

COMUNE DI OZZANO
DELL'EMILIA
Città Metropolitana di Bologna



RESPONSABILE
DEL PROCEDIMENTO
Dott.sa Maura Tassinari
Responsabile Settore
Programmazione del Territorio

POC

PIANO OPERATIVO COMUNALE

(L.R. 24 marzo 2000, n. 20 – art. 30)

“POC Arcipelago AUC5”

PROGETTISTA
STUDIO TESTONI ARCHITETTI
Arch. Testoni Luca



STUDIO TESTONI
Geom. Vittorio Testoni _ Arch. Luca Testoni
Ozzano dell'Emilia_Fosse Ardeatine 3

ELABORATO

04

Relazione Geologica/Sismica

Versione	File nome	Scala	Formato
ADOZIONE			
<i>Adozione</i>	<i>Approvazione</i>		
D.C.C. . nr. del / /	D.C.C. nr. del / /	n.a.	A4

INDICE

1 Premessa	2
2 Normativa di riferimento	3
3 Inquadramento geologico generale	4
3.1 Caratteri stratigrafici, litologici e morfologici	4
3.2 Caratteri idrologici superficiali e sotterranei	6
3.3 Caratteristiche tettonico-strutturali e sismogenetiche del territorio	10
3.4 Storia sismica del territorio	11
3.5 Sintesi di quanto riportato dagli strumenti di pianificazione	12
4 Indagini geognostiche	16
4.1 Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT).....	16
4.2 Indagine geofisica MASW/Re.Mi.....	19
4.3 Indagine geofisica HVSR	20
5 Assetto litostratigrafico e parametrizzazione fisico-meccanica dei terreni	23
6 Caratterizzazione sismica del sito	30
6.1 Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche	30
6.1.1 Amplificazione stratigrafica e topografica	32
6.2 Considerazioni in merito alle frequenze del sottosuolo	34
6.3 Il fenomeno della liquefazione.....	35
6.3.1 Criteri di previsione e metodi per la valutazione del potenziale di liquefazione.....	35
6.3.2 Valutazione del rischio di liquefazione dei terreni.....	37
7 Conclusioni	37

RELAZIONE GEOLOGICA

1 Premessa

Su incarico dello Studio Testoni di Architettura è stata redatta la presente relazione geologica preliminare riguardante le risultanze di una campagna di indagini svolta presso l'Ambito AUC5 del Comune di Ozzano dell'Emilia, ubicato in via F.lli Cervi: in particolare, lo studio di cui al presente documento è stato redatto a supporto della Valutazione di Sostenibilità Ambientale e Territoriale (VALSAT) avente come oggetto il succitato ambito AUC5 e riguardante la proposta di realizzazione al suo interno di n.2 nuovi fabbricati residenziali.

In allegato, si riportano un estratto della Carta Tecnica Regionale ed uno della Carta Geologica, entrambi in scala 1:5.000, sui quali è evidenziata la posizione del sito interessato dall'indagine di cui al presente documento.

Lo studio è stato svolto mediante la consultazione delle cartografie tematiche disponibili in letteratura, nonché di quanto riportato dagli strumenti di pianificazione territoriale vigenti e territorialmente competenti.

Direttamente in sito è stata realizzata una campagna di indagini geognostiche articolatasi nella realizzazione di:

- n. 2 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- n.1 indagine geofisica condotta con metodologia MASW/Re.Mi;
- n.2 indagini tromografiche condotte con metodologia HVSR a stazione singola.

Va sottolineato che tale campagna dovrà essere integrata, in sede di progettazione esecutiva degli interventi, mediante la realizzazione di ulteriori approfondimenti geognostici e geotecnici volti a caratterizzare in dettaglio i terreni di sedime dei fabbricati previsti (secondo quanto previsto dal D.M. 17/01/2018).

2 Normativa di riferimento

La stesura della presente relazione è stata compiuta in ottemperanza alle disposizioni contenute nelle normative di riferimento di seguito elencate:

- ✓ Norme Tecniche per le Costruzioni” D.M. 17/01/2018;
- ✓ “Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17/01/2018”. Circolare Ministero Infrastrutture e Trasporti del 21 gennaio 2019, n° 7, CSLPP;
- ✓ Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n° 36 del 27/07/2007;
- ✓ "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione". D.M. 11 Marzo 1988;
- ✓ Istruzioni relative alle "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione". Circ. Min. LL.PP. n° 30483, 24 Settembre 1988;
- ✓ AGI: raccomandazione sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Giugno 1977;
- ✓ AGI: raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio, Maggio 1990;

3 Inquadramento geologico generale

3.1 Caratteri stratigrafici, litologici e morfologici

Il sito in oggetto è ubicato in via F.lli Cervi, circa m. 72 a SW dell'intersezione tra tale asse viario e la via E. Mattei, e circa m. 90 a W-NW dell'intersezione tra la via Cervi e la via Giuseppe Mazzini, in Comune di Ozzano dell'Emilia (BO): la quota assoluta della superficie topografica, desunta dall'estratto della Carta Tecnica Regionale riportato in allegato al presente documento (in scala 1:5.000) risulta compresa tra m. 69-71 s.l.m.

Dal punto di vista morfologico, l'area in esame risulta ubicata al piede della fascia pedecollinare appenninica, in un contesto caratterizzato dalla presenza di superfici ampie e prive di sostanziali irregolarità topografiche, fatta salva una debole pendenza in direzione N-NE verso la Pianura Padana: presso il sito in oggetto, tale assetto risulta lievemente alterato dalla presenza, poco a NW del margine W dell'area interessata dagli interventi in progetti, di un modesto impluvio sviluppato in direzione SW-NE, lungo una linea quanto più possibile prossima alla massima pendenza locale.



Fig.1: Estratto della Carta Tecnica Regionale sul quale è stato evidenziata la posizione del sito in oggetto. Si noti, inoltre, la traccia dell'impianto citato nel testo, evidenziata dalla linea azzurra tratteggiata

Le cartografie tematiche consultate riportano la presenza, nel sottosuolo dell'area in esame, di depositi sedimentari continentali di origine alluvionale, descritti dalla legenda del **Foglio 221 "Bologna"** della Carta Geologica d'Italia come "**Sabbie e limi di canale, argine e rotta fluviale**": sulla base della medesima fonte, tali depositi sono costituiti da "**sabbie, da finissime a grossolane, localmente limose...alternate a limi, limi sabbiosi e subordinatamente limi argillosi...**".

Dal punto di vista stratigrafico e cronologico, tali depositi sono stati attribuiti al **Subsistema di Ravenna (AES8)**, un'unità stratigrafica a limiti inconformi che rappresenta l'estrema porzione sommitale (e più recente) del Sistema Emiliano Romagnolo Superiore, e che risale al Pleistocene superiore – Olocene.

I depositi sedimentari sopra descritti appartengono al complesso delle coperture quaternarie, che insiste su un substrato di origine marina attribuito, dalla cartografia tematica consultata, alla **Formazione delle Sabbie Gialle (IMO)** e, più in particolare, al **membro di Castel San Pietro (IMO3)** di tale formazione, descritto dalla legenda del **Foglio 221 "Bologna"** come costituito da "**...sabbie giallastre fini e finissime, subordinatamente medie e grossolane...con rare intercalazioni pelitiche discontinue e rari livelli centimetrici di ciottoli...**" deposti in ambiente deltizio.

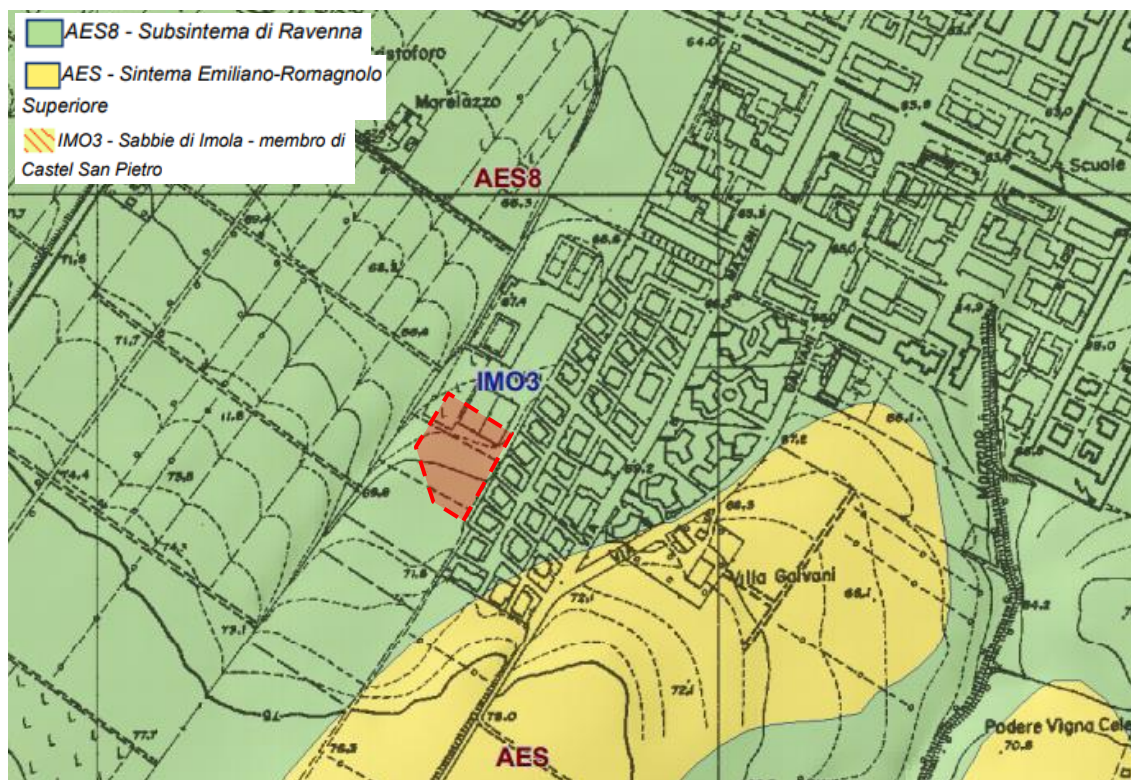


Fig.2: Estratto della Carta Geologica sul quale è stata evidenziata la posizione del sito in oggetto.

3.2 Caratteri idrologici superficiali e sotterranei

L'area in esame è ubicata in posizione intermedia tra le aste fluviali del Torrente Idice (che scorre in direzione S-N con andamento sinuoso circa 1,95 km a W del sito in oggetto) e del Torrente Quaderna (che scorre in direzione SW-NE con andamento sinuoso circa 2,84 km a E-SE del sito stesso).

Il reticolo idrografico secondario è costituito da scoli e torrenti che discendono dai rilievi collinari posti a S dell'area in esame e scorrono in direzione della Pianura Padana: in particolare, va segnalata la presenza del Rio Marzano (che scorre in direzione SW-NE con andamento sinuoso circa m. 431 a SE del sito in oggetto) ed il Rio Centonara, che scorre in direzione SE-NW con andamento debolmente sinuoso circa m. 1.045 a E del medesimo sito.

Inoltre, va sottolineata la presenza dell'impluvio citato in precedenza (cfr. § 3.1) che si sviluppa in direzione SW-NE con andamento pressoché rettilineo in prossimità del margine W dell'area interessata dalla realizzazione di quanto in progetto.

La regimazione delle acque meteoriche è affidata alla rete fognaria urbana in corrispondenza delle zone edificate adiacenti all'area in esame, e ad una rete di fossi e scoline, concentrati in particolar modo in

adiacenza ai principali assi viari, in corrispondenza delle aree coltivate prospicienti il sito in oggetto in direzione W.

Per quanto riguarda la circolazione idrica sotterranea, nell'ambito della campagna di indagini condotta in loco è stata rinvenuta una falda soggiacente a m. 15,0 di profondità dal piano campagna locale, in corrispondenza della verticale di indagine CPT-1. Tale livello deve, tuttavia, essere considerato suscettibile di oscillazioni correlate all'andamento degli apporti meteorici, con particolare riferimento ad eventuali innalzamenti che potrebbero verificarsi in occasione di periodi caratterizzati da precipitazioni intense e/o abbondanti: inoltre, non si può escludere che, nei medesimi periodi, possano instaurarsi falde temporanee e/o ristagni localizzati di acque meteoriche infiltratesi dalla superficie anche in corrispondenza di altri intervalli del sottosuolo.

Per quanto riguarda gli strumenti di pianificazione territoriale vigenti, la **Tav.2A-IV del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP)** della Città Metropolitana di Bologna include l'area in esame nell'"**ambito di controllo degli apporti d'acqua in pianura**", soggetto alle prescrizioni di cui all'**art.4.8** delle Norme Tecniche di Attuazione del PTCP stesso.

Inoltre, la **Tav. 2B – Nord** del succitato PTCP include l'area in esame tra le "**Zone di protezione delle acque sotterranee nel territorio pedecollinare e di pianura**" e, più in particolare, tra le "**Aree di ricarica tipo B**", descritte come "*aree caratterizzate da ricarica indiretta della falda: generalmente presenti tra la zona A e la pianura, idrogeologicamente identificabili come sistema debolmente compartimentato in cui alla falda freatica superficiale segue una falda semiconfinata in collegamento per drenanza verticale*": tali aree sono soggette alle relative prescrizioni di cui agli **artt. 5.2, 5.3 e 6.9** delle NTA-PTCP.

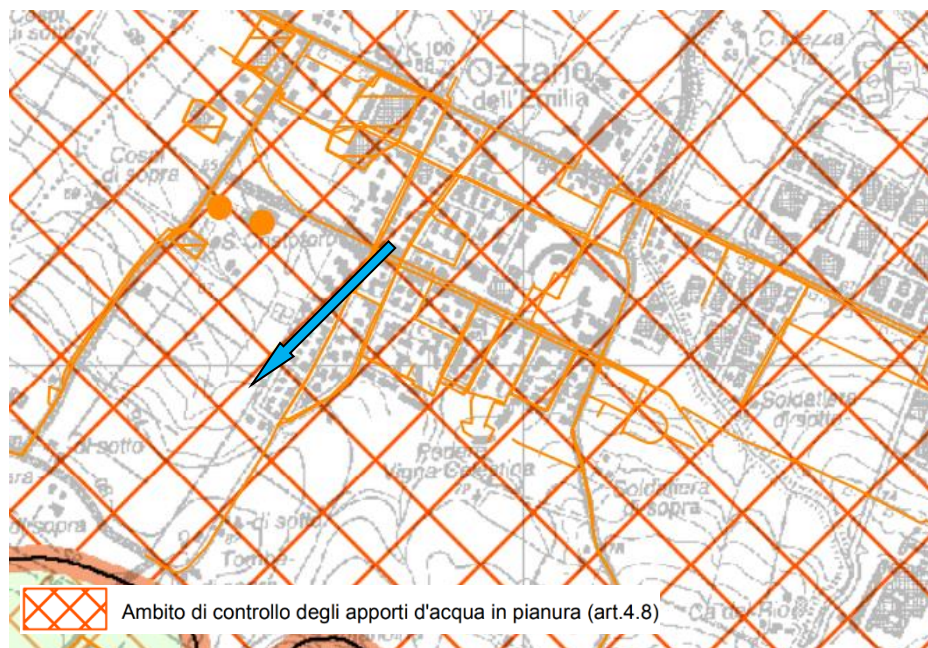


Fig.3: Estratto della Tav.2A-IV del PTCP. La freccia azzurra evidenzia l'ubicazione del sito in oggetto

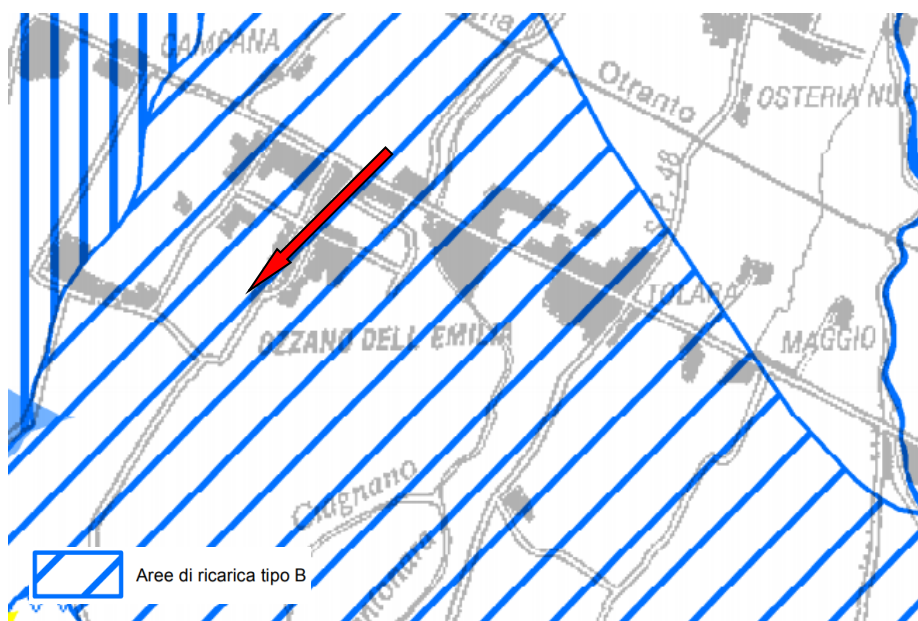


Fig.4: Estratto della Tav.2B-Nord del PTCP. La freccia rossa evidenzia l'ubicazione del sito in oggetto

La Tav. 2.2a del Piano Strutturale Comunale (PSC) del Comune di Ozzano dell'Emilia evidenzia come l'impiuvio esistente in prossimità del margine W dell'area in esame sia classificato come "alveo attivo" e, come tale, soggetto alle prescrizioni di cui all'art. 2.2 delle NTA-PSC. Inoltre, la medesima tavola evidenzia come l'area in esame sia inclusa tra le "aree soggette al controllo degli apporti d'acqua" (assoggettate alle prescrizioni di cui all'art.2.19 delle NTA-PSC), tra le "aree di ricarica tipo B" (soggette alle prescrizioni di cui

agli artt. 2.5 e 2.6 delle NTA-PSC) e tra le “**Zone vulnerabili da nitrati**” (soggetta alle prescrizioni specifiche di cui agli artt. 2.5 e 2.6 delle NTA-PSC).

