N_1)_{60CS} - \alpha] / \beta$

In cui α e β sono dipendenti dal contenuto di fine

- Stima dello sforzo volumetrico ε_v , funzione della $CSR_{7,5}$ e della $(N_1)_{60}$ attraverso l'abaco proposto da Tokimatsu e Seed (1987), che viene riproposto di seguito in **Figura 11.1.**

La procedura suggerisce che la stima delle deformazioni venga eseguita per terreni incoerenti con densità relativa $< 75\%$.

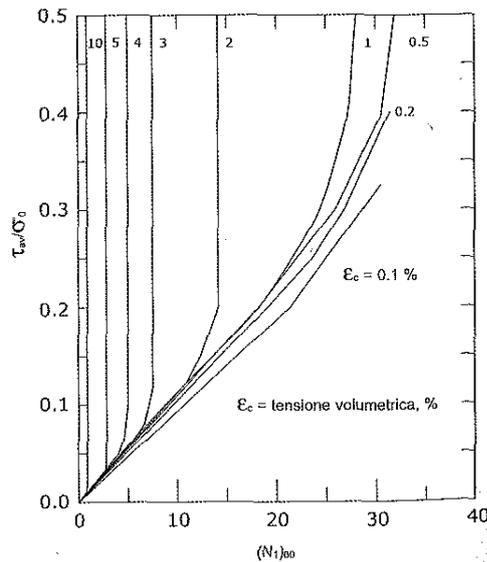


Figura 11.1. Abaco per la definizione della deformazione volumetrica

11.3 CEDIMENTO POST-SISMICO TOTALE

Attraverso le modalità di calcolo esposte sono stati calcolati i cedimenti per tutti i livelli critici intercettati nei primi 14,6 m. Di seguito si riportano i risultati dei calcoli effettuati e il valore del cedimento post-sismico totale:

CEDIMENTI POST-SISMICI CALCOLATI SU CPT 1 (anno 2009)				
STRATO	PROF. (m-m)	Cu (kPa)	DEFORM. VOLUM. (%)	ΔH POST-SISMICO (cm)
<i>Livelli coesivi</i>				
1	2,0 – 3,4	51	≈ 0	≈ 0
2	6,0 – 14,6	71	0,339	2,91
<i>Livelli granulari saturi (da software CLiq)</i>				
-	Livelli decimetrici sporadici			0,61
CEDIMENTO POST-SISMICO TOTALE (cm)				3,5

È possibile constatare come i cedimenti risultino nel complesso contenuti in valore assoluto; inoltre è bene specificare che si tratta di cedimenti (calcolati in *free-field*, cioè in assenza di strutture) di carattere areale, pertanto, accertata l'assenza di eteropie geologiche significative locali nel suolo di fondazione, tali cedimenti generalmente non provocano danneggiamenti importanti in strutture dimensionalmente contenute.

12 CONCLUSIONI

Le analisi e valutazioni condotte sono state finalizzate alla caratterizzazione geotecnica e sismica del terreno di fondazione interessato dalla realizzazione di un fabbricato rurale residenziale. Di seguito i punti salienti emersi:

CLASSIFICAZIONE

SISMICA:

Per la natura dei terreni individuata, per la collocazione geografica del sito e a seguito dell'elaborazione delle indagini effettuate i principali parametri sismici risultano i seguenti:

Zona: 3 (da OPCM 3519/06)

A_{max} di picco al suolo più conservativa: **0,24 g**

(da Del. Reg. 112/07)

Categoria suolo: C (con $V_{s30} = 187$ m/s)

LIQUEFAZIONE:

Per un sisma con $M=6,14$ accelerazione pari a 0,24g e livello di falda a 1 m da p.c. il potenziale a liquefazione risulta pari a **LPI = 0,29**, associando il sito a rischio basso.

CEDIMENTI

POST-SISMICI:

Per un sisma con $a=0,24g$, attraverso le procedure di calcolo dei cedimenti post-sismici per terreni coesivi e granulari si stima un cedimento post-sismico massimo complessivo pari a **3,5 cm**, calcolato sui primi 14,6 m da p.c..

Tutti gli elementi acquisiti in corso d'opera permettono di fornire, relativamente ad ogni aspetto delle verifiche effettuate, le informazioni atte a supportare la progettazione e ad esprimere un giudizio di idoneità complessiva dell'area e del terreno investigato, per l'uso a cui verranno destinati.

