

STUDIO GEOLOGICO – TECNICO
Dott. Geol. Andrea Diegoli

PROVINCIA DI FERRARA

COMUNE DI CENTO

Località: Cento

VARIAZIONE ZONA OMOGENEA
“PIANO DELLA RICOSTRUZIONE – COMUNE DI CENTO”

RELAZIONE GEOLOGICA **E CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO**

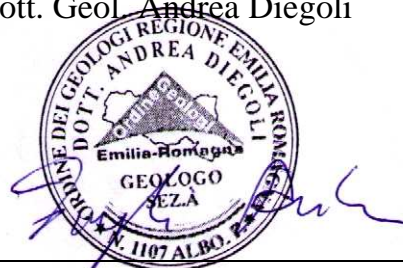
- *CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA, GEOLOGICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE.*
- *STIMA DELLA PERICOLOSITA' SISMICA DEL SITO AI SENSI DEL D.M. 14.01.2008*

COMMITTENTE: SIG. MANDERIOLI ALBERTO
SIG.RA ROSSI MARIA GIULIANA

CANTIERE: Via Marconi, 12-12/A-12/B
CENTO (FE)

Cento, 14 Gennaio 2015

Dott. Geol. Andrea Diegoli



INDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PREMESSA..... | 3 |
| 2 | INQUADRAMENTO GEOGRAFICO | 4 |
| 3 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO-IDROGEOLOGICO..... | 5 |
| 3.1 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE..... | 5 |
| 3.2 | INQUADRAMENTO LITO-STRATIGRAFICO | 9 |
| 3.2.1 | INQUADRAMENTO STRATIGRAFICO | 9 |
| 3.2.2 | CARATTERISTICHE LITOLOGICHE DEI DEPOSITI SUPERFICIALI..... | 12 |
| 3.3 | INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO | 13 |
| 3.4 | TOPOGRAFIA DEL TERRITORIO | 14 |
| 3.5 | ASSETTO IDROSTRATIGRAFICO..... | 16 |
| 4 | INDAGINE ESEGUITE IN SITO | 19 |
| 4.1 | PROVA PENETROMETRICA STATICA (CPT)..... | 19 |
| 4.1.1 | MODALITA' DI ESECUZIONE DELLA CPT..... | 19 |
| 4.1.2 | PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA..... | 21 |
| 4.2 | INDAGINE SISMICA (MASW)..... | 23 |
| 4.2.1 | RISULTATI DELLA PROVA MASW | 24 |
| 5 | CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI..... | 25 |
| 5.1 | PREMESSA..... | 25 |
| 5.2 | SISMICITA' DEL TERRITORIO | 25 |
| 5.3 | CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SOTTOSUOLO | 28 |
| 5.4 | VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA DI PROGETTO | 29 |
| 5.5 | ANALISI DELLA SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE..... | 36 |
| 6 | MODELLO GEOLOGICO ED ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO | 39 |
| 7 | CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE..... | 40 |

ELENCO ALLEGATI

| | |
|-------------------|--|
| Tav.1 | STRALCIO CATASTALE ED UBICAZIONE DELLE INDAGINI ESEGUITE |
| Allegato 1 | Tavole dati CPT 1 |
| Allegato 2 | Rapporto tecnico: indagine geofisica con la metodologia MASW e REMI, redatto da Studio Bozzolan di Ariano nel Polesine (RO) |

1 PREMESSA

Su incarico ricevuto dal Sig. Manderioli Alberto, é stata eseguita una campagna di indagine geognostica, ai sensi del D.M. 14/01/2008 (N.T.C.) e del “Decreto Legge 6 giugno 2012 - n. 74”, al fine di determinare le caratteristiche geologiche - geotecniche e sismiche dei terreni interessati da una variazione di zona omogenea inserito nel “Piano della ricostruzione – Comune di Cento”, ed ubicati nel Comune di Cento (FE) in via Marconi, n.c. 12, 12/a e 12/b.

A tal scopo si è proceduto all’esecuzione di:

- n. 1 prova penetrometrica statica spinta alla profondità di -20,00 metri da piano campagna;
- un’indagine sismica tramite tecnica MASW (attiva e passiva).

Lo studio prevede la creazione di un modello geologico del terreno sede dell’opera e la classificazione del sito per la progettazione sismica come prescritto dal D.M. 14 Gennaio 2008.

Tale studio fa riferimento alla seguente normativa vigente:

- **EUROCODICE 7.1 (1997)**
- **EUROCODICE 8 (1998)**
- **L.R. 20/2000, art. 16, c.1** “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”
- **EUROCODICE 7.2 (2002)**
- **EUROCODICE 7.3 (2002)**
- **O.P.C.M. 3274 del 23.03.03**
- **LINEE GUIDA AGI (2005)**
- **Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3316** “Modifiche ed integrazioni all’ordinanza n. 3274 del 20/3/03”
- **Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Servizio Sismico Nazionale.** “Nota esplicativa dell’Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20/3/03. Data: 4 giugno 2003”
- **Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3431 del 3/5/05**
- **C.S.L.P.** “Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n. 36 del 27.07.2007”
- **ATTO DI INDIRIZZO REGIONALE n. 112/2007**
- **D.M. 14.01.2008** “Testo Unitario – Norme Tecniche per le Costruzioni”
- **C.S.L.P.** “Istruzioni per l’applicazione delle “Norme tecniche per le Costruzioni” di cui al D.M. 14 Gennaio 2008. Circolare 2 Febbraio 2009”
- **Ordinanza del Commissario Delegato per la ricostruzione n. 70 del 13/11/2012**

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO-IDROGEOLOGICO

Nel seguente capitolo viene fornito un inquadramento geologico, litostratigrafico, geomorfologico ed idrogeologico dell'area in esame.

3.1 *INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE*

La Pianura Padana è un ampio bacino sedimentario la cui genesi ha avuto inizio nel Terziario (65 milioni di anni fa) e rappresenta un'avanfossa per entrambe le catene montuose dalle quali essa è delimitata: le Alpi Meridionali a Nord ed il margine settentrionale degli Appennini a Sud. La sua evoluzione strutturale è connessa con la dinamica degli eventi che hanno interessato la placca litosferica Africana ed Eurasiatica, che hanno prodotto una tettonica compressiva con accorciamento crostale per convergenza e collisione.

L'evoluzione geologica della Pianura Padana ha lasciato le sue tracce nella struttura tettonica ancor oggi riconoscibile in profondità, sotto la coltre dei sedimenti alluvionali. In particolare si possono distinguere:

- gruppi di pieghe ad andamento NW-SE, interessati da frequenti ondulazioni assiali asimmetriche, con vergenza verso N e con un'immersione generale verso SE;
- un fitto sistema di faglie con direzione NNW-SSE, WNW-ESE e N-S, con la suddivisione dell'area padana in settori dislocati da paleofaglie che hanno determinato situazioni di bacino e di alto locale, caratterizzati da una diversa evoluzione (Figura 3.1).

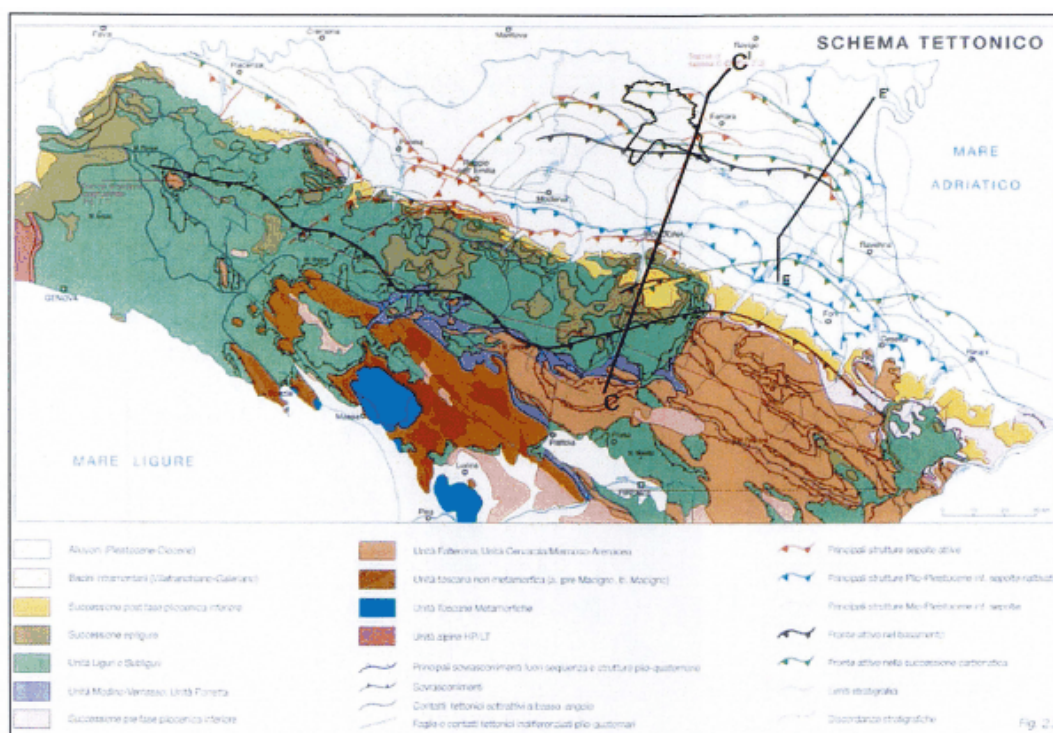


Figura 3.1 – Schema tettonico tratto dalla “Carta Geologico-Strutturale dell’Appennino Emiliano-Romagnolo (Figura 5.1 estratta da “ Contributo natura geologica, geomorfologica ed idrogeologica - Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale - Associazione Intercomunale dell’Alto Ferrarese”)

Si osserva quindi una contrapposizione tra la grande monoclinale pedealpina e le pieghe appenniniche sepolte riconducibili ai tre archi principali: "*Arco del Monferrato*" che si estende da Torino a Tortona, "*Arco delle pieghe emiliane*" che si estende dall'Appennino Vogherese a San Colombano e a Sud sino alla linea del Sillaro e "*Arco delle pieghe ferraresi e romagnole*" ubicate nella parte Nord-Est dell'Appennino emiliano orientale.

"Arco delle pieghe ferraresi e romagnole"

Nell'ambito dell'arco ferrarese-romagnolo si possono distinguere tre gruppi minori di pieghe: ferraresi, romagnole, adriatiche.

Le *pieghe ferraresi* sono le più esterne, con nucleo mesozoico molto sollevato e tettonizzato; ad esse si affianca, nella parte a mare, l'arco delle *pieghe adriatiche* che si accavallano sulla monoclinale adriatica e sono caratterizzate da forte disarmonia tra clastici e carbonati sottostanti. Nella parte interna (a Sud), l'arco delle pieghe ferraresi ed adriatiche è a contatto con le pieghe romagnole che presentano una forte disarmonia strutturale fra le formazioni terziarie piegate e i sottostanti calcari mesozoici relativamente meno tettonizzati.

Tutte le strutture sopraindicate sono delimitate esternamente da fasci di faglie inverse, testimoni di diversi fronti compressivi in avanzamento; al contrario, nelle fasce retrostanti ai fronti compressivi, si rilevano sistemi di faglie dirette ad indicare un carattere distensivo (Figura 3.2). Gran parte delle strutture compressive descritte si sono determinate già prima del Pliocene, come conseguenza di spinte tangenziali, mentre in seguito sono stati prevalenti i movimenti verticali, soprattutto di subsidenza.

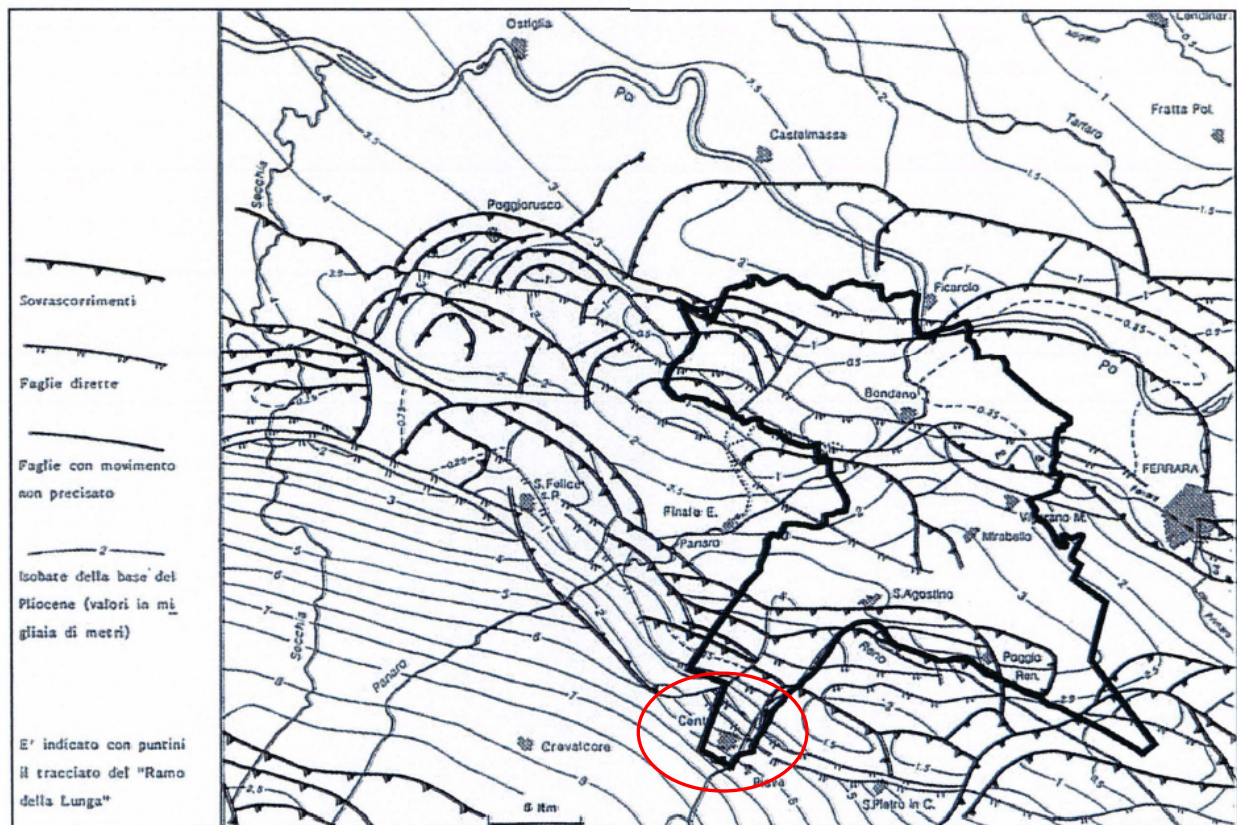


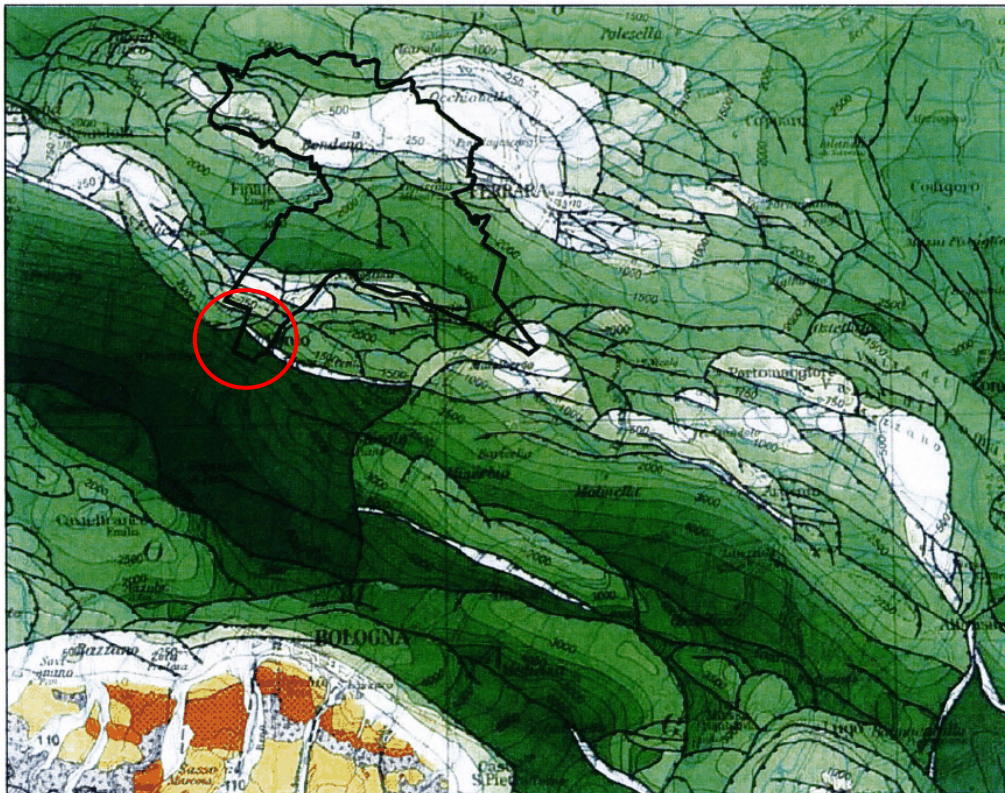
Figura 3.2 – Dettaglio della “Carta Strutturale della base del Pliocene”.

In rosso un'ubicazione di massima del territorio comunale di indagine.

(Figura 5.5 estratta da “Contributo natura geologica, geomorfologica ed idrogeologica - Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale - Associazione Intercomunale dell'Alto Ferrarese”)

"La Dorsale Ferrarese"

L'unità dominante delle pieghe ferraresi (C.N.R., 1986) è senza dubbio la "Dorsale Ferrarese", costituita da pieghe, pieghe-faglie e faglie molto inclinate ad orientamento WNW-ESE, vergenti verso NNE, la quale già nel Pliocene aveva funzione di alto strutturale (Figura 3.3). La Dorsale Ferrarese è localizzata nell'area centro-occidentale della provincia ferrarese tra Ferrara e le Valli di Comacchio; le sue culminazioni principali sono costituite dalle anticlinali di Ficarolo, di Poggio Rusco, di Mirandola e di Novi-Correggio.



*Figura 3.3 – Stralcio della “Carta Strutturale del Nord Italia” - le isobate rappresentano la base del Pliocene (espresse in metri) (Figura 5.6 estratta da “Contributo natura geologica, geomorfologica ed idrogeologica - Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale - Associazione Intercomunale dell'Alto Ferrarese”).
In rosso un'ubicazione di massima del territorio comunale di indagine.*

La peculiarità di questo sistema di pieghe è che costituiscono un alto strutturale del substrato calcareo Mesozoico, con riduzione o assenza dei sovrastanti sedimenti terziari, asportati dall'azione dei processi erosivi legati all'emersione dell'area durante il Pleistocene medio. Ai lati della Dorsale si sono impostate, invece, due zone a forte subsidenza: nella regione del delta a Nord e nel Ravennate a Sud; in particolare, a Sud della Dorsale s'individua il bacino Emiliano-Romagnolo dove la base del Pliocene si approfondisce rapidamente, così come a Nord verso la fossa Padano-Adriatica (Masè, 1983).

La struttura è disposta secondo la direzione WNW-ESE lungo una linea passante fra Bondeno e Poggio Rusco dove la profondità della base del Pliocene varia tra i 400 e i 600 m. Gli assi delle pieghe, facenti parte di questo complesso, hanno andamento circa W-E e si individuano faglie inverse con andamento preferenziale vergente verso Nord e perpendicolare agli assi delle pieghe stesse.

3.2 INQUADRAMENTO LITO-STRATIGRAFICO

3.2.1 INQUADRAMENTO STRATIGRAFICO

La complessa storia geologica della Pianura Padana, affiancata all'azione della rete idrografica, di trasporto e sedimentazione dei materiali provenienti dall'erosione delle terre emerse, hanno portato ad avere spessori di sedimenti che variano da circa 200 m in corrispondenza dell'alto strutturale della Dorsale Ferrarese, a oltre 3000 m nella zona corrispondente al litorale attuale.

Si possono distinguere due unità strutturali principali: *Unità Profonda* antecedente a -3,55 milioni di anni fa e costituita da sedimenti del Messiniano e Pliocene inferiore e *Unità Superiore* posteriore a -3,55 milioni di anni fa e costituita da sedimenti del Pliocene medio-superiore e del Quaternario in concomitanza tra loro.

L'Unità Profonda

I terreni di tale unità sono concordanti tra loro e deformati secondo pieghe e faglie orientate NW-SE. In dettaglio, l'evoluzione sedimentaria si è svolta secondo quanto di seguito riportato (dal più antico, e quindi più profondo, al più recente). I terreni del Cretaceo, per lo più formati da scaglia rossa, sono stati trovati a 697 m di profondità a Casaglia, in corrispondenza della Dorsale Ferrarese. L'Eocene, litologicamente dall'alto verso il basso, è formato da conglomerati ed arenarie, marne arenacee, calcari marnosi bianchi, scaglia cinerea, scaglia rossa. L'Oligocene è costituito da marne arenacee, marne calcaree e calcari marnosi. Il Miocene Inferiore è costituito da marne, marne arenacee ed arenarie; con la fine del Miocene inferiore, durante il Langhiano si registra una pausa nell'apporto di materiale clastico grossolano e prevalente deposizione di marne e argille. Nel Miocene medio, rappresentato litologicamente da marne calcaree ed arenacee, argille marnose e sabbie, il fenomeno subsidente riprende e con lui anche il ripiegamento del fondo della fossa: si vengono così a creare zone di alto strutturale. Fra queste strutture si comincia ad individuare una fascia di pieghe molto rilevate descrivente un arco tra Comacchio e l'Appennino Modenese, la *Dorsale Ferrarese*. Nel Miocene superiore si ha un arresto della subsidenza e si instaura un ambiente lagunare ipersalino con sedimentazione di depositi evaporitici (banchi di marne, arenarie e gessi) rappresentanti facies lagunari e salmastra. Nel periodo di transizione tra Miocene e Pliocene, si ha un'ulteriore fase tettonica con evidenti fenomeni di piegamento e conseguente emersione dal mare di vaste aree del settore sud orientale della pianura.

Nel Pliocene inferiore la subsidenza riprende con deposizione di sedimenti clastici grossolani nelle depressioni e di sedimenti a granulometria minore sulle dorsali sommerse. Le pieghe ferraresi continuano a rimanere emerse. Alla fine del Pliocene inferiore, si verifica una nuova fase di emersione e piegamento, senza segni evidenti di variazione dell'orientamento delle direttrici tettoniche. All'inizio del Pliocene medio le anticlinali emersero dal mare con conseguente erosione del loro apice. Litologicamente, il Pliocene nelle due facies Astiano e Piacenziano è costituito da

argille azzurre molto fini, con porosità bassissima; si notano inoltre minime intercalazioni sabbiose alla base.

L'Unità Superiore

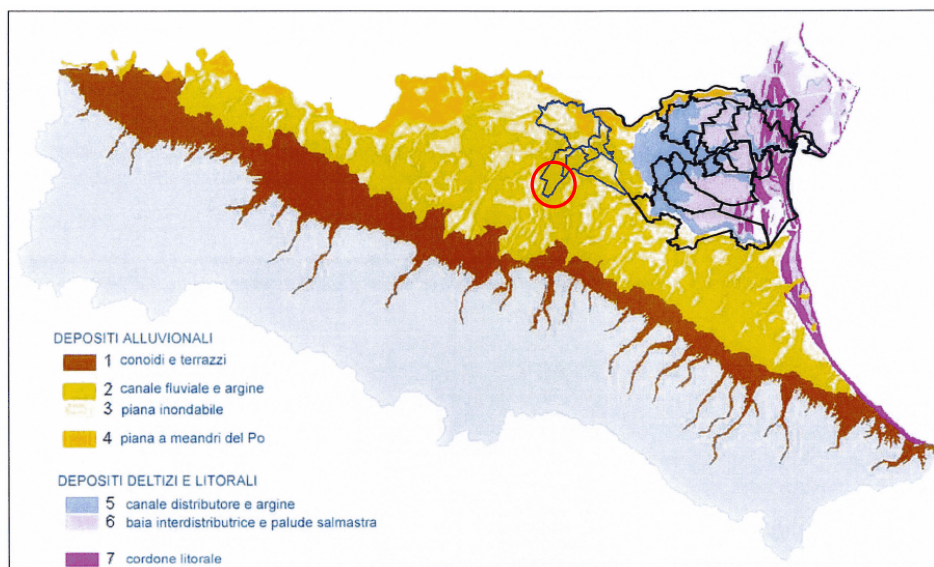
Tale successione poggia in trasgressione e discordanza sul Pliocene inferiore all'apice delle anticlinali, mentre nelle sinclinali è ancora concordante e continua con i sedimenti sottostanti.