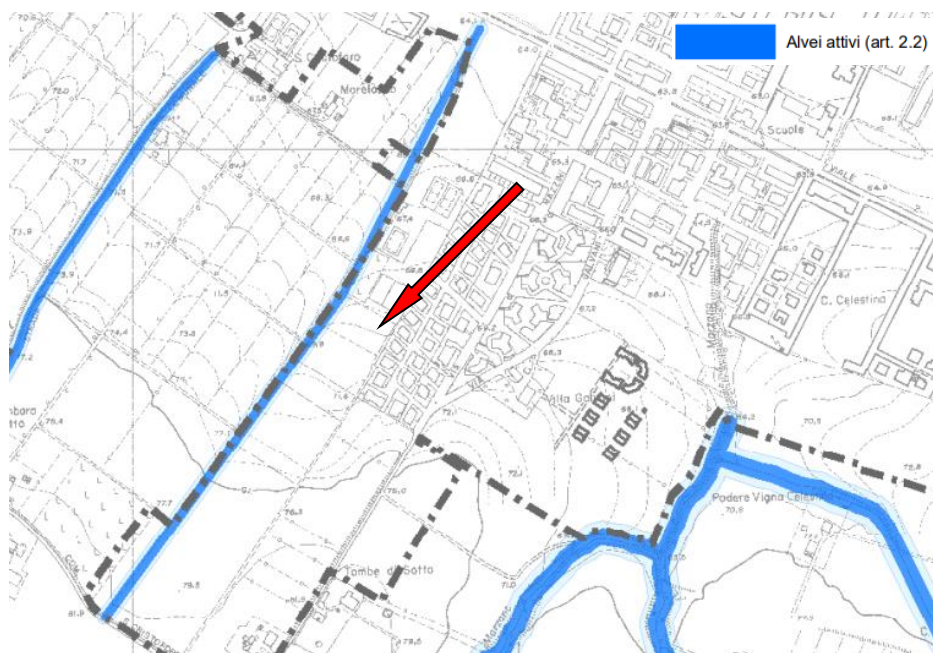


Fig.5: Estratto della Tav.2.2a del PSC. La freccia rossa evidenzia l'ubicazione del sito in oggetto

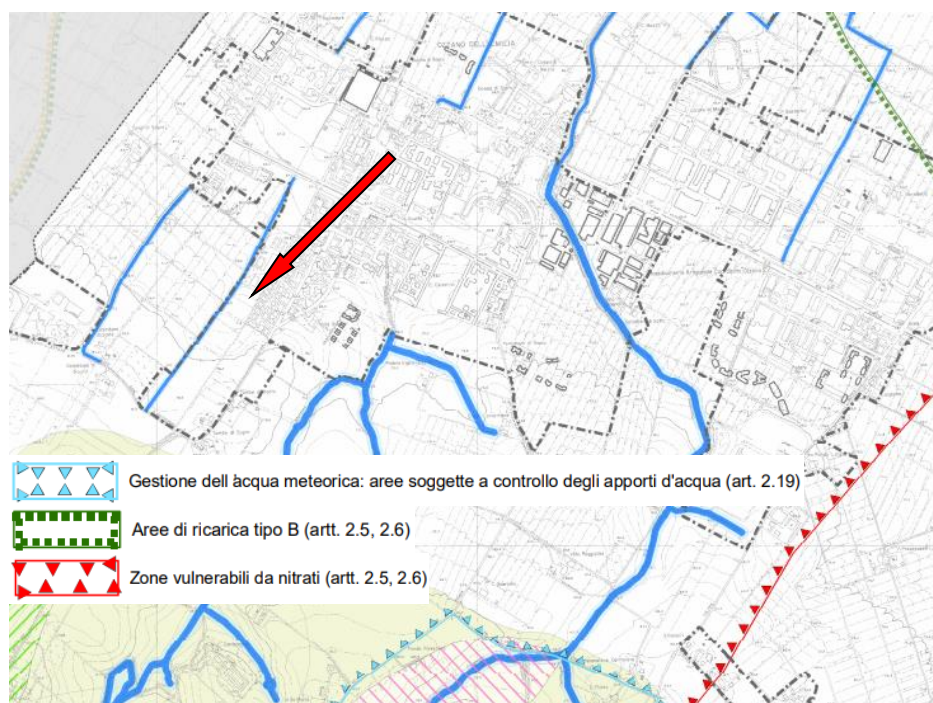


Fig.6: Estratto della Tav.2.2a del PSC. La freccia rossa evidenzia l'ubicazione del sito in oggetto

3.3 Caratteristiche tettonico-strutturali e sismogenetiche del territorio

L'attività sismica del territorio in esame risulta connessa all'attività orogenetica appenninica e definita nell'ambito di specifiche zone sismogenetiche, nelle quali gli eventi possono ritenersi circoscritti o definiti in relazione all'assetto tettonico del territorio. Recenti studi hanno messo in luce il legame sismogenetico tra la Pianura Padana e il fronte della catena appenninica.

In base alla zonazione sismogenetica del territorio italiano, denominata ZS9 e redatta a cura dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), l'area in esame ricade all'interno della **zona-sorgente 913**. Tale zona ricade in una fascia di transizione a carattere misto, "*...in cui convivono i meccanismi cinematici diversi (compressivi a NW e distensivi a SE)*". I fenomeni sismici, in quest'area sono descritti come "*...terremoti prevalentemente compressivi...*" che "*...raramente hanno raggiunto valori molto elevati di magnitudo*" (Meletti C. & Valensise G., 2004).

In base al **database delle sorgenti sismogenetiche italiane DISS 3.2.1**, il sito in oggetto risulta collocato in corrispondenza della **Sorgente Sismogenetica Composita (CSS) ITCS047 "Castelvetro di Modena – Castel San Pietro Terme"**, che rappresenta la porzione centrale del fronte appenninico sepolto, con vergenza a NNE. Le magnitudo espresse dalle sotto-strutture che compongono la sorgente composita risultano, in gran parte, comprese tra $4,5 < M_w < 5,0$, con l'eccezione degli eventi verificatisi nel modenese in data 20/07/1399 ($M_w=5,4$) e presso Bologna in data al 03/01/1505 ($M_w=5,5$) e 20/09/1929 ($M_w=5,5$): sulla base di tali eventi, nonché di considerazioni derivanti dall'analisi della sismicità regionale, la massima magnitudo associata alla CSS ITCS047 è stata stimata pari a **$M_w=6,0$** .

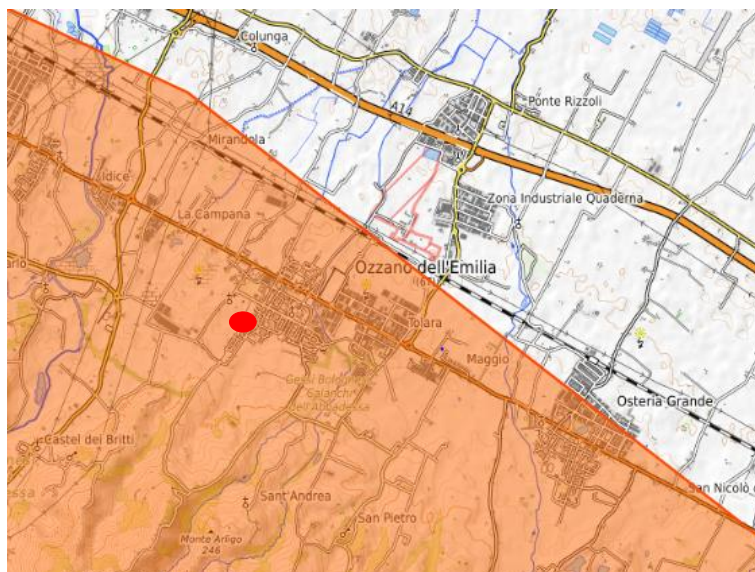


Fig.7: Distribuzione delle "zone" sismogenetiche, riportata dal DISS 3.2.1: il punto rosso evidenzia l'ubicazione dell'area in esame.

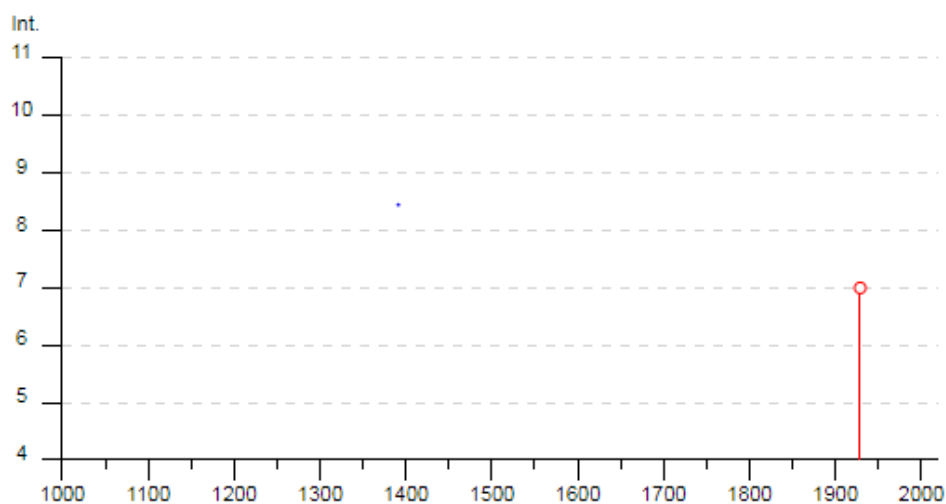
3.4 Storia sismica del territorio

Il territorio in esame è stato più volte interessato da fenomeni sismici; la ricostruzione della storia sismica del Comune di Ozzano dell'Emilia è stata condotta sulla base dei dati contenuti nel database macrosismico italiano versione CPTI15 - DBMI 15, disponibile on-line all'indirizzo <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>.

La tabella seguente riporta l'elenco degli eventi sismici storici che hanno interessato l'area in esame, indicandone l'intensità al sito, l'anno in cui tale evento si è verificato e la denominazione dell'evento stesso.

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
7	1929	04	10	05	44		Bolognese	87	6	5.05
NF	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1992	04	17	11	59	0	Appennino bolognese	56	4-5	4.11
2-3	2000	05	06	22	07	0	Faentino	85	5	4.08
NF	2000	05	08	12	29	5	Faentino	126	5	4.67
NF	2000	05	10	16	52	1	Faentino	151	5-6	4.82
NF	2002	06	18	22	23	3	Frignano	186	4	4.30
NF	2005	07	15	15	17	1	Forlivese	173	4-5	4.29

Il diagramma riportato di seguito, proveniente dalla stessa fonte bibliografica, riporta invece la collocazione temporale (in ascissa) e l'intensità al sito in corrispondenza dell'area oggetto del presente studio (in ordinata) degli eventi sismici sopra descritti, limitatamente a quelli con intensità epicentrale uguale o superiore a 4.



3.5 Sintesi di quanto riportato dagli strumenti di pianificazione

Per quanto riguarda gli strumenti di pianificazione vigenti, si segnala, in particolar modo, lo studio di Microzonazione Sismica del Comune di Ozzano dell'Emilia (BO): tale studio è disponibile on-line all'indirizzo <https://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs>.

La **Carta delle frequenze naturali dei depositi**, evidenzia che le misure di microtremore (HVSr) compiute nell'intorno del sito in oggetto hanno registrato picchi del rapporto H/V in corrispondenza delle frequenze $F_0=0,9-5,1$ Hz: la medesima cartografia evidenzia che le ampiezze del rapporto H/V in corrispondenza del suddetto intervallo di frequenza a risultano comprese tra 1,6-2,0

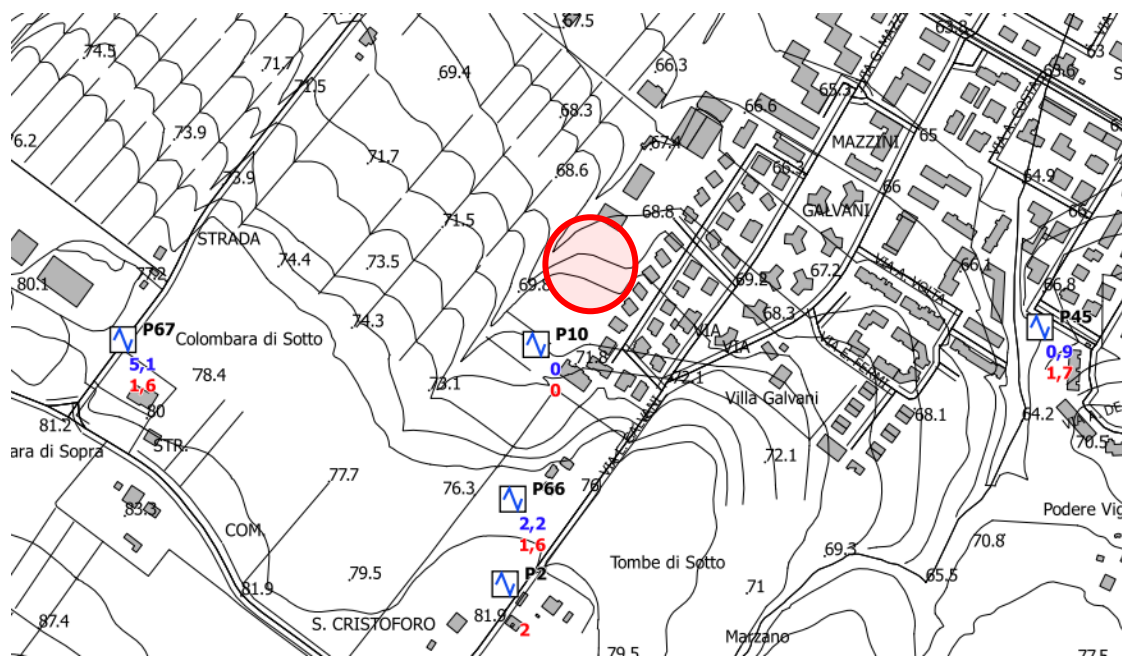


Fig.8: Estratto della "Carta delle Frequenze" dello Studio di Microzonazione Sismica. L'ellisse rossa evidenzia l'ubicazione del sito in oggetto

La "**Carta delle Vs**" evidenzia che, nell'intorno dell'area in esame, sono state misurati valori di velocità delle onde di taglio (Vs) nei primi 30 metri del sottosuolo (**Vs30**) compresi tra **214-381 m/s**.