Montalbano (FE), giugno 2015

Il tecnico
Dott. Geol. Stefano Maresta



Allegato 1

*Tavole dati CPT
(log stratigrafico e parametri geotecnici)*

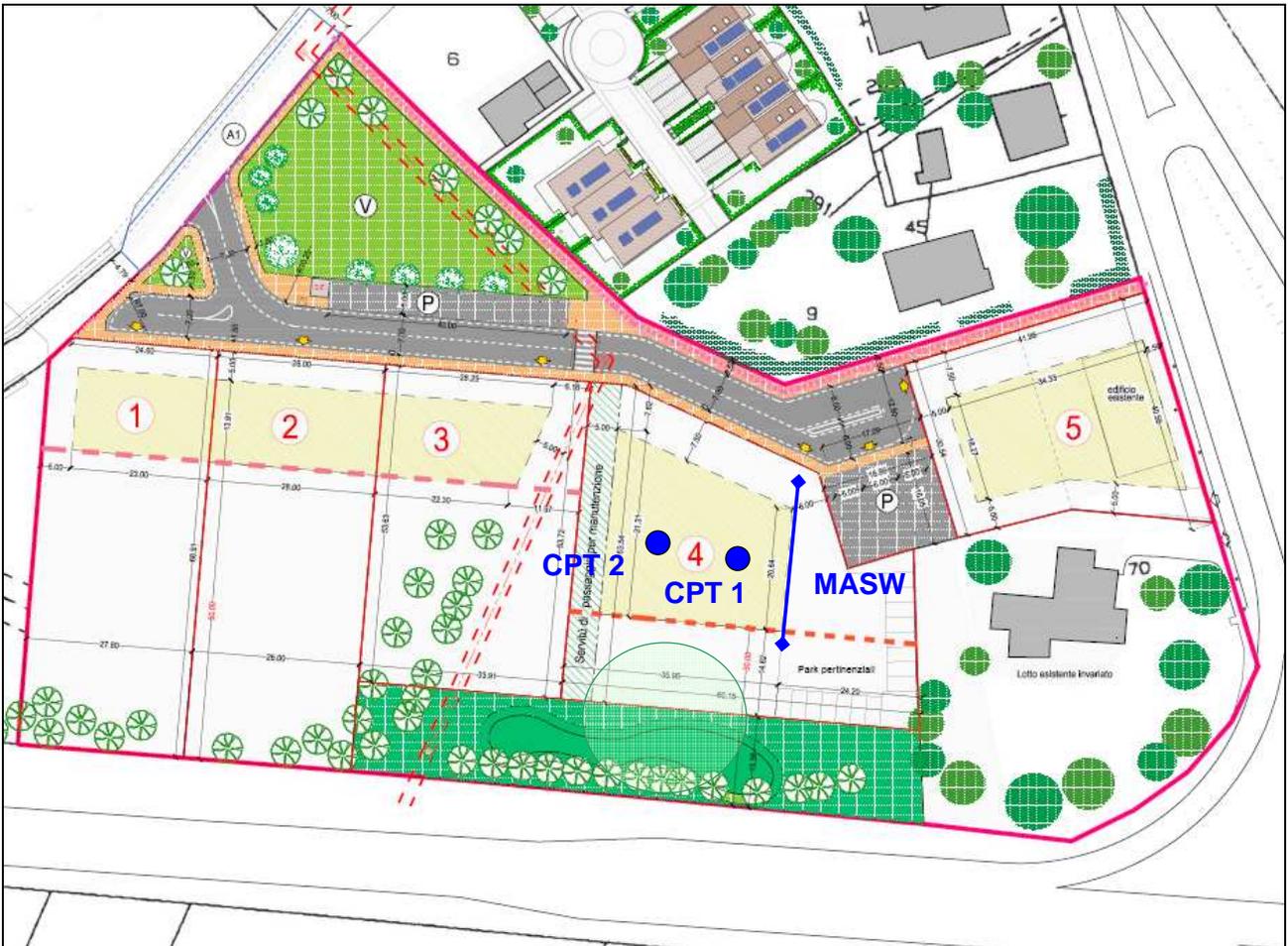


Tavola 1. Estratto di planimetria di progetto con individuazione dell'area oggetto di indagine; in blu si riporta ubicazione delle indagini geognostiche eseguite nell'anno 2009 (CPT 1 e CPT 2) dell'indagine sismica eseguita per la caratterizzazione oggetto del presente documento. (tavola fuori scala).

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI - CPT 1

TERRENI COESIVI

Coesione non drenata

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Cu (Kg/cm ²)
Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	Terzaghi	0,01
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Terzaghi	1,65
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	Terzaghi	0,52
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Terzaghi	0,86
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Terzaghi	0,72

Modulo Edometrico

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Eed (Kg/cm ²)
Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	Metodo generale del modulo Edometrico	0,91
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Metodo generale del modulo Edometrico	65,98
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	Metodo generale del modulo Edometrico	44,45
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Metodo generale del modulo Edometrico	46,91
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Metodo generale del modulo Edometrico	48,42

Modulo di deformazione non drenato Eu

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Eu (Kg/cm ²)
Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	Cancelli 1980	4,58
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Cancelli 1980	1229,15
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	Cancelli 1980	372,19
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Cancelli 1980	618,75
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Cancelli 1980	496,44

Modulo di deformazione a taglio

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Modulo di deformazione a taglio (Kg/cm ²)
Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	Imai & Tomauchi	8,35
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Imai & Tomauchi	237,09
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	Imai & Tomauchi	117,47

Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Imai & Tomauchi	159,53
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Imai & Tomauchi	143,42

Grado di sovraconsolidazione

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Ocr
Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	P.W.Mayne 1991	0,5
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	P.W.Mayne 1991	9
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	P.W.Mayne 1991	4,73
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	P.W.Mayne 1991	9
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	P.W.Mayne 1991	9

Peso unità di volume

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m ³)
Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	Meyerhof	1,12
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Meyerhof	2,06
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	Meyerhof	1,86
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Meyerhof	1,94
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Meyerhof	1,9

Fattori di compressibilità C Crm

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	C	Crn
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	0,12	0,02
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	0,14	0,02
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	0,16	0,02

Peso unità di volume saturo

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m ³)
Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	Meyerhof	1,2
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Meyerhof	2,14
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	Meyerhof	1,94
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Meyerhof	2,02
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Meyerhof	1,98