Il Pleistocene Inferiore è caratterizzato litologicamente da sabbie argillose e argille sabbiose. Il Pleistocene Superiore presenta depositi con un'alternanza di episodi a facies litorale, lagunare e palustre-continentale. L'Olocene è litologicamente costituito da sabbie a varia granulometria, con argille più o meno sabbiose e localmente lenti di torba. Infine, nel Quaternario recente prevale la sedimentazione in connessione con le variazioni eustatiche del livello marino provocate dalle glaciazioni, cosicché sostanziosi depositi continentali si sovrappongono ai sedimenti marini con completo ricoprimento delle strutture geologiche precedenti.

Successione sedimentaria superficiale

La gran parte dei sedimenti che affiorano sulla superficie della pianura emiliano-romagnola fanno parte della successione post-evaporitica del margine padano-adriatico e derivano dalla complessa relazione fra il fiume Po a Nord, i fiumi appenninici a Sud ed il Mare Adriatico ad Est.

Nelle seguenti immagini si riporta la “Carta della Geologia di Superficie dell'Emilia-Romagna” (Figura 3.4), che descrive la distribuzione e le caratteristiche litologiche e di facies delle unità stratigrafiche contenute nel Supersintema Emiliano-Romagnolo, che rappresenta l'unità stratigrafica comprendente l'insieme dei depositi quaternari di origine continentale che affiorano in corrispondenza del margine appenninico padano (Ricci Lucchi et alii, 1982) ed i sedimenti ad essi correlati nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola.



*Figura 3.4 – Sintesi dei sistemi deposizionali estratta dalla Carta geologica di Pianura (Figura 7.3 estratta da “Contributo natura geologica, geomorfologica ed idrogeologica - Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale - Associazione Intercomunale dell'Alto Ferrarese”).
In rosso un'ubicazione di massima del territorio comunale di indagine.*

Si può affermare che i terreni sabbiosi sono localizzati principalmente in corrispondenza di antichi alvei fluviali o di loro coni di esondazione, i materiali più fini si sono invece depositati principalmente nelle piane alluvionali in seguito a straripamento dei fiumi o rotta degli argini naturali.

Dall'analisi della Carta, si può notare un'area abbastanza ampia che partendo da Cento, prosegue verso Nord per Sant'Agostino, Mirabello, Vigarano Mainarda e da qui ripiega verso Sud (Figura 3.5) caratterizzata dalle alluvioni ascrivibili ai diversi alvei, sia naturali che artificiali percorsi nel tempo dal fiume Reno. Depositi costituiti da alternanze di sabbie fini e finissime, spesso limose, in strati da sottili a spessi, e limi, limi sabbiosi e limi argillosi, in strati da molto sottili a medi. Gli strati sono organizzati in sequenze con gradazione positiva. Localmente sono presenti sabbie medio grossolane alla base delle sequenze positive ed intercalazioni di argilla al tetto. Sono interpretati come depositi di argine e di rotta fluviale e, subordinatamente, di riempimento di canale. Sono stati cartografati solo in superficie dove formano dei corpi rilevati a geometria nastriforme, di larghezza variabile da poche centinaia di metri a 5 km e possono essere formati da un singolo sistema fluviale o da più sistemi coalescenti. Sulla loro superficie sono spesso visibili le tracce dei canali abbandonati e dei ventagli di rotta. Lo spessore massimo è intorno a 7/8 m. Passano lateralmente a depositi di piana inondabile con contatti graduali.

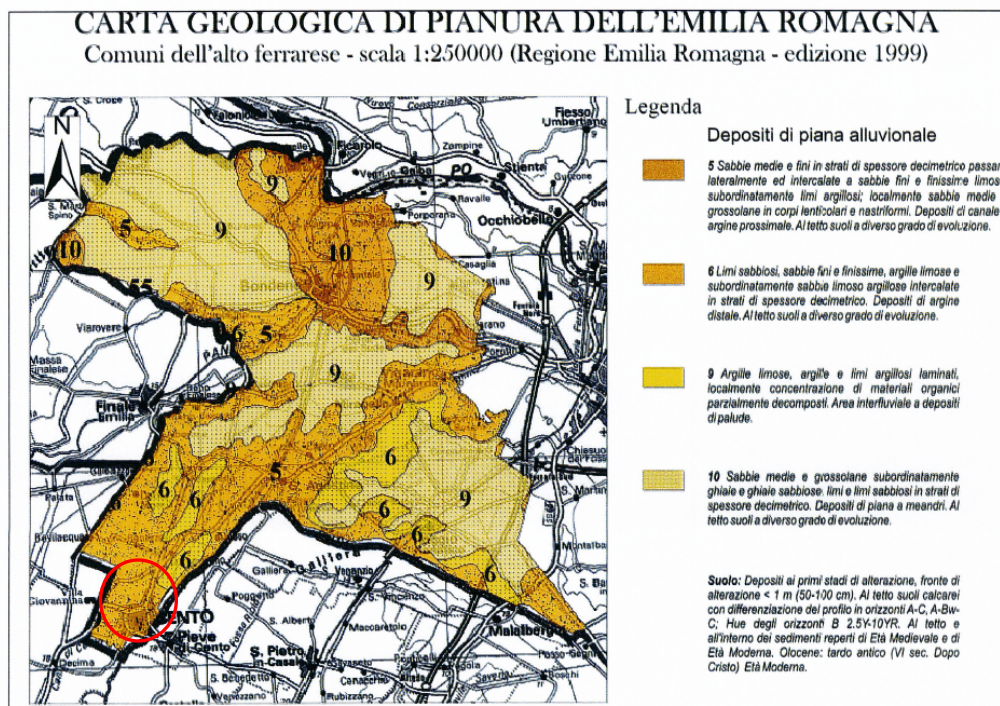


Fig. 7.5: La Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna nasce dall'analisi fotointerpretativa di dettaglio di riprese aeree (voli G.A.I. 1950/1955 e volo R.E.R. 1988), dall'analisi di immagini telerilevate (LANDSAT TM 3-5-6), dall'analisi di cartografie storiche e dalla bibliografia di settore, nonché dall'analisi dell'altimetria di pianura; la taratura delle suddette analisi è stata condotta grazie ai dati provenienti da 3500 sondaggi e trivellate. L'intero set di dati oltre a consentire la caratterizzazione litologica superficiale (sino alla profondità di 1,5 - 2 metri dal piano campagna), ha permesso, attraverso l'analisi dei fenomeni deposizionali ed il riconoscimento delle facies, la suddivisione in ambienti deposizionali. Grazie al rilevamento pedologico ed all'analisi del grado di alterazione dei suoli, è inoltre stato possibile classificare i depositi in unità pedostratigrafiche e, con il supporto delle analisi geomorfologiche e dei reperti archeologici, è stato infine possibile assegnare loro un'età.

*Figura 3.5 – Figura 7.5 estratta da “Contributo natura geologica, geomorfologica ed idrogeologica - Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale - Associazione Intercomunale dell'Alto Ferrarese”.
In rosso un'ubicazione di massima del territorio comunale di indagine.*

3.2.2 CARATTERISTICHE LITOLOGICHE DEI DEPOSITI SUPERFICIALI

La distribuzione dei vari tipi litologici è chiaramente legata al reticolo idrografico dei rami del Po e del Reno, che anticamente divagavano in questo settore della pianura. In corrispondenza dei paleoalvei sono presenti sedimenti sabbiosi (principalmente sabbie limose e sabbie argillose), alternati a terreni equilibrati (miscele ternarie argilla-limo-sabbia).

In particolare, nella zona di Cento, la litologia prevalente è data da miscele ternarie di argilla-limo-sabbia prevalgono nella parte meridionale e del territorio e si alternano a sedimenti argilloso-limosi in quella centrale; questi ultimi prevalgono invece lungo tutto il margine Nord occidentale e nella zona settentrionale del territorio comunale; corpi allungati sabbioso- argillosi si rinvengono in prossimità degli abitati di Casumaro, Corpo Reno, Renazzo e lungo la direttrice Alberane-Pilastrello, a testimoniare l'esistenza di antichi alvei fluviali.

Di seguito uno stralcio della “Carta della litologia di superficie” (Figura 3.6) (intervallo di profondità che va da circa 10 cm fino a 80 cm di profondità da p.c.).

Relativamente all’area in esame, come risulta dallo stralcio di Carta B2.2 “Carta delle litologie di superficie” del PSC dell’Alto Ferrarese, la litologia dominante è rappresentata da argilla limosa.

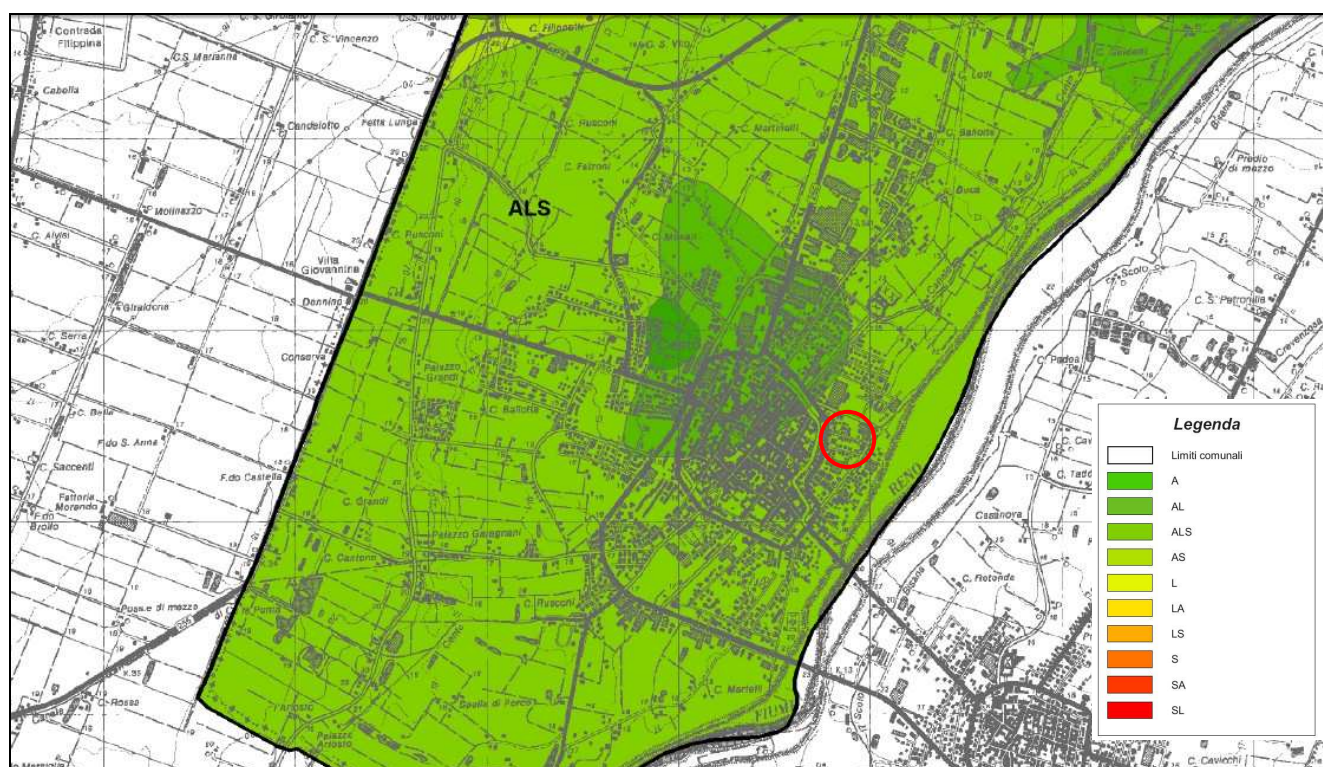


Figura 3.6 - Stralcio Tavola B2.2 “Carta delle litologie di superficie”. In rosso è evidenziata l’area di indagine (Associazione Intercomunale dell’Alto Ferrarese - Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale - Contributo natura geologica, geomorfologica ed idrogeologica)

3.3 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

In pianura le caratteristiche morfologiche principali sono senza dubbio legate all'evoluzione del sistema idrografico, che a sua volta viene condizionato dai caratteri climatici e dalle strutture geologiche del sottosuolo. In particolare, per quanto riguarda la Pianura Padana si può dire che la sua genesi non è stata un fenomeno regolare in quanto si sono alternati nel tempo numerosi episodi di sommersione ed emersione provocati dalle fluttuazioni eustatiche del livello del mare, connesse alle variazioni climatiche. Ad ogni glaciazione, infatti, il livello del mare si abbassava (regressione) ed emergevano vaste pianure costiere destinate a venire nuovamente sommerse durante le fasi interglaciali, quando il livello del mare tornava ad alzarsi (trasgressione) e le grandi quantità di sedimenti trasportati dai fiumi colmavano le fasce marine litoranee, determinando un progressivo avanzamento della linea di costa (Ferrari, 1996). L'evoluzione della rete idrografica padana è ovviamente collegata alle suddette variazioni climatiche in quanto dal clima dipendono i processi geomorfologici di erosione, trasporto e sedimentazione dei fiumi.

L'ultima glaciazione wurmiana ha praticamente cancellato tutte le tracce morfologiche o idrografiche preesistenti, rimodellando completamente la superficie della pianura. Possiamo dunque porre come data di nascita della configurazione attuale della Pianura Padana l'ultimo periodo postglaciale, durante il quale i corsi d'acqua, originati dallo scioglimento dei ghiacciai, scendevano verso valle con forte capacità erosiva e sedimentavano imponenti quantità di materiali.

Lo studio e l'interpretazione della "Carta geomorfologica" (in Figura 3.7 si riporta uno stralcio relativamente al territorio comunale in esame) risultano piuttosto complessi in quanto essa è costituita da un intreccio fitto di tracce di paleoalvei che si sono intersecati e sovrapposti nel tempo. Da una prima osservazione emerge che il territorio risulta dominato da un lato da fasce di terreno particolarmente elevate (12/14 m s.l.m. per i paleo alvei dossivi del PaleoPo e del PaleoReno; 9/11 ms.l.m per i paleoalvei dossivi di corsi d'acqua secondari) ben riconoscibili in corrispondenza dei corsi fluviali attuali ed estinti, e dall'altro da varie zone depresse e bacini interfluviali (3/6 ms.l.m.). In particolare, la zona dell'Alto Ferrarese è attraversata da Sud fino alla zona centrale da una complessa rete di dossi, spesso molto pronunciati, legati in prevalenza alle continue diversioni dell'alveo del Reno succedutesi nei secoli, ed intervallati da aree di depressione relativa; mentre, la parte Nord ed Est è caratterizzata da zone di altitudine media con una depressione pronunciata (fino a 3 m s.l.m nella Diamantina).

Si può inoltre notare come tutta la rete fluviale attuale ed antica e specie gli elementi morfologici dossivi hanno un andamento sinuoso ed un orientamento generale WNW-ESE, cioè subparallelo alle strutture tettoniche profonde della Dorsale Ferrarese, soprattutto nella parte più occidentale,

mentre nella parte centro-orientale hanno una direzione prevalentemente N-S, a testimonianza del condizionamento della tettonica profonda sull'evoluzione dei corsi d'acqua.

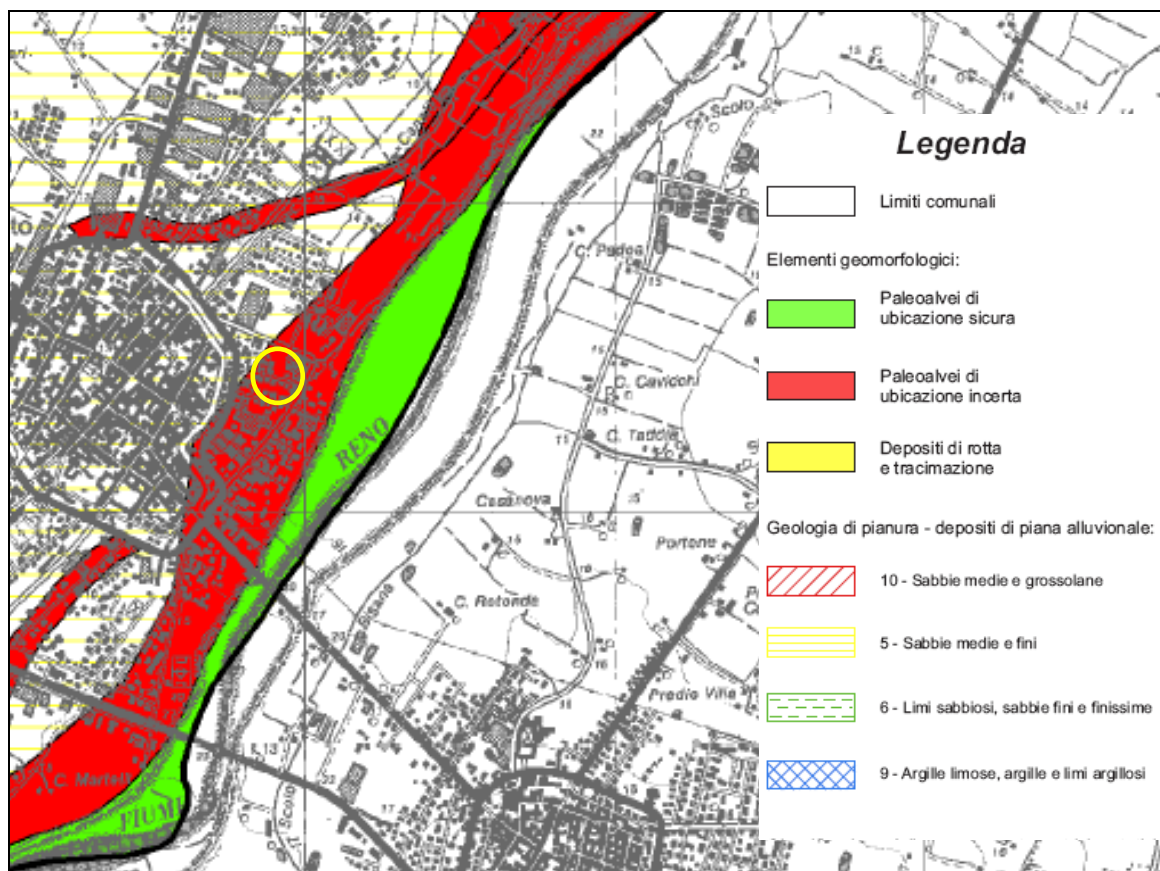


Figura 3.7 - Stralcio Tavola B2.1 "Carta geomorfologica". In giallo è evidenziata l'area di indagine (Associazione Intercomunale dell'Alto Ferrarese - Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale - Contributo natura geologica, geomorfologica ed idrogeologica)

3.4 TOPOGRAFIA DEL TERRITORIO

La carta altimetrica costituisce uno strumento fondamentale per la pianificazione territoriale, la difesa del suolo e la gestione idraulica. Il Modello altimetrico della Provincia di Ferrara (DTM, Digital Terrain Model) è stato ricostruito grazie ai punti quotati della Carta Tecnica Regionale a scala 1:5.000 e sintetizza, mediante isoipse di equidistanza 1 metro, il quadro derivante dall'analisi delle quote puntuali. Per il territorio in oggetto le informazioni altimetriche disponibili sono sostanzialmente di due tipi:

- 1) Punti appartenenti a linee/reti di livellazione geometrica tecnica, di precisione e di alta precisione con un errore medio di 1mm/km; i caposaldi di livellazione appartengono a:
 - linee di livellazione di precisione dell'IGM;
 - linee di livellazione di alta precisione dell'ARPA Emilia-Romagna;
 - linee di livellazione di precisione di altri Enti (Consorzio di Bonifica, AGIP, reti locali comunali e provinciali, ...);

2) Punti quotati riportati sulla Carta Tecnica Regionale, CTR in scala 1:5.000, realizzata tramite volo aerofotogrammetrico negli anni 1977/1979 con quota di volo di circa 2.000 metri, con inquadramento altimetrico derivato dai caposaldi delle linee di livellazione dell'IGMI. Nelle aree di pianura le informazioni altimetriche sono riportate tramite punti quotati isolati, con una tolleranza altimetrica di ± 1.20 m ed in numero medio di 15 punti ogni 25 ettari.

Da un primo esame della carta altimetrica (Figura 3.8), è inoltre possibile localizzare con una certa facilità gli antichi corsi d'acqua dei principali fiumi che hanno solcato queste terre, ora espressi come paleoalvei dossivi; in particolare è evidente il corso del paleo alveo del Reno (colorazione arancio-rosso).

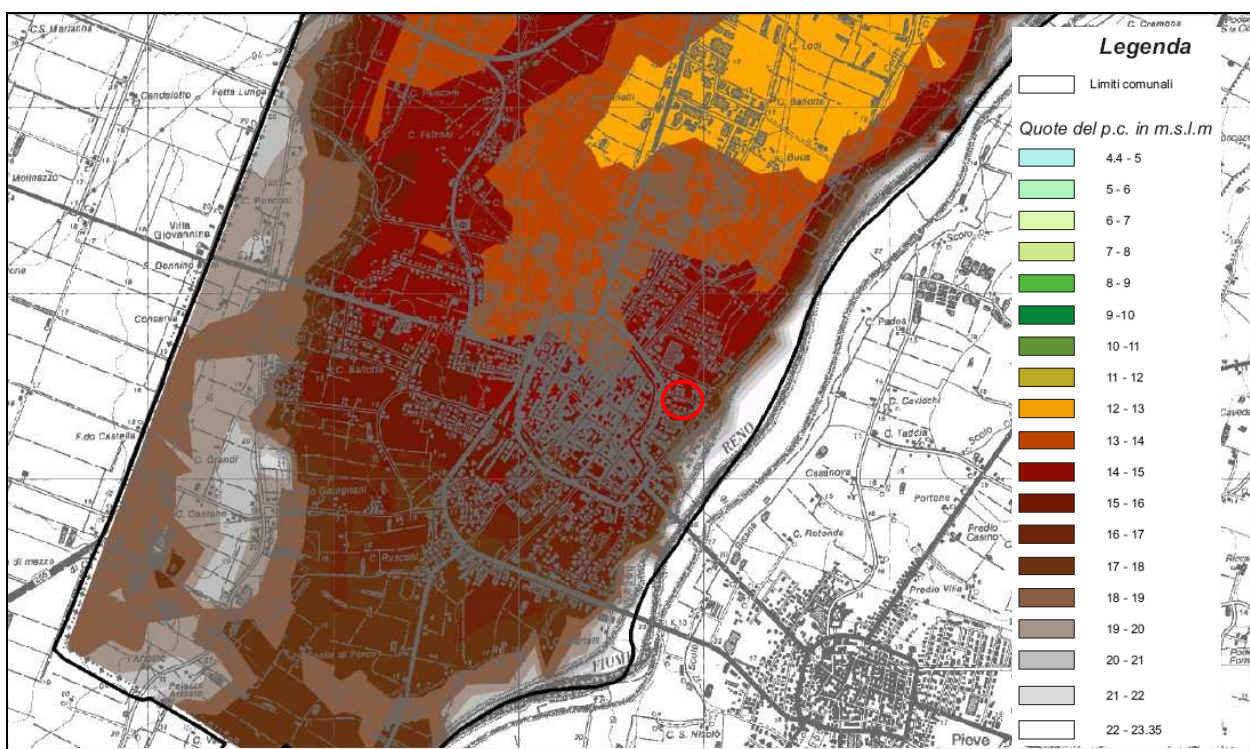


Figura 3.8 - Stralcio Tavola B2.3 "Carta altimetrica". In rosso è evidenziata l'area di indagine (Associazione Intercomunale dell'Alto Ferrarese - Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale - Contributo natura geologica, geomorfologica ed idrogeologica)

3.5 ASSETTO IDROSTRATIGRAFICO

I dati stratigrafici di seguito riportati sono principalmente ricavati dai dati bibliografici ed in particolare da “Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna” realizzate dall’Ufficio Geologico della Regione Emilia Romagna e da ENI – AGIP, 1998.

Relativamente all'acquifero emiliano-romagnolo, si riconoscono tre gruppi acquiferi (denominati dall'alto al basso A, B e C), separati fra loro da barriere di permeabilità di estensione regionale, che isolano perfettamente i diversi sistemi di circolazione e quindi le risorse allocate nei diversi Gruppi Acquiferi, cosicché ciascuno di essi è caratterizzato da un differente stato quali/quantitativo.