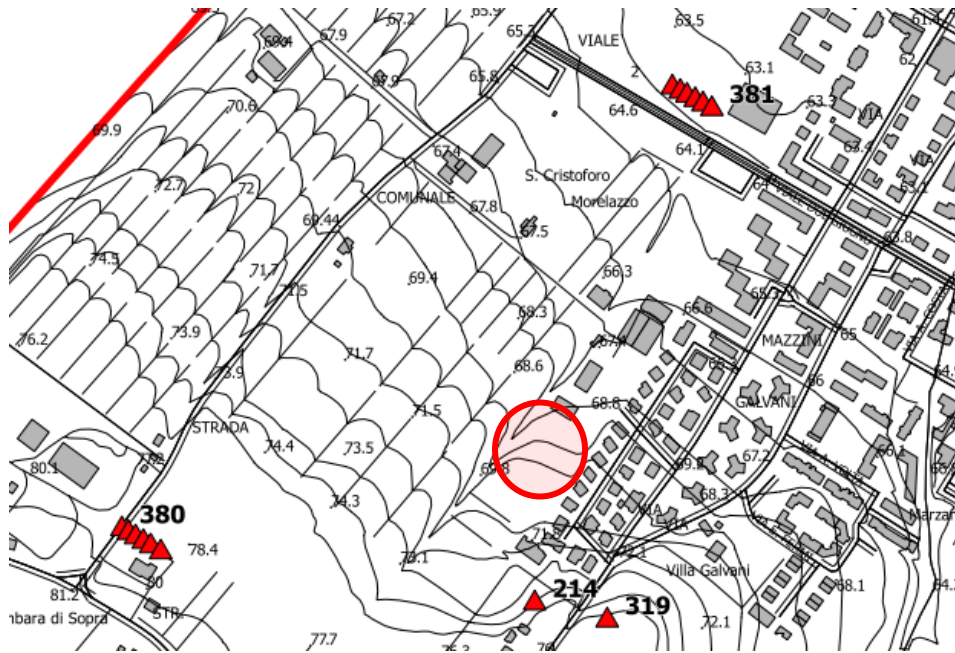


Fig.9: Estratto della “Carta delle Vs” dello Studio di Microzonazione Sismica. L’ellisse rossa evidenzia l’ubicazione del sito in oggetto

La Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) classifica l’area in oggetto come “Zone stabili suscettibili di amplificazione locale” e la identifica come “Zona25 - 2025”, in corrispondenza della quale è segnalata la presenza “limi sabbiosi e sabbie limose” fino a m. 1-10 di profondità p.c., al di sotto delle quali è riportata la presenza di sabbie e areniti poco cementate.

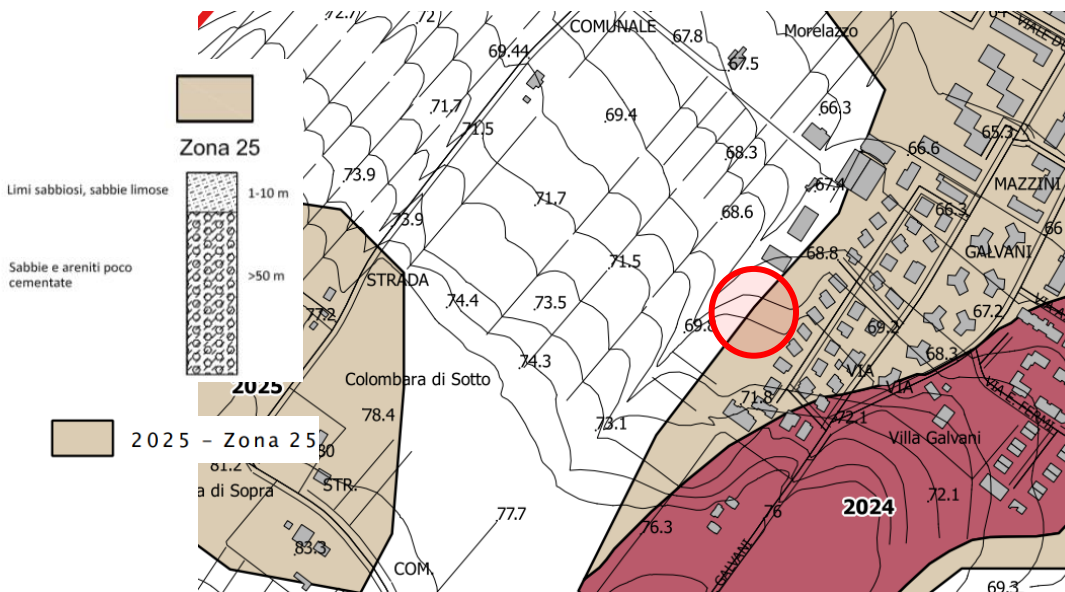


Fig.10: Estratto della “Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica” dello Studio di Microzonazione. L’ellisse rossa evidenzia l’ubicazione del sito in oggetto

La **Carta di Microzonazione Simica - FA PGA** evidenzia come all'area in esame sia stato attribuito un valore del fattore di amplificazione dell'accelerazione di picco **FA PGA = 1,5-1,6**.

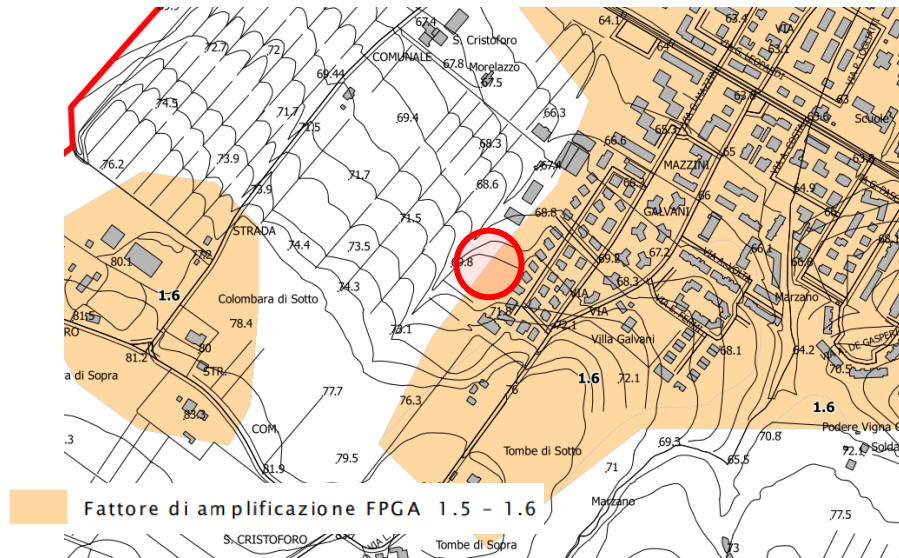


Fig.11: Estratto della "Carta di Microzonazione Sismica FPGA" dello Studio di Microzonazione. L'ellisse rossa evidenzia l'ubicazione del sito in oggetto

La **Carta di Microzonazione Simica - FH_{0,1-0,5s}** classifica l'area in esame tra le "Zone stabili suscettibili di amplificazione locale" ed evidenzia come le sia stato attribuito un valore del fattore di amplificazione **FH_{0,1-0,5s} = 1,7-1,8**.

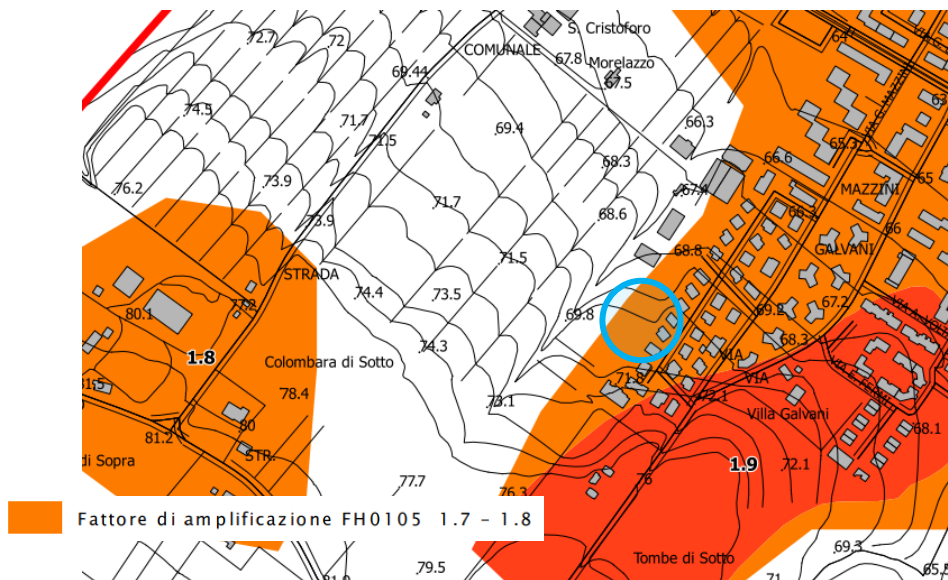


Fig.11: Estratto della "Carta di Microzonazione Sismica FH 0105". L'ellisse azzurra evidenzia l'ubicazione del sito in oggetto

La **Carta di Microzonazione Simica - FH_{0,5-1,0s}** classifica l'area in esame tra le "Zone stabili suscettibili di amplificazione locale" ed evidenzia come le sia stato attribuito un valore del fattore di amplificazione **FH_{0,5-1,0s} = 2,3-2,4**.

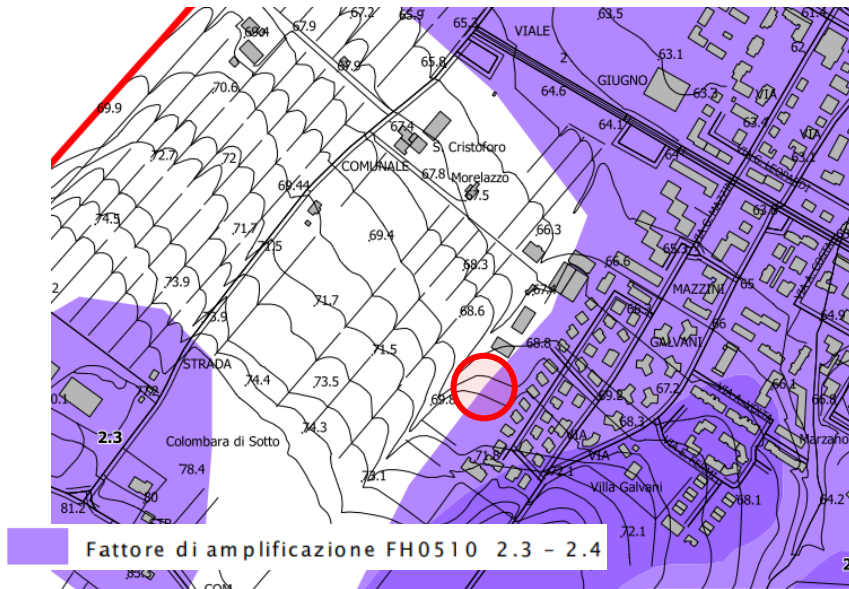


Fig.12: Estratto della "Carta di Microzonazione Sismica FH05-10". L'ellisse azzurra evidenzia l'ubicazione del sito in oggetto

La **Carta di Microzonazione Simica - FH_{0,5-1,5s}** classifica l'area in esame tra le "Zone stabili suscettibili di amplificazione locale" ed evidenzia come le sia stato attribuito un valore del fattore di amplificazione **FH_{0,5-1,5s} = 2,3-2,4**.

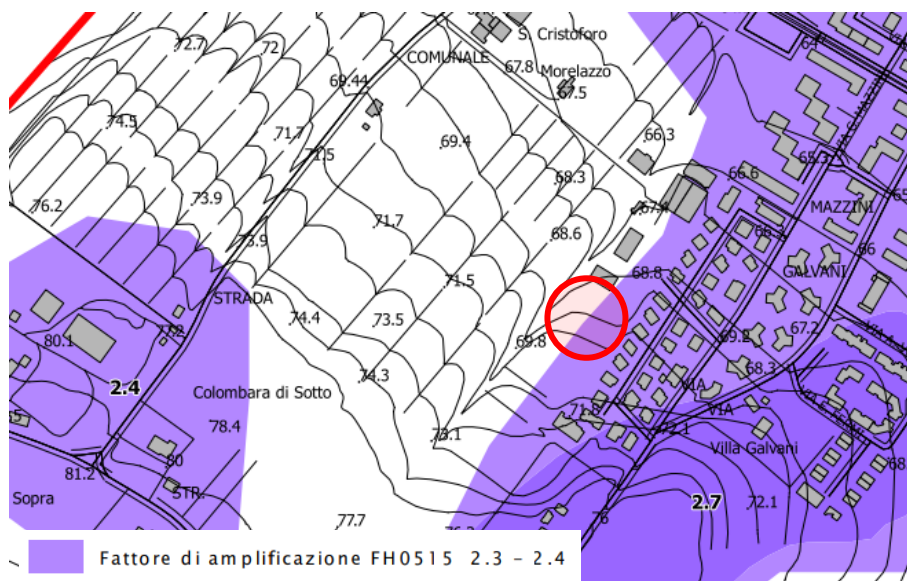


Fig.12: Estratto della "Carta di Microzonazione Sismica FH05-15". L'ellisse azzurra evidenzia l'ubicazione del sito

4 Indagini geognostiche

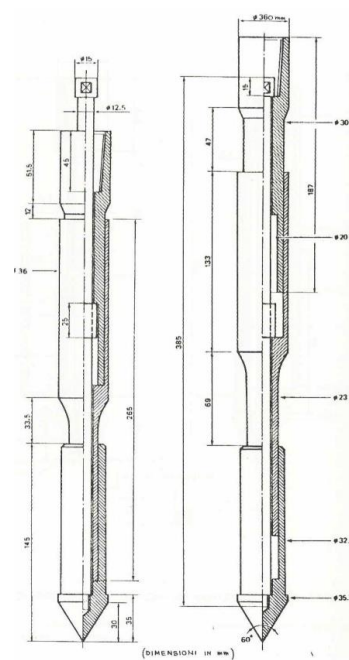
Il modello geologico sviluppato sulla base della documentazione bibliografica consultata, dell'esito di alcune indagini di repertorio eseguite in posizioni limitrofe al sito in oggetto e dei sopralluoghi eseguiti, è stato sottoposto a verifica mediante la realizzazione di n. 2 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT), n. 1 indagine geofisica condotta con metodologia MASW e di n. 2 rilevazioni di microtremori con metodologia HVSR a stazione singola.

4.1 Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)

Per l'esecuzione di tali prove si è utilizzato un penetrometro semovente Pagani TG 63 da 20 t.

La punta meccanica è di tipo telescopico con manicotto - "punta Begemann" (cfr. figura a pagina seguente), con diametro di base pari a 37,5 mm. e angolo di apertura del cono pari a 60°, come da raccomandazioni AGI 1977 e indicazioni internazionali standardizzate. La batteria di aste è composta da una serie di spezzoni di aste cave di lunghezza pari a 1 m. e con diametro esterno di 36 mm. al cui interno è posta la batteria di astine che permette l'apertura della punta meccanica. La penetrazione avviene ad una velocità costante pari a 2 cm/sec (con tolleranza $\pm 0,5$ cm/sec), indipendentemente dalla resistenza opposta dal terreno.

Il dispositivo di spinta è reso solidale al terreno mediante un duplice ancoraggio in modo da non muoversi rispetto al piano di lavoro durante l'immissione. Esso agisce alternativamente sulla batteria di aste interne (consentendo l'avanzamento dapprima della punta e poi del manicotto



laterale) e su quella di aste cave esterne (durante tale fase la punta si richiude e torna in posizione iniziale). Si ottengono in tal modo misure “discontinue”, poiché il ciclo di apertura-chiusura avviene ogni 20 cm, che consistono in:

- L_p : spinta necessaria per l'avanzamento della sola punta;
- L_p+L_l : spinta per l'avanzamento della punta e del manicotto;

Tramite semplici formule di conversione si ottengono:

- Q_c : resistenza alla punta;
- F_s : resistenza per attrito locale sul manicotto;

Un'indicazione della stratigrafia dei terreni indagati è fornita dal rapporto tra la resistenza all'infissione statica della punta (Q_c) e la resistenza per attrito laterale locale (F_s) che il materiale sviluppa sul manicotto della punta meccanica. Nell'interpretazione quantitativa dei risultati, che consente di determinare le grandezze di alcuni parametri geotecnici dei terreni attraversati mediante formule empiriche, si è tenuto in considerazione che le prove sono assimilabili a prove rapide in condizioni di drenaggio impedito. Pertanto, in terreni coesivi, si ottiene una stima della coesione non drenata C_u . Nei terreni sabbiosi è possibile valutare il grado di addensamento e una stima del valore di angolo di attrito.