TERRENI INCOERENTI

Densità relativa

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Densità relativa (%)
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Baldi 1978 - Schmertmann 1976	56,2
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Baldi 1978 -	20,03

						Schmertmann 1976	
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Baldi 1978 - Schmertmann 1976	7,78

Angolo di resistenza al taglio

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Meyerhof 1951	31,81
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Meyerhof 1951	24,75
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Meyerhof 1951	23,51

Modulo di Young

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Robertson & Campanella 1983	65,99
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Robertson & Campanella 1983	34,5
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Robertson & Campanella 1983	28,98

Modulo Edometrico

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Modulo Edometrico (Kg/cm ²)
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Robertson & Campanella da Schmertmann	59,98
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Robertson & Campanella da Schmertmann	20,49
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Robertson & Campanella da Schmertmann	19,05

Modulo di deformazione a taglio

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	G (Kg/cm ²)
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Imai & Tomauchi	237,09
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Imai & Tomauchi	159,53
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Imai & Tomauchi	143,42

Grado di sovraconsolidazione

	Prof. Strato	qc	fs	Tensione	Tensione	Correlazione	Ocr
--	--------------	----	----	----------	----------	--------------	-----

	(m)	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	litostatica totale (Kg/cm ²)	litostatica efficace (Kg/cm ²)		
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Stress-History	3,57
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Stress-History	0,54
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Stress-History	<0,5

Modulo di reazione Ko

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Ko
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Kulhawy- Mayne (1990)	0,80
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Kulhawy- Mayne (1990)	0,23
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Kulhawy- Mayne (1990)	0,00

Fattori di compressibilità C Crm

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	C	Crm
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	0,11821	0,01537
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	0,1441	0,01873
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	0,15877	0,02064

Peso unità di volume

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m ³)
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Meyerhof	1,8
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Meyerhof	1,8
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Meyerhof	1,8

Peso unità di volume saturo

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m ³)
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Meyerhof	2,1
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Meyerhof	2,1
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Meyerhof	2,1

Liquefazione - Accelerazione sismica massima (g)=0,15

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Fattore di sicurezza a liquefazione
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Robertson e Wride 1997	0,899
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Robertson e Wride 1997	0,685

Permeabilità

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	K (cm/s)
--	---------------------	-----------------------------	-----------------------------	--	--	--------------	-------------

Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	Piacentini-Righi 1988	1,00E-11
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Piacentini-Righi 1988	4,86E-09
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	Piacentini-Righi 1988	3,11E-08
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Piacentini-Righi 1988	2,80E-05
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Piacentini-Righi 1988	3,86E-07

Coefficiente di consolidazione

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Coefficiente di consolidazione (cm ² /s)
Strato 1	0,20	0,138	2,667	0,02	0,02	Piacentini-Righi 1988	4,14E-09
Strato 2	2,00	32,9925	1,4667	0,22	0,22	Piacentini-Righi 1988	4,814043E-04
Strato 3	3,40	10,4534	0,4571	0,53	0,53	Piacentini-Righi 1988	9,748369E-04
Strato 4	6,00	17,2497	0,4666	0,9	0,75	Piacentini-Righi 1988	1,448286
Strato 5	14,60	14,4923	0,5426	1,97	1,25	Piacentini-Righi 1988	1,679127E-02

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI - CPT 2

TERRENI COESIVI

Coesione non drenata

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Cu (Kg/cm ²)
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	Terzaghi	0,01
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Terzaghi	1,96
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Terzaghi	1,18
Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	Terzaghi	0,63
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Terzaghi	0,73

Modulo Edometrico

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Eed (Kg/cm ²)
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	Metodo generale del modulo Edometrico	0,91
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Metodo generale del modulo Edometrico	78,39
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Metodo generale del modulo Edometrico	47,19
Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	Metodo generale del modulo Edometrico	47,55
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Metodo generale del modulo Edometrico	48,43

Modulo di deformazione non drenato Eu

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Eu (Kg/cm ²)
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	Cancelli 1980	4,58
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Cancelli 1980	1463,27
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Cancelli 1980	869,76
Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	Cancelli 1980	449,55
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Cancelli 1980	514,66

Modulo di deformazione a taglio

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Modulo di deformazione a taglio (Kg/cm ²)
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	Imai & Tomauchi	8,35
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Imai & Tomauchi	263,41
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Imai & Tomauchi	193,18

Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	Imai & Tomauchi	132,2
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Imai & Tomauchi	144,48

Grado di sovraconsolidazione

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Ocr
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	P.W.Mayne 1991	0,5
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	P.W.Mayne 1991	9
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	P.W.Mayne 1991	9
Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	P.W.Mayne 1991	6,49
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	P.W.Mayne 1991	9

Peso unità di volume

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m ³)
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	Meyerhof	1,12
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Meyerhof	2,09
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Meyerhof	2,0
Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	Meyerhof	1,89
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Meyerhof	1,91

Fattori di compressibilità C Crm

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	C	Crn
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	0,11	0,01
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	0,12	0,02
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	0,16	0,02

Peso unità di volume saturo

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m ³)
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	Meyerhof	1,2
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Meyerhof	2,17
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Meyerhof	2,08
Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	Meyerhof	1,97
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Meyerhof	1,99

TERRENI INCOERENTI

Densità relativa

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Densità relativa (%)
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Baldi 1978 - Schmertmann 1976	63,92
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Baldi 1978 -	37,82