Ciascun gruppo acquifero è stato suddiviso a sua volta in tredici unità idrostratigrafiche gerarchicamente inferiori, denominate complessi acquiferi, secondo un modello di suddivisione gerarchico (ENI-AGIP, 1988), basato sul volume complessivo di acquiferi utili in ciascuna unità e su spessore, continuità ed estensione areale del livello acquitardo di ciascuna unità (Figura 3.9).

| UNITÀ IDROSTRATIGRAFICHE | | | | ETÀ (milioni di anni) | SCALA CRONO- STRATIGRAFICA (milioni di anni) |
|--------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|---|
| GRUPPO ACQUIFERO | COMPLESSO ACQUIFERO | SISTEMA ACQUIFERO | SISTEMA ACQUITARDO | | |
| A | A1 | | | - 0.12 | PLEISTOCENE SUPERIORE 0.125 |
| | A2 | | | | |
| | A3 | | | | |
| | A4 | | | | |
| B | B1 | | | - 0.35-0.45 | PLEISTOCENE MEDIO |
| | B2 | | | | |
| | B3 | | | | |
| | B4 | | | | |
| C | C1 | | | - 0.65 | 0.89 |
| | C2 | | | | |
| | C3 | | | | |
| | C4 | | | | |
| | C5 | | | | |
| ACQUITARDO BASALE | | | | - 3.9 | PLEISTOCENE INFERIORE 1.72 PLIOCENE MEDIO-SUPERIORE 3.55 PLIOCENE INF. MIOCENE |

Figura 3.9 – Schema idrostratigrafico (“Riserve Idriche Sotterranee” - Regione Emilia-Romagna e Eni-Agip, 1998)

Dal punto di vista genetico, gli acquiferi individuati sono essenzialmente di due tipi (Fig. 3.10):

- a Sud vi sono le ghiaie che i fiumi appenninici depositano ed hanno depositato appena usciti dalle valli, allo sbocco in pianura, che formano dei grossi corpi ghiaiosi sovrapposti gli uni agli altri per alcune centinaia di metri di spessore (conoidi);
- a Nord vi sono le sabbie che il Po ha sedimentato lungo il suo percorso e nel suo apparato deltizio (pianura alluvionale).

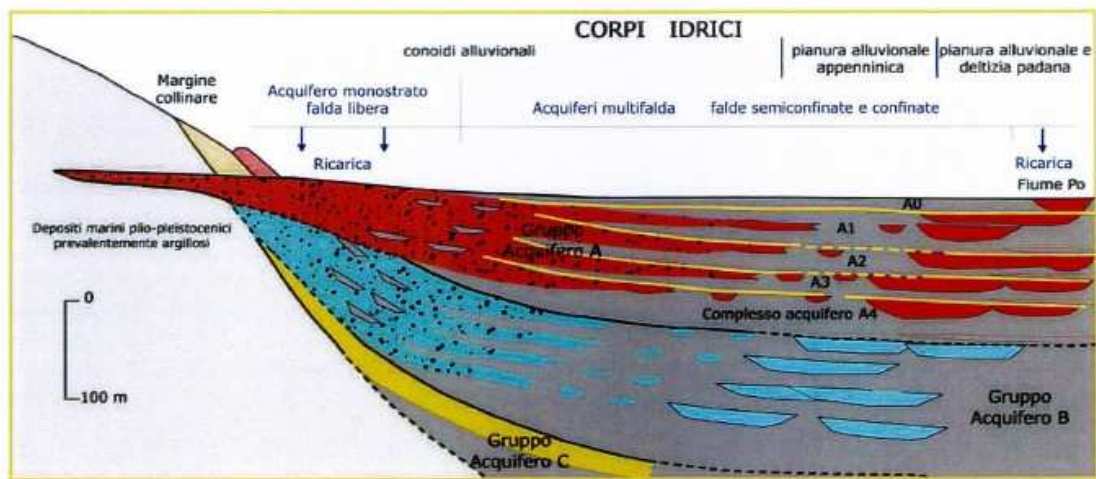


Fig. 3.10 – Distribuzione schematica dei corpi idrici e delle unità idrostratigrafiche nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola ("Riserve Idriche Sotterranee" - Regione Emilia-Romagna e Eni-Agip, 1998)

Gli acquiferi costituiti dalle ghiaie appenniniche si congiungono lateralmente a quelli formati dalle sabbie padane tra Piacenza e Parma, mentre a partire dal reggiano sino al mare vi è un ampio e spesso corpo di depositi della pianura alluvionale formati prevalentemente da limi ed argille che si interpongono tra essi mantenendoli fisicamente separati ed impedendone il contatto idraulico (acquitardi).

La distinzione dei sistemi padani rispetto a quelli appenninici si basa sul fatto che i corpi sabbiosi di origine padana sono molto più abbondanti e più spessi di quelli appenninici ed hanno una maggiore continuità laterale, a scala delle decine di chilometri.

L'area dell'Alto Ferrarese è interessata solo dal secondo tipo di acquifero ed in particolare dal complesso idrogeologico della pianura alluvionale e deltizia padana, costituito quasi esclusivamente da sabbie grossolane e medie (Fig. 3.1).

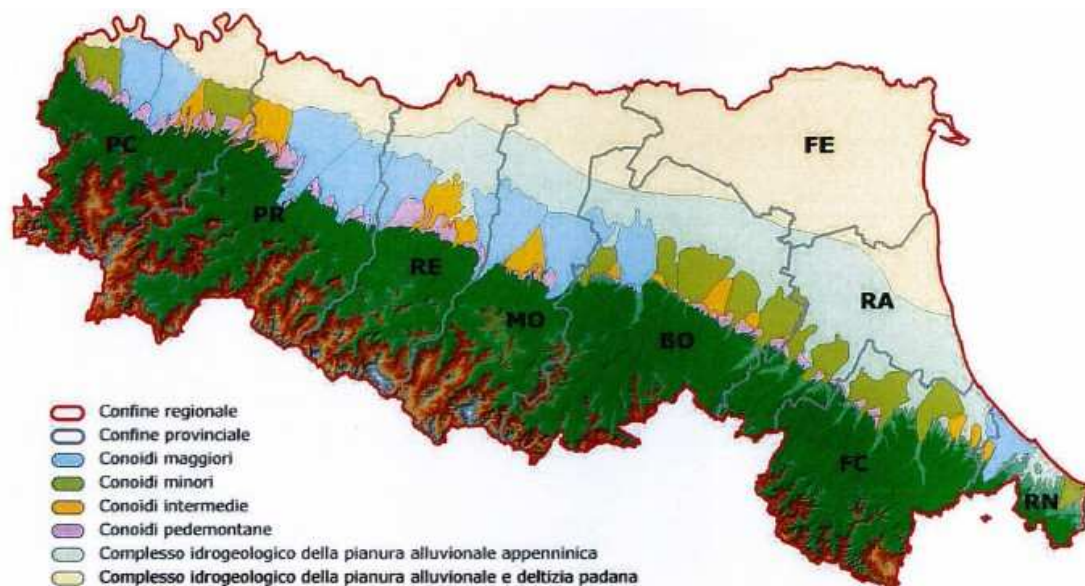


Fig. 3.12 – Distribuzione dei complessi idrogeologici riconosciuti nella pianura emiliano-romagnola ("Riserve Idriche Sotterranee" - Regione Emilia-Romagna e Eni-Agip, 1998)

All'interno di questa unità sono comunque riconoscibili alternanze cicliche lungo la verticale, organizzate al loro interno nel modo seguente:

- la base, spesso mediamente una decina di metri, è per lo più costituita da limi-argillosi;
- la porzione intermedia, di spessore decametrico con continuità laterale di decine di chilometri, è composta da depositi limoso-sabbiosi spesso alternati a depositi sabbiosi;
- la parte sommitale, di spessore decametrico con continuità laterale di decine di chilometri, è caratterizzata dalla presenza di depositi sabbiosi.

Localmente, in particolare nelle zone di alto strutturale interne al bacino, lo spessore di depositi grossolani può arrivare a costituire la quasi totalità dello spessore dell'unità. Nonostante complessivamente vi sia una elevata percentuale di depositi sabbioso-grossolani, la circolazione idrica all'interno di questi depositi è complessivamente ridotta. Gli scambi fiume-falda sono possibili solamente con gli acquiferi meno profondi (A1), mentre nei sottostanti il flusso avviene in modo francamente compartimentato in condizioni confinate. I valori medi di gradiente idraulico sono quindi pari a circa 0.2-0.3 %.

Caratterizzazione dell'acquifero libero

Di seguito viene riportato uno stralcio della Carta B2.13 del PSC dell'Alto Ferrarese, elaborata utilizzando rilevamenti effettuati nell'arco del periodo 1998-2007, con un totale di 139 punti di misura distribuiti sul territorio dell'Alto Ferrarese.

Nell'area di indagine la superficie freatica è posta tra +13,00 m s.l.m. e +13,50 m s.l.m.

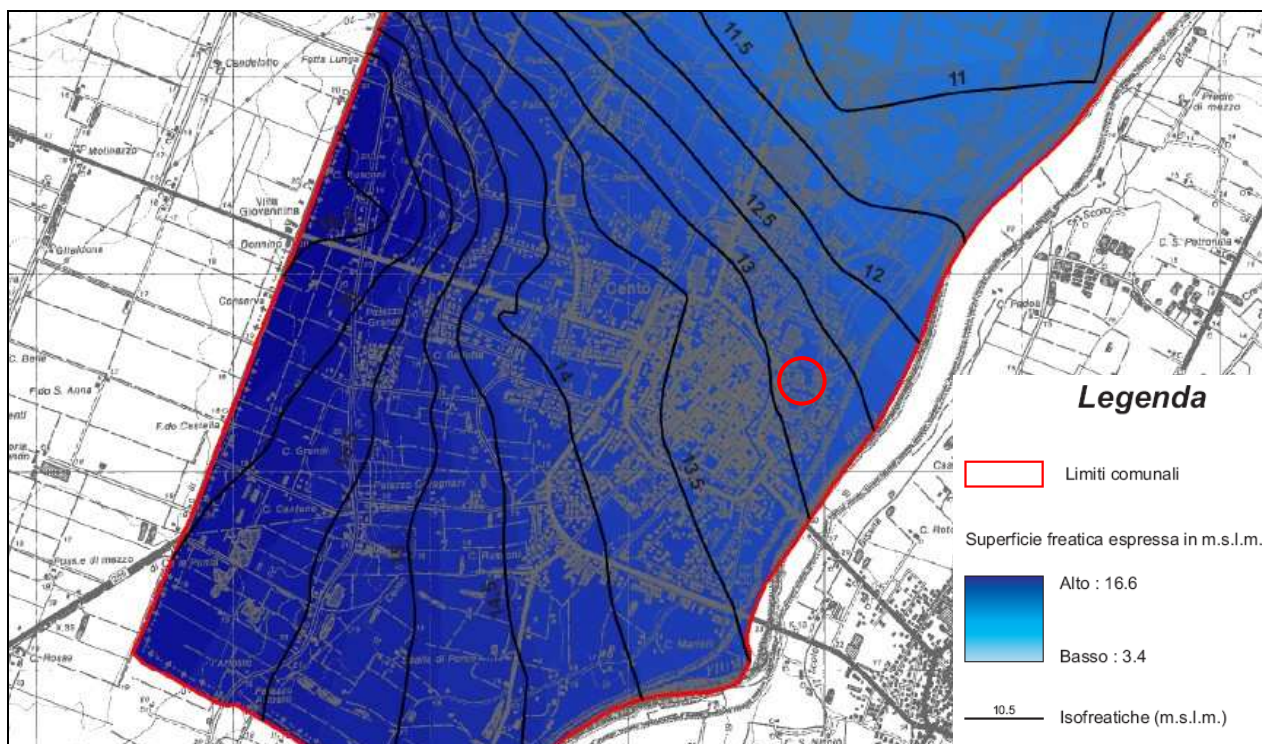


Figura 3.13 – Stralcio Carta B2.13 “Carta delle isofreatiche” del PSC dell’Alto Ferrarese.
In rosso è evidenziata l’area di indagine

4 INDAGINE ESEGUITE IN SITO

Nel seguente capitolo vengono riportate le indagini eseguite nel sito in esame, atte alla caratterizzazione geotecnica e sismica dei terreni di fondazione interessati dall'opera in progetto.

In particolare verranno descritte:

- in **paragrafo 4.1:** le modalità di esecuzione della n° 1 prova penetrometrica statica (CTP) mirata al riconoscimento stratigrafico dei terreni indagati e alla determinazione indiretta dei parametri geotecnici;
- in **paragrafo 4.2:** l'indagine sismica eseguita mediante tecnica MASW per la determinazione del parametro Vs30.

4.1 *PROVA PENETROMETRICA STATICA (CPT)*

Al fine di determinare con adeguato dettaglio le caratteristiche lito-stratigrafiche del sito interessato dal futuro intervento in oggetto, in data 13/01/2015, è stata eseguita n°1 prova penetrometrica statica, spinta alla profondità di -20,00 metri da p.c.

Mediante l'indagine geognostica è stato possibile investigare il volume di terreno, attinente alle condizioni di stabilità dei sistemi geotecnici, che sarà interessato dalla variazione degli stati tensionali. La profondità della prova condotta tiene conto del volume significativo del terreno influenzato dai sistemi fondali previsti in prima analisi per la realizzazione dell'opera.

L'ubicazione della prova eseguita è riportata su stralcio catastale del Comune di Cento (v. Tav. 1).

4.1.1 *MODALITA' DI ESECUZIONE DELLA CPT*

La prova penetrometrica statica CPT (Cone Penetration Test) è stata eseguita mediante penetrometro meccanico da 20 tonnellate di spinta auto-ancorante, con punta standard tipo Begemann in accordo con la procedura di riferimento ISSMFE (codice RM).

Questa prova geognostica consiste nell'infiggere, con velocità costante di 2 cm/sec, a pressione nel terreno una punta meccanica, misurando ogni 20 cm lo sforzo necessario alla penetrazione della stessa e l'adesione acciaio – terreno di un manicotto posto al di sopra della punta.

Le caratteristiche tecniche standardizzate della punta *Begemann* sono le seguenti:

- diametro di base del cono $\phi = 35,7$ mm;
- angolo di apertura del cono (α) = 60°
- superficie laterale del manicotto (A_m) = 150 cm²

- area della punta (A_p) = 10 cm²
- diametro esterno delle aste cave = 36 mm
- costante di trasformazione (C_t) = 10

I vari parametri di prova sono ottenuti mediante le seguenti relazioni:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| • resistenza alla punta | • $R_p = (LP * C_t)/A_p$ |
| • resistenza unitaria di attrito laterale locale | • $R_f = R_l = (LL - LP) * C_t/A_m$ |
| • rapporto della resistenza (Friction Ratio) | • $FR (\%) = R_l/R_p$ |

Dove LP = lettura alla punta e LL = lettura laterale misurate alla stessa profondità.

La prova CPT, in generale, trova applicazione per:

- rilevare l'andamento stratigrafico lungo la verticale indagata;
- individuare i tipi di terreno attraversati;
- interpolare l'andamento degli strati tra verticali di sondaggio.

I parametri determinati dalle prove CPT sono solitamente utilizzati per valutare:

- l'angolo di attrito e la compressibilità drenata dei terreni granulari;
- la resistenza al taglio non drenata dei terreni coesivi.

4.1.2 PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA

Nelle tabelle e nei diagrammi di Allegato 1 sono riportati i parametri geotecnici elaborati dai dati ottenuti dalla prova penetrometrica eseguita in sito.

In particolare, sono riportati i valori di resistenza alla punta R_p e resistenza laterale locale R_f , rilevati ad ogni 20 cm. Questi valori si ottengono moltiplicando la lettura alla punta o laterale per la costante di trasformazione C_t caratteristica del penetrometro utilizzato.

La diretta correlazione tra il rapporto $F = R_p/R_f$ e la granulometria dei terreni attraversati (secondo Begemann, 1965 e secondo Schmertmann; Raccomandazioni A.G.I. 1977), rende possibile caratterizzare la natura dei terreni differenziandoli rispettivamente in torbe e argille organiche, limi e argille, limi sabbiosi e sabbie limose e sabbie e sabbie con ghiaia.

Negli allegati vengono riportati i seguenti parametri:

- valutazione litologica secondo *Schmertmann* ottenuta in base all'analisi dei valori di R_p e del rapporto R_f/R_p %;
- la natura dei terreni classificati come granulari o coesivi, ricavata dal diagramma di *Schmertmann*;
- il peso per unità di volume γ' (t/m^3), ottenuto dalla relazione esistente tra la densità del terreno e la sua resistenza all'infissione della punta;
- la tensione verticale geostatica efficace σ'_{vo} , espressa come

$$\sigma'_{vo} = 1,85 \times Z_1 + 0,20 \times \sum \gamma' i$$

dove Z_1 è uguale alla profondità della falda dal piano campagna (-1,40 m dal p.c.);

- la coesione non drenata C_u (Kg/cm^2) (per i terreni di natura coesiva) ottenuto dal rapporto " $C_u = R_p/a$ " (da *Sanglerat*, 1972) dove "a" è un coefficiente dipendente dalla natura del terreno, e quindi da R_p ;
- l'angolo di attrito interno efficace F (per i terreni di natura granulare), anch'esso correlato alla R_p (*Robertson & Campanella*, 1983);
- il modulo edometrico (M_o), reciproco del coefficiente di compressibilità di volume M_v , definito come:

$$M_v = 1/R_p \times a$$

dove il coefficiente "a" è direttamente dipendente da R_p ;

- l'angolo di attrito interno efficace F (per i terreni di natura granulare), anch'esso correlato alla R_p (*Robertson & Campanella*, 1983).

Di seguito i parametri geotecnici elaborati a seguito della prova penetrometrica eseguita, necessari, in accordo col progettista strutturale, alla definizione degli impianti fondali ed alla loro verifica agli stati limite come previsto dal D.M .14 Gennaio 2008.

Presupponendo di analizzare il terreno in condizioni non drenate sono stati determinati, per ciascun orizzonte stratigrafico, i seguenti parametri geotecnici:

- γ = peso nell'unità di volume
 γ_{sat} = peso nell'unità di volume saturo
 C_u = coesione non drenata media
 C_{uk} = coesione non drenata caratteristica
 M_O = modulo edometrico
 ϕ = angolo di attrito medio
 ϕ_k = angolo di attrito caratteristico
 M_E = modulo elastico

| STRATO IDENTIFICATO | PROFONDITA' STRATO da p.c. [m] | γ [KN/m ³] | γ_{sat} [KN/m ³] | C_u [kPa] | C_{uk} [kPa] | ϕ (°) | ϕ_k (°) | Dr (%) | M_O [kPa] | M_E [kPa] |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|-------------|----------------|------------|--------------|--------|-------------|-------------|
| 1° STRATO | 0,00 – 8,00 | 18,44 | 19,22 | 59,41 | 40,12 | / | / | / | 4634,62 | / |
| 2° STRATO | 8,00 – 17,20 | / | 20,69 | 131,08 | 100,82 | / | / | / | 6119,35 | / |
| 3° STRATO | 17,20 – 20,00 | / | 20,59 | / | / | 33,12 | 31,46 | 45,48 | 6444,93 | 15129,70 |

Tabella 4.1 – Parametri geotecnici elaborati dalla prova CPT

4.2 INDAGINE SISMICA (MASW)

Nel sito oggetto d'indagine è stata eseguita un'indagine sismica con metodologia MASW attiva e passiva per la determinazione del parametro V_{s30} (valutato fino alla profondità di 30 metri da p.c.). Tale indagine permette di determinare in modo dettagliato l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio (o onde S) in funzione della profondità, attraverso lo studio della propagazione delle onde superficiali o di Rayleigh.

Il metodo di indagine si distingue in:

- *Attivo (MASW)*: i geofoni rilevano le onde superficiali prodotte da una sorgente impulsiva (massa battente) disposta a piano campagna e vengono registrate da uno stendimento lineare composto da numerosi ricevitori posti a breve distanza (distanza intergeofonica); le frequenze che interessano l'analisi sono generalmente comprese tra 5 e 70 Hz;
- *Passivo (REMI)*: i geofoni rilevano il rumore naturale (o di fondo); analizza generalmente le frequenze tra 0 e 10 Hz.

L'acquisizione dei dati sismici è stata realizzata con un sismografo a 24 canali mod. DoReMi della Sara Electronics Instruments.

L'acquisizione dei dati sismici è così avvenuta:

- *metodo attivo*: è stata effettuata 1 stesa sismica di 16 geofoni con passo intergeofonico di 3 metri con successiva acquisizione dei vari shot; la frequenza propria dei sensori è di 4,5 Hz;
- *metodo passivo*: sulla stessa stesa utilizzata per il metodo attivo sono state realizzate 3 acquisizioni di sismica passiva, della durata di un minuto ciascuna, concatenate, in fase di pre-processing, in un unico file di 3 minuti, in modo da colmare il “vuoto” alle basse frequenze della sismica attiva.



Figura 4.2 – Dettaglio profilo sismico

4.2.1 RISULTATI DELLA PROVA MASW

Gli elaborati relativi alla prova effettuata, riportati in Allegato 2, sono di seguito riportati.

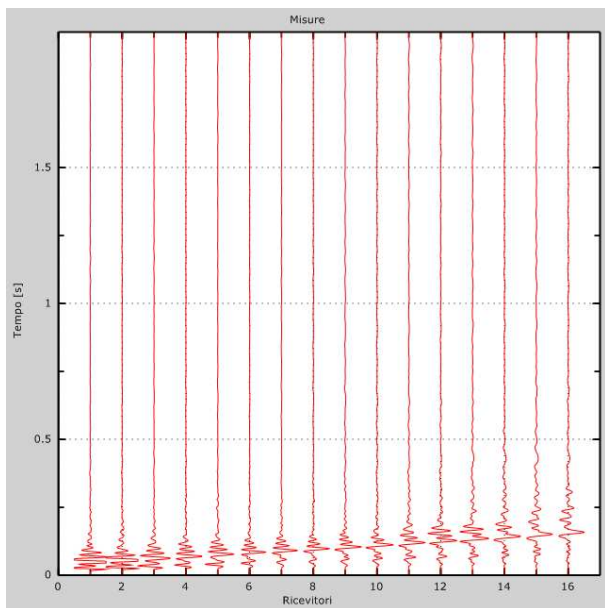


Figura 4.4 – Tracce sperimentali indagine attiva

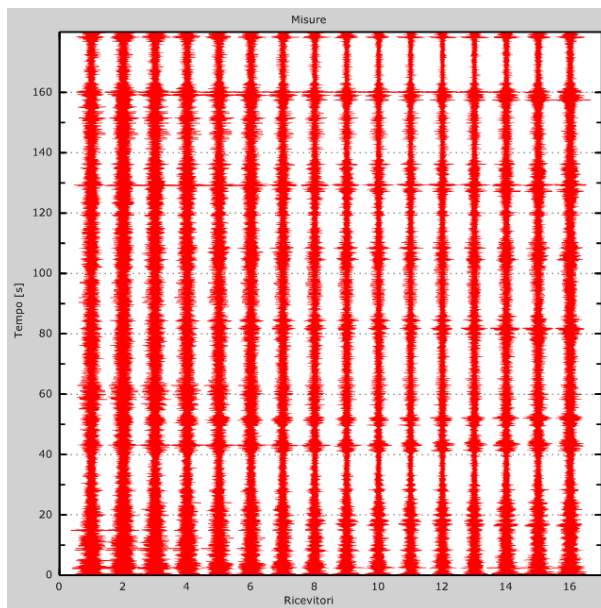


Figura 4.5 – Tracce sperimentali indagine passiva

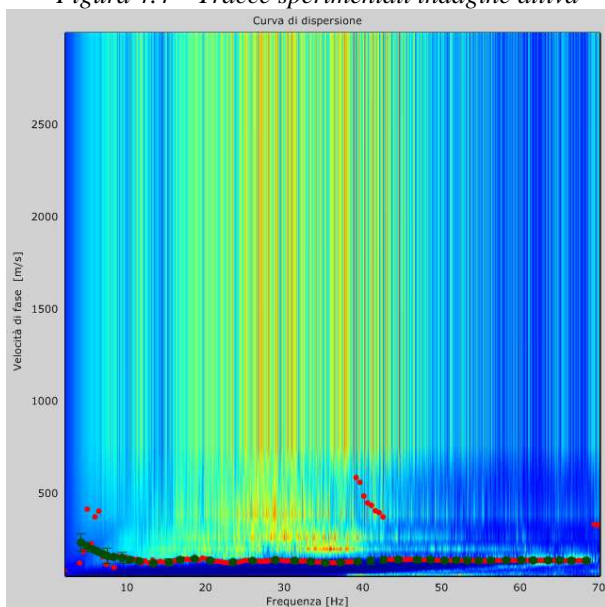


Figura 4.6 – Curva di dispersione sperimentale

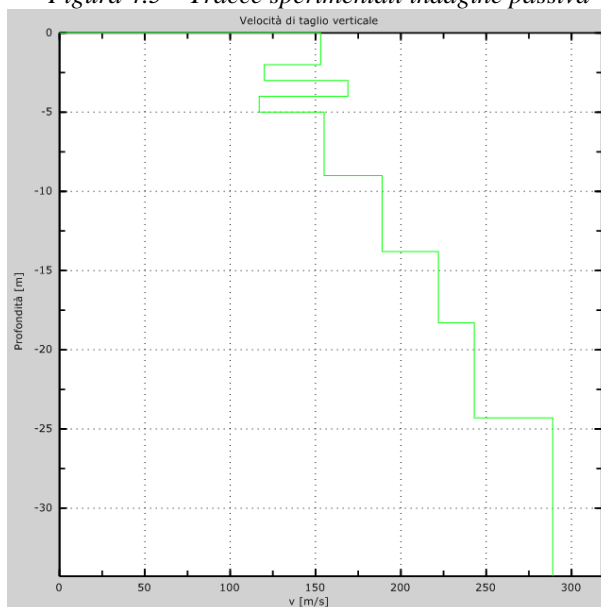


Figura 4.7 – Profilo verticale di velocità delle Vs

Come si legge nel documento riportato in Allegato 2:

“L’indagine sismica, considerando la sismostratigrafia fino alla profondità di -30,00 metri da p.c., ha permesso la determinazione della velocità delle Vs30, ricavata dalla formula riportata nel D.M. del 14 Gennaio 2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni” che risulta essere pari a

$$Vs30 = 197 \text{ m/s}$$

I terreni di fondazione interessati dalla progettazione sismica, come prescritto al paragrafo 3.2.2 dal D.M. 14 Gennaio 2008, appartengono a: suolo di fondazione di tipo C.