Le correlazioni utilizzate per la determinazione dei parametri sono riportate nella tabella seguente.

PROVA PENETROMETRICA CPT		
PARAMETRO	SIGLA	CORRELAZIONE
Litologia		Schmertmann 1978
Resistenza (o coesione) non drenata	C_u	Marsland (1974) e Marsland & Powell (1979)
Modulo edometrico	$M_{o\ ed}$	Buisman & Sanglerat
Peso di volume terreni coesivi	γ	Meyerhof ed altri
Angolo d'attrito	ϕ	Caquot
Densità relativa	D_r	Jamiolkowski (1985)
Modulo di Young	E_y	Robertson e Campanella (1983)
Peso di volume terreni granulari	γ	Meyerhof

Le prove penetrometriche statiche sono state spinte fino a profondità massime pari a m. 20,0 p.c. Nell'ambito dell'esecuzione della prova CPT-1 è stata rinvenuta acqua nel sottosuolo del sito in oggetto, a partire da m. 15,0 di profondità p.c.



Foto 1: CPT-1 in esecuzione



Foto 2: CPT-2 in esecuzione

4.2 Indagine geofisica MASW/Re.Mi

Per mezzo delle tecniche **MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves, Park et al., 1999) e **Re.Mi** (Refraction Microtremor) è possibile ottenere delle stime del profilo di velocità delle onde di taglio (S) mediante lo studio delle onde superficiali che comunemente dominano una porzione considerevole dei sismogrammi nelle indagini sismiche (sia per ampiezza relativa che per durata del segnale).

L'idea su cui si fondano i metodi MASW e Re.Mi, è basata sull'utilizzo del fenomeno della dispersione delle onde superficiali di Rayleigh (ed in particolare della loro componente verticale) per derivare informazioni indirette sulle proprietà fisiche e reologiche del terreno, tra cui la densità, i parametri elastici e le velocità delle onde di taglio.

A partire dall'intero campo d'onda, acquisito in campagna utilizzando un numero variabile di geofoni (di solito 12-24) allineati a spaziatura regolare (similmente a un classico esperimento di sismica a rifrazione), l'obiettivo è di derivare una curva di dispersione sperimentale velocità di fase – frequenza (cf-f), la cui forma è associata alle proprietà meccaniche del terreno da indagare. Tale curva si può ottenere seguendo differenti metodologie di elaborazione del campo d'onda; nel presente studio è applicata un procedimento che prevede una trasformata tempo di ritardo – slowness (τ -p) e una trasformata di Fourier dal dominio τ a quello della frequenza. Il risultato è una nuova rappresentazione del campo d'onda dal dominio spazio-tempo a quello frequenza-slowness o frequenza-velocità di fase (la slowness è infatti il reciproco della velocità).

Nell'ambito del metodo MASW, si procede ad un'energizzazione a distanza prefissata dal primo geofono e si calcolano i tempi di arrivo del relativo impulso ai ricevitori successivi: al contrario, l'analisi Re.Mi utilizza i microtremori ambientali quale fonte di eccitazione, e la trasformata frequenza-slowness viene impiegata per l'analisi dell'energia di propagazione del rumore in entrambe le direzioni della linea sismica.

Nel caso in esame, l'esecuzione dell'indagine ha comportato la realizzazione di uno stendimento costituito da 12 geofoni verticali da 4,5 Hz disposti con interasse pari a m. 3,0, per una lunghezza complessiva di m. 36,0; i segnali sono stati acquisiti mediante un sismografo digitale a 24 bit modello Dolang ed elaborati con il software GRILLA 6.0.

I risultati dell'indagine svolta hanno permesso di calcolare un valore della velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri del sottosuolo (V_{s30}) pari a **$V_{s30} = 260$ m/s**. Per ulteriori dettagli in merito, si rimanda all'apposita relazione tecnica, riportata in allegato al presente documento.



Foto 3: Indagine MASW/Re.Mi in esecuzione

4.3 Indagine geofisica HVSR

Per la realizzazione dei rilievi H.V.S.R. a stazione singola è stato impiegato uno strumento marca Moho, modello *Tromino Blu* che adotta una metodologia, anche chiamata tecnica di Nakamura (1989), introdotta da Nogoshi e Igarashi (1971) sulla base degli studi di Kanai e Tanaka del 1961.

Questo strumento dispone di tre sensori sismometrici, ciascuno associato a un canale velocimetrico (N-S, E-W e Up-Down), atti a registrare il microtremore sismico ambientale in corrispondenza dell'intervallo di frequenza compreso tra 0,1 e 1.024 Hz.

Il microtremore sismico (altrimenti definito "rumore sismico di fondo") è presente ovunque sulla crosta terrestre, ed è generato da fenomeni quali i moti oceanici, i fenomeni atmosferici, a cui possono contribuire fonti locali derivanti da attività antropiche. Inoltre, i microtremori possono essere in parte costituiti da onde di volume, quali onde P, S e superficiali: le onde superficiali esprimono velocità prossime a quelle delle onde S (Lachet e Bard, 1994) il che ne fa un utile strumento per la determinazione delle velocità di queste ultime.

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) si basa sull'analisi dei rapporti tra le componenti orizzontali e la componente verticale del moto (H/V): numerosi studi (Lachet and Bard, 1994; Lermo and Chavez-Garcia, 1994; Ibs-von Seht and Wohlenberg, 1999) hanno evidenziato come questi rapporti forniscano stime affidabili delle frequenze

proprie di risonanza del sottosuolo, perlomeno in presenza di un modello semplice e unidimensionale del sottosuolo stesso, con uno strato “soffice” posto al di sopra di uno strato rigido (“bedrock” o “bedrock-like”). In presenza di simili circostanze si può osservare come un’onda che viaggia attraverso lo strato “soffice”, venga parzialmente riflessa dall’interfaccia con il bedrock: l’onda riflessa interferisce con i treni d’onda incidenti, sommandosi e raggiungendo la massima ampiezza quando la lunghezza dell’onda incidente stessa è pari a 4 volte lo spessore dello strato interessato (H). Di conseguenza:

$$f = V_s/4H$$

dove V_s è la velocità delle onde S all’interno dello strato di spessore H, la cui frequenza di risonanza propria è pari a (f).

Per quanto le condizioni reali siano di rado così lineari (in quanto spesso ci si trova in presenza di più strati, di una topografia articolata o di disturbi di vario genere), l’analisi della curva descritta dall’andamento del rapporto H/V(f) consente di risalire alle informazioni relative alle frequenze di risonanza proprie degli strati del sottosuolo e, di conseguenza, al loro spessore.

E’ quindi possibile derivare dalla curva H/V un profilo del sottosuolo, in termini di frequenze proprie e di spessori degli strati attraversati, mettendo a confronto la curva sperimentale con una curva “sintetica”, in presenza di adeguati “vincoli” ottenuti da prove geognostiche dirette o da altre indagini geofisiche. (Fäh et al., 2001; Mulargia, et al., 2007).

Sul piano esecutivo, l’indagine tomografica richiede la collocazione dello strumento sul terreno, avendo cura di posizionarlo orizzontalmente (mediante apposita bolla) e di renderlo solidale al suolo tramite appositi “piedi” d’appoggio: la procedura di acquisizione del “rumore” sismico richiede tempi di registrazione di circa 20 minuti, e viene eseguita ad una frequenza di campionamento di 128 Hz. L’elaborazione dei dati registrati avviene per mezzo del software Grilla® (Micromed S.p.A.), opportunamente settato (i parametri del setting sono riportati nell’apposito report, allegato alla presente relazione).

Di seguito si riporta una tabella in cui sono riepilogati gli intervalli di frequenza in corrispondenza dei quali sono stati rilevati i picchi del rapporto H/V.

Indagine	Picchi H/V
HVSR-1	0,45-0,55 Hz; 0,7-0,8 Hz; 1,1 Hz; 1,9 Hz; 2,5 Hz; 8,0-8,5 Hz
HVSR-2	0,4 Hz; 0,6 Hz; 0,85-0,95 Hz; 1,85-1,9 Hz; 9,5 Hz; 12,4-12,6 Hz; 17,5 Hz



Foto 4: Indagine tromografica HVSR-1 in esecuzione



Foto 5: Indagine tromografica HVSR-2 in esecuzione

5 Assetto litostratigrafico e parametrizzazione fisico-meccanica dei terreni

Sulla base delle risultanze delle indagini geognostiche realizzate, è stato ricostruito l'assetto litostratigrafico del sottosuolo del sito in oggetto, che descrive le caratteristiche dei terreni rinvenuti a partire dalla quota del piano campagna locale. Va sottolineato che, in corrispondenza delle due verticali indagate (CPT-1 e CPT-2) hanno mostrato significative differenze litologiche e stratigrafiche, l'una rispetto all'altra: per meglio dare conto di tali differenze, i risultati di ciascuna prova sono stati, di seguito, discussi singolarmente.

In corrispondenza della verticale di indagine CPT-1:

- È stata riscontrata la presenza di un primo intervallo, di spessore pari a m. 1,0, costituito da terreni alterati a causa della prolungata esposizione agli agenti atmosferici e/o rimaneggiati nel corso di pregressi interventi antropici (**Unità litologica TA/R**).
- Al di sotto dell'unità TA/R, è stata rilevata la presenza di litotipi a comportamento coesivo di natura argilloso-limosa e limoso-argillosa, caratterizzati da un grado di consistenza medio-elevato/elevato (**Unità litologica A**). I terreni che costituiscono questo intervallo risultano affetti da fenomeni di sovraconsolidazione per disseccamento, provocati dalla diminuzione del contenuto d'acqua dei litotipi a comportamento coesivo a causa dell'evaporazione: il disseccamento si traduce in un progressivo ritiro volumetrico dei litotipi interessati, ed essendo influenzato da fattori molto mutevoli (esposizione all'insolazione, granulometria e litologia dei terreni, effetti di suzione indotti

dagli apparati radicali delle piante) può dare luogo a comportamenti differenziali dei terreni che determinano risentimenti sulle strutture su di essi impostate.

In corrispondenza della prova CPT-1 l'unità A si protrae nel sottosuolo fino a m. 8,0 di profondità p.c.

- Tra m. 8,0-9,6 di profondità p.c. sono stati rinvenuti litotipi incoerenti di natura sabbiosa e/o sabbioso-limosa, caratterizzati da un grado di addensamento medio-basso (**Unità litologica B**).
- Tra m. 9,6-14,0 di profondità p.c. è presente un intervallo costituito da argille sabbiose a media consistenza, intervallate da intercalazioni decimetriche costituite da sabbie e sabbie limose poco addensate (**Unità litologica C**).
- Infine, al di sotto dell'Unità C, fino alla massima profondità raggiunta dalla prova CPT-1 (m. 20,0 p.c.), sono stati rinvenuti litotipi a comportamento coesivo di natura argilloso-sabbiosa e argilloso-limosa caratterizzati da un grado di consistenza elevato, con subordinate intercalazioni sabbiose e sabbioso-limose (**Unità litologica D**).
- Per quanto riguarda la circolazione idrica sotterranea, le rilevazioni condotte all'interno del foro di prova hanno evidenziato la **presenza di una falda idrica sotterranea soggiacente a m. 15,0 dal piano campagna locale**: tale livello deve, in ogni caso, essere considerato suscettibile di oscillazioni correlate all'andamento delle precipitazioni, con particolare riferimento ad eventuali innalzamenti che potrebbero verificarsi in periodi caratterizzati da precipitazioni intense e/o abbondanti. Inoltre, non si può escludere che possano formarsi falde temporanee e/o ristagni di acque meteoriche infiltratesi dalla superficie, in particolar modo in corrispondenza degli intervalli maggiormente permeabili del sottosuolo.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva relativa all'assetto litostratigrafico del sottosuolo, unitamente ad una serie di parametri geotecnici i cui valori sono stati stimati sulla base delle caratteristiche meccaniche derivanti dalle prove penetrometriche effettuate. In *corsivo* è indicato il range dei valori riscontrati compreso fra un minimo ed un massimo, in **[grassetto]** il valore medio. In allegato si riportano i dettagli dei parametri geotecnici stimati sulla base delle prove effettuate ed i relativi **grafici di resistenza meccanica**.

Va sottolineato che, nel caso delle Unità litologiche C e D, sono stati forniti sia i valori dei parametri propri dei litotipi a comportamento coesivo, sia quelli dei parametri caratteristici dei terreni incoerenti: ciò è stato fatto in ragione della natura ambivalente di tali intervalli, caratterizzati dalla presenza di entrambe le frazioni litologiche e granulometriche, commiste tra loro.

ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO DEL SOTTOSUOLO E PARAMETRIZZAZIONE MECCANICA DEI TERRENI – PROVA PENETROMETRICA CPT-1									
(Valori nominali)									
UNITÀ LITOLOGICA	PROFONDITÀ (m)	DESCRIZIONE	cu	Mo _{ed}	Dr	φ	Ey	γ	γ _{sat}
			(kPa)	(MPa)	(%)	(°)	(MPa)	(kN/m ³)	(kN/m ³)
TA/R	1,0	Terreni alterati e/o rimaneggiati	-	-	-	-	-	20,8-21,5 [21,0]	21,6-22,2 [21,8]
A	8,0	Argille e limi argillosi con grado di consistenza medio-elevato/elevato (sovracconsolidate per disseccamento)	131-271 [183]	6,8-12,2 [8,6]	-	-	-	20,4-21,7 [21,0]	21,2-22,4 [21,8]
B	9,6	Sabbie e sabbie limose con grado di addensamento medio-basso	-	-	27-48 [38]	25-29 [27]	9,4-17,7 [13,6]	17,7-21,8 [20,8]	20,6-22,6 [21,9]
C	14,0	Argille sabbiose a media consistenza con intercalazioni di sabbie e sabbie limose poco addensate	143-219 [185]	6,9-12,9 [9,3]	7-20 [13]	22-24 [23]	6,7-11,0 [8,2]	20,1-21,3 [20,8]	20,9-22,1 [21,5]
D	Max. prof. Indagata (m. 20,0 p.c.)	Argille sabbiose e limose con grado di consistenza elevato, con intercalazioni sabbiose e sabbioso-limose poco addensate	156-271 [207]	6,9-16,0 [9,8]	7-31 [19]	22-26 [24]	22,7-26,8 [24,5]	20,6-22,1 [21,2]	21,4-22,9 [22,0]

In corrispondenza della verticale di indagine CPT-2:

- È stata riscontrata la presenza di un primo intervallo, di spessore pari a m. 1,0, costituito da terreni alterati a causa della prolungata esposizione agli agenti atmosferici e/o rimaneggiati nel corso di pregressi interventi antropici (**Unità litologica ta/r**).
- Al di sotto dell'unità ta/r, fino a m. 3,4 di profondità p.c. è stata rilevata la presenza di litotipi a comportamento coesivo di natura argilloso-limosa e limoso-argilloso, caratterizzati da un grado di consistenza medio-elevato/elevato (**Unità litologica a**). I terreni che costituiscono questo intervallo risultano affetti da fenomeni di sovraconsolidazione per disseccamento, provocati dalla diminuzione del contenuto d'acqua dei litotipi a comportamento coesivo a causa dell'evaporazione: il disseccamento si traduce in un progressivo ritiro volumetrico dei litotipi interessati, ed essendo influenzato da fattori molto mutevoli (esposizione all'insolazione, granulometria e litologia dei terreni, effetti di suzione indotti dagli apparati radicali delle piante) può dare luogo a comportamenti differenziali dei terreni che determinano risentimenti sulle strutture su di essi impostate.
- Tra m. 3,4-7,6 di profondità p.c. sono state rinvenute ghiaie e sabbie caratterizzate da un grado di addensamento variabile da medio ad elevato, intervallate da subordinate intercalazioni costituite da limi argillosi (**Unità litologica b**).
- Tra m. 7,6-10,4 di profondità p.c. sono stati rinvenuti litotipi incoerenti di natura sabbiosa e limoso-sabbiosa con grado di addensamento basso/medio-basso, con subordinate intercalazioni limoso-argillose (**Unità litologica c**).
- Tra m. 10,4-14,6 di profondità p.c. è stata rilevata la presenza di litotipi a comportamento coesivo di natura argilloso-sabbiosa, caratterizzati da un grado di consistenza medio-elevato, intervallati da intercalazioni sabbiose e sabbioso-limose subordinate (**Unità litologica d**).
- Infine, tra m. 14,6 p.c. e la massima profondità raggiunta dalla prova CPT-2 (m. 20,0 p.c.) sono presenti ulteriori terreni a comportamento coesivo di natura argilloso-limosa e/o argilloso-sabbiosa, caratterizzati da un grado di consistenza elevato (**Unità litologica e**).