						Schmertmann 1976	
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Baldi 1978 - Schmertmann 1976	12,17

Angolo di resistenza al taglio

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Meyerhof 1951	34,6
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Meyerhof 1951	27,59
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Meyerhof 1951	23,59

Modulo di Young

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Robertson & Campanella 1983	78,39
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Robertson & Campanella 1983	47,19
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Robertson & Campanella 1983	29,33

Modulo Edometrico

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Modulo Edometrico (Kg/cm ²)
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Robertson & Campanella da Schmertmann	68,91
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Robertson & Campanella da Schmertmann	38,94
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Robertson & Campanella da Schmertmann	15,42

Modulo di deformazione a taglio

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	G (Kg/cm ²)
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Imai & Tomauchi	263,41
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Imai & Tomauchi	193,18
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Imai & Tomauchi	144,48

Grado di sovraconsolidazione

	Prof. Strato	qc	fs	Tensione	Tensione	Correlazione	Ocr
--	--------------	----	----	----------	----------	--------------	-----

	(m)	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	litostatica totale (Kg/cm ²)	litostatica efficace (Kg/cm ²)		
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Stress-History	5,16
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Stress-History	1,37
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Stress-History	<0,5

Modulo di reazione Ko

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Ko
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Kulhawy- Mayne (1990)	1,02
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Kulhawy- Mayne (1990)	0,43
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Kulhawy- Mayne (1990)	0,00

Fattori di compressibilità C Crm

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	C	Crm
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	0,11246	0,01462
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	0,12337	0,01604
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	0,15768	0,0205

Peso unità di volume

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m ³)
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Meyerhof	1,8
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Meyerhof	1,8
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Meyerhof	1,8

Peso unità di volume saturo

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m ³)
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Meyerhof	2,1
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Meyerhof	2,1
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Meyerhof	2,1

Liquefazione - Accelerazione sismica massima (g)=0,15

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Fattore di sicurezza a liquefazione
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Robertson e Wride 1997	0,722

Permeabilità

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	K (cm/s)
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	Piacentini-	1,00E-11

						Righi 1988	
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Piacentini- Righi 1988	1,84E-11
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Piacentini- Righi 1988	6,39E-06
Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	Piacentini- Righi 1988	2,04E-08
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Piacentini- Righi 1988	3,19E-07

Coefficiente di consolidazione

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Tensione litostatica totale (Kg/cm ²)	Tensione litostatica efficace (Kg/cm ²)	Correlazione	Coefficiente di consolidazione (cm ² /s)
Strato 1	0,20	0,138	1,6	0,02	0,02	Piacentini- Righi 1988	4,14E-09
Strato 2	1,60	39,1971	2,057	0,18	0,18	Piacentini- Righi 1988	2,163086E-06
Strato 3	2,40	23,595	0,7165	0,4	0,4	Piacentini- Righi 1988	0,4521018
Strato 4	5,60	12,6835	0,5625	0,78	0,7	Piacentini- Righi 1988	7,76254E-04
Strato 5	8,00	14,6672	0,5554	1,31	0,94	Piacentini- Righi 1988	0,014044

Allegato 2

Report verifica a liquefazione

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

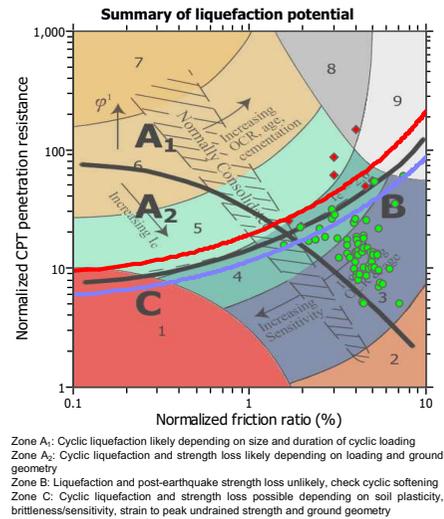
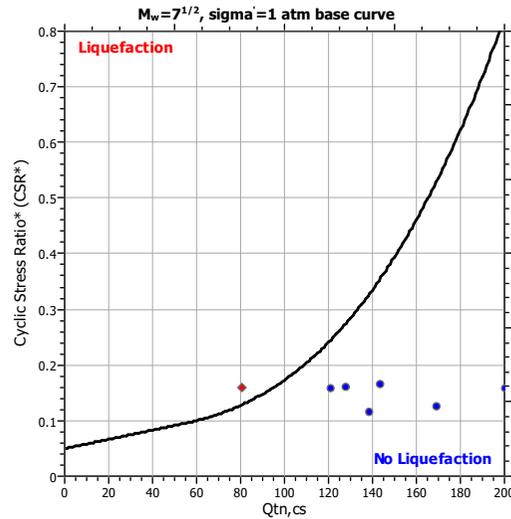
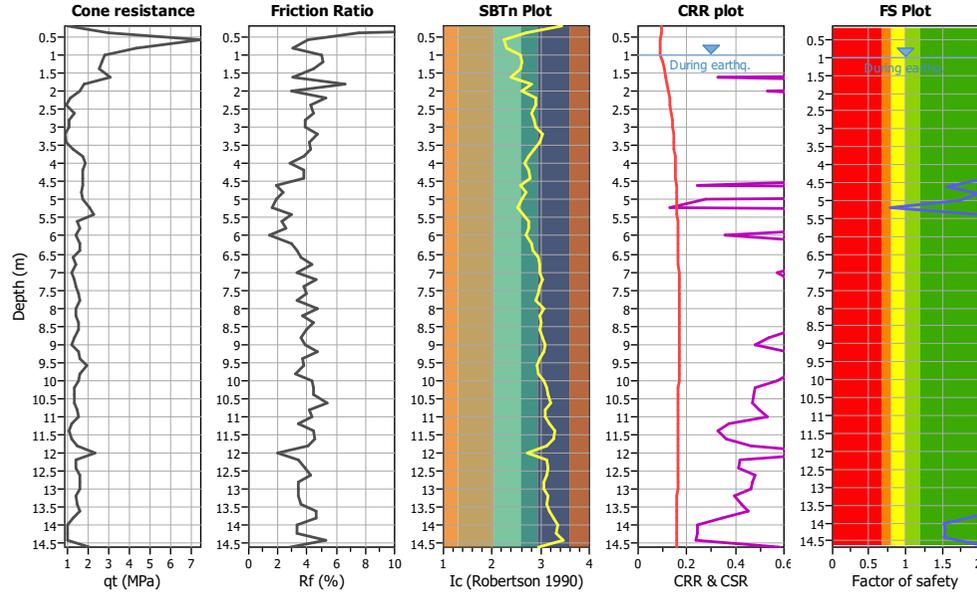
Project title : Caratterizzazione geologico-sismica