5 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI

5.1 *PREMESSA*

Le onde di propagazione di un evento sismico, subiscono riflessioni e rifrazioni a causa delle eterogeneità crostali.

Negli strati più superficiali del terreno, dal punto di vista geotecnico, questo può causare variazioni di carico limite e capacità portante, incrementi delle spinte sulle opere di sostegno o addirittura, nei terreni liquefacibili, fenomeni di instabilità e dissesto.

Le onde meccaniche generate da un sisma, producono effetti diversi a seconda del tipo di terreno in cui esse si propagano.

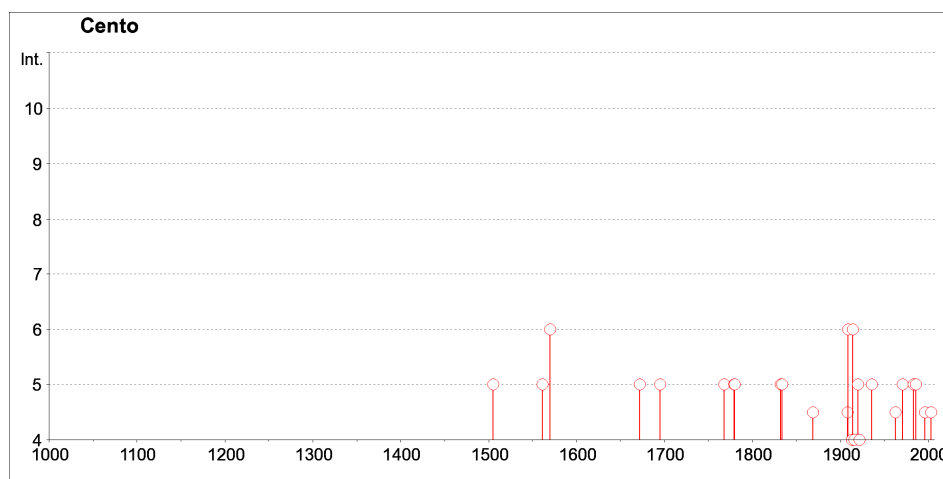
In particolare un terreno può avere un comportamento stabile quando le sollecitazioni del terremoto sono inferiori alla resistenza al taglio del terreno (ghiaie e sabbie addensate e argille compatte), oppure può definirsi instabile quando queste sollecitazioni superano la resistenza al taglio del terreno (argille molli e terreni saturi, con effetti di degradazione connessi alla pressione interstiziale).

L'azione sismica di progetto in base alla quale valutare il rispetto dei diversi *stati limite* presi in considerazione viene definita partendo dalla "pericolosità di base" del sito di costruzione, che è l'elemento essenziale di conoscenza per la determinazione dell'azione sismica.

5.2 *SISMICITA' DEL TERRITORIO*

La storia sismica del territorio del Comune di Cento è dedotta tramite il data-base delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani (DBMI11), realizzato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Nel grafico sottostante sono rappresentati gli eventi sismici con intensità al sito $I_s > IV$ grado della scala MCS.



In tabella 5.1 sono elencati gli eventi di maggiore intensità al sito ($I_s > IV$ grado della scala MCS) con indicazione della data esatta in cui si è verificato tale evento, il luogo in cui si sono riscontrati i maggiori effetti (AE), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (I_o) e la magnitudo momento (M_w).

| Is | Anno Me Gi Or | Area epicentrale (AE) | nMDP | Io | Mw |
|-----------|----------------------|------------------------------|-------------|-----------|------------|
| 5 | 1505 01 03 02:00 | Bolognese | 31 | 8 | 5.57 ±0.25 |
| 5 | 1561 11 24 01:25 | Ferrara | 5 | 5-6 | 4.51 ±0.34 |
| 6 | 1570 11 17 19:10 | Ferrara | 60 | 7-8 | 5.46 ±0.25 |
| NC | 1624 03 19 19:45 | Argenta | 18 | 7-8 | 5.47 ±0.49 |
| 5 | 1672 04 14 15:45 | Riminese | 92 | 8 | 5.61 ±0.21 |
| 5 | 1695 02 25 05:30 | Asolano | 82 | 10 | 6.48 ±0.18 |
| 5 | 1768 10 19 23:00 | Appennino romagnolo | 45 | 9 | 5.87 ±0.21 |
| 3 | 1779 06 01 23:55 | Bolognese | 8 | | |
| 5 | 1779 06 04 07:00 | Bolognese | 13 | 7 | 5.24 ±0.52 |
| 5 | 1779 06 10 08:35 | Bolognese | 10 | | |
| 5 | 1779 07 14 19:30 | Bolognese | 17 | | |
| F | 1779 11 23 18:30 | Bolognese | 14 | 5 | 4.99 ±0.31 |
| 5 | 1780 02 06 04:00 | Bolognese | 9 | 6 | 5.13 ±0.57 |
| 5 | 1832 03 13 03:30 | Reggiano | 98 | 7-8 | 5.53 ±0.18 |
| 5 | 1834 10 04 19:00 | Bolognese | 12 | 6 | 4.85 ±0.43 |
| 4-5 | 1869 06 25 13:58 | Media valle del Reno | 18 | 7-8 | 5.42 ±0.48 |
| 3 | 1870 10 30 18:34 | Romagna | 41 | 8 | 5.58 ±0.27 |
| 3 | 1873 03 12 20:04 | Marche meridionali | 196 | 8 | 5.95 ±0.10 |
| F | 1873 06 29 03:58 | Bellunese | 199 | 9-10 | 6.32 ±0.11 |
| 3 | 1878 03 12 21:36 | Bolognese | 31 | 6 | 5.06 ±0.30 |
| F | 1881 01 24 16:14 | Bolognese | 38 | 7 | 5.16 ±0.30 |
| F | 1881 01 25 07:06 | Bolognese | 18 | | |
| NF | 1898 01 16 12:10:05 | Romagna settentrionale | 73 | 6-7 | 4.79 ±0.33 |
| NF | 1904 11 17 05:02 | Pistoiese | 204 | 7 | 5.15 ±0.14 |
| 4-5 | 1908 06 28 03:19:58 | Finale Emilia | 15 | 5 | 4.27 ±0.53 |
| 6 | 1909 01 13 00:45 | BASSA PADANA | 799 | 6-7 | 5.53 ±0.09 |
| 4 | 1913 11 25 20:55 | Val di Taro | 73 | 4-5 | 4.84 ±0.20 |
| 6 | 1914 10 27 09:22:36 | Garfagnana | 618 | 7 | 5.76 ±0.09 |
| F | 1916 05 17 12:49:50 | Alto Adriatico | 132 | | 5.95 ±0.14 |
| 4 | 1916 08 16 07:06 | Alto Adriatico | 257 | | 6.14 ±0.14 |
| F | 1919 06 29 15:06:12 | Mugello | 566 | 10 | 6.29 ±0.09 |
| 5 | 1920 09 07 05:55:40 | Garfagnana | 756 | 10 | 6.48 ±0.09 |
| 4 | 1922 05 24 21:17:25 | Ferrarese | 7 | 4 | 4.34 ±0.25 |
| NF | 1930 10 30 07:13:13 | SENIGALLIA | 263 | 8 | 5.81 ±0.09 |
| 5 | 1936 10 18 03:10:12 | BOSCO CANSIGLIO | 267 | 9 | 6.12 ±0.09 |
| 3-4 | 1939 10 15 14:05 | Garfagnana | 62 | 6-7 | 5.08 ±0.16 |
| 4-5 | 1963 04 05 13:49:42 | Finale Emilia | 6 | 4-5 | 4.09 ±0.34 |
| 5 | 1971 07 15 01:33:23 | Parmense | 229 | 8 | 5.64 ±0.09 |
| 3-4 | 1980 11 23 18:34:52 | Irpinia-Basilicata | 1394 | 10 | 6.89 ±0.09 |
| 5 | 1983 11 09 16:29:52 | Parmense | 850 | 6-7 | 5.06 ±0.09 |
| 5 | 1986 12 06 17:07:20 | BONDENO | 604 | 6 | 4.61 ±0.10 |
| 3 | 1989 09 13 21:54:01 | PASUBIO | 779 | 6-7 | 4.88 ±0.09 |
| 2-3 | 1992 04 17 11:59:09 | Montevoglio | 56 | 4-5 | 4.32 ±0.18 |
| 4-5 | 1996 10 15 09:56:02 | Correggio | 135 | 7 | 5.41 ±0.09 |
| NF | 2000 06 18 07:42:08 | Parmense | 300 | 5-6 | 4.43 ±0.09 |
| 4-5 | 2003 09 14 21:42:53 | Appennino bolognese | 133 | 6 | 5.29 ±0.09 |
| F | 1873 06 29 03:58 | Bellunese | 199 | 9-10 | 6.32 ±0.11 |
| 3 | 1878 03 12 21:36 | Bolognese | 31 | 6 | 5.06 ±0.30 |
| F | 1881 01 24 16:14 | Bolognese | 38 | 7 | 5.16 ±0.30 |
| F | 1881 01 25 07:06 | Bolognese | 18 | | |
| NF | 1898 01 16 12:10:05 | Romagna settentrionale | 73 | 6-7 | 4.79 ±0.33 |
| NF | 1904 11 17 05:02 | Pistoiese | 204 | 7 | 5.15 ±0.14 |
| 4-5 | 1908 06 28 03:19:58 | Finale Emilia | 15 | 5 | 4.27 ±0.53 |
| 6 | 1909 01 13 00:45 | BASSA PADANA | 799 | 6-7 | 5.53 ±0.09 |
| 4 | 1913 11 25 20:55 | Val di Taro | 73 | 4-5 | 4.84 ±0.20 |
| 6 | 1914 10 27 09:22:36 | Garfagnana | 618 | 7 | 5.76 ±0.09 |
| F | 1916 05 17 12:49:50 | Alto Adriatico | 132 | | 5.95 ±0.14 |
| 4 | 1916 08 16 07:06 | Alto Adriatico | 257 | | 6.14 ±0.14 |
| F | 1919 06 29 15:06:12 | Mugello | 566 | 10 | 6.29 ±0.09 |
| 5 | 1920 09 07 05:55:40 | Garfagnana | 756 | 10 | 6.48 ±0.09 |
| 4 | 1922 05 24 21:17:25 | Ferrarese | 7 | 4 | 4.34 ±0.25 |
| NF | 1930 10 30 07:13:13 | SENIGALLIA | 263 | 8 | 5.81 ±0.09 |
| 5 | 1936 10 18 03:10:12 | BOSCO CANSIGLIO | 267 | 9 | 6.12 ±0.09 |
| 3-4 | 1939 10 15 14:05 | Garfagnana | 62 | 6-7 | 5.08 ±0.16 |

| Is | Anno Me Gi Or | Area epicentrale (AE) | nMDP | Io | Mw |
|-----------|----------------------|------------------------------|-------------|-----------|------------|
| 4-5 | 1963 04 05 13:49:42 | Finale Emilia | 6 | 4-5 | 4.09 ±0.34 |
| 5 | 1971 07 15 01:33:23 | Parmense | 229 | 8 | 5.64 ±0.09 |
| 3-4 | 1980 11 23 18:34:52 | Irpinia-Basilicata | 1394 | 10 | 6.89 ±0.09 |
| 5 | 1983 11 09 16:29:52 | Parmense | 850 | 6-7 | 5.06 ±0.09 |
| 5 | 1986 12 06 17:07:20 | BONDENO | 604 | 6 | 4.61 ±0.10 |
| 3 | 1989 09 13 21:54:01 | PASUBIO | 779 | 6-7 | 4.88 ±0.09 |
| 2-3 | 1992 04 17 11:59:09 | Montevoglio | 56 | 4-5 | 4.32 ±0.18 |
| 4-5 | 1996 10 15 09:56:02 | Correggio | 135 | 7 | 5.41 ±0.09 |
| NF | 2000 06 18 07:42:08 | Parmense | 300 | 5-6 | 4.43 ±0.09 |
| 4-5 | 2003 09 14 21:42:53 | Appennino bolognese | 133 | 6 | 5.29 ±0.09 |
| 4 | 1916 08 16 07:06 | Alto Adriatico | 257 | | 6.14 ±0.14 |
| F | 1919 06 29 15:06:12 | Mugello | 566 | 10 | 6.29 ±0.09 |
| 5 | 1920 09 07 05:55:40 | Garfagnana | 756 | 10 | 6.48 ±0.09 |
| 4 | 1922 05 24 21:17:25 | Ferrarese | 7 | 4 | 4.34 ±0.25 |
| NF | 1930 10 30 07:13:13 | SENIGALLIA | 263 | 8 | 5.81 ±0.09 |
| 5 | 1936 10 18 03:10:12 | BOSCO CANSIGLIO | 267 | 9 | 6.12 ±0.09 |
| 3-4 | 1939 10 15 14:05 | Garfagnana | 62 | 6-7 | 5.08 ±0.16 |
| 4-5 | 1963 04 05 13:49:42 | Finale Emilia | 6 | 4-5 | 4.09 ±0.34 |
| 5 | 1971 07 15 01:33:23 | Parmense | 229 | 8 | 5.64 ±0.09 |
| 3-4 | 1980 11 23 18:34:52 | Irpinia-Basilicata | 1394 | 10 | 6.89 ±0.09 |
| 5 | 1983 11 09 16:29:52 | Parmense | 850 | 6-7 | 5.06 ±0.09 |

Tabella 5.1 - Storia sismica del territorio comunale di Cento (FE) [44.727, 11.289]

5.3 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SOTTOSUOLO

L'area oggetto d'intervento, situata nel comune di Cento (FE), ai sensi dell'OPCM 3274 del 23.03.03 è classificata in zona 3.

Al fine della progettazione sismica la normativa vigente (D.M. 14.01.2008) prevede la classificazione del profilo stratigrafico del sottosuolo nei primi 30 metri al di sotto del piano di posa delle fondazioni.

Parametro fondamentale per la suddetta classificazione risulta la “ V_{S30} ”, ossia la velocità media delle onde di taglio nei primi 30 metri, che viene definita dall'espressione:

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

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.

La V_{S30} ricavata dall'indagine MASW eseguita (v. par. 4.2) risulta pari a:

$$V_{S30} = 197 \text{ m/s}$$

Dal valore di V_{S30} ottenuto si determina la categoria di sismica del sito di intervento; nel caso in oggetto l'area di studio è caratterizzata da terreni appartenenti alla **categoria C**, ossia: *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, 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 (ovvero $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < Cu_{30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).*

| CATEGORIA | DESCRIZIONE |
|-----------|---|
| A | Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di Vs30 superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m. |
| B | Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $NSPT_{30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $Cu_{30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina). |
| C | Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < Cu_{30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina). |
| D | Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di 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 Vs30 inferiori a 180 m/s (ovvero $NSPT_{,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $Cu_{30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina). |
| E | Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con Vs30 > 800 m/s). |
| S1 | Depositi di terreni caratterizzati da valori di Vs30 inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < Cu_{30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche. Servono studi speciali. |
| S2 | Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti. Servono studi speciali. |

Tabella 5.2 - Categorie sismiche dei terreni

5.4 VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA DI PROGETTO

Ai sensi dell'Ordinanza del Commissario Delegato per la ricostruzione n. 70 del 13/11/2012 l'area indagata ricade in un "zona suscettibile di amplificazione e liquefazione (LQ2)", come evidenziato dalla "Carta delle microzone omogenee in prospettive sismica" Cento_01, allegata all'Ordinanza sopracitata.

Tuttavia, in par. 5.5 del presente studio, la verifica alla liquefazione ha escluso si possano verificare fenomeni di liquefazione, di conseguenza si procederà alla determinazione dei parametri sismici e alla valutazione dell'azione sismica mediante approccio semplificato.

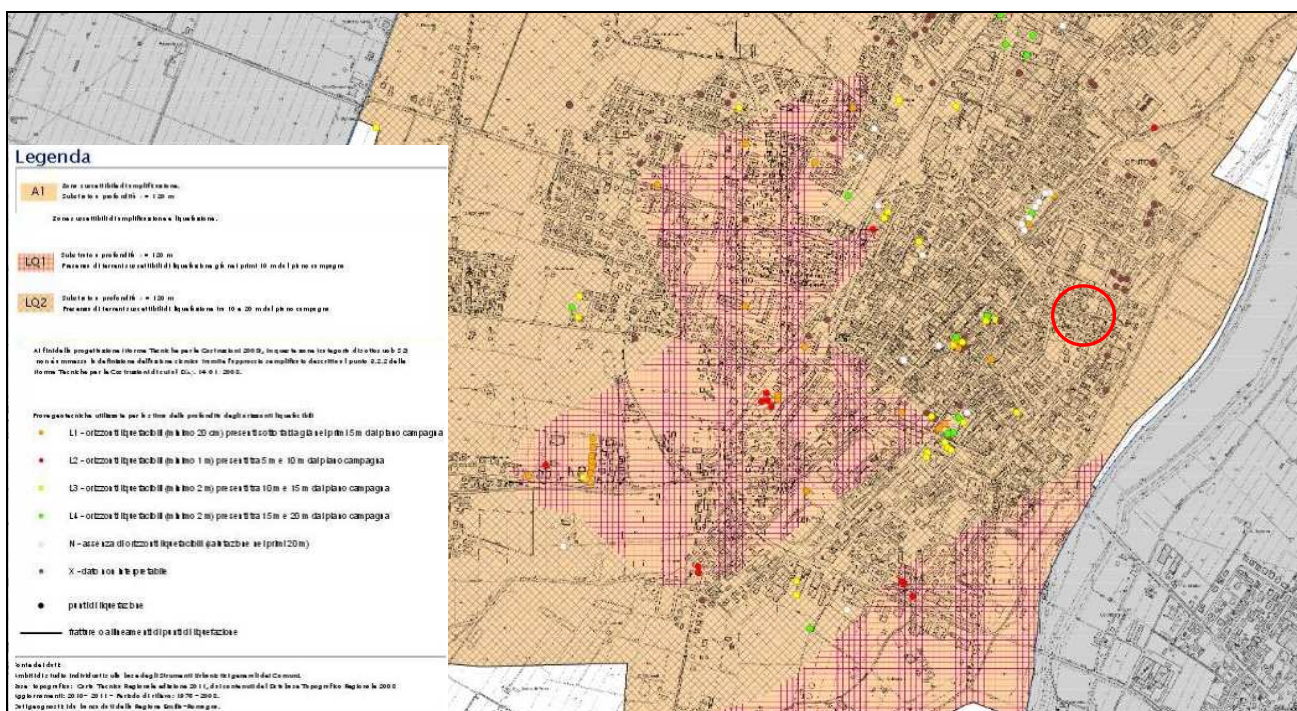


Figura 5.1 – “Carta delle microzone omogenee in prospettive sismica” Cento_01 (Ordinanza del Commissario Delegato per la ricostruzione n. 70 del 13/11/2012). In rosso l'area di indagine

La normativa vigente (D.M. 14 Gennaio 2008) implica l'individuazione del sito di studio all'interno di un reticolo formato da 4 punti distanti tra loro non più di 4 Km.

L'individuazione del reticolo di riferimento risulta indispensabile per la determinazione dei valori di accelerazione sismica (a_g) attesa sul sito e per l'individuazione di tutti gli altri parametri necessari alla verifica degli stati limite in azione sismica.

Si individuano quindi i parametri intrinseci del sito:

- Coordinate Geografiche del sito (Latitudine, Longitudine)
- Coefficiente Topografico (T)
- Categoria del Suolo

Secondo le prescrizioni del D.M. 14.01.2008 si identifica il parametro (**S**) di amplificazione dell'azione sismica di progetto, dipendente dalla categoria del suolo di fondazione e dalla situazione topografica del sito.

$$S = S_S \times S_T$$

Dove:

S_S = Coefficiente di amplificazione stratigrafica determinato per ogni categoria di suolo tramite la seguente tabella:

| CATEGORIA SOTTOSUOLO | S_S | C_c |
|-----------------------------|--|------------------------------|
| A | 1,00 | 1,00 |
| B | $1,00 \leq 1,40 - 0,40 * F_0 * ag/g \leq 1,20$ | $1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$ |
| C | $1,00 \leq 1,70 - 0,60 * F_0 * ag/g \leq 1,50$ | $1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$ |
| D | $0,90 \leq 2,40 - 1,50 * F_0 * ag/g \leq 1,80$ | $1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$ |
| E | $1,00 \leq 2,00 - 1,10 * F_0 * ag/g \leq 1,60$ | $1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$ |

S_T = Coefficiente di amplificazione topografica desunta dalla seguente tabella:

| CATEGORIA TOPOGRAFICA | | S_T |
|------------------------------|---|-------------------------|
| T1 | Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i < 15^\circ$ | 1 |
| T2 | Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$ (valore alla sommità del pendio) | 1,2 |
| T3 | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$ (valore della cresta del rilievo) | 1,2 |
| T4 | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$ (valore della cresta del rilievo) | 1,4 |

Le sovresposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

Per l'identificazione dei parametri di progetto di seguito riportati, si rimanda all'elaborazione della relazione geotecnica ai sensi del D.M. 14 Gennaio 2008.

- Vita Nominale (Vn)
- Classe d'Uso dell'opera
- Coefficiente d'Uso (Cu)
- Vita di Riferimento (Vr)
- Smorzamento e fattore di struttura

5.4.1.1 Riferimenti normativi

Vita nominale (§ 2.4.1 NTC-08)

La vita nominale di un'opera strutturale V_N è intesa come il numero di anni nel quale l'opera, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata. La vita nominale dei diversi tipi di opere è quella riportata nella **Tab. 2.4.I** delle NTC-08 e deve essere precisata nei documenti di progetto.

Tabella 2.4.I – Vita nominale V_N per diversi tipi di opere

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

Classi d'uso (§ 2.4.2 NTC-08)

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

| | |
|--------------------|---|
| <i>Classe I:</i> | Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. |
| <i>Classe II:</i> | Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in <i>Classe d'uso III</i> o in <i>Classe d'uso IV</i> , reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti. |
| <i>Classe III:</i> | Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in <i>Classe d'uso IV</i> . Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso. |
| <i>Classe IV:</i> | Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica. |

Vita di riferimento (§ 2.4.3 NTC-08)

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad (\text{NTC-08 Eq. 2.4.1})$$

Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato nella **Tab. 2.4.II** delle NTC-08.