Nell'ambito della realizzazione della prova CPT-2 non è stata rinvenuta alcuna falda idrica sotterranea nel sottosuolo del sito in oggetto. Tuttavia, non si può escludere che, in periodi caratterizzati da precipitazioni intense e/o abbondanti, possano instaurarsi falde temporanee e/o ristagni localizzati di acque meteoriche infiltratesi dalla superficie, in particolar modo in corrispondenza degli intervalli maggiormente permeabili del sottosuolo.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva relativa all'assetto litostratigrafico del sottosuolo, unitamente ad una serie di parametri geotecnici i cui valori sono stati stimati sulla base delle caratteristiche meccaniche derivanti dalle prove penetrometriche effettuate. In *corsivo* è indicato il range dei valori riscontrati compreso fra un minimo ed un massimo, in **[grassetto]** il valore medio. In allegato si riportano i dettagli dei parametri geotecnici stimati sulla base delle prove effettuate ed i relativi **grafici di resistenza meccanica**.

Va sottolineato che, nel caso dell'Unità litologica c, sono stati forniti sia i valori dei parametri propri dei litotipi a comportamento coesivo, sia quelli dei parametri caratteristici dei terreni incoerenti: ciò è stato fatto in ragione della natura ambivalente di tale intervallo, caratterizzato dalla presenza di entrambe le frazioni litologiche e granulometriche, commiste tra loro.

ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO DEL SOTTOSUOLO E PARAMETRIZZAZIONE MECCANICA DEI TERRENI – PROVA PENETROMETRICA CPT-2									
(Valori nominali)									
UNITÀ LITOLOGICA	PROFONDITÀ (m)	DESCRIZIONE	cu	Mo _{ed}	Dr	φ	E _y	γ	γ _{sat}
			(kPa)	(MPa)	(%)	(°)	(MPa)	(kN/m ³)	(kN/m ³)
Ta/r	1,0	Terreni alterati e/o rimaneggiati	-	-	-	-	-	20,8-21,3 [21,0]	21,6-22,1 [21,8]
a	3,4	Argille e limi argillosi con grado di consistenza medio-elevato/elevato (sovracconsolidate per disseccamento)	118-216 [154]	6,8-12,9 [9,4]	-	-	-	20,3-21,3 [20,7]	21,1-22,1 [21,5]
b	7,6	Ghiaie e sabbie con grado di addensamento elevato	-	-	48-100 [84]	19-41 [35]	12,7-96,1 [49,1]	17,7-22,6 [19,4]	18,9-22,7 [21,2]
c	10,4	Sabbie e limi sabbiosi con grado di addensamento basso/medio-basso, con subordinate intercalazioni limoso-argillose	36-101 [73]	3,2-9,3 [6,8]	5-31 [14]	21-26 [23]	3,7-9,8 [6,0]	17,7-20,0 [19,0]	18,8-20,7 [20,2]
d	14,6	Argille sabbiose con grado di consistenza medio-elevato con intercalazioni sabbiose e sabbioso limose	88-346 [158]	6,8-15,6 [10,1]	10-30 [20]	22-26 [24]	5,0-20,8 [9,3]	17,7-22,1 [20,4]	20,4-22,8 [21,3]
e	Max. prof. indagata (m. 20,0 p.c.)	Argille sabbiose e limose con grado di consistenza elevato	134-248 [194]	6,6-12,1 [9,0]	-	-	-	20,4-21,5 [21,0]	21,2-22,2 [21,8]

6 Caratterizzazione sismica del sito

In base all'Ordinanza P.C.M. 3274 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zone sismiche", il territorio italiano è stato suddiviso in zone uniformi, differenziate sulla base dei valori di accelerazione massima attesa (a_g) al suolo, in occasione di eventi sismici: poiché tali valori sono stati preventivamente suddivisi in quattro classi, le zone sono state denominate Zona 1, Zona 2, Zona 3 e Zona 4, in ordine decrescente dei valori stessi di accelerazione.

Zona	Accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (a_g/g)	Accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (a_g/g)
1	> 0,25	0,35
2	0,15-0,25	0,25
3	0,05-0,15	0,15
4	< 0,05	0,05

Il Comune di Ozzano dell'Emilia (BO), entro cui si colloca l'area in esame, risulta classificato come "Zona 2".

6.1 Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche

La nuova normativa in materia di Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018) sancisce che "ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3" della medesima normativa. In alternativa, "...qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori di velocità di propagazione delle onde di taglio V_s ".

Di seguito, si riporta la succitata tabella 3.2.II - *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato*.

Categoria	DESCRIZIONE
A	<i>Ammassi rocciosi o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C e D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale per la definizione delle azioni sismiche.

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo (parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso) la classificazione riportata nella tabella sovrastante si effettua in base ai **valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$** . Essa viene calcolata con la seguente relazione:

$$V_{s,eq} = H / \sum h_i / V_{s_i} \quad (\text{m/sec}) \quad \text{con } i=1,N$$

Con:

h_i spessore dell' i-esimo strato

V_{s_i} velocità delle onde di taglio nell' i-esimo strato

N numero di strati

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da V_s non inferiore a 800 m/s.

Peraltro, ai sensi del § 3.2.2 del succitato decreto, “per depositi con profondità (H) del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio ($V_{s,eq}$) è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità”. I valori di V_s “...devono essere ottenuti mediante specifiche prove ovvero, con giustificata motivazione e limitatamente all’approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche”.

L’elaborazione dei risultati dell’indagine geofisica MASW/Re.Mi ha fornito un **valore della velocità delle onde di taglio nell’intervallo compreso tra la superficie ed una profondità di m.30 dal piano campagna locale (V_{s30}) pari a 260 m/s: si ritiene pertanto di attribuire il sottosuolo del sito in oggetto alla categoria C, ai sensi dell’art. 3.2.2. del D.M. 17/01/2018.**

Secondo le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (cfr. § 3.2.2, D.M. 17/01/2018) “Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell’opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta delle fondazioni”. Tuttavia, non essendo disponibili, al momento in cui vengono formulate queste note, indicazioni dettagliate in merito all’effettiva profondità di imposta delle fondazioni, la stima del valore di V_{s30} è stata, in questo caso, riferita al piano campagna locale.

6.1.1 Amplificazione stratigrafica e topografica

Per le categorie di sottosuolo di fondazione definite nel paragrafo precedente, la forma spettrale su sottosuolo di categoria A è modificata attraverso il coefficiente stratigrafico S_s e il coefficiente topografico S_T come riportato nelle sottostanti tabelle: in ragione della categoria di sottosuolo risultante dalla specifica indagine si definisce quindi un coefficiente S_s che quantifica l’amplificazione stratigrafica.

Categoria di sottosuolo	S_s	C_c
A	1.00	1.00
B	$1.00 \leq 1.40 - 0.40 F_0 \text{ ag/g} \leq 1.20$	$1.10 (T^*c)^{-0,20}$
C	$1.00 \leq 1.70 - 0.60 F_0 \text{ ag/g} \leq 1.50$	$1.10 (T^*c)^{-0,33}$
D	$0.90 \leq 2.40 - 1.50 F_0 \text{ ag/g} \leq 1.80$	$1.05 (T^*c)^{-0,50}$
E	$1.00 \leq 2.00 - 1.10 F_0 \text{ ag/g} \leq 1.60$	$1.15 (T^*c)^{-0,40}$

Alla categoria di sottosuolo C, determinata per il sito oggetto del presente studio corrisponde la seguente formulazione del coefficiente S_s e del coefficiente C_c :

$$S_s = 1.00 \leq 1.70 - 0.60 F_0 \text{ ag/g} \leq 1.50$$

$$C_c = 1.10 (T^*c)^{-0.33}$$

Per quanto concerne la valutazione dell'influenza delle *condizioni topografiche* in merito alla risposta sismica del suolo, la normativa per configurazioni superficiali semplici adotta la classificazione riportata nella seguente tabella. *“Le suesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bi-dimensionali, creste o dorsali allungate e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 metri”*. Per ogni categoria individuata e dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento in progetto la normativa associa un relativo coefficiente di amplificazione topografica (S_T , cfr. Tab. 3.2.V D.M. 17/01/2018).

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica	S_T
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	1,0
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1,2
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1,2
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	1,4

Il sito in oggetto è ubicato in un contesto sub-pianeggiante: di conseguenza, l'area in esame risulta attribuibile alla categoria T1, e, ai fini della caratterizzazione delle azioni indotte dal sisma, si potrà adottare un coefficiente.

$$S_T = 1,0.$$

Una volta definiti i parametri che determinano gli effetti di amplificazione secondo quanto sopra si determina il valore del coefficiente S, necessario alla definizione dello spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali, secondo la formula:

$$S = S_s * S_T$$

6.2 Considerazioni in merito alle frequenze del sottosuolo

Come già accennato, quanto fin qui esposto costituisce un approccio semplificato, e, come tale, non offre alcuna indicazione relativa alla frequenza principale di risonanza del sottosuolo del sito in oggetto, che costituisce uno dei parametri fondamentali per la valutazione degli effetti di amplificazione sismica locale.

Gli effetti sismici di sito sono causati prevalentemente da amplificazioni locali delle onde sismiche dovute a particolari condizioni geologiche o topografiche: in particolare, qualora un'onda sismica incidente funga da funzione di eccitazione dei terreni presenti nel primo sottosuolo di un sito, tali terreni possono essere indotti a vibrare alla loro frequenza propria, con un'ampiezza limitata solo dal fattore di dissipazione intrinseca (Mulargia, et al., 2007). Se la frequenza di risonanza del suolo viene a coincidere con quella delle strutture su di esso edificate, può prodursi il fenomeno della doppia risonanza che si traduce in un'amplificazione delle onde sismiche e nell'induzione di sollecitazioni con forte potere distruttivo.

Le indagini tromografiche condotte con metodologia HVSR a stazione singola hanno evidenziato alcuni picchi del rapporto H/V: tali picchi sono da considerarsi legati alla presenza di discontinuità sismiche nel sottosuolo e sono indicativi delle frequenze di risonanza dei terreni presenti, per quanto non siano ad esse riconducibili in modo semplice (Mulargia, et al, 2007).

Di seguito si riportano i valori delle frequenze in corrispondenza dei quali sono stati individuati i picchi del rapporto H/V.

Indagine	Picchi H/V
HVSR-1	0,45-0,55 Hz; 0,7-0,8 Hz; 1,1 Hz; 1,9 Hz; 2,5 Hz; 8,0-8,5 Hz
HVSR-2	0,4 Hz; 0,6 Hz; 0,85-0,95 Hz; 1,85-1,9 Hz; 9,5 Hz; 12,4-12,6 Hz; 17,5 Hz

È doveroso sottolineare che *“l'ampiezza del picco H/V [...] non è correlabile all'amplificazione sismica in modo semplice”* (Mulargia, et al., 2007) e non costituisce, pertanto, una indicazione diretta della pericolosità connessa a ciascuna frequenza.

6.3 Il fenomeno della liquefazione

Nel linguaggio tecnico corrente con tale termine s'intende la perdita totale di resistenza dei terreni saturi sotto sollecitazioni statiche o dinamiche, in conseguenza delle quali il terreno raggiunge una condizione di fluidità pari a quella di una massa viscosa. Ciò avviene solitamente nei depositi di sabbie fini sciolte quando, sotto l'azione dei carichi applicati o di forze idrodinamiche, la pressione dell'acqua dei pori aumenta progressivamente fino ad eguagliare la pressione totale di confinamento, cioè fino a quando gli sforzi efficaci si riducono a zero.

La liquefazione di un deposito può avvenire sia in condizioni statiche sia sotto sollecitazioni dinamiche cicliche o monotoniche. Possono essere identificati tre principali meccanismi di liquefazione:

1. Liquefazione per filtrazione
2. Liquefazione per effetto di carichi monotonicamente crescenti
3. Liquefazione per effetto di carichi ciclici

6.3.1 Criteri di previsione e metodi per la valutazione del potenziale di liquefazione

Per una stima accurata della probabilità di liquefazione in un deposito sabbioso durante un terremoto, occorrerebbe tenere in conto di tutti i fattori che concorrono a creare le condizioni in cui il fenomeno può verificarsi. Dalle considerazioni esposte in precedenza si evince però l'impossibilità di inglobare in un unico modello tutti i parametri rappresentativi del fenomeno. Gli studi più recenti si sono sviluppati lungo due direttrici principali:

1. Osservazione delle caratteristiche sismiche, geologiche e geotecniche dei siti colpiti da terremoti distruttivi
2. Analisi del comportamento dei terreni in prove cicliche di laboratorio in condizioni controllate.

Sono emersi così i primi criteri empirici di previsione, basati sulle caratteristiche granulometriche e sullo stato di addensamento, cui hanno fatto seguito criteri e metodi più raffinati e complessi capaci di tener conto di un numero di parametri sempre più elevato.

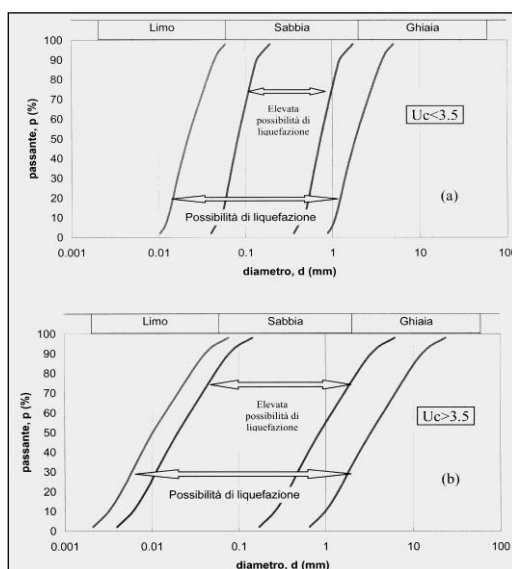
È possibile raggruppare la grande molteplicità di metodi per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei depositi in quattro classi:

1. **Criteri empirici:** si basano su parametri desunti da prove di identificazione o da misure della densità relativa ovvero da prove penetrometriche standard.
2. **Metodi semplificati:** si basano sul confronto fra le sollecitazioni di taglio che producono liquefazione e quelle indotte dal terremoto; richiedono quindi la valutazione dei parametri sia relativi all'evento sismico sia al deposito.

3. **Metodi di analisi dinamica semplificata:** richiedono la determinazione, alle diverse quote, della storia delle sollecitazioni delle tensioni e deformazioni di taglio, conseguente ad un input sismico, definito da una storia di accelerazioni al bedrock.
4. **Metodi dinamici avanzati:** vengono condotte in genere in condizioni bidimensionali mediante l'impiego di codici di calcolo ad elementi finiti o alle differenze finite ed in alcuni casi prevedono la modellazione integrata del sistema terreno-fondazione-struttura.

Sulla base di un'analisi preliminare della sismicità del sito e delle caratteristiche geotecniche del deposito, si può ritenere che la probabilità che si verifichi la liquefazione sia bassa o nulla (e quindi può essere omessa) nel caso si manifesti almeno una delle seguenti circostanze (ai sensi del D.M. 17/01/2018):

- ❑ Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) inferiori a 0.1 g;
- ❑ Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- ❑ Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{C1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{C1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
- ❑ Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nel primo grafico sotto riportato, nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ e nel secondo, nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.



Va sottolineato che *“quando la condizione 1 non risulti soddisfatta, le indagini geotecniche devono essere finalizzate almeno alla determinazione dei parametri necessari alla verifica delle condizioni 2, 3 e 4”*, ai sensi del § 7.11.3.4.2. del D.M. 17/01/2018.

6.3.2 Valutazione del rischio di liquefazione dei terreni

I risultati delle indagini geognostiche non hanno evidenziato la presenza, nel sottosuolo del sito in oggetto, di condizioni potenzialmente predisponenti l'insorgere di fenomeni di liquefazione dei terreni in caso di sisma. I litotipi incoerenti rinvenuti (cfr. Cap.5) risultano, infatti, in gran parte intercalati all'interno di prevalenti litotipi a comportamento coesivo e/o caratterizzati da eterogeneità granulometrica o grado di addensamento medio/elevato (Unità Litologica b): inoltre, le indagini hanno rinvenuto la falda idrica sotterranea a profondità pari o superiori a m. 15 dal piano campagna locale.