Location : Funo di Argelato (BO) - Sigg. Bolelli

CPT file : CPT 1

Input parameters and analysis data

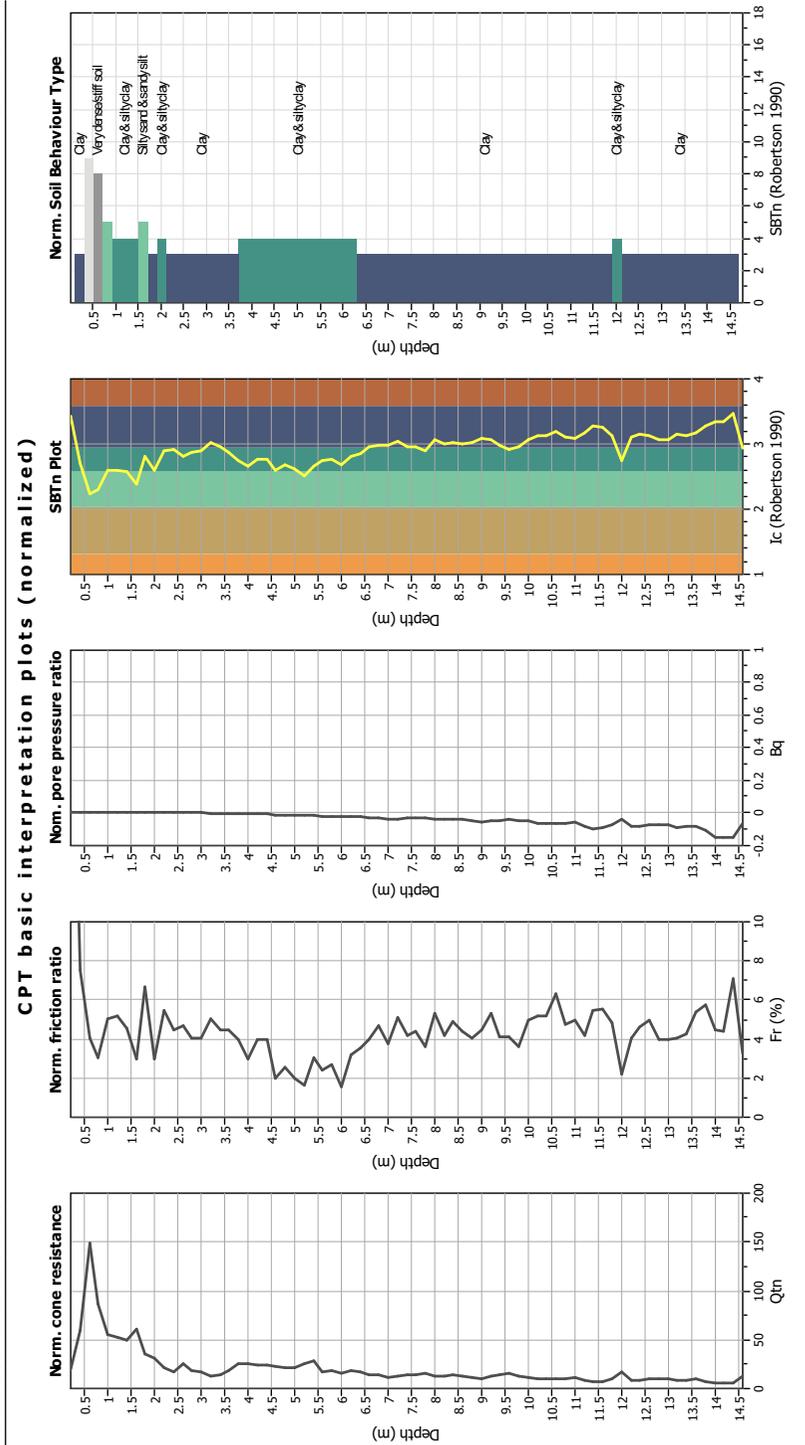
Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	3.10 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	1	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.24	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_s applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