Tabella 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso C_U

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

Se $V_R \leq 35$ anni si pone comunque $V_R = 35$ anni.

Parametri sismici

Tipo di elaborazione: Fondazioni superficiali

Sito in esame.

latitudine: 44,7330700 [°]

longitudine: 11,2919500[°]

le coordinate geografiche sono espresse in ED50

Classe d'uso: II. *Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.*

Vita nominale: 50 [anni]

Siti di riferimento

| | ID | Latitudine [°] | Longitudine [°] | Distanza [m] |
|--------|-------|----------------|-----------------|--------------|
| Sito 1 | 15841 | 44,713620 | 11,239970 | 4641,68 |
| Sito 2 | 15842 | 44,714920 | 11,310240 | 2482,48 |
| Sito 3 | 15620 | 44,764900 | 11,308480 | 3771,92 |
| Sito 4 | 15619 | 44,763600 | 11,238130 | 5439,36 |

Tabella 5.3 – Coordinate geografiche dei vertici della maglia di appartenenza dell'area di indagine

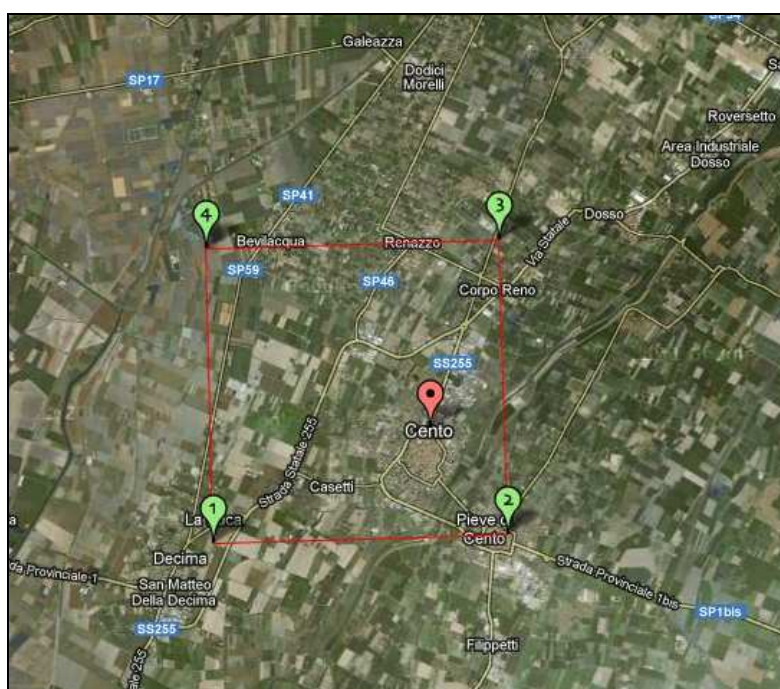


Figura 5.2 – Localizzazione della maglia di appartenenza dell'area di indagine con indicazione dei vertici di riferimento

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 50 anni

Coefficiente c_u : 1

| | Prob. Superamento[%] | Tr [anni] | ag [g] | Fo [-] | Tc* [s] |
|---------------------------------------|-----------------------------|------------------|---------------|---------------|----------------|
| Operatività (SLO) | 81 | 30 | 0,043 | 2,510 | 0,256 |
| Danno (SLD) | 63 | 50 | 0,056 | 2,482 | 0,269 |
| Salvaguardia della vita (SLV) | 10 | 475 | 0,157 | 2,591 | 0,272 |
| Prevenzione dal collasso (SLC) | 5 | 975 | 0,209 | 2,536 | 0,279 |

Tabella 5.4 – Probabilità di superamento P_{VR} al variare dello stato limite considerato (Tabella 3.2.I NTC-08)

Coefficienti Sismici

| | Kh [-] | Kv [-] | Amax [m/s²] | Beta [-] |
|------------|---------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| SLO | 0,013 | 0,007 | 0,640 | 0,200 |
| SLD | 0,017 | 0,008 | 0,822 | 0,200 |
| SLV | 0,055 | 0,027 | 2,244 | 0,240 |
| SLC | 0,081 | 0,040 | 2,833 | 0,280 |

Tabella 5.3 – Parametri sismici determinati per gli stati limiti considerati

Il rispetto dei vari stati limite viene considerato, dalle NTC-08:

✓ Nei confronti di tutti gli stati limite ultimi (SLU) quando siano soddisfatte le verifiche relative al solo “stato limite vita” (SLV):

$$\mathbf{SLU=SLV}$$

✓ Nei confronti di tutti gli stati limite d’esercizio (SLE) quando siano soddisfatte le verifiche relative al solo “stato limite danno” (SLD):

$$\mathbf{SLE=SLD}$$

Di seguito vengono riportati gli spettri di risposta elastici delle componenti orizzontali e verticali rappresentativi del sito in esame ed i parametri sismici di ciascun stato limite.

➤ Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali

Coefficiente di smorzamento viscoso $\xi = 5 \%$
 Fattore che altera lo spettro elastico $\eta = 1,000$

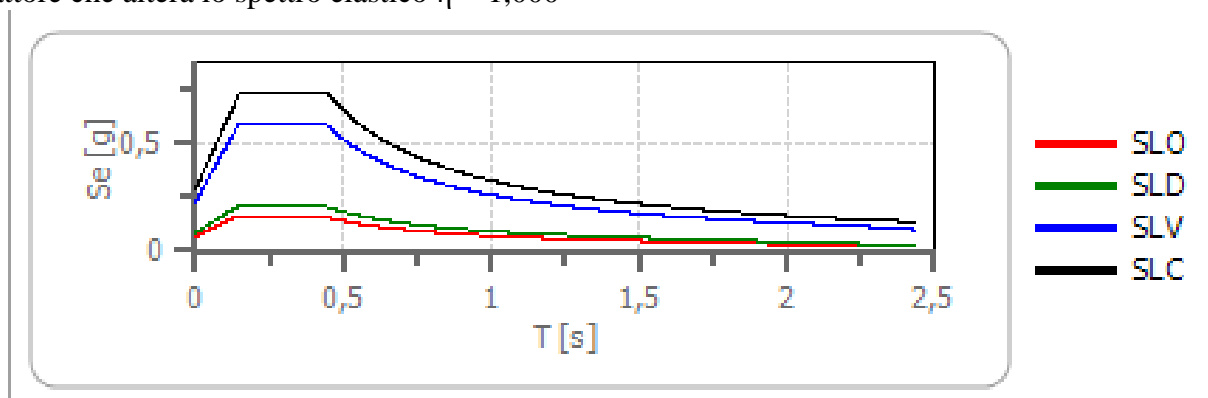


Figura 5.4 – Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali

| | cu | ag [g] | Fo | Tc* [s] | Ss | Cc | St | S | η | TB [s] | TC [s] | TD [s] |
|-----|----|--------|-------|---------|------|------|----|------|--------|--------|--------|--------|
| SLO | 1 | 0,043 | 2,51 | 0,256 | 1,5 | 1,65 | 1 | 1,5 | 1 | 0,141 | 0,423 | 1,774 |
| SLD | 1 | 0,056 | 2,482 | 0,269 | 1,5 | 1,62 | 1 | 1,5 | 1 | 0,145 | 0,436 | 1,823 |
| SLV | 1 | 0,157 | 2,591 | 0,272 | 1,46 | 1,61 | 1 | 1,46 | 1 | 0,146 | 0,439 | 2,227 |
| SLC | 1 | 0,209 | 2,536 | 0,279 | 1,38 | 1,6 | 1 | 1,38 | 1 | 0,149 | 0,446 | 2,437 |

Tabella 5.6 – Parametri sismici relativi allo spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali

➤ Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali

Coefficiente di smorzamento viscoso $\xi = 5 \%$
 Fattore che altera lo spettro elastico $\eta = 1,000$

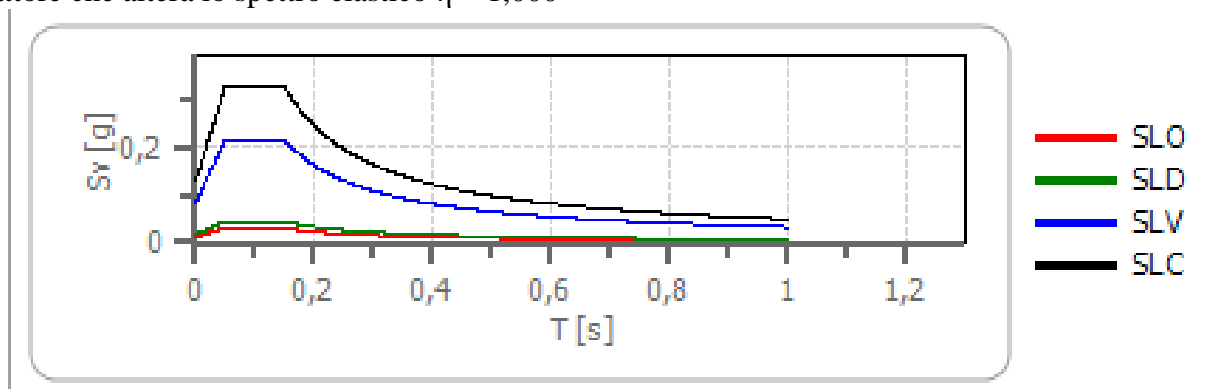


Figura 5.3 – Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali

| | cu | ag [g] | Fo | Tc* [s] | Ss | Cc | St | S | η | TB [s] | TC [s] | TD [s] |
|-----|----|--------|-------|---------|----|------|----|---|--------|--------|--------|--------|
| SLO | 1 | 0,043 | 2,51 | 0,256 | 1 | 1,65 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 0,15 | 1 |
| SLD | 1 | 0,056 | 2,482 | 0,269 | 1 | 1,62 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 0,15 | 1 |
| SLV | 1 | 0,157 | 2,591 | 0,272 | 1 | 1,61 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 0,15 | 1 |
| SLC | 1 | 0,209 | 2,536 | 0,279 | 1 | 1,6 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 0,15 | 1 |

Tabella 5.5 – Parametri sismici relativi allo spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali

– VERIFICA ALLO STATO LIMITE VITA (SLU=SLV)

Per la tipologia di opera in esame, il valore di a_g rappresentativo dell'area è pari a $0,157g$, da cui $a_g = 1,540 \text{ m/s}^2$ con probabilità di superamento in 50 anni del 10% (SLV).

Inoltre per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) si ricava:

- Un accelerazione massima data dall'espressione:

$$A_{max} = S * a_g = 2,248 \text{ m/s}^2$$

- Il coefficiente sismico orizzontale K_h con l'espressione:

$$K_h = \beta * A_{max} / g$$

- Il coefficiente sismico verticale K_v con l'espressione:

$$K_v = 0,5 * K_h$$

Con $\beta = 0,240$

$$K_h = 0,055 \quad ; \quad K_v = 0,027$$

– VERIFICA ALLO STATO LIMITE DANNO (SLE=SLD)

Per la tipologia di opera in esame, il valore di a_g rappresentativo dell'area è pari a $0,056g$, da cui $a_g = 0,549 \text{ m/s}^2$ con probabilità di superamento in 50 anni del 63% (SLD).

Inoltre per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLD) si ricava:

- Un accelerazione massima data dall'espressione:

$$A_{max} = S * a_g = 0,824 \text{ m/s}^2$$

- Il coefficiente sismico orizzontale K_h con l'espressione:

$$K_h = \beta * A_{max} / g$$

- Il coefficiente sismico verticale K_v con l'espressione:

$$K_v = 0,5 * K_h$$

Con $\beta = 0,200$ si ottiene quindi:

$$K_h = 0,017 \quad ; \quad K_v = 0,008$$

5.5 ANALISI DELLA SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE

Tra i tipi di terreno presenti in Pianura Padana, certamente quelli *non coesivi e poco addensati sono quelli più suscettibili ad alterazioni di rilievo.*

In particolare con il termine *liquefazione del terreno* si intende la diminuzione della resistenza del terreno stesso a seguito del raggiungimento del limite di fluidità.

Questo fenomeno si produce a causa dei movimenti ciclici che avvengono durante un sisma che producono un accumulo della pressione interstiziale di un terreno granulare saturo (ghiaia, sabbia e limo non coesivo), provocandone una diminuzione della resistenza al taglio.

Per comprendere tale fenomeno è necessario considerare il principio degli sforzi efficaci in cui, in un terreno saturo agisce nello scheletro solido una *Tensione efficace* così definita:

$$\sigma' = \sigma - p$$

Dove σ è la tensione totale agente perpendicolarmente a qualsiasi piano passante per un generico punto e p la pressione dell'acqua nello stesso punto. Esprimendo il criterio di *Resistenza di Mohr-Coulomb* in termini di tensioni efficaci, la resistenza al taglio che può essere mobilitata su un piano normale n soggetto a una tensione normale totale σ_n , è data da:

$$T_n = (\sigma_n - p) \operatorname{tg} \phi + c$$

La liquefazione si attua quando il valore limite della tensione tangenziale T_n tende a zero, inoltre la liquefazione aumenta al diminuire della coesione c , dell'angolo d'attrito ϕ e della tensione totale σ_n ed all'aumentare della pressione interstiziale p .

La presenza di argilla nei sedimenti granulari riduce considerevolmente il rischio della liquefazione. La verifica alla suscettibilità alla liquefazione dei terreni, secondo il D.M. 14.01.2008, viene valutata in base ad un fattore di sicurezza identificato dal seguente rapporto:

$$\text{➤ } FS = CRR / CSR > 1,25 \quad (\text{terreni non liquefacibili})$$

Dove, *CSR (Cyclic Stress Ratio)* è il rapporto tensionale ciclico che esprime lo sforzo di taglio generato dal sisma, e *CRR (Cyclic Resistance Ratio)* è il rapporto di resistenza ciclica che esprime la capacità del terreno di resistere alla liquefazione.

Qualora si usi, come nel caso in oggetto, il metodo delle correlazioni di campagna, un terreno viene considerato suscettibile alla liquefazione quando lo sforzo di taglio, generato dal terremoto ad una determinata profondità, supera l'80% ($FS > 1,25$) dello sforzo critico che ha provocato la liquefazione alla medesima profondità durante terremoti.

Nel caso in oggetto tali verifiche sono state eseguite sulla base dei dati ottenuti dall'esecuzione della prova penetrometrica statica.

Tramite la campagna di indagine è stato rilevato uno strato di terreno a carattere incoerente presente nell'intervallo di profondità: -17,20/-20,00 metri da p.c. (Strato 3).

Tale strato è stato sottoposto a verifica mediante il calcolo del seguente fattore di sicurezza alla liquefazione:

STIMA DEL FATTORE DI SICUREZZA ALLA LIQUEFAZIONE

La verifica alla suscettibilità alla liquefazione dei terreni, secondo il D.M. 14.01.2008, viene valutata in base ad un fattore di sicurezza identificato dal seguente rapporto:

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \cdot MSF > 1,25 \quad \text{terreni non liquefacibili}$$

(Quaderno di approfondimento alle Linee Guida NTC 08 - Gruppo Interregionale Ordine dei Geologi)

Dove:

- ✓ CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) è il rapporto di resistenza ciclica che esprime la capacità del terreno di resistere alla liquefazione, calcolata secondo la procedura empirica proposta da Robertson & Wride (1998) per terremoti di magnitudo $M=7,5$;
- ✓ CSR (*Cyclic Stress Ratio*) è il rapporto tensionale ciclico che esprime lo sforzo di taglio generato dal sisma. Le relazioni per la valutazione di CSR vengono dedotte su base empirica, dalle osservazioni del comportamento di depositi naturali durante eventi sismici con magnitudo di momento M pari a 7.5;
- ✓ MSF = coefficiente correttivo per la rivalutazione della sollecitazione sismica funzione della magnitudo di progetto del terremoto per eventi sismici aventi M differente da 7,5; per la determinazione di tale valore è stata adottata l'espressione proposta da Idriss e Boulanger (Linee Guida AGI, 2005).

Il valore di magnitudo, ai fini delle valutazioni in oggetto, è stato assunto in considerazione della localizzazione del sito di studio appartenente alla zona sismogenetica ZS912 (Zonazione sismogenetica ZS9 - Gruppo di lavoro, 2004), alla quale è associata una magnitudo massima $M_{w_{max}}$ pari a 6,14.

STIMA DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Come richiesto dall'Allegato 3 dell'Atto di indirizzo regionale n. 112/2007 è stato calcolato l'**indice del potenziale di liquefazione**, che fornisce una stima del grado di pericolosità dovuto alla liquefazione in un determinato sito.

Per il calcolo è stato utilizzato il metodo semplificato di Iwasaki et Al. (1982) (Linee AGI, 2005) adottando la seguente formula:

$$I_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

Dove:

z = profondità del piano campagna (m);

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

F = $1 - F_L$ se $F_L \leq 1.0$

F = 0 se $F_L \geq 1.0$ dove F_L è il coefficiente di sicurezza alla liquefazione

Se:

- ✓ $I_L \leq 5$ il rischio di liquefazione è basso
- ✓ $5 < I_L \leq 15$ il rischio di liquefazione è elevato
- ✓ $I_L > 15$ il rischio di liquefazione è estremamente elevato

Di seguito una rappresentazione grafico dei risultati ottenuti lungo la verticale penetrometrica analizzata.

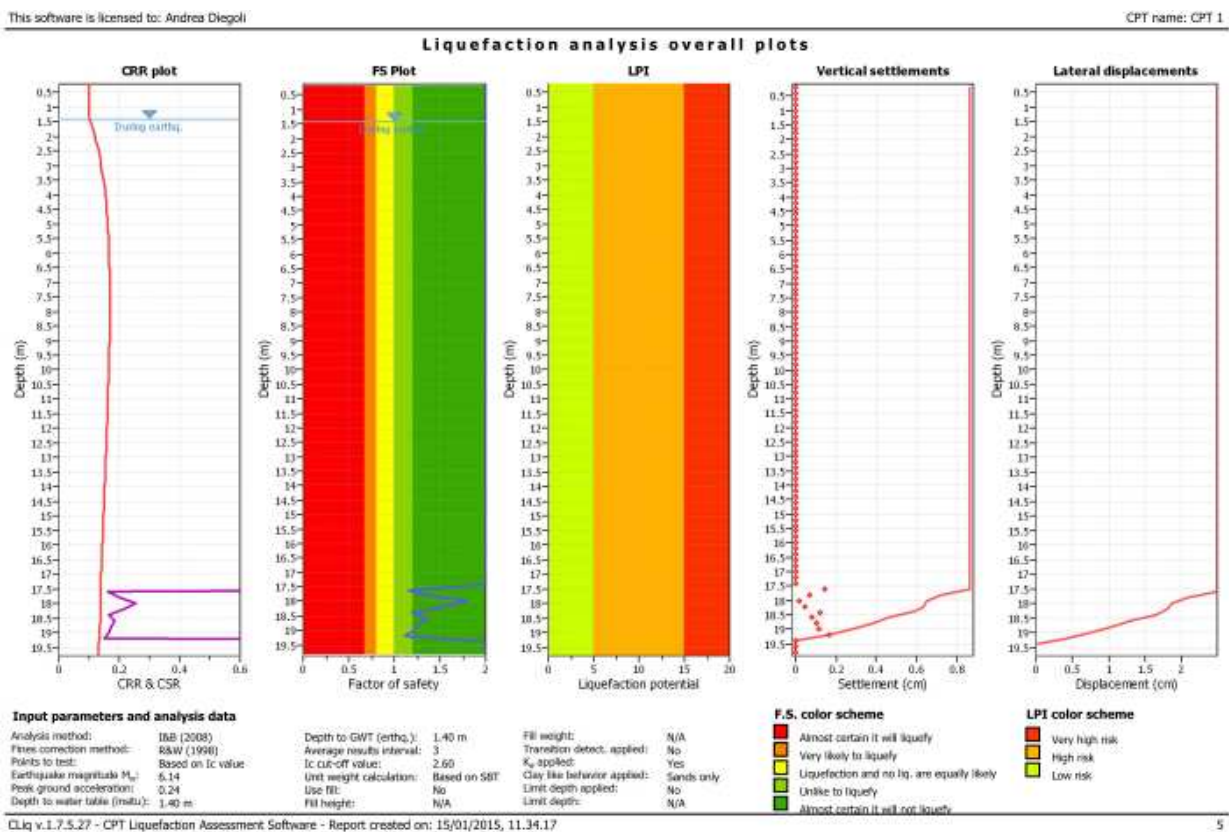


Figura 4.2 – Elaborazione prova CPT

Dalla verifiche effettuate non sono emersi strati potenzialmente suscettibili di liquefazione nell'intervallo di profondità analizzato per la magnitudo di riferimento associata al sito, come confermato inoltre dall'indice di potenziale di liquefazione nullo.

6 MODELLO GEOLOGICO ED ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO

Dai dati emersi dalla prova penetrometrica effettuata è stato possibile determinare il seguente modello geologico del terreno di fondazione dell'opera in progetto.

Dall'indagine geognostica si determinano, secondo le prescrizioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC-08), i valori medi (f_m) per ciascun orizzonte identificato, rimandando alla determinazione dei valori caratteristici (f_k) al progettista in fase di elaborazione della relazione geotecnica come previsto dalla normativa vigente.

E' stata così determinata la seguente successione stratigrafica:

— **ORIZZONTE 1: Da 0,00 m. a – 8,00 m. da p.c.:**

La prova penetrometrica evidenzia un'alternanza di argilla inorganica compatta con un livello superficiale di argilla organica e terreni misti, avente mediocri capacità portante:

| | | | |
|--|-------------------------|---|-------------------------|
| ➤ Peso nell'unità di volume: | γ_{medio} | = | 18,44 kN/m ³ |
| ➤ Peso nell'unità di volume saturo: | γ_{sat} | = | 19,22 kN/m ³ |
| ➤ Coesione non drenata: | Cu_{medio} | = | 59,41 kPa |
| ➤ Coesione non drenata caratteristica: | Cu_k | = | 40,12 kPa |
| ➤ Modulo edometrico: | Mo | = | 4634,62 kPa |

— **ORIZZONTE 2: Da 8,00 m. a – 17,20 m. da p.c.:**

La correlazione di *Schmertmann* evidenzia un banco di argilla inorganica molto compatta con livelli di argilla organica-terreni misti e argilla sabbiosa-limosa, avente discreta capacità portanti:

| | | | |
|--|-----------------------|---|-------------------------|
| ➤ Peso nell'unità di volume saturo: | γ_{sat} | = | 20,69 kN/m ³ |
| ➤ Coesione non drenata: | Cu_{medio} | = | 131,08 kPa |
| ➤ Coesione non drenata caratteristica: | Cu_k | = | 100,82 kPa |
| ➤ Modulo edometrico: | Mo | = | 6119,35 kPa |

— **ORIZZONTE 3: Da 17,20 m. a – 20,00 m. da p.c.:**

La correlazione di *Schmertmann* evidenzia un banco di sabbie limose e limi sabbiosi, avente buona capacità portanti:

| | | | |
|---|-----------------------|---|-------------------------|
| ➤ Peso nell'unità di volume saturo: | γ_{sat} | = | 20,59 kN/m ³ |
| ➤ Angolo d'attrito interno (valore medio): | ϕ_{medio} | = | 33,12° |
| ➤ Angolo d'attrito interno (valore caratteristico): | ϕ_k | = | 31,46° |
| ➤ Modulo edometrico: | Mo | = | 6444,93 kPa |
| ➤ Modulo elastico: | Me | = | 15129,70 kPa |
| ➤ Densità relativa: | Dr | = | 45,48 % |

La falda freatica è stata rilevata alla profondità di circa -1,40 metri dal piano campagna.

7 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dall'elaborazione dei dati delle prove penetrometriche e dal presente studio geotecnico si evince che:

- In base alle disposizioni della vigente normativa sulle costruzioni, i terreni che interessano il sito in esame appartengono alla categoria C della nuova classificazione sismica, ossia trattasi di “*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, 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 (ovvero $15 < NSPT, 30 < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < Cu_{30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina)*”;
- Per la tipologia di opera in esame, il valore di a_g rappresentativo dell'area è pari a 0,149g, da cui $a_g=1,462$ m/s² con probabilità di superamento in 50 anni del 10% (SLV), con un valore del coefficiente di amplificazione sismica $S=1,47$, da cui si ottiene un'accelerazione massima attesa al sito pari a $A_{max} = 2,149$ m/s².
- Il volume significativo investigato dalla campagna di indagine geognostica soddisfa le prescrizioni del D.M. 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche sulle Costruzioni) per l'entità dell'opera in progetto.
- La valutazione della suscettibilità alla liquefazione, dei litotipi sabbiosi posti sottofondazione, ha escluso la possibilità che si verifichi il fenomeno in caso di sollecitazioni sismiche di magnitudo di riferimento.
- Con la presente si rimanda all'elaborazione geotecnica per la verifica agli stati limite dell'eventuale sistema terreno – manufatto come prescritto dalle N.T.C. 2008.