In ogni caso, si sottolinea che la normativa in materia di costruzioni di cui al D.M. 17/01/2018, stabilisce al § 7.11.3.4.3 che *“L'adeguatezza del margine di sicurezza nei confronti della liquefazione deve essere valutata e motivata dal progettista”*.

7 Conclusioni

Sulla base dei risultati delle indagini realizzate, delle osservazioni condotte in sede di sopralluogo e di quanto riportato dalle cartografie tematiche e dagli strumenti di pianificazione territoriale vigenti, si possono formulare le seguenti considerazioni preliminari:

- Il sito in oggetto risulta sub-pianeggiante e non interessato da fenomeni di dissesto gravitativo attivi e/o incipienti. Sulla base dei risultati delle indagini geognostiche realizzate, il sottosuolo dell'area in esame è caratterizzato dalla prevalenza di litotipi a comportamento coesivo di natura argillosa e limosa, intervallati da lenti ed intercalazioni subordinate costituite da litotipi incoerenti di natura sabbiosa, sabbioso limosa e ghiaiosa.
- Le prove penetrometriche hanno evidenziato che, nel primo sottosuolo, fra i due punti indagati, esiste una eterogeneità delle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei terreni.
- Nell'ambito della campagna di indagini realizzata è stata rinvenuta una falda idrica sotterranea soggiacente a m. 15,0 di profondità p.c. in corrispondenza di una delle verticali indagate (CPT-1): tale livello deve tuttavia essere considerato discontinuo (in corrispondenza della seconda verticale indagata non è stata rilevata la presenza di acqua fino a m. 20,0 p.c.) e soggetto a fluttuazioni stagionali. In ogni caso, non si può escludere che, in caso di precipitazioni abbondanti, possano instaurarsi falde

temporanee e/o ristagni localizzati di acque meteoriche anche in corrispondenza di intervalli stratigrafici meno profondi, con particolare riferimento a quelli maggiormente permeabili.

- Le indagini geofisiche compiute presso il sito in oggetto hanno consentito di attribuirne il sottosuolo alla categoria C, ai sensi dell'art. 3.2.2 del D.M. 17/01/2018. Le rilevazioni di microtremori condotte con metodologia HVSR a stazione singola hanno evidenziato la presenza di "picchi" del rapporto H/V riconducibili a contrasti di impedenza di origine stratigrafica: tali picchi sono risultati, nella maggior parte dei casi, caratterizzati da ampiezza poco significativa ($H/V < 2,5$).
- Sulla base dell'assetto litostratigrafico e geofisico desunto dai risultati delle indagini di cui ai punti precedenti del presente elenco, si ritiene che nel sottosuolo del sito in oggetto non sussistano condizioni predisponenti l'insorgere di significativi fenomeni di liquefazione dei terreni in caso di sisma.
- In tutti i casi in fase di progettazione esecutiva degli interventi si raccomanda di prevedere adeguati approfondimenti di indagine, con particolare riferimento alla realizzazione di indagini geognostiche dirette (prove penetrometriche e/o sondaggi, prove geotecniche di laboratorio), al fine di caratterizzare adeguatamente, sotto un profilo geologico e geotecnico, i terreni di sedime delle strutture previste, secondo quanto richiesto dalla Normativa Vigente in Materia di Costruzioni (di cui al DM 17/01/2018).

Imola, 16/07/2021

Dott. Geol. Tiziano Righini



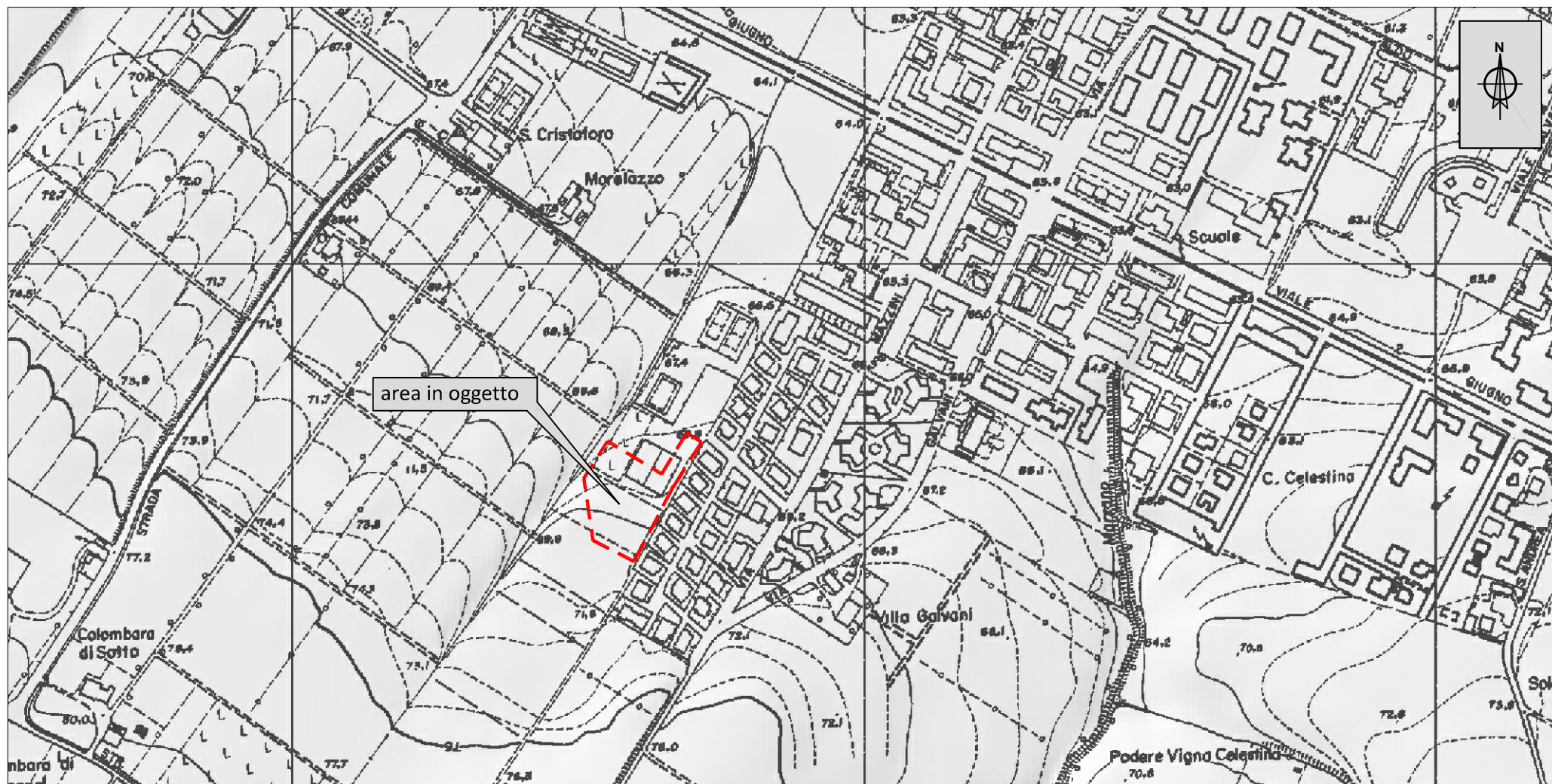
Dott. Geol. Carlo Berti Ceroni



ELENCO ALLEGATI:

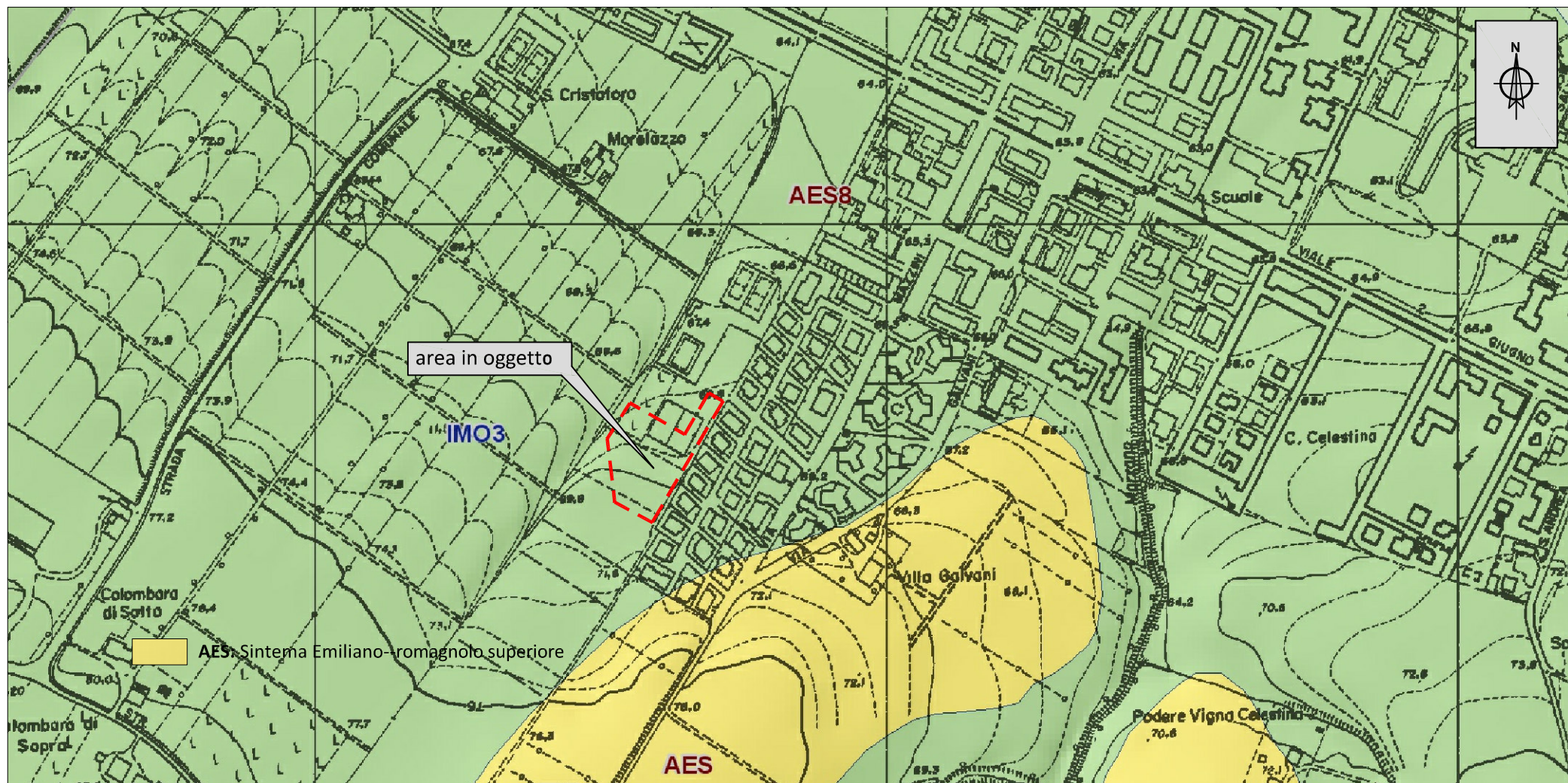
- **ESTRATTO C.T.R. IN SCALA 1:5.000**
- **ESTRATTO CARTA GEOLOGICA IN SCALA 1: 5.000**
- **UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SCALA 1: 500**
- **PROVE PENETROMETRICHE CPT: TABELLE E GRAFICI**
- **INDAGINE GEOFISICA MASW/REMI: RELAZIONE TECNICA**
- **INDAGINI GEOFISICHE HVSR: RELAZIONI TECNICHE**

ESTRATTO C.T.R. - scala 1:5.000*






* fonte: Carta Geologica d'Italia: Progetto CARG - Regione Emilia-Romagna

ESTRATTO CARTA GEOLOGICA - scala 1:5.000*



Legenda

-  AES8: Subsistema di Ravenna
-  AES: Sistema Emiliano-romagnolo superiore
-  IMO3: Formazione delle Sabbie Gialle - membro di Monte Castellaccio

* fonte: Carta Geologica d'Italia: Progetto CARG - Regione Emilia-Romagna

UBICAZIONE INDAGINI - scala 1:500



Legenda

- CPT - Prova penetrometrica statica con punta meccanica
- HVSr - Rilevazione di microtremori con metodologia a stazione singola
- - - MASW/Re.Mi - tracciato stendimento