This software is licensed to: GAIA snc

CPT name: CPT 1



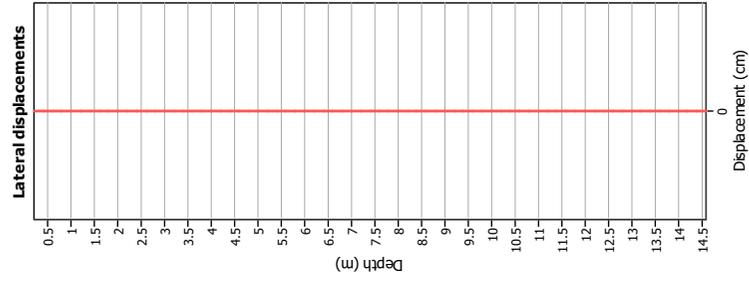
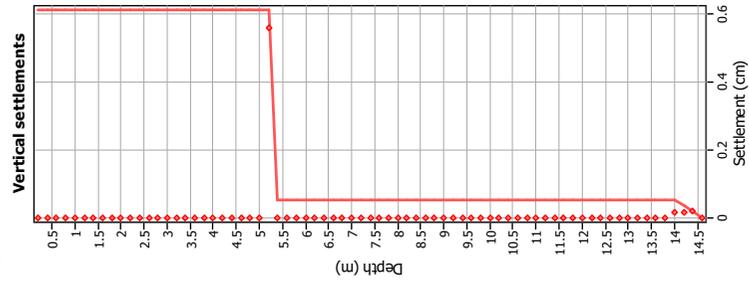
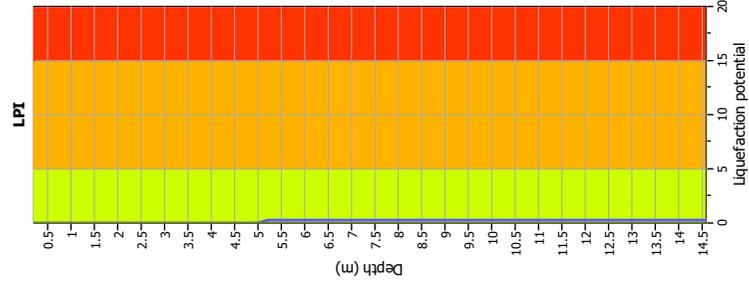
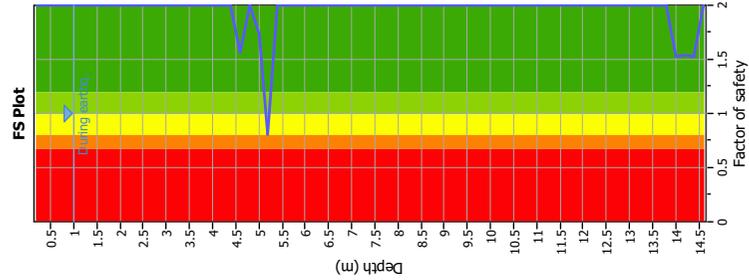
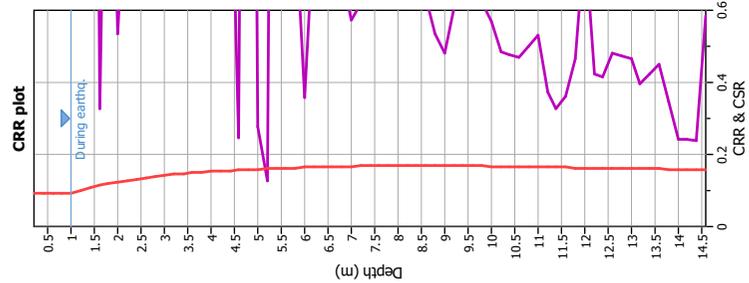
SBTn legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to clay
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (insttu):	3.10 m
Fines correction method:	Robertson (2009)	Fill weight:	N/A
Points to test:	Based on Ic value	Transition detect. applied:	No
Earthquake magnitude M_w :	6.14	K_s applied:	Yes
Peak ground acceleration:	0.24	Ic cut-off value:	2.60
Depth to water table (insttu):	3.10 m	Unit weight calculation:	Based on SBT
		Use fill:	No
		Limit depth:	N/A

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data
 Analysis method: Robertson (2009)
 Points correction method: Robertson (2009)
 Points correction: Based on t_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.24
 Depth to water table (instu): 3.10 m

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_{app} applied: Yes
 Clay like behavior applied: All soils
 Limit depth applied: No
 Limit depth: N/A

F.S. color scheme
 Red: Almost certain it will liquefy
 Orange: Very likely to liquefy
 Yellow: Liquefaction and no liq. are equally likely
 Green: Unlikely to liquefy
 Dark Green: Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme
 Red: Very high risk
 Orange: High risk
 Yellow: Low risk

CLiq v.1.7.6.49 - CPT Liquefaction Assessment Software - Report created on: 01/06/2015, 16:41:19
 Project file: \\Svr\consulenze\1-CONSULENZA GAIA\2015\GL01 - GEOL MARESTA\GL01_15_009_rev\liquef bolelli-cacciari-giorgi.ciq