Alla luce dei dati acquisiti, ed in base alle condizioni geologiche e tecniche prescritte dalle normative vigenti, si dà parere favorevole all'edificazione con le precisazioni sopra esposte.

Cento, 14 Gennaio 2015

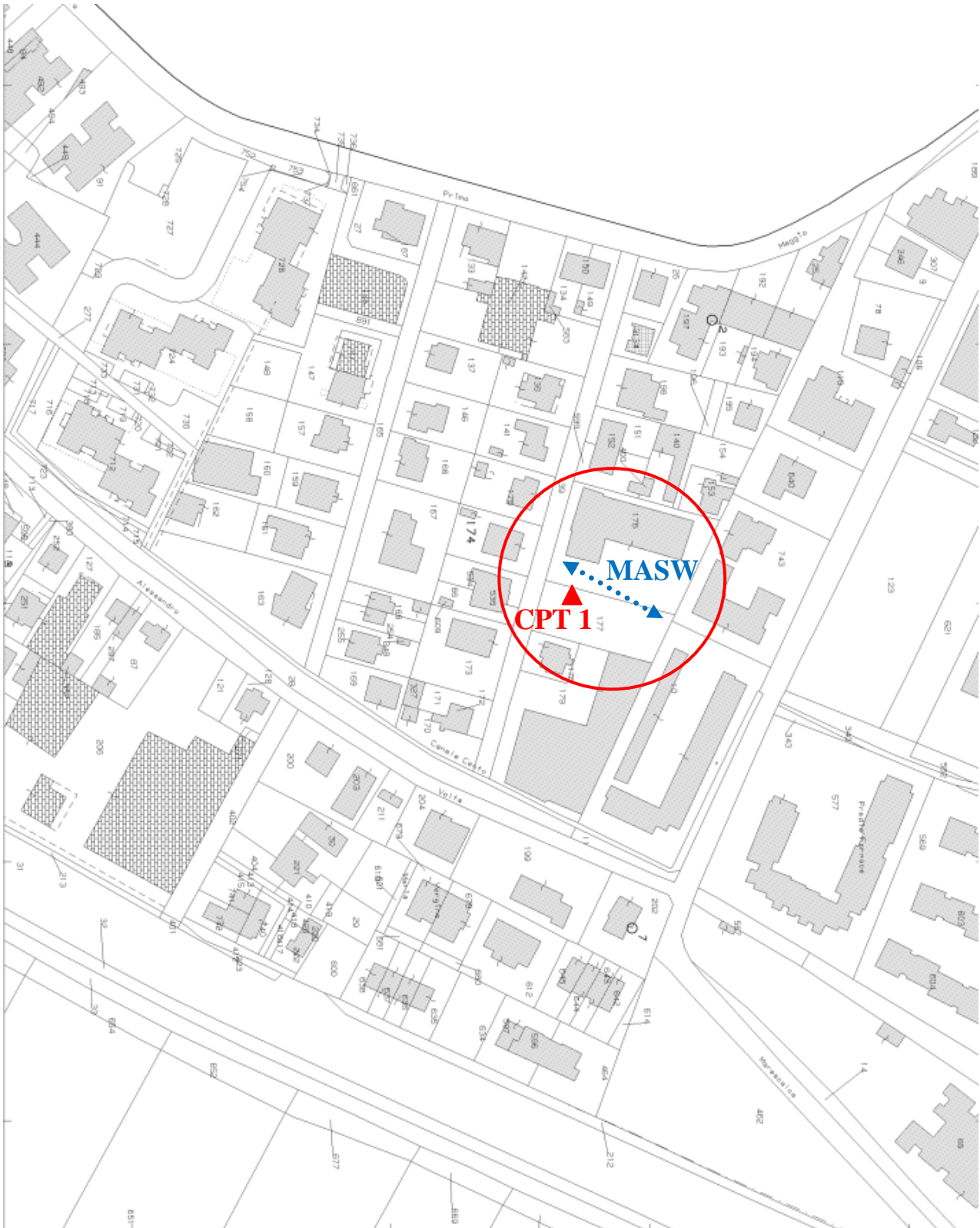


Il tecnico

Dott. Geol. Andrea Diegoli

TAVOLA 1

STRALCIO CATASTALE ED UBICAZIONE DELLE PROVE ESEGUITE



ALLEGATO 1
Tavole dati CPT 1

VALORI DI RESISTENZA Rp, RI.

CPT

1

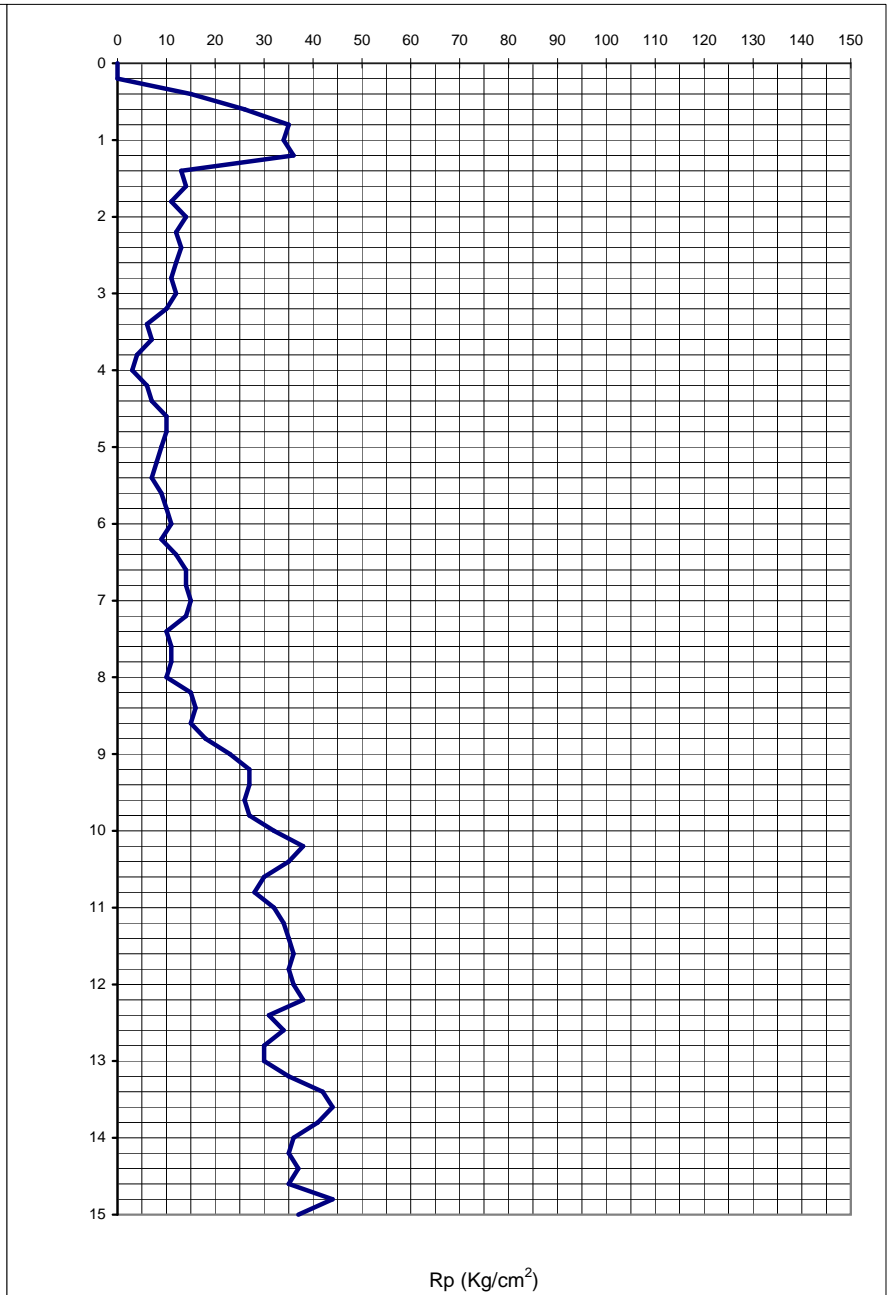
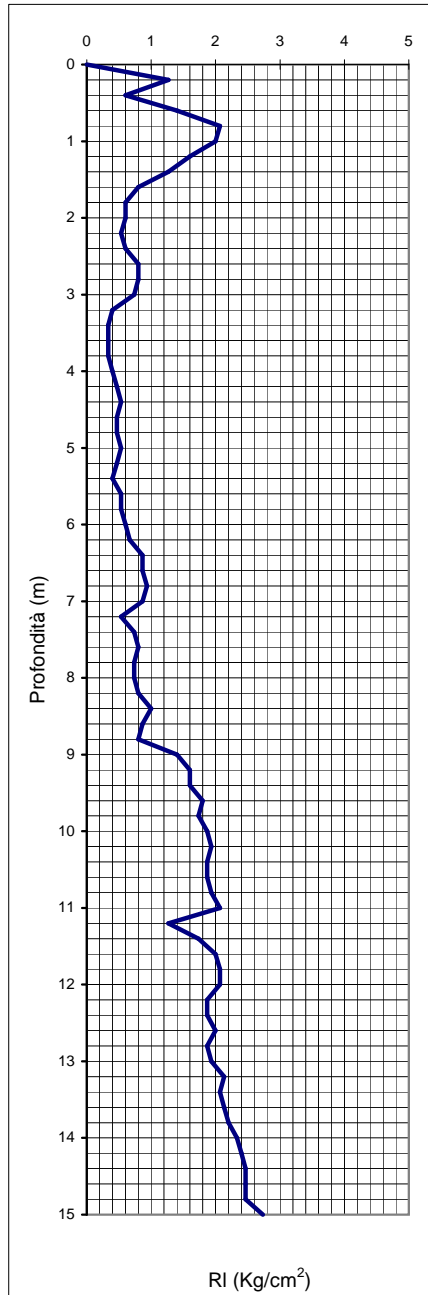
Committente: Manderioli Alberto

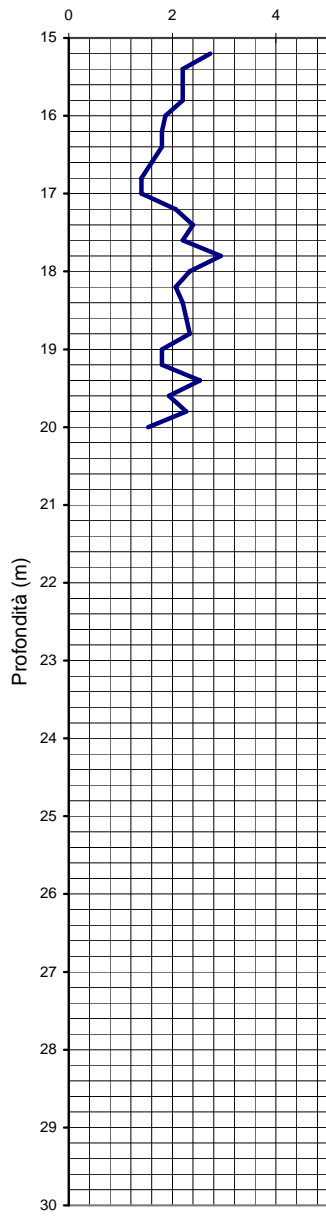
Località : Via Marconi, 12 - Cento (FE)

Data: 13/01/2015

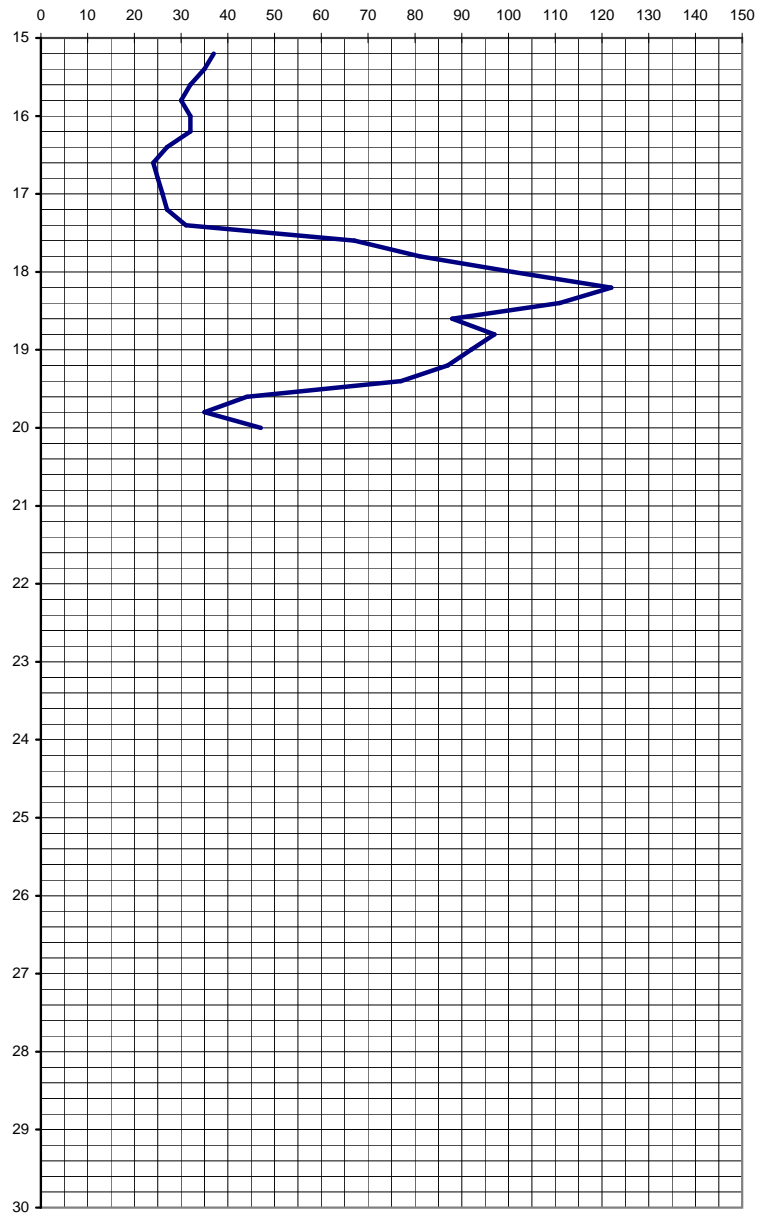
Profondità falda (m): 1,4

Quota inizio: p.c.





RI (Kg/cm²)



Rp (Kg/cm²)

DIAGRAMMA Rp / RI - Profondità.

CPT 1

Committente: Manderioli Alberto

Località : Via Marconi, 12 - Cento (FE)

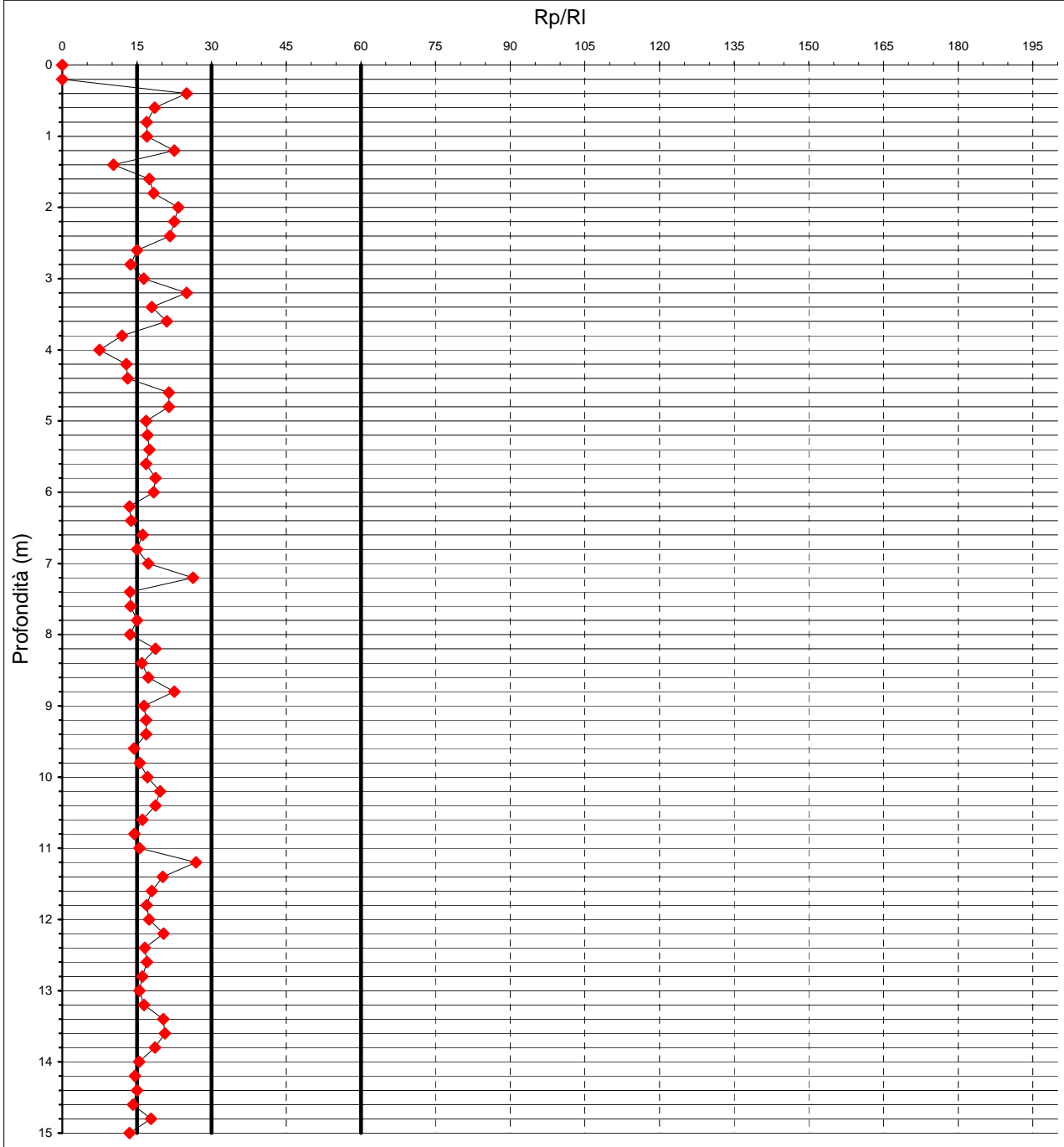
Data: 13/01/2015

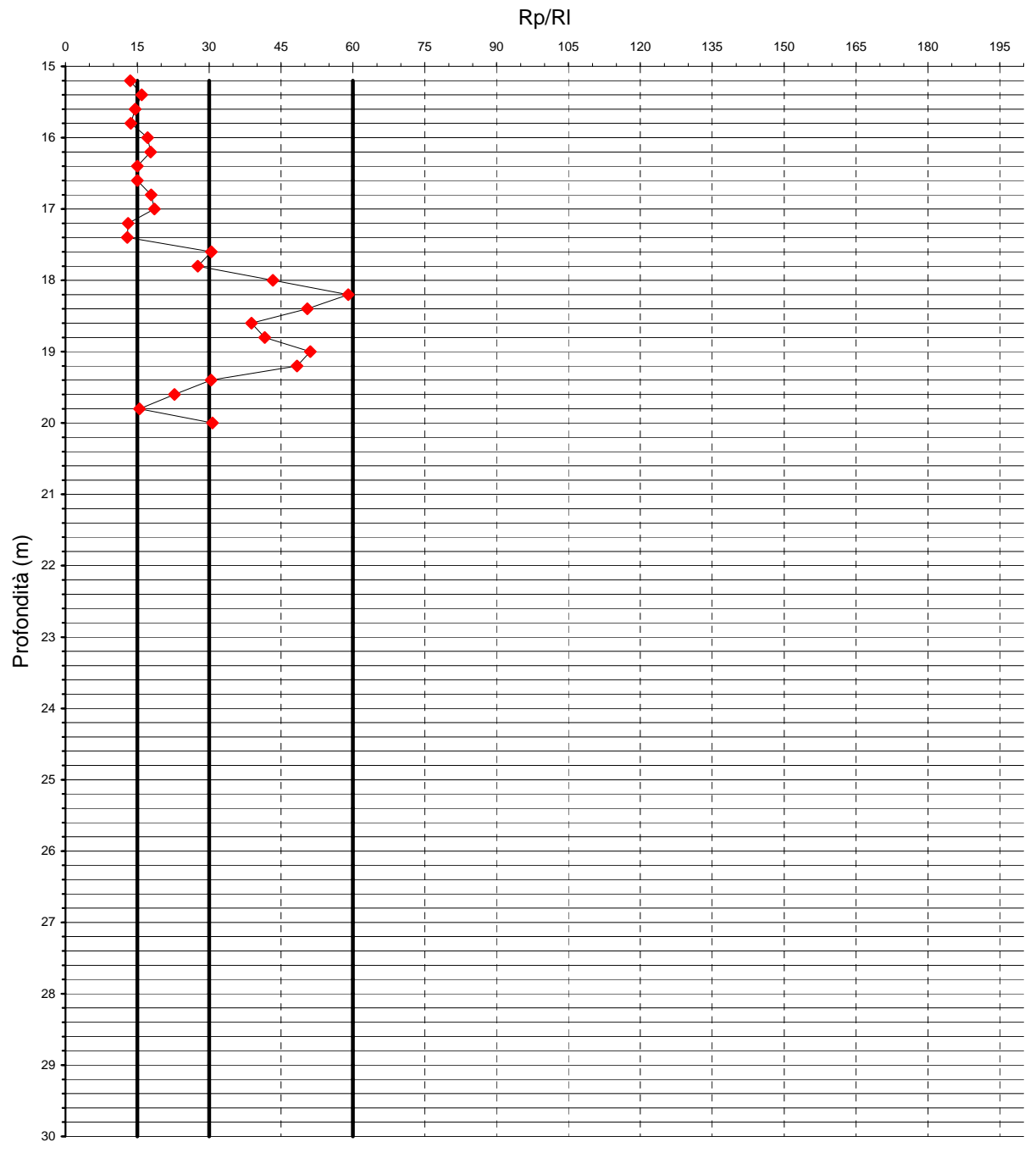
Profondità falda (m): 1,4

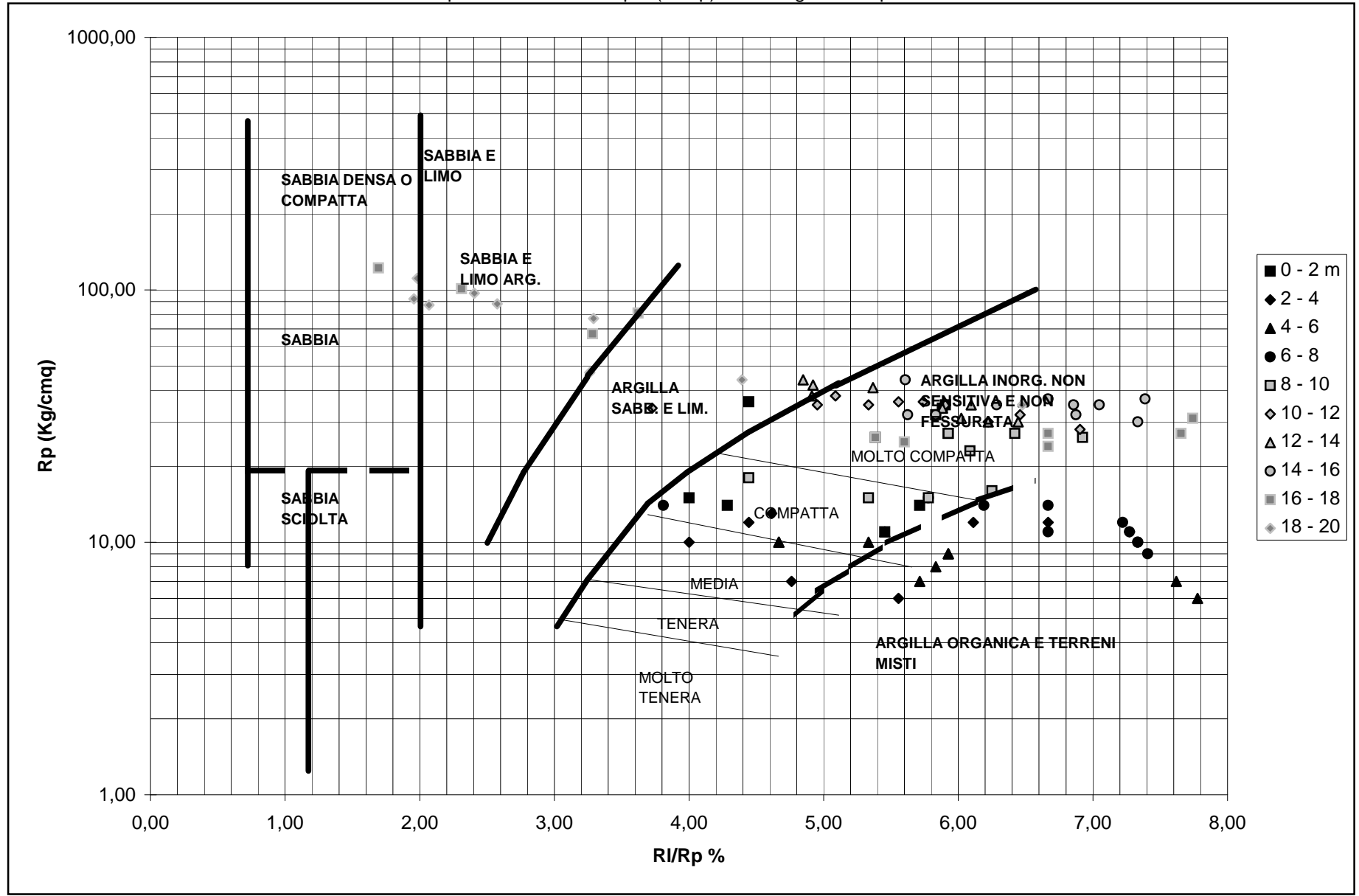
Quota inizio: p.c.