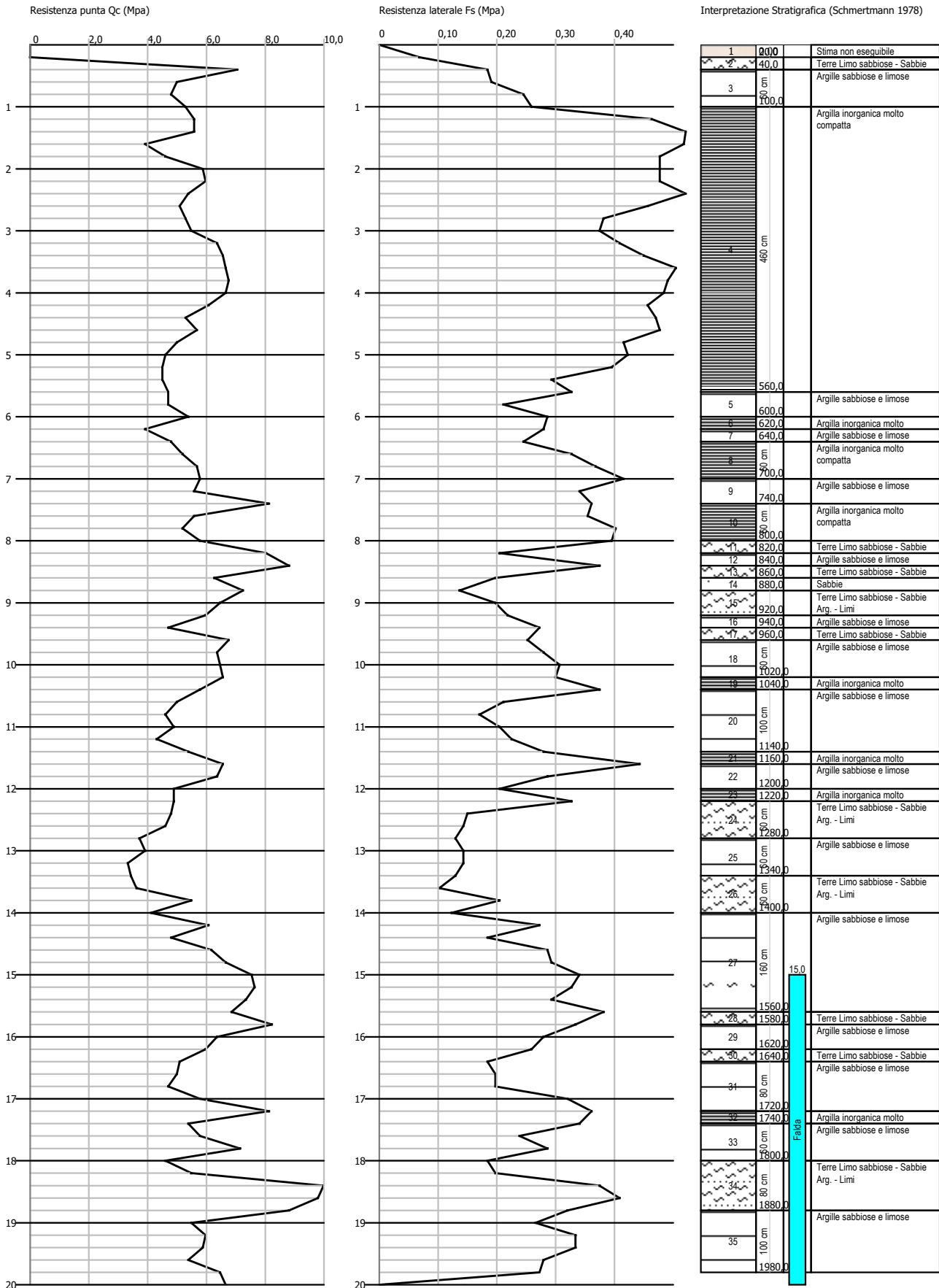
PROVE PENETROMETRICHE - VALORI DI RESISTENZA (Qc, Fs)										
Committente: Studio Tecnico Arch. Testoni										
Cantiere: Pdc area AUC_5 via Salvo D'acquistio comune di Ozzano Emilia (BO)										
Prof. (m)	PROVA CPT-1		PROVA CPT-2							
	Qc (MPa)	Fs (MPa)	Qc (MPa)	Fs (MPa)	Qc (MPa)	Fs (MPa)	Qc (MPa)	Fs (MPa)	Qc (MPa)	Fs (MPa)
0,20	0,00	0,07	4,22	0,11						
0,40	7,06	0,18	4,90	0,12						
0,60	5,00	0,18	4,71	0,18						
0,80	4,81	0,24	6,47	0,68						
1,00	5,30	0,25	5,98	0,45						
1,20	5,59	0,44	6,47	0,48						
1,40	5,59	0,54	4,90	0,41						
1,60	3,92	0,50	4,81	0,36						
1,80	4,61	0,46	4,31	0,28						
2,00	5,88	0,46	4,81	0,28						
2,20	5,98	0,46	5,10	0,29						
2,40	5,39	0,50	4,31	0,24						
2,60	5,10	0,44	3,92	0,22						
2,80	5,30	0,37	3,92	0,22						
3,00	5,49	0,36	4,61	0,24						
3,20	6,37	0,39	4,61	0,24						
3,40	6,57	0,43	3,53	0,67						
3,60	6,67	0,48	28,24	0,39						
3,80	6,77	0,47	48,05	0,44						
4,00	6,67	0,46	30,69	0,33						
4,20	6,08	0,44	31,09	0,80						
4,40	5,30	0,45	26,28	0,37						
4,60	5,69	0,46	27,36	0,18						
4,80	5,00	0,40	15,49	0,24						
5,00	4,61	0,41	2,65	0,15						
5,20	4,51	0,38	2,65	0,13						
5,40	4,51	0,28	2,84	0,14						
5,60	4,71	0,31	2,26	0,34						
5,80	4,71	0,20	14,32	0,11						
6,00	5,39	0,27	4,41	0,38						
6,20	3,92	0,27	6,37	0,25						
6,40	4,81	0,24	19,42	0,29						
6,60	5,20	0,31	25,50	0,73						
6,80	5,69	0,35	35,30	0,61						
7,00	5,79	0,40	36,19	0,20						
7,20	5,59	0,33	14,61	0,72						
7,40	8,14	0,35	9,61	0,29						
7,60	5,59	0,34	1,08	0,03						
7,80	5,20	0,39	1,86	0,04						
8,00	5,79	0,38	1,47	0,10						
8,20	8,04	0,20	1,96	0,13						
8,40	8,83	0,36	4,41	0,09						
8,60	6,28	0,19	4,90	0,08						
8,80	7,26	0,13	2,94	0,08						
9,00	6,47	0,19	2,65	0,08						
9,20	5,98	0,21	1,57	0,07						
9,40	4,71	0,26	2,16	0,08						
9,60	6,77	0,24	2,26	0,05						
9,80	6,37	0,27	1,08	0,05						
10,00	6,47	0,29	2,06	0,13						
10,20	6,57	0,29	2,94	0,12						
10,40	5,79	0,36	3,04	0,10						
10,60	5,00	0,20	4,02	0,15						
10,80	4,61	0,16	4,02	0,16						
11,00	4,90	0,20	5,39	0,23						
11,20	4,31	0,22	4,51	0,20						
11,40	5,39	0,27	4,71	0,15						
11,60	6,57	0,42	6,47	0,14						
11,80	6,37	0,27	4,22	0,14						
12,00	4,90	0,20	3,92	0,09						
12,20	4,90	0,31	3,33	0,10						
12,40	4,81	0,14	2,65	0,08						
12,60	4,61	0,14	2,84	0,18						
12,80	3,73	0,12	6,67	0,35						
13,00	3,92	0,14	10,40	0,58						
13,20	3,33	0,14	19,42	0,25						
13,40	3,43	0,12	16,57	0,54						
13,60	3,63	0,10	8,83	0,69						
13,80	5,49	0,20	6,67	0,27						
14,00	4,12	0,12	2,65	0,09						
14,20	6,08	0,26	2,84	0,10						
14,40	4,81	0,18	3,04	0,10						
14,60	6,18	0,27	3,33	0,08						
14,80	6,67	0,28	4,02	0,12						
15,00	7,55	0,33	4,51	0,16						
15,20	7,65	0,31	4,41	0,20						
15,40	7,35	0,28	5,30	0,23						
15,60	6,86	0,37	4,90	0,39						
15,80	8,24	0,32	5,98	0,31						
16,00	6,37	0,27	5,59	0,31						
16,20	5,98	0,25	5,59	0,31						
16,40	5,10	0,18	5,59	0,27						
16,60	5,00	0,19	6,37	0,27						
16,80	4,71	0,19	6,67	0,32						
17,00	5,79	0,31	6,08	0,34						
17,20	8,14	0,35	5,98	0,37						
17,40	5,39	0,33	6,77	0,35						
17,60	5,79	0,23	5,69	0,27						
17,80	7,16	0,27	6,18	0,27						
18,00	4,61	0,18	6,18	0,31						
18,20	5,49	0,19	6,96	0,39						
18,40	10,69	0,36	7,45	0,33						
18,60	9,81	0,39	6,96	0,31						
18,80	8,83	0,31	6,08	0,31						
19,00	5,49	0,25	6,18	0,36						
19,20	5,98	0,32	5,88	0,31						
19,40	5,88	0,32	5,39	0,32						
19,60	5,39	0,27	5,30	0,28						
19,80	6,47	0,26	5,59	0,23						
20,00	6,67	0,00	6,67	0,00						

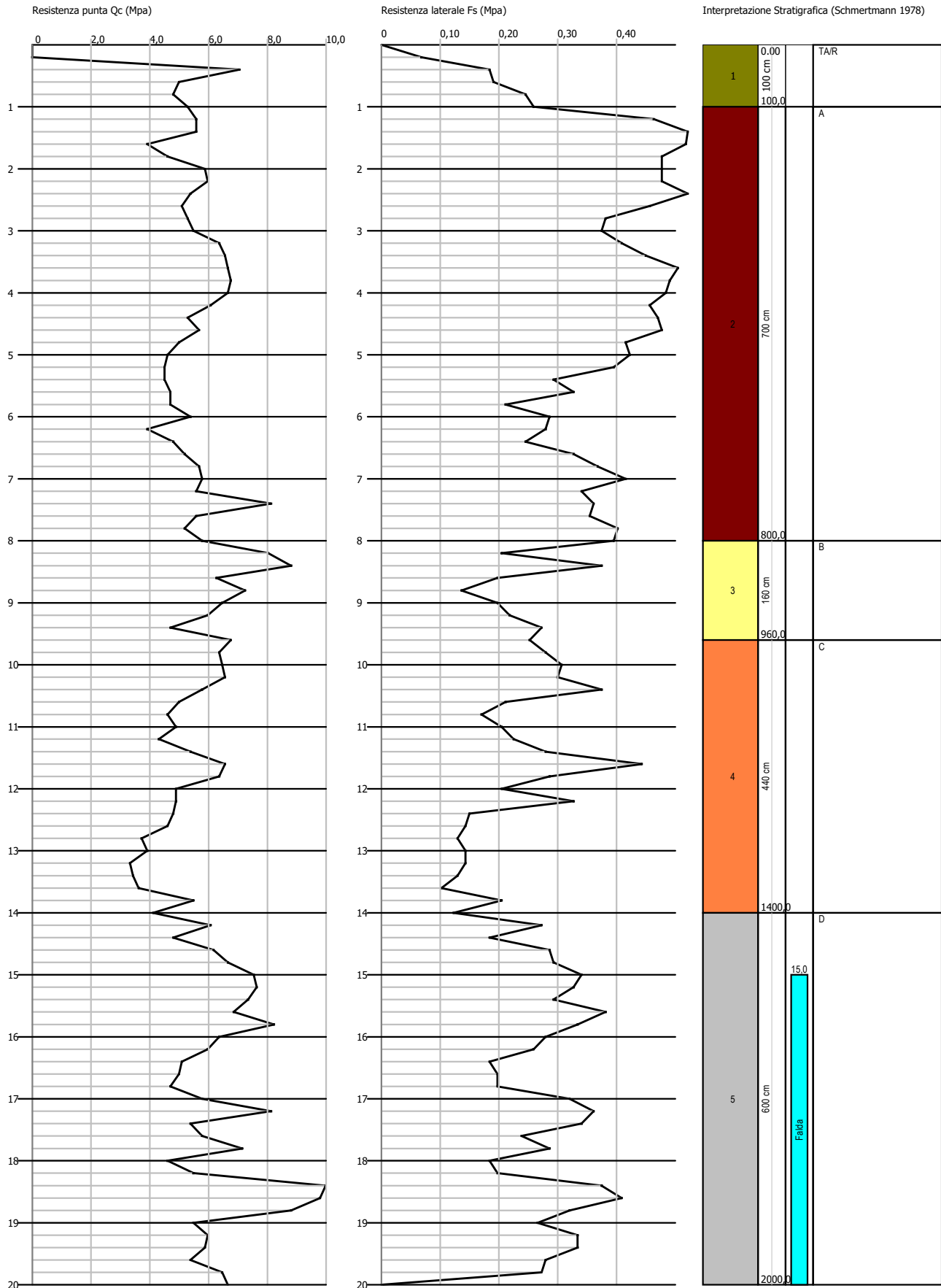
STIMA PARAMETRI GEOTECNICI CPT-1

Nr: Numero progressivo strato
 Prof: Profondità strato (m)
 Tipo: C: Coesivo. I: Incoerente. CI: Coesivo-Incoerente
 Cu: Coesione non drenata (KPa)
 Eu: Modulo di defomazione non drenato (Mpa)
 Mo: Modulo Edometrico (Mpa)
 G: Modulo di deformazione a taglio (Mpa)
 OCR: Grado di sovraconsolidazione
 Puv: Peso unità di volume (KN/m³)
 PuvS: Peso unità di volume saturo (KN/m³)
 Dr: Densità relativa (%)
 Fi: Angolo di resistenza al taglio (°)
 Ey: Modulo di Young (Mpa)
 Vs: Velocità onde di taglio (m/s)

Nr.	Prof.	Tipo	Cu	Eu	Mo	G	OCR	Puv	PuvS	Dr	Fi	Ey	Vs
1	0,20												
2	0,40	CI	235,4	264,7	10,6	37,5	>9	21,5	22,2	100,0	45,0	14,1	222,52
3	0,60	CI	166,7	187,3	7,5	30,3	>9	20,9	21,7	100,0	42,9	10,0	233,71
4	0,80	CI	160,2	179,8	7,2	29,6	>9	20,8	21,6	100,0	40,2	9,6	246,31
5	1,00	CI	176,5	198,0	7,9	31,4	8,4	21,0	21,8	100,0	39,0	10,6	263,09
6	1,20	C	186,3	208,9	8,4	32,5	>9	21,1	21,9	--	--	--	229,34
7	1,40	C	186,3	208,7	8,4	32,5	>9	21,1	21,9	--	--	--	236,81
8	1,60	C	130,8	146,1	11,8	26,2	>9	20,5	21,3	--	--	--	228,04
9	1,80	C	153,6	171,7	6,9	28,9	>9	20,7	21,5	--	--	--	240,11
10	2,00	C	196,1	219,3	8,8	33,5	>9	21,1	21,9	--	--	--	256,00
11	2,20	C	199,4	222,8	9,0	33,8	>9	21,2	22,0	--	--	--	261,41
12	2,40	C	179,8	200,6	8,1	31,8	>9	21,0	21,8	--	--	--	260,70
13	2,60	C	170,0	189,4	7,6	30,7	>9	20,9	21,7	--	--	--	261,84
14	2,80	C	176,5	196,6	7,9	31,4	>9	21,0	21,8	--	--	--	267,15
15	3,00	C	183,1	203,8	8,2	32,1	>9	21,0	21,8	--	--	--	272,24
16	3,20	C	212,5	236,8	9,6	35,2	>9	21,3	22,1	--	--	--	282,92
17	3,40	C	219,0	243,9	9,9	35,8	>9	21,3	22,1	--	--	--	287,56
18	3,60	C	222,3	247,5	10,0	36,2	>9	21,3	22,1	--	--	--	291,26
19	3,80	C	225,6	251,0	10,1	36,5	>9	21,4	22,2	--	--	--	294,82
20	4,00	C	222,3	247,1	10,0	36,2	>9	21,3	22,1	--	--	--	296,70
21	4,20	C	202,7	224,9	9,1	34,2	>9	21,2	22,0	--	--	--	294,26
22	4,40	C	176,5	195,3	7,9	31,4	>9	21,0	21,7	--	--	--	289,29
23	4,60	C	189,6	209,9	8,5	32,8	>9	21,1	21,9	--	--	--	295,29
24	4,80	C	166,7	184,0	7,5	30,3	>9	20,9	21,6	--	--	--	290,59
25	5,00	C	153,6	169,1	6,9	28,9	>9	20,7	21,5	--	--	--	288,29
26	5,20	C	150,4	165,3	6,8	28,5	>9	20,7	21,5	--	--	--	289,06
27	5,40	C	150,4	165,1	6,8	28,5	>9	20,7	21,5	--	--	--	290,88
28	5,60	C	156,9	172,3	7,1	29,2	>9	20,8	21,5	--	--	--	294,90
29	5,80	CI	156,9	172,2	7,1	29,2	1,0	20,7	21,5	41,5	28,2	9,4	330,07
30	6,00	CI	179,8	197,8	8,1	31,8	1,1	21,0	21,8	44,4	28,7	10,8	343,05
31	6,20	C	130,8	142,5	11,8	26,2	>9	20,4	21,2	--	--	--	290,19
32	6,40	CI	160,2	175,4	7,2	29,6	0,9	20,8	21,6	39,2	27,8	9,6	336,03
33	6,60	C	173,3	190,0	7,8	31,1	>9	20,9	21,7	--	--	--	308,53
34	6,80	C	189,6	208,2	8,5	32,8	>9	21,1	21,8	--	--	--	315,17
35	7,00	C	192,9	211,7	8,7	33,2	>9	21,1	21,9	--	--	--	317,69
36	7,20	CI	186,3	204,2	8,4	32,5	0,9	21,0	21,8	40,0	27,9	11,2	354,43
37	7,40	CI	271,3	299,6	12,2	40,9	1,3	21,7	22,4	49,9	29,6	16,3	390,90
38	7,60	C	186,3	203,9	8,4	32,5	>9	21,0	21,8	--	--	--	320,11
39	7,80	C	173,3	189,0	7,8	31,1	>9	20,9	21,7	--	--	--	317,29
40	8,00	C	192,9	210,9	8,7	33,2	>9	21,1	21,9	--	--	--	324,87
41	8,20	CI	268,0	295,3	12,1	40,6	1,1	21,6	22,4	46,5	29,1	16,1	394,97
42	8,40	CI	294,2	324,6	13,2	42,9	1,2	21,8	22,6	48,4	29,4	17,7	405,61
43	8,60	CI	209,2	228,8	9,4	34,9	0,8	21,2	22,0	38,0	27,6	12,6	373,50
44	8,80	I	--	--	10,9	38,1	0,9	17,7	20,6	41,5	28,2	14,5	388,45
45	9,00	CI	215,7	235,9	9,7	35,5	0,8	21,3	22,1	37,6	27,5	12,9	378,49
46	9,20	CI	199,4	217,3	9,0	33,8	0,7	21,1	21,9	34,6	27,0	12,0	372,14
47	9,40	CI	156,9	169,4	7,1	29,2	0,6	20,7	21,5	27,1	25,7	9,4	351,38
48	9,60	CI	225,6	246,4	10,1	36,5	0,8	21,3	22,1	36,9	27,4	13,5	385,94