:: Liquefaction Potential Index calculation data ::											
Depth (m)	FS	F _L	w _z	d _z	LPI	Depth (m)	FS	F _L	w _z	d _z	LPI
0.20	2.00	0.00	9.90	0.20	0.00	0.40	2.00	0.00	9.80	0.20	0.00
0.60	2.00	0.00	9.70	0.20	0.00	0.80	2.00	0.00	9.60	0.20	0.00
1.00	2.00	0.00	9.50	0.20	0.00	1.20	2.00	0.00	9.40	0.20	0.00
1.40	2.00	0.00	9.30	0.20	0.00	1.60	2.00	0.00	9.20	0.20	0.00
1.80	2.00	0.00	9.10	0.20	0.00	2.00	2.00	0.00	9.00	0.20	0.00
2.20	2.00	0.00	8.90	0.20	0.00	2.40	2.00	0.00	8.80	0.20	0.00
2.60	2.00	0.00	8.70	0.20	0.00	2.80	2.00	0.00	8.60	0.20	0.00
3.00	2.00	0.00	8.50	0.20	0.00	3.20	2.00	0.00	8.40	0.20	0.00
3.40	2.00	0.00	8.30	0.20	0.00	3.60	2.00	0.00	8.20	0.20	0.00
3.80	2.00	0.00	8.10	0.20	0.00	4.00	2.00	0.00	8.00	0.20	0.00
4.20	2.00	0.00	7.90	0.20	0.00	4.40	2.00	0.00	7.80	0.20	0.00
4.60	1.56	0.00	7.70	0.20	0.00	4.80	2.00	0.00	7.60	0.20	0.00
5.00	1.73	0.00	7.50	0.20	0.00	5.20	0.80	0.20	7.40	0.20	0.29
5.40	2.00	0.00	7.30	0.20	0.00	5.60	2.00	0.00	7.20	0.20	0.00
5.80	2.00	0.00	7.10	0.20	0.00	6.00	2.00	0.00	7.00	0.20	0.00
6.20	2.00	0.00	6.90	0.20	0.00	6.40	2.00	0.00	6.80	0.20	0.00
6.60	2.00	0.00	6.70	0.20	0.00	6.80	2.00	0.00	6.60	0.20	0.00
7.00	2.00	0.00	6.50	0.20	0.00	7.20	2.00	0.00	6.40	0.20	0.00
7.40	2.00	0.00	6.30	0.20	0.00	7.60	2.00	0.00	6.20	0.20	0.00
7.80	2.00	0.00	6.10	0.20	0.00	8.00	2.00	0.00	6.00	0.20	0.00
8.20	2.00	0.00	5.90	0.20	0.00	8.40	2.00	0.00	5.80	0.20	0.00
8.60	2.00	0.00	5.70	0.20	0.00	8.80	2.00	0.00	5.60	0.20	0.00
9.00	2.00	0.00	5.50	0.20	0.00	9.20	2.00	0.00	5.40	0.20	0.00
9.40	2.00	0.00	5.30	0.20	0.00	9.60	2.00	0.00	5.20	0.20	0.00
9.80	2.00	0.00	5.10	0.20	0.00	10.00	2.00	0.00	5.00	0.20	0.00
10.20	2.00	0.00	4.90	0.20	0.00	10.40	2.00	0.00	4.80	0.20	0.00
10.60	2.00	0.00	4.70	0.20	0.00	10.80	2.00	0.00	4.60	0.20	0.00
11.00	2.00	0.00	4.50	0.20	0.00	11.20	2.00	0.00	4.40	0.20	0.00
11.40	2.00	0.00	4.30	0.20	0.00	11.60	2.00	0.00	4.20	0.20	0.00
11.80	2.00	0.00	4.10	0.20	0.00	12.00	2.00	0.00	4.00	0.20	0.00
12.20	2.00	0.00	3.90	0.20	0.00	12.40	2.00	0.00	3.80	0.20	0.00
12.60	2.00	0.00	3.70	0.20	0.00	12.80	2.00	0.00	3.60	0.20	0.00
13.00	2.00	0.00	3.50	0.20	0.00	13.20	2.00	0.00	3.40	0.20	0.00
13.40	2.00	0.00	3.30	0.20	0.00	13.60	2.00	0.00	3.20	0.20	0.00
13.80	2.00	0.00	3.10	0.20	0.00	14.00	1.53	0.00	3.00	0.20	0.00
14.20	1.54	0.00	2.90	0.20	0.00	14.40	1.52	0.00	2.80	0.20	0.00
14.60	2.00	0.00	2.70	0.20	0.00						

Overall liquefaction potential: 0.29

LPI = 0.00 - Liquefaction risk very low
 LPI between 0.00 and 5.00 - Liquefaction risk low
 LPI between 5.00 and 15.00 - Liquefaction risk high
 LPI > 15.00 - Liquefaction risk very high

Abbreviations

FS: Calculated factor of safety for test point
 F_L: 1 - FS
 w_z: Function value of the extend of soil liquefaction according to depth
 d_z: Layer thickness (m)
 LPI: Liquefaction potential index value for test point

:: Post-earthquake settlement of dry sands ::