Rp/RI Litologia (Raccomandazioni AGI '77)

| | |
|---------|-------------------------------|
| 0 - 15 | torbe ed argille organiche |
| 15 - 30 | limi ed argille |
| 30 - 60 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| > 60 | sabbie e sabbie con ghiaia |







PARAMETRI GEOTECNICI .

CPT 1

Committente: Manderioli Alberto

Località: Via Marconi - Cento (FE)

Data: 13/01/2015

Profondità falda (m): 1,4 Quota inizio: p.c.

| Prof. (m) | Rp Kg/cm ² | Rf Kg/cm ² | Rp/Rf | Litologia secondo Schmertmann | Natura | γ (t/m ³) | tens. eff. (Kg/cm ²) | C u (Kg/cm ²) | ϕ | Mo (Kg/cm ²) | OCR |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-------|----------------------------------|-----------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------|--------------------------|-------|
| 0,20 | 0,00 | 1,27 | 0,00 | non rilevato | | | | | | | |
| 0,40 | 15,00 | 0,60 | 25,00 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,85 | 0,04 | 0,87 | - | 50 | 265,9 |
| 0,60 | 26,00 | 1,40 | 18,57 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,85 | 0,07 | 1,18 | - | 78 | 164,0 |
| 0,80 | 35,00 | 2,07 | 16,94 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,85 | 0,11 | 1,46 | - | 105 | 128,5 |
| 1,00 | 34,00 | 2,00 | 17,00 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,85 | 0,15 | 1,42 | - | 102 | 86,5 |
| 1,20 | 36,00 | 1,60 | 22,50 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,85 | 0,19 | 1,50 | - | 108 | 70,3 |
| 1,40 | 13,00 | 1,27 | 10,26 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,91 | 0,20 | 0,77 | - | 47 | 27,0 |
| 1,60 | 14,00 | 0,80 | 17,50 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,91 | 0,22 | 0,82 | - | 48 | 26,4 |
| 1,80 | 11,00 | 0,60 | 18,33 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,90 | 0,24 | 0,66 | - | 42 | 18,3 |
| 2,00 | 14,00 | 0,60 | 23,33 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,91 | 0,26 | 0,82 | - | 48 | 21,8 |
| 2,20 | 12,00 | 0,53 | 22,50 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,90 | 0,28 | 0,71 | - | 45 | 16,9 |
| 2,40 | 13,00 | 0,60 | 21,67 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,91 | 0,29 | 0,77 | - | 47 | 17,1 |
| 2,60 | 12,00 | 0,80 | 15,00 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,90 | 0,31 | 0,71 | - | 45 | 14,5 |
| 2,80 | 11,00 | 0,80 | 13,75 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,90 | 0,33 | 0,66 | - | 42 | 12,2 |
| 3,00 | 12,00 | 0,73 | 16,36 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,90 | 0,35 | 0,71 | - | 45 | 12,6 |
| 3,20 | 10,00 | 0,40 | 25,00 | argilla inorg. media | coesiva | 0,90 | 0,37 | 0,61 | - | 40 | 9,7 |
| 3,40 | 6,00 | 0,33 | 18,00 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,82 | 0,38 | 0,38 | - | 30 | 5,1 |
| 3,60 | 7,00 | 0,33 | 21,00 | argilla inorg. media | coesiva | 0,84 | 0,40 | 0,44 | - | 35 | 5,7 |
| 3,80 | 4,00 | 0,33 | 12,00 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,25 | 0,40 | 0,26 | - | 6 | 2,9 |
| 4,00 | 3,00 | 0,40 | 7,50 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,25 | 0,41 | 0,19 | - | 5 | 2,0 |
| 4,20 | 6,00 | 0,47 | 12,86 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,25 | 0,41 | 0,38 | - | 9 | 4,6 |
| 4,40 | 7,00 | 0,53 | 13,13 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,25 | 0,42 | 0,44 | - | 11 | 5,4 |
| 4,60 | 10,00 | 0,47 | 21,43 | argilla inorg. media | coesiva | 0,90 | 0,44 | 0,61 | - | 40 | 7,7 |
| 4,80 | 10,00 | 0,47 | 21,43 | argilla inorg. media | coesiva | 0,90 | 0,46 | 0,61 | - | 40 | 7,4 |
| 5,00 | 9,00 | 0,53 | 16,88 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,88 | 0,47 | 0,55 | - | 39 | 6,2 |
| 5,20 | 8,00 | 0,47 | 17,14 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,86 | 0,49 | 0,49 | - | 37 | 5,2 |
| 5,40 | 7,00 | 0,40 | 17,50 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,84 | 0,51 | 0,44 | - | 35 | 4,3 |
| 5,60 | 9,00 | 0,53 | 16,88 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,88 | 0,52 | 0,55 | - | 39 | 5,5 |
| 5,80 | 10,00 | 0,53 | 18,75 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,90 | 0,54 | 0,61 | - | 40 | 5,9 |
| 6,00 | 11,00 | 0,60 | 18,33 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,90 | 0,56 | 0,66 | - | 42 | 6,3 |
| 6,20 | 9,00 | 0,67 | 13,50 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,88 | 0,58 | 0,55 | - | 39 | 4,8 |
| 6,40 | 12,00 | 0,87 | 13,85 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,90 | 0,60 | 0,71 | - | 45 | 6,4 |
| 6,60 | 14,00 | 0,87 | 16,15 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,91 | 0,61 | 0,82 | - | 48 | 7,4 |
| 6,80 | 14,00 | 0,93 | 15,00 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,91 | 0,63 | 0,82 | - | 48 | 7,1 |
| 7,00 | 15,00 | 0,87 | 17,31 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,91 | 0,65 | 0,87 | - | 50 | 7,4 |
| 7,20 | 14,00 | 0,53 | 26,25 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 0,91 | 0,67 | 0,82 | - | 48 | 6,6 |
| 7,40 | 10,00 | 0,73 | 13,64 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,90 | 0,69 | 0,61 | - | 40 | 4,4 |
| 7,60 | 11,00 | 0,80 | 13,75 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,90 | 0,70 | 0,66 | - | 42 | 4,7 |
| 7,80 | 11,00 | 0,73 | 15,00 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,90 | 0,72 | 0,66 | - | 42 | 4,6 |
| 8,00 | 10,00 | 0,73 | 13,64 | argilla organica e terreni misti | coesiva | 0,90 | 0,74 | 0,61 | - | 40 | 4,0 |
| 8,20 | 15,00 | 0,80 | 18,75 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,91 | 0,76 | 0,87 | - | 50 | 6,1 |
| 8,40 | 16,00 | 1,00 | 16,00 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,91 | 0,78 | 0,92 | - | 52 | 6,3 |
| 8,60 | 15,00 | 0,87 | 17,31 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,91 | 0,80 | 0,87 | - | 50 | 5,7 |
| 8,80 | 18,00 | 0,80 | 22,50 | argilla inorg. compatta | coesiva | 0,92 | 0,81 | 1,02 | - | 56 | 6,8 |
| 9,00 | 23,00 | 1,40 | 16,43 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,94 | 0,83 | 1,13 | - | 69 | 7,5 |
| 9,20 | 27,00 | 1,60 | 16,88 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,96 | 0,85 | 1,23 | - | 81 | 8,1 |
| 9,40 | 27,00 | 1,60 | 16,88 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,96 | 0,87 | 1,23 | - | 81 | 7,9 |
| 9,60 | 26,00 | 1,80 | 14,44 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,96 | 0,89 | 1,18 | - | 78 | 7,3 |
| 9,80 | 27,00 | 1,73 | 15,58 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,96 | 0,91 | 1,23 | - | 81 | 7,5 |
| 10,00 | 32,00 | 1,87 | 17,14 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,99 | 0,93 | 1,33 | - | 96 | 8,1 |
| 10,20 | 38,00 | 1,93 | 19,66 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,03 | 0,95 | 1,58 | - | 114 | 9,7 |
| 10,40 | 35,00 | 1,87 | 18,75 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,01 | 0,97 | 1,46 | - | 105 | 8,6 |
| 10,60 | 30,00 | 1,87 | 16,07 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,98 | 0,99 | 1,25 | - | 90 | 6,9 |
| 10,80 | 28,00 | 1,93 | 14,48 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,97 | 1,01 | 1,27 | - | 84 | 6,9 |
| 11,00 | 32,00 | 2,07 | 15,48 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,99 | 1,03 | 1,33 | - | 96 | 7,1 |
| 11,20 | 34,00 | 1,27 | 26,84 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,00 | 1,05 | 1,42 | - | 102 | 7,5 |
| 11,40 | 35,00 | 1,73 | 20,19 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,01 | 1,07 | 1,46 | - | 105 | 7,6 |
| 11,60 | 36,00 | 2,00 | 18,00 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,02 | 1,09 | 1,50 | - | 108 | 7,7 |
| 11,80 | 35,00 | 2,07 | 16,94 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,01 | 1,11 | 1,46 | - | 105 | 7,2 |
| 12,00 | 36,00 | 2,07 | 17,42 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,02 | 1,13 | 1,50 | - | 108 | 7,3 |
| 12,20 | 38,00 | 1,87 | 20,36 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,03 | 1,15 | 1,58 | - | 114 | 7,7 |
| 12,40 | 31,00 | 1,87 | 16,61 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,99 | 1,17 | 1,29 | - | 93 | 5,8 |
| 12,60 | 34,00 | 2,00 | 17,00 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,00 | 1,19 | 1,42 | - | 102 | 6,4 |
| 12,80 | 30,00 | 1,87 | 16,07 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,98 | 1,21 | 1,25 | - | 90 | 5,4 |
| 13,00 | 30,00 | 1,93 | 15,52 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,98 | 1,23 | 1,25 | - | 90 | 5,2 |
| 13,20 | 35,00 | 2,13 | 16,41 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,01 | 1,25 | 1,46 | - | 105 | 6,2 |
| 13,40 | 42,00 | 2,07 | 20,32 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,04 | 1,27 | 1,75 | - | 126 | 7,7 |
| 13,60 | 44,00 | 2,13 | 20,63 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,04 | 1,29 | 1,83 | - | 132 | 8,0 |
| 13,80 | 41,00 | 2,20 | 18,64 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,04 | 1,31 | 1,71 | - | 123 | 7,1 |
| 14,00 | 36,00 | 2,33 | 15,43 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,02 | 1,33 | 1,50 | - | 108 | 6,0 |
| 14,20 | 35,00 | 2,40 | 14,58 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,01 | 1,35 | 1,46 | - | 105 | 5,6 |
| 14,40 | 37,00 | 2,47 | 15,00 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,02 | 1,37 | 1,54 | - | 111 | 5,9 |
| 14,60 | 35,00 | 2,47 | 14,19 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,01 | 1,39 | 1,46 | - | 105 | 5,4 |
| 14,80 | 44,00 | 2,47 | 17,84 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,04 | 1,41 | 1,83 | - | 132 | 7,1 |
| 15,00 | 37,00 | 2,73 | 13,54 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,02 | 1,43 | 1,54 | - | 111 | 5,6 |
| 15,20 | 35,00 | 2,20 | 15,91 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,01 | 1,45 | 1,46 | - | 105 | 5,2 |
| 15,40 | 32,00 | 2,20 | 14,55 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,99 | 1,47 | 1,33 | - | 96 | 4,5 |
| 15,60 | 30,00 | 2,20 | 13,64 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,98 | 1,49 | 1,25 | - | 90 | 4,1 |
| 15,80 | 32,00 | 1,87 | 17,14 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,99 | 1,51 | 1,33 | - | 96 | 4,4 |
| 16,00 | 32,00 | 1,80 | 17,78 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,99 | 1,53 | 1,33 | - | 96 | 4,3 |
| 16,20 | 27,00 | 1,80 | 15,00 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,96 | 1,55 | 1,23 | - | 81 | 3,8 |
| 16,40 | 24,00 | 1,60 | 15,00 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,94 | 1,57 | 1,13 | - | 72 | 3,4 |
| 16,60 | 25,00 | 1,40 | 17,86 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,95 | 1,59 | 1,14 | - | 75 | 3,4 |
| 16,80 | 26,00 | 1,40 | 18,57 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,96 | 1,61 | 1,18 | - | 78 | 3,5 |
| 17,00 | 27,00 | 2,07 | 13,06 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,96 | 1,63 | 1,23 | - | 81 | 3,6 |
| 17,20 | 31,00 | 2,40 | 12,92 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 0,99 | 1,65 | 1,29 | - | 93 | 3,8 |
| 17,40 | 67,00 | 2,20 | 30,45 | sabbia e limo argilloso | granulare | 0,95 | 1,67 | - | 32 | 201 | - |
| 17,60 | 81,00 | 2,93 | 27,61 | sabbia e limo argilloso | granulare | 0,97 | 1,69 | - | 32 | 243 | - |
| 17,80 | 101,00 | 2,33 | 43,29 | sabbia e limo argilloso | granulare | 1,00 | 1,71 | - | 35 | 303 | - |
| 18,00 | 122,00 | 2,07 | 59,03 | sabbia densa o compatta | granulare | 1,04 | 1,73 | - | 35 | 366 | - |
| 18,20 | 111,00 | 2,20 | 50,45 | sabbia densa o compatta | granulare | 1,02 | 1,75 | - | 34 | 333 | - |
| 18,40 | 88,00 | 2,27 | 38,82 | sabbia e limo argilloso | granulare | 0,98 | 1,77 | - | 33 | 264 | - |
| 18,60 | 97,00 | 2,33 | 41,57 | sabbia e limo argilloso | granulare | 1,00 | 1,79 | - | 34 | 291 | - |
| 18,80 | 92,00 | 1,80 | 51,11 | sabbia | granulare | 0,99 | 1,81 | - | 33 | 276 | - |
| 19,00 | 87,00 | 1,80 | 48,33 | sabbia | granulare | 0,98 | 1,83 | - | 33 | 261 | - |
| 19,20 | 77,00 | 2,53 | 30,39 | sabbia e limo argilloso | granulare | 0,96 | 1,85 | - | 32 | 231 | - |
| 19,40 | 44,00 | 1,93 | 22,76 | argilla sabbiosa e limosa | coesiva | 1,04 | 1,87 | 1,83 | - | 132 | 5,0 |
| 19,60 | 35,00 | 2,27 | 15,44 | argilla inorg. molto compatta | coesiva | 1,01 | 1,89 | 1,46 | - | 105 | 3,7 |
| 19,80 | 47,00 | 1,53 | 30,65 | sabbia e limo argilloso | granulare | 0,91 | 1,91 | - | 31 | 141 | - |
| 20,00 | - | - | - | non rilevato | - | 1,85 | - | - | - | - | - |
| Prof. (m) | Rp Kg/cm ² | Rf Kg/cm ² | Rp/Rf | Litologia secondo Schmertmann | Natura | γ (t/m ³) | tens. eff. (Kg/cm ²) | C u (Kg/cm ²) | ϕ | Mo (Kg/cm ²) | OCR |

PROVA PENETROMETRICA STATICA CPT

1

Committente: Manderioli Alberto

Località: Via Marconi - Cento (FE)

Data: 13/01/2015

Profondità falda (m): 1,40 Quota inizio: p.c.

| Prof. (m) | lettura di punta | lettura lat. | Rp (Kg/cm ²) | Rl (Kg/cm ²) | Rp/Rl | Litologia secondo Begemann, (Raccomandazioni AGI, 1977) |
|-----------|------------------|--------------|--------------------------|--------------------------|-------|---|
| 0,20 | | | 0,00 | 1,27 | 0,00 | torbe ed argille organiche |
| 0,40 | 15,00 | 34,00 | 15,00 | 0,60 | 25,00 | limi ed argille |
| 0,60 | 26,00 | 35,00 | 26,00 | 1,40 | 18,57 | limi ed argille |
| 0,80 | 35,00 | 56,00 | 35,00 | 2,07 | 16,94 | limi ed argille |
| 1,00 | 34,00 | 65,00 | 34,00 | 2,00 | 17,00 | limi ed argille |
| 1,20 | 36,00 | 66,00 | 36,00 | 1,60 | 22,50 | limi ed argille |
| 1,40 | 13,00 | 37,00 | 13,00 | 1,27 | 10,26 | torbe ed argille organiche |
| 1,60 | 14,00 | 33,00 | 14,00 | 0,80 | 17,50 | limi ed argille |
| 1,80 | 11,00 | 23,00 | 11,00 | 0,60 | 18,33 | limi ed argille |
| 2,00 | 14,00 | 23,00 | 14,00 | 0,60 | 23,33 | limi ed argille |
| 2,20 | 12,00 | 21,00 | 12,00 | 0,53 | 22,50 | limi ed argille |
| 2,40 | 13,00 | 21,00 | 13,00 | 0,60 | 21,67 | limi ed argille |
| 2,60 | 12,00 | 21,00 | 12,00 | 0,80 | 15,00 | torbe ed argille organiche |
| 2,80 | 11,00 | 23,00 | 11,00 | 0,80 | 13,75 | torbe ed argille organiche |
| 3,00 | 12,00 | 24,00 | 12,00 | 0,73 | 16,36 | limi ed argille |
| 3,20 | 10,00 | 21,00 | 10,00 | 0,40 | 25,00 | limi ed argille |
| 3,40 | 6,00 | 12,00 | 6,00 | 0,33 | 18,00 | limi ed argille |
| 3,60 | 7,00 | 12,00 | 7,00 | 0,33 | 21,00 | limi ed argille |
| 3,80 | 4,00 | 9,00 | 4,00 | 0,33 | 12,00 | torbe ed argille organiche |
| 4,00 | 3,00 | 8,00 | 3,00 | 0,40 | 7,50 | torbe ed argille organiche |
| 4,20 | 6,00 | 12,00 | 6,00 | 0,47 | 12,86 | torbe ed argille organiche |
| 4,40 | 7,00 | 14,00 | 7,00 | 0,53 | 13,13 | torbe ed argille organiche |
| 4,60 | 10,00 | 18,00 | 10,00 | 0,47 | 21,43 | limi ed argille |
| 4,80 | 10,00 | 17,00 | 10,00 | 0,47 | 21,43 | limi ed argille |
| 5,00 | 9,00 | 16,00 | 9,00 | 0,53 | 16,88 | limi ed argille |
| 5,20 | 8,00 | 16,00 | 8,00 | 0,47 | 17,14 | limi ed argille |
| 5,40 | 7,00 | 14,00 | 7,00 | 0,40 | 17,50 | limi ed argille |
| 5,60 | 9,00 | 15,00 | 9,00 | 0,53 | 16,88 | limi ed argille |
| 5,80 | 10,00 | 18,00 | 10,00 | 0,53 | 18,75 | limi ed argille |
| 6,00 | 11,00 | 19,00 | 11,00 | 0,60 | 18,33 | limi ed argille |
| 6,20 | 9,00 | 18,00 | 9,00 | 0,67 | 13,50 | torbe ed argille organiche |
| 6,40 | 12,00 | 22,00 | 12,00 | 0,87 | 13,85 | torbe ed argille organiche |
| 6,60 | 14,00 | 27,00 | 14,00 | 0,87 | 16,15 | limi ed argille |
| 6,80 | 14,00 | 27,00 | 14,00 | 0,93 | 15,00 | torbe ed argille organiche |
| 7,00 | 15,00 | 29,00 | 15,00 | 0,87 | 17,31 | limi ed argille |
| 7,20 | 14,00 | 27,00 | 14,00 | 0,53 | 26,25 | limi ed argille |
| 7,40 | 10,00 | 18,00 | 10,00 | 0,73 | 13,64 | torbe ed argille organiche |
| 7,60 | 11,00 | 22,00 | 11,00 | 0,80 | 13,75 | torbe ed argille organiche |
| 7,80 | 11,00 | 23,00 | 11,00 | 0,73 | 15,00 | torbe ed argille organiche |
| 8,00 | 10,00 | 21,00 | 10,00 | 0,73 | 13,64 | torbe ed argille organiche |
| 8,20 | 15,00 | 26,00 | 15,00 | 0,80 | 18,75 | limi ed argille |
| 8,40 | 16,00 | 28,00 | 16,00 | 1,00 | 16,00 | limi ed argille |
| 8,60 | 15,00 | 30,00 | 15,00 | 0,87 | 17,31 | limi ed argille |
| 8,80 | 18,00 | 31,00 | 18,00 | 0,80 | 22,50 | limi ed argille |
| 9,00 | 23,00 | 35,00 | 23,00 | 1,40 | 16,43 | limi ed argille |
| 9,20 | 27,00 | 48,00 | 27,00 | 1,60 | 16,88 | limi ed argille |
| 9,40 | 27,00 | 51,00 | 27,00 | 1,60 | 16,88 | limi ed argille |
| 9,60 | 26,00 | 50,00 | 26,00 | 1,80 | 14,44 | torbe ed argille organiche |
| 9,80 | 27,00 | 54,00 | 27,00 | 1,73 | 15,58 | limi ed argille |
| 10,00 | 32,00 | 58,00 | 32,00 | 1,87 | 17,14 | limi ed argille |
| 10,20 | 38,00 | 66,00 | 38,00 | 1,93 | 19,66 | limi ed argille |
| 10,40 | 35,00 | 64,00 | 35,00 | 1,87 | 18,75 | limi ed argille |
| 10,60 | 30,00 | 58,00 | 30,00 | 1,87 | 16,07 | limi ed argille |
| 10,80 | 28,00 | 56,00 | 28,00 | 1,93 | 14,48 | torbe ed argille organiche |
| 11,00 | 32,00 | 61,00 | 32,00 | 2,07 | 15,48 | limi ed argille |
| 11,20 | 34,00 | 65,00 | 34,00 | 1,27 | 26,84 | limi ed argille |
| 11,40 | 35,00 | 54,00 | 35,00 | 1,73 | 20,19 | limi ed argille |
| 11,60 | 36,00 | 62,00 | 36,00 | 2,00 | 18,00 | limi ed argille |
| 11,80 | 35,00 | 65,00 | 35,00 | 2,07 | 16,94 | limi ed argille |
| 12,00 | 36,00 | 67,00 | 36,00 | 2,07 | 17,42 | limi ed argille |
| 12,20 | 38,00 | 69,00 | 38,00 | 1,87 | 20,36 | limi ed argille |
| 12,40 | 31,00 | 59,00 | 31,00 | 1,87 | 16,61 | limi ed argille |
| 12,60 | 34,00 | 62,00 | 34,00 | 2,00 | 17,00 | limi ed argille |
| 12,80 | 30,00 | 60,00 | 30,00 | 1,87 | 16,07 | limi ed argille |
| 13,00 | 30,00 | 58,00 | 30,00 | 1,93 | 15,52 | limi ed argille |
| 13,20 | 35,00 | 64,00 | 35,00 | 2,13 | 16,41 | limi ed argille |
| 13,40 | 42,00 | 74,00 | 42,00 | 2,07 | 20,32 | limi ed argille |
| 13,60 | 44,00 | 75,00 | 44,00 | 2,13 | 20,63 | limi ed argille |
| 13,80 | 41,00 | 73,00 | 41,00 | 2,20 | 18,64 | limi ed argille |
| 14,00 | 36,00 | 69,00 | 36,00 | 2,33 | 15,43 | limi ed argille |
| 14,20 | 35,00 | 70,00 | 35,00 | 2,40 | 14,58 | torbe ed argille organiche |
| 14,40 | 37,00 | 73,00 | 37,00 | 2,47 | 15,00 | torbe ed argille organiche |
| 14,60 | 35,00 | 72,00 | 35,00 | 2,47 | 14,19 | torbe ed argille organiche |
| 14,80 | 44,00 | 81,00 | 44,00 | 2,47 | 17,84 | limi ed argille |
| 15,00 | 37,00 | 74,00 | 37,00 | 2,73 | 13,54 | torbe ed argille organiche |
| 15,20 | 35,00 | 76,00 | 35,00 | 2,20 | 15,91 | limi ed argille |
| 15,40 | 32,00 | 65,00 | 32,00 | 2,20 | 14,55 | torbe ed argille organiche |
| 15,60 | 30,00 | 63,00 | 30,00 | 2,20 | 13,64 | torbe ed argille organiche |
| 15,80 | 32,00 | 65,00 | 32,00 | 1,87 | 17,14 | limi ed argille |
| 16,00 | 32,00 | 60,00 | 32,00 | 1,80 | 17,78 | limi ed argille |
| 16,20 | 27,00 | 54,00 | 27,00 | 1,80 | 15,00 | torbe ed argille organiche |
| 16,40 | 24,00 | 51,00 | 24,00 | 1,60 | 15,00 | torbe ed argille organiche |
| 16,60 | 25,00 | 49,00 | 25,00 | 1,40 | 17,86 | limi ed argille |
| 16,80 | 26,00 | 47,00 | 26,00 | 1,40 | 18,57 | limi ed argille |
| 17,00 | 27,00 | 48,00 | 27,00 | 2,07 | 13,06 | torbe ed argille organiche |
| 17,20 | 31,00 | 62,00 | 31,00 | 2,40 | 12,92 | torbe ed argille organiche |
| 17,40 | 67,00 | 103,00 | 67,00 | 2,20 | 30,45 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 17,60 | 81,00 | 114,00 | 81,00 | 2,93 | 27,61 | limi ed argille |
| 17,80 | 101,00 | 145,00 | 101,00 | 2,33 | 43,29 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 18,00 | 122,00 | 157,00 | 122,00 | 2,07 | 59,03 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 18,20 | 111,00 | 142,00 | 111,00 | 2,20 | 50,45 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 18,40 | 88,00 | 121,00 | 88,00 | 2,27 | 38,82 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 18,60 | 97,00 | 131,00 | 97,00 | 2,33 | 41,57 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 18,80 | 92,00 | 127,00 | 92,00 | 1,80 | 51,11 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 19,00 | 87,00 | 114,00 | 87,00 | 1,80 | 48,33 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 19,20 | 77,00 | 104,00 | 77,00 | 2,53 | 30,39 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 19,40 | 44,00 | 82,00 | 44,00 | 1,93 | 22,76 | limi ed argille |
| 19,60 | 35,00 | 64,00 | 35,00 | 2,27 | 15,44 | limi ed argille |
| 19,80 | 47,00 | 81,00 | 47,00 | 1,53 | 30,65 | limi sabbiosi e sabbie limose |
| 20,00 | 31,00 | 54,00 | - | - | - | non rilevato |
| Prof. (m) | lettura di punta | lettura lat. | Rp (Kg/cm ²) | Rl (Kg/cm ²) | Rp/Rl | Litologia secondo Begemann, (Raccomandazioni AGI, 1977) |