Depth (m)	Ic	Kc	Qc1n	Qc1n,cs	N1,60 (blows)	Vs (m/s)	Gmax (kPa)	CSR	Shear, γ (%)	Svol,15 (%)	Nc	ev (%)	Settle. (cm)
0.20	3.42	12.69	19.81	251.31	0	0.0	0	0.09	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000
0.40	2.70	4.00	58.95	235.58	0	0.0	0	0.09	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000
0.60	2.24	1.77	149.09	263.82	60	245.1	124410	0.09	0.001	0.00	5.21	0.00	0.000
0.80	2.29	1.92	86.25	165.46	39	192.5	72327	0.09	0.002	0.00	5.21	0.00	0.000
Total estimated settlement: 0.00													

:: Post-earthquake settlement due to soil liquefaction ::

Depth (m)	Q _{m,cs}	FS	e _v (%)	DF	Settlement (cm)	Depth (m)	Q _{m,cs}	FS	e _v (%)	DF	Settlement (cm)
1.00	269.31	2.00	0.00	1.00	0.00	1.20	296.69	2.00	0.00	1.00	0.00
1.40	240.77	2.00	0.00	1.00	0.00	1.60	138.71	2.00	0.00	1.00	0.00
1.80	170.70	2.00	0.00	1.00	0.00	2.00	169.62	2.00	0.00	1.00	0.00
2.20	122.28	2.00	0.00	1.00	0.00	2.40	101.25	2.00	0.00	1.00	0.00
2.60	120.17	2.00	0.00	1.00	0.00	2.80	98.16	2.00	0.00	1.00	0.00
3.00	95.88	2.00	0.00	1.00	0.00	3.20	95.16	2.00	0.00	1.00	0.00
3.40	94.00	2.00	0.00	1.00	0.00	3.60	104.46	2.00	0.00	1.00	0.00
3.80	111.86	2.00	0.00	1.00	0.00	4.00	210.18	2.00	0.00	1.00	0.00
4.20	109.79	2.00	0.00	1.00	0.00	4.40	108.84	2.00	0.00	1.00	0.00
4.60	121.07	1.56	0.00	1.00	0.00	4.80	200.37	2.00	0.00	1.00	0.00
5.00	128.12	1.73	0.00	1.00	0.00	5.20	80.56	0.80	2.79	1.00	0.56
5.40	206.72	2.00	0.00	1.00	0.00	5.60	75.17	2.00	0.00	1.00	0.00
5.80	81.14	2.00	0.00	1.00	0.00	6.00	143.70	2.00	0.00	1.00	0.00
6.20	86.50	2.00	0.00	1.00	0.00	6.40	91.00	2.00	0.00	1.00	0.00
6.60	86.52	2.00	0.00	1.00	0.00	6.80	95.71	2.00	0.00	1.00	0.00
7.00	79.48	2.00	0.00	1.00	0.00	7.20	94.23	2.00	0.00	1.00	0.00
7.40	88.40	2.00	0.00	1.00	0.00	7.60	92.67	2.00	0.00	1.00	0.00
7.80	86.69	2.00	0.00	1.00	0.00	8.00	95.97	2.00	0.00	1.00	0.00
8.20	85.84	2.00	0.00	1.00	0.00	8.40	94.58	2.00	0.00	1.00	0.00
8.60	89.36	2.00	0.00	1.00	0.00	8.80	79.80	2.00	0.00	1.00	0.00
9.00	79.10	2.00	0.00	1.00	0.00	9.20	95.53	2.00	0.00	1.00	0.00
9.40	86.93	2.00	0.00	1.00	0.00	9.60	93.92	2.00	0.00	1.00	0.00
9.80	81.24	2.00	0.00	1.00	0.00	10.00	89.48	2.00	0.00	1.00	0.00
10.20	84.36	2.00	0.00	1.00	0.00	10.40	83.79	2.00	0.00	1.00	0.00
10.60	90.26	2.00	0.00	1.00	0.00	10.80	83.00	2.00	0.00	1.00	0.00
11.00	86.65	2.00	0.00	1.00	0.00	11.20	68.64	2.00	0.00	1.00	0.00
11.40	71.78	2.00	0.00	1.00	0.00	11.60	75.56	2.00	0.00	1.00	0.00
11.80	80.58	2.00	0.00	1.00	0.00	12.00	71.31	2.00	0.00	1.00	0.00
12.20	71.88	2.00	0.00	1.00	0.00	12.40	74.99	2.00	0.00	1.00	0.00
12.60	82.75	2.00	0.00	1.00	0.00	12.80	74.69	2.00	0.00	1.00	0.00
13.00	74.30	2.00	0.00	1.00	0.00	13.20	69.96	2.00	0.00	1.00	0.00
13.40	73.33	2.00	0.00	1.00	0.00	13.60	83.40	2.00	0.00	1.00	0.00
13.80	74.97	2.00	0.00	1.00	0.00	14.00	57.40	1.53	0.09	1.00	0.02
14.20	57.24	1.54	0.09	1.00	0.02	14.40	66.97	1.52	0.09	1.00	0.02
14.60	75.48	2.00	0.00	1.00	0.00						

:: Post-earthquake settlement due to soil liquefaction :: (continued)

Depth (m)	Q _{m,cs}	FS	e _v (%)	DF	Settlement (cm)	Depth (m)	Q _{m,cs}	FS	e _v (%)	DF	Settlement (cm)
Total estimated settlement: 0.61											

Abbreviations

- Q_{m,cs}: Equivalent clean sand normalized cone resistance
- FS: Factor of safety against liquefaction
- e_v (%): Post-liquefaction volumetric strain
- DF: e_v depth weighting factor
- Settlement: Calculated settlement