ALLEGATO 2

Rapporto tecnico: Indagine MASW e REMI

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

| | |
|---------------------|--|
| Committente: | Studio Geologico Tecnico Dott. Geol Andrea Diegoli |
| Località: | Via Marconi, 12 – Cento (FE) |
| Indagine: | indagine geofisica con la metodologia MASW e REMI |

RAPPORTO TECNICO

| | | | | | |
|-------------------|----------|-------------------|---------|-------------|-----------|
| Codice Documento: | | Numero Pagine: 13 | | | |
| Rev. | Data | Descrizione | Redatto | Controllato | Approvato |
| A | 15_01_15 | Emissione | SB | MA | SB |

STUDIO BOZZOLAN

Via Matteotti, 8 – 45012 Ariano nel Polesine (RO)

Mobile: +39 333 58 63 494

email: geosimone75@hotmail.com

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

INDICE GENERALE

| | |
|--|----|
| 1.PREMESSA..... | 3 |
| 2.DESCRIZIONE GENERALE DELLA PROCEDURA MASW..... | 4 |
| 2.1ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI..... | 4 |
| 2.2STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA DI INDAGINE..... | 6 |
| 3.RISULTATI DELL'INDAGINE SISMICA..... | 8 |
| 3.1RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI INDAGINE ATTIVA..... | 8 |
| 3.2RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI INDAGINE PASSIVA..... | 9 |
| 3.3RAPPRESENTAZIONE DELLA CURVA DI DISPERSIONE SPERIMENTALE..... | 10 |
| | 10 |
| 3.4ANALISI DEL PROFILO DELLE VELOCITA'..... | 10 |
| 3.5DETERMINAZIONE DELLE VS30 E DELLA CATEGORIA DI SUOLO..... | 12 |
| 4.CONCLUSIONI..... | 13 |

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

1. PREMESSA

Lo scrivente, su incarico dello Studio Geologico Tecnico del Dott. Geol. Andrea Diegoli ha eseguito in data 13 Gennaio 2015 un'indagine sismica mediante il metodo MASW attivo e passivo presso civile abitazione sita in Via Marconi, 12 – Cento (FE)

L'indagine è consistita nell'esecuzione di n°1 stendimenti sismici con metodologia MASW per la determinazione del profilo verticale delle onde di taglio e del valore Vs30, necessario per la classificazione dei terreni di fondazione degli interventi in progetto nelle categorie di suolo descritte al paragrafo 3.2.2 delle N.T.C. 2008 "D.M. 14/01/2008" e dall'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio ", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per pianificazione territoriale e urbanistica" (Proposta della Giunta Regionale in data 10 gennaio 2007, n.1) della Regione Emilia Romagna.

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

2. DESCRIZIONE GENERALE DELLA PROCEDURA MASW

2.1 ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI

Il metodo MASW è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

Le onde di Rayleigh sono generate dall'interazione tra le onde di pressione e le onde di taglio verticali ogni qualvolta esiste una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo. Alla superficie libera hanno un moto ellittico retrogrado (antiorario) che si inverte ad una profondità di $\lambda/2\pi$. In un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo, le onde di Rayleigh non presentano dispersione e la velocità di propagazione è indipendente dalla frequenza e il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente, sino ad estinguersi ad una profondità pari circa ad una lunghezza d'onda. Da questo deriva che la profondità raggiunta dipende dalla lunghezza d'onda, e che, a diverse lunghezze d'onda corrisponde la stessa velocità di fase. La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è stata descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).



Figura 2 – Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto alla direzione di propagazione dell'onda

In un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito cioè da strati aventi proprietà

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

meccaniche differenti, le onde superficiali mostrano un carattere fortemente dispersivo, cioè onde con diverse lunghezze viaggiano con diverse velocità di fase e di gruppo (Achenbah, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980). Ciò significa che lunghezze d'onda diverse interessano strati differenti ai quali sono associate proprietà meccaniche diverse: ogni lunghezza d'onda si propaga ad una velocità di fase che dipende dalle caratteristiche dello strato interessato dalla propagazione; onde ad alta frequenza (con lunghezza d'onda corta) si propagano negli strati più superficiali mentre onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi.

Per ottenere un profilo delle Vs bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. I dati acquisiti vengono sottoposti successivamente ad una fase di processing che consente di stimare la curva di dispersione (curva apparente derivante dalla sovrapposizione delle curve relative ai vari modi di vibrazione) caratteristica del sito in oggetto, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza.

Esistono diverse tecniche per estrarre dai sismogrammi acquisiti le caratteristiche dispersive del sito.

La metodologia più diffusa è l'analisi spettrale nel dominio f-k (frequenza-numero d'onda). I dati sismici registrati vengono sottoposti ad una doppia trasformata di Fourier che consente di passare dal dominio x-t (spazio-tempo) al dominio f-k. Lo spettro f-k del segnale consente di ottenere una curva di dispersione per le onde di Rayleigh, nell'ipotesi che nell'intervallo di frequenze analizzato le onde che si propagano con il maggior contenuto di energia siano proprio le onde di Rayleigh e che le caratteristiche del sito siano tali da consentire la propagazione delle onde superficiali e un comportamento dispersivo delle stesse. La velocità delle onde di Rayleigh è infatti associata ai massimi dello spettro f-k; si può così ottenere una curva di dispersione individuando ad ogni frequenza un picco spettrale al quale è associato un numero d'onda k e quindi una velocità delle onde di Rayleigh V_r determinabile in base alla teoria delle onde dalla relazione:

$$V_r(f) = 2\pi f/k$$

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

Riportando le coppie di valori V_r - f in un grafico si ottiene la curva di dispersione utilizzabile nella successiva fase di inversione. La fase di inversione deve essere preceduta da una parametrizzazione del sottosuolo, che viene di norma schematizzato come un mezzo visco-elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati. Il processo di inversione è iterativo: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, il problema diretto viene risolto diverse volte variando i parametri che definiscono il modello. Il processo termina quando viene individuato quel set di parametri di modello che minimizza la differenza tra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione sintetica). Il processo di inversione si basa su algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati che consentono di automatizzare la procedura.

Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte) hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S (V_s) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

2.2 STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA DI INDAGINE

Il metodo di indagine MASW adottato si distingue in:

- Attivo (MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves): i geofoni rilevano le onde superficiali, prodotte da una sorgente impulsiva (massa battente) disposta a piano campagna, che vengono registrate da uno stendimento lineare composto da numerosi ricevitori posti a breve distanza; le frequenze che interessano l'analisi sono generalmente comprese tra 5 e 70 Hz;
- Passivo (REMI - Refractor Microtremor): i geofoni rilevano il rumore naturale (o di fondo); analizza generalmente le frequenze tra 0 e 10 Hz.

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

La campagna di acquisizione sismica è stata svolta utilizzando un acquisitore sismico della Sara Electronics Instruments, denominato DoReMi, composto da:

- due serie di cavi da 12 canali ciascuno, per un totale di 24 canali (frequenze variabili di acquisizione di ciascun canale da 200 a 20000 Hz);
- registratore sismico, posizionato in corrispondenza di ogni geofono, per la memorizzazione del dato ricevuto dal sensore e l'invio in modalità digitale al PC;
- convertitore analogico digitale di tipo SAR a 16 bit con una dinamica di 88dB a 10000Hz,;
- interfaccia RS232 sismografo – PC

L'acquisizione dei dati sismici è così avvenuta:

- metodo attivo: è stata effettuata 1 stesa sismica con passo intergeofonico di 1 metro e 16 geofoni ubicata come dalla planimetria riportata di seguito. Si sono acquisiti vari shot in modo da avere un maggior set di dati e poter scegliere quelli più adatti alla successiva elaborazione. La frequenza propria dei sensori è la classica e raccomandata per tale tipologia di indagini (4,5 Hz).
- metodo passivo: sulla stessa stesa utilizzata per il metodo attivo si sono realizzate 3 acquisizioni di sismica passiva, di un minuto ciascuna, concatenate, in fase di pre-processing, in un unico file di 3 minuti, in modo da colmare il "vuoto" alle basse frequenze della sismica attiva.



Figura 3 – Ubicazione profilo sismico (linea rossa)

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

3. RISULTATI DELL'INDAGINE SISMICA

3.1 RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI INDAGINE ATTIVA

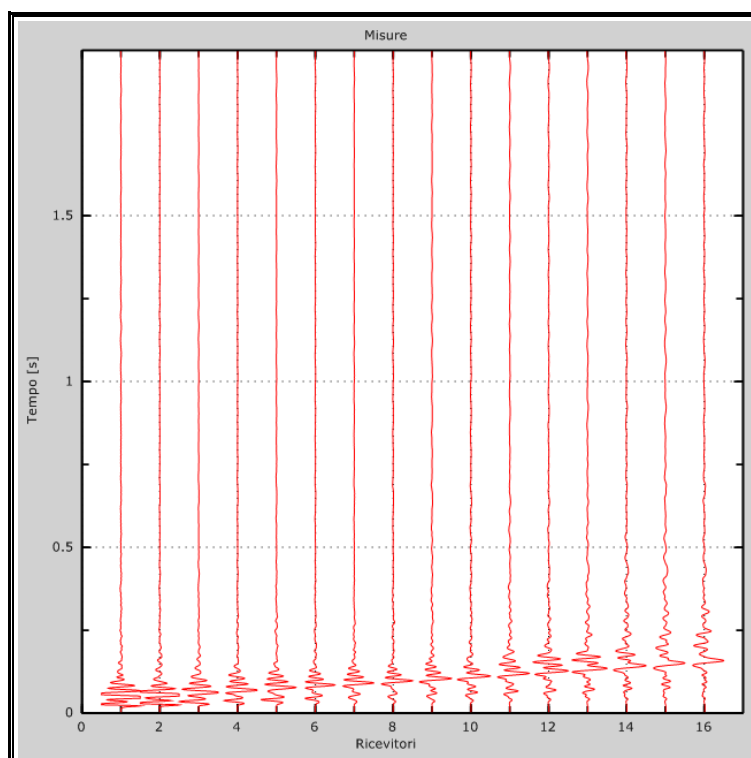


Figura 4 – Tracce sperimentali indagine attiva

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

3.2 RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI INDAGINE PASSIVA

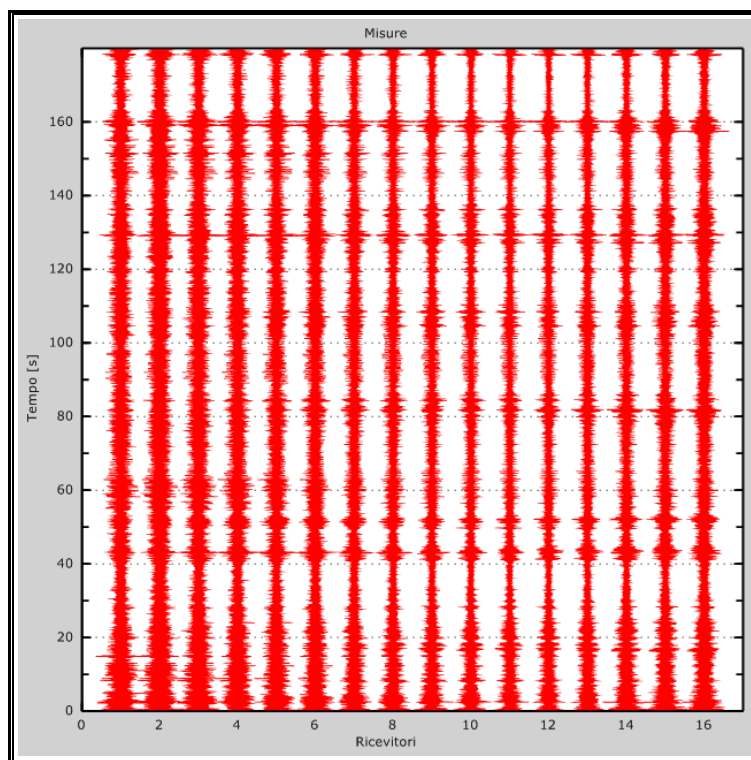


Figura 5 - tracce sperimentali indagine passiva

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

3.3 RAPPRESENTAZIONE DELLA CURVA DI DISPERSIONE SPERIMENTALE

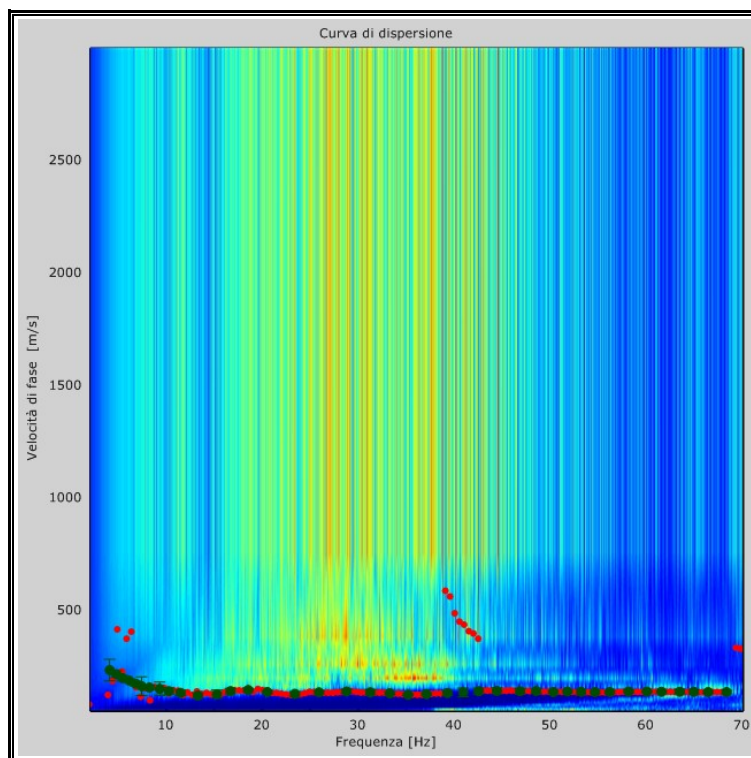


Figura 6 - Curva di dispersione sperimentale

3.4 ANALISI DEL PROFILO DELLE VELOCITA'

Dall'esecuzione dell'indagine sismica è emersa la seguente successione della velocità delle onde sismiche.

| Strato | h [m] | z [m] | Vs fin. [m/s] | Vp [m/s] | Falda (S/N) |
|----------|-------|-------|---------------|----------|-------------|
| Strato 1 | 2,0 | -2,0 | 153 | 318 | N |
| Strato 2 | 1,0 | -3,0 | 120 | 612 | S |
| Strato 3 | 1,0 | -4,0 | 169 | 862 | S |
| Strato 4 | 1,0 | -5,0 | 117 | 597 | S |
| Strato 5 | 4,0 | -9,0 | 155 | 790 | S |
| Strato 6 | 4,8 | -13,8 | 189 | 964 | S |
| Strato 7 | 4,5 | -18,3 | 222 | 1132 | S |
| Strato 8 | 6,0 | -24,3 | 243 | 1239 | S |
| Strato 9 | / | -∞ | 289 | 1474 | S |

Di seguito si riportano le immagini relative alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh e del modello che ne deriva previa inversione dei dati.

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

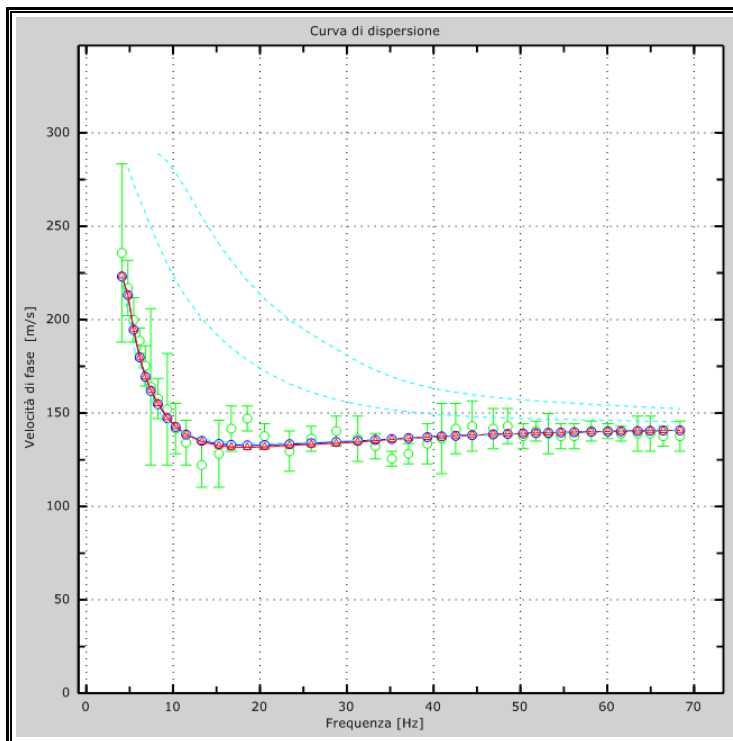


Figura 7 - Velocità numeriche
(Punti sperimentali - verde, modi di Rayleigh - ciano, curva apparente - blu, curva numerica – rosso)

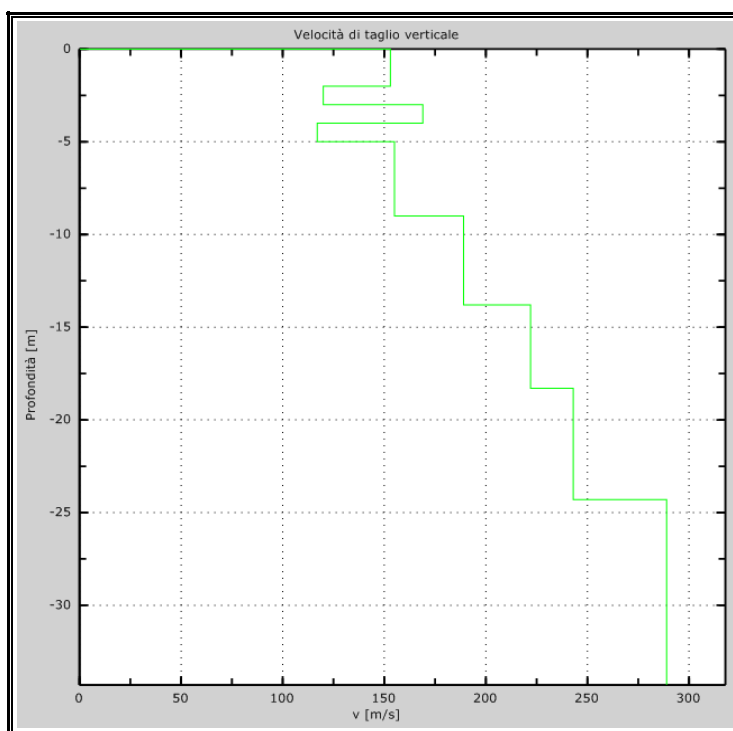


Figura 8 – Profilo verticale di velocità delle Vs

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

3.5 DETERMINAZIONE DELLE VS30 E DELLA CATEGORIA DI SUOLO

L'indagine sismica, considerando la sismostratigrafia fino alla profondità di -30,00 metri da p.c., ha permesso la determinazione della velocità delle V_{s30} , ricavata dalla formula riportata nel D.M. del 14 Gennaio 2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni":

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

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.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore:

$$\underline{V_{s30} = 197 \text{ m/s}}$$

I terreni di fondazione interessati dalla progettazione sismica, come prescritto al paragrafo 3.2.2 dal D.M. 14 Gennaio 2008, appartengono a:

suolo di fondazione di tipo C

ovvero, come definito in Tabella 3.2.II (Categorie di sottosuolo): Tipo C: Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, 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 (ovvero $15 < NSPT30 < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu30 < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

STUDIO BOZZOLAN

INDAGINI GEOFISICHE – CONSULENZA AMBIENTALE

4. CONCLUSIONI

L'investigazione sismica ha permesso di individuare la velocità delle onde S nei primi 30 metri di profondità nel sito indagato. Dall'analisi ed elaborazione dei dati è emerso che la Vs 30 in corrispondenza del profilo sismico analizzato è tipica di suoli di tipo C.

Si sottolinea che il suolo, se alla verifica alla liquefazione o per notizie storiche, dovesse risultare liquefacibile, passerebbe dalla categoria C alla categoria S2. L'indicazione della categoria di suolo si riferisce al solo valore di Vs 30 misurata e la classificazione è valida una volta che si sia esclusa l'appartenenza a suoli di tipo S2.