49	9,80	CI	212,5	231,6	9,6	35,2	0,7	21,2	22,0	34,6	27,0	12,7	381,21
50	10,00	CI	215,7	235,1	9,7	35,5	0,7	21,3	22,0	34,4	27,0	12,9	383,68
51	10,20	CI	219,0	238,6	9,9	35,8	0,7	21,3	22,1	34,3	26,9	13,1	386,13
52	10,40	C	192,9	209,0	8,7	33,2	>9	21,1	21,9	--	--	--	339,26
53	10,60	CI	166,7	179,4	7,5	30,3	0,5	20,8	21,6	25,3	25,4	10,0	362,36
54	10,80	CI	153,6	164,6	6,9	28,9	<0,5	20,7	21,5	22,4	24,9	9,2	355,84
55	11,00	CI	163,4	175,4	7,4	30,0	0,5	20,8	21,6	23,7	25,1	9,8	362,25
56	11,20	CI	143,8	153,2	12,9	27,7	<0,5	20,6	21,3	19,5	24,4	8,6	351,61
57	11,40	CI	179,8	193,5	8,1	31,8	0,5	20,9	21,7	25,3	25,4	10,8	372,70
58	11,60	C	219,0	237,5	9,9	35,8	>9	21,3	22,1	--	--	--	353,38
59	11,80	CI	212,5	230,0	9,6	35,2	0,6	21,2	22,0	29,1	26,0	12,7	390,39
60	12,00	CI	163,4	174,7	7,4	30,0	<0,5	20,8	21,6	21,1	24,7	9,8	366,30
61	12,20	C	163,4	174,5	7,4	30,0	8,4	20,8	21,6	--	--	--	337,93
62	12,40	CI	160,2	170,7	7,2	29,6	<0,5	20,7	21,5	19,6	24,4	9,6	365,96
63	12,60	CI	153,6	163,2	6,9	28,9	<0,5	20,7	21,4	17,9	24,1	9,2	362,88
64	12,80	CI	124,2	129,9	11,2	25,3	<0,5	20,3	21,1	11,4	23,0	7,5	344,70
65	13,00	CI	130,8	137,1	11,8	26,2	<0,5	20,4	21,2	12,4	23,1	7,8	349,84
66	13,20	CI	111,1	114,9	10,0	23,7	<0,5	20,1	20,9	7,3	22,3	6,7	336,49
67	13,40	CI	114,4	118,4	10,3	24,1	<0,5	20,1	20,9	7,7	22,3	6,9	339,57
68	13,60	CI	120,9	125,6	10,9	24,9	<0,5	20,2	21,0	8,9	22,5	7,3	344,96
69	13,80	CI	183,1	195,3	8,2	32,1	<0,5	21,0	21,7	20,3	24,5	11,0	383,48
70	14,00	CI	137,3	143,7	12,4	26,9	<0,5	20,5	21,2	11,7	23,0	8,2	357,41
71	14,20	CI	202,7	217,1	9,1	34,2	<0,5	21,1	21,9	22,4	24,9	12,2	394,83
72	14,40	CI	160,2	169,1	7,2	29,6	<0,5	20,7	21,5	15,3	23,6	9,6	372,84
73	14,60	CI	205,9	220,5	9,3	34,5	<0,5	21,2	21,9	22,1	24,8	12,4	397,82
74	14,80	CI	222,3	238,7	10,0	36,2	0,5	21,3	22,1	23,9	25,1	13,3	406,23
75	15,00	CI	251,7	271,6	11,3	39,0	0,6	21,5	22,3	27,0	25,7	15,1	419,84
76	15,20	CI	255,0	275,2	11,5	39,3	0,6	21,5	22,3	27,0	25,7	15,3	421,76
77	15,40	CI	245,2	264,1	11,0	38,4	0,6	21,5	22,2	25,5	25,5	14,7	418,02
78	15,60	CI	228,8	245,6	10,3	36,8	0,5	21,3	22,1	23,1	25,1	13,7	411,22
79	15,80	CI	274,6	297,0	12,4	41,2	0,6	21,6	22,4	28,0	25,9	16,5	430,87
80	16,00	CI	212,5	227,0	9,6	35,2	<0,5	21,2	22,0	20,2	24,6	12,7	404,38
81	16,20	CI	199,4	212,2	9,0	33,8	<0,5	21,1	21,9	18,0	24,3	12,0	398,33
82	16,40	CI	170,0	179,0	7,6	30,7	<0,5	20,8	21,6	13,1	23,5	10,2	383,01
83	16,60	CI	166,7	175,3	7,5	30,3	<0,5	20,8	21,6	12,2	23,3	10,0	381,47
84	16,80	CI	156,9	164,2	7,1	29,2	<0,5	20,7	21,5	10,1	23,0	9,4	376,02
85	17,00	CI	192,9	204,5	8,7	33,2	<0,5	21,0	21,8	15,7	24,0	11,6	396,34
86	17,20	CI	271,3	292,7	12,2	40,9	0,6	21,6	22,4	25,1	25,6	16,3	432,16
87	17,40	C	179,8	189,7	8,1	31,8	6,4	20,9	21,7	--	--	--	360,45
88	17,60	CI	192,9	204,3	8,7	33,2	<0,5	21,0	21,8	14,7	23,9	11,6	397,35
89	17,80	CI	238,6	255,7	10,7	37,8	<0,5	21,4	22,2	20,4	24,9	14,3	419,51
90	18,00	CI	153,6	160,0	6,9	28,9	<0,5	20,6	21,4	7,5	22,7	9,2	375,92
91	18,20	CI	183,1	193,0	8,2	32,1	<0,5	20,9	21,7	12,2	23,5	11,0	393,14
92	18,40	CI	356,3	387,8	16,0	48,3	0,7	22,1	22,9	31,0	26,8	21,4	465,06
93	18,60	CI	326,9	354,6	14,7	45,8	0,7	21,9	22,7	28,2	26,3	19,6	455,50
94	18,80	CI	294,2	317,8	13,2	42,9	0,6	21,8	22,5	24,8	25,8	17,7	443,99
95	19,00	CI	183,1	192,6	8,2	32,1	<0,5	20,9	21,7	10,9	23,4	11,0	394,47
96	19,20	CI	199,4	211,0	9,0	33,8	<0,5	21,1	21,9	13,0	23,8	12,0	403,34
97	19,40	CI	196,1	207,2	8,8	33,5	<0,5	21,1	21,8	12,3	23,7	11,8	401,99
98	19,60	CI	179,8	188,7	8,1	31,8	<0,5	20,9	21,7	9,5	23,2	10,8	393,61
99	19,80	CI	215,7	229,1	9,7	35,5	<0,5	21,2	22,0	14,4	24,1	12,9	412,36
100	20,00	I	--	--	10,0	36,2	<0,5	0,0	0,0	15,0	24,2	13,3	415,75





STIMA PARAMETRI GEOTECNICI CPT-2

Nr: Numero progressivo strato
 Prof: Profondità strato (m)
 Tipo: C: Coesivo. I: Incoerente. CI: Coesivo-Incoerente
 Cu: Coesione non drenata (KPa)
 Eu: Modulo di defomazione non drenato (Mpa)
 Mo: Modulo Edometrico (Mpa)
 G: Modulo di deformazione a taglio (Mpa)
 OCR: Grado di sovraconsolidazione
 Puv: Peso unità di volume (KN/m³)
 PuvS: Peso unità di volume saturo (KN/m³)
 Dr: Densità relativa (%)
 Fi: Angolo di resistenza al taglio (°)
 Ey: Modulo di Young (Mpa)
 Vs: Velocità onde di taglio (m/s)

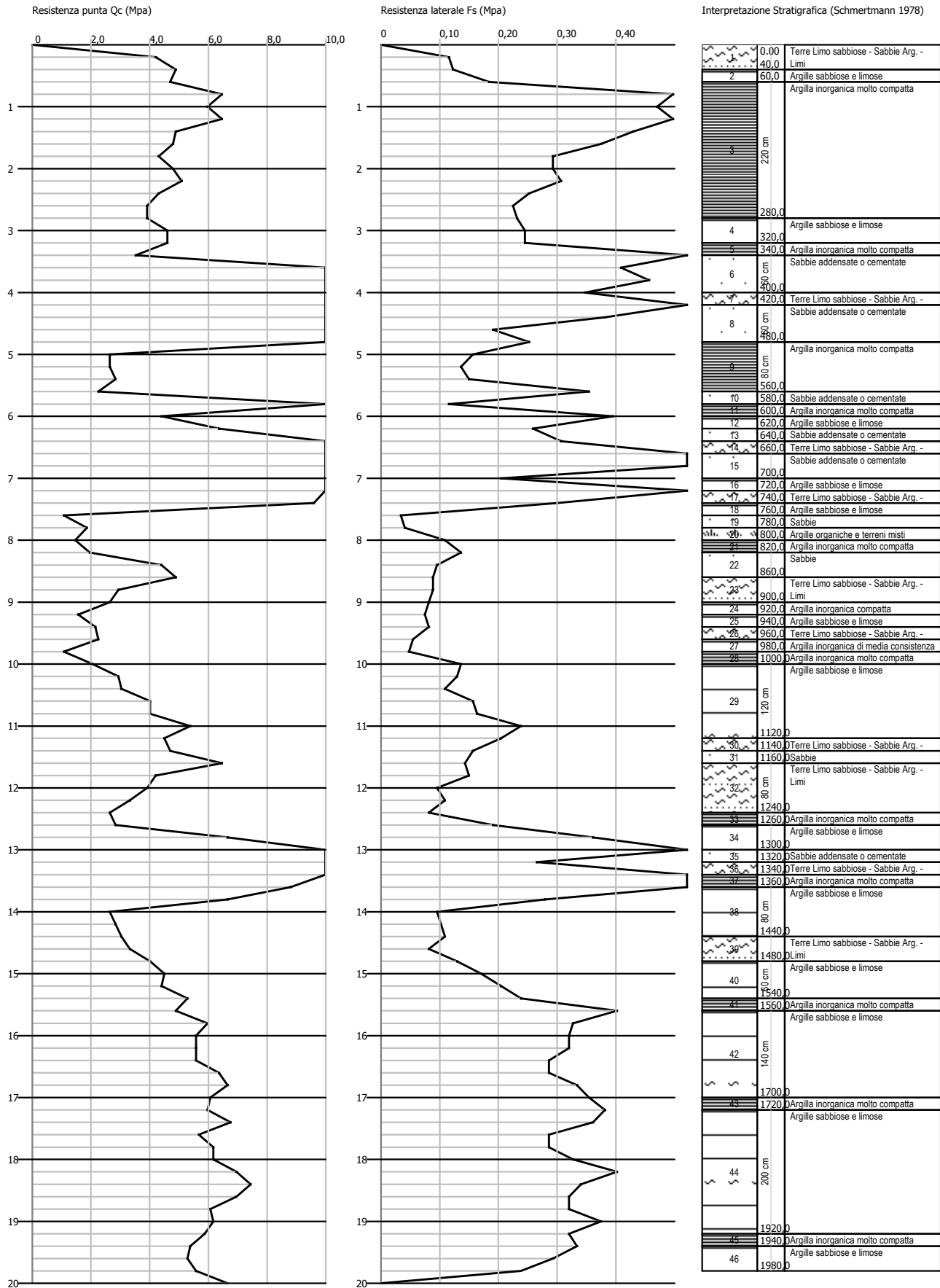
Nr.	Prof.	Tipo	Cu	Eu	Mo	G	OCR	Puv	PuvS	Dr	Fi	Ey	Vs
1	0,20	CI	140,6	158,1	12,7	27,3	>9	20,6	21,4	100,0	45,0	8,4	194,48
2	0,40	CI	163,4	183,6	7,4	30,0	>9	20,9	21,6	100,0	42,9	9,8	231,73
3	0,60	CI	156,9	176,1	7,1	29,2	>9	20,8	21,6	100,0	40,1	9,4	244,51
4	0,80	C	215,7	242,2	9,7	35,5	>9	21,3	22,1	--	--	--	225,89
5	1,00	C	199,4	223,6	9,0	33,8	>9	21,2	22,0	--	--	--	231,96
6	1,20	C	215,7	241,8	9,7	35,5	>9	21,3	22,1	--	--	--	243,05
7	1,40	C	163,4	182,9	7,4	30,0	>9	20,8	21,6	--	--	--	237,39
8	1,60	C	160,2	179,0	7,2	29,6	>9	20,8	21,6	--	--	--	241,94
9	1,80	C	143,8	160,5	12,9	27,7	>9	20,6	21,4	--	--	--	242,00
10	2,00	C	160,2	178,7	7,2	29,6	>9	20,8	21,6	--	--	--	251,12
11	2,20	C	170,0	189,6	7,6	30,7	>9	20,9	21,7	--	--	--	257,91
12	2,40	C	143,8	160,0	12,9	27,7	>9	20,6	21,4	--	--	--	253,86
13	2,60	C	130,8	145,1	11,8	26,2	>9	20,5	21,3	--	--	--	252,81
14	2,80	C	130,8	145,0	11,8	26,2	>9	20,5	21,3	--	--	--	255,88
15	3,00	CI	153,6	170,6	6,9	28,9	1,8	20,7	21,5	59,5	31,3	9,2	302,85
16	3,20	CI	153,6	170,4	6,9	28,9	1,7	20,7	21,5	57,6	31,0	9,2	305,36
17	3,40	C	117,7	129,8	10,6	24,5	>9	20,3	21,1	--	--	--	259,12
18	3,60	I	--	--	42,4	87,4	>9	18,6	21,6	100,0	39,4	56,5	488,43
19	3,80	I	--	--	72,1	120,9	>9	18,6	21,6	100,0	41,8	96,1	561,80
20	4,00	I	--	--	46,0	91,9	8,9	18,6	21,6	100,0	39,3	61,4	505,15
21	4,20	CI	1036,2	1162,6	46,6	92,6	8,5	23,9	24,7	100,0	39,1	62,2	510,10
22	4,40	I	--	--	39,4	83,6	6,9	18,6	21,6	98,3	38,0	52,6	492,10
23	4,60	I	--	--	41,0	85,7	6,8	18,6	21,6	98,2	38,0	54,7	499,76
24	4,80	I	--	--	23,2	60,5	3,7	18,6	21,6	80,7	35,0	31,0	435,52
25	5,00	C	88,3	95,5	7,9	20,6	>9	19,8	20,6	--	--	--	261,58
26	5,20	C	88,3	95,4	7,9	20,6	8,8	19,8	20,6	--	--	--	263,19
27	5,40	C	94,8	102,6	8,5	21,5	>9	19,9	20,7	--	--	--	268,21
28	5,60	C	75,2	80,4	6,8	18,7	>9	19,5	20,3	--	--	--	258,65
29	5,80	I	--	--	21,5	57,7	2,9	18,6	21,6	73,1	33,7	28,6	436,93
30	6,00	C	147,1	161,0	6,6	28,1	>9	20,6	21,4	--	--	--	295,24
31	6,20	CI	212,5	234,4	9,6	35,2	1,2	21,3	22,0	48,0	29,3	12,7	359,64
32	6,40	I	--	--	29,1	69,5	3,5	18,6	21,6	79,0	34,7	38,8	477,57
33	6,60	CI	849,9	951,1	38,2	82,1	4,5	23,6	24,4	85,9	35,9	51,0	513,47
34	6,80	I	--	--	53,0	100,1	6,0	17,7	20,6	94,3	37,3	70,6	559,38
35	7,00	I	--	--	54,3	101,7	5,9	18,6	21,6	94,2	37,3	72,4	564,83
36	7,20	CI	487,1	542,5	21,9	58,4	2,3	22,6	23,4	67,3	32,7	29,2	451,50
37	7,40	CI	320,4	354,8	14,4	45,2	1,5	21,9	22,7	54,5	30,4	19,2	407,95
38	7,60	CI	36,0	34,7	3,2	11,9	<0.5	18,1	18,9	5,0	19,5	2,2	236,39
39	7,80	I	--	--	9,3	16,6	<0.5	17,7	20,6	6,0	22,0	3,7	271,94
40	8,00	C	49,0	49,1	4,4	14,4	4,5	18,7	19,5	--	--	--	253,53
41	8,20	C	65,4	67,3	5,9	17,1	5,5	19,2	20,0	--	--	--	268,07
42	8,40	I	--	--	6,6	28,1	0,6	17,7	20,6	28,8	26,0	8,8	340,57
43	8,60	I	--	--	7,4	30,0	0,7	17,7	20,6	31,2	26,4	9,8	350,64
44	8,80	CI	98,1	103,7	8,8	21,9	<0.5	19,9	20,7	15,9	23,8	5,9	309,29
45	9,00	CI	88,3	92,5	7,9	20,6	<0.5	19,7	20,5	12,2	23,1	5,3	302,05
46	9,20	C	52,3	51,9	4,7	14,9	2,7	18,8	19,6	--	--	--	262,01
47	9,40	CI	71,9	73,8	6,5	18,2	<0.5	19,4	20,1	5,2	21,9	4,3	288,41
48	9,60	CI	75,2	77,4	6,8	18,7	<0.5	19,4	20,2	5,8	22,0	4,5	292,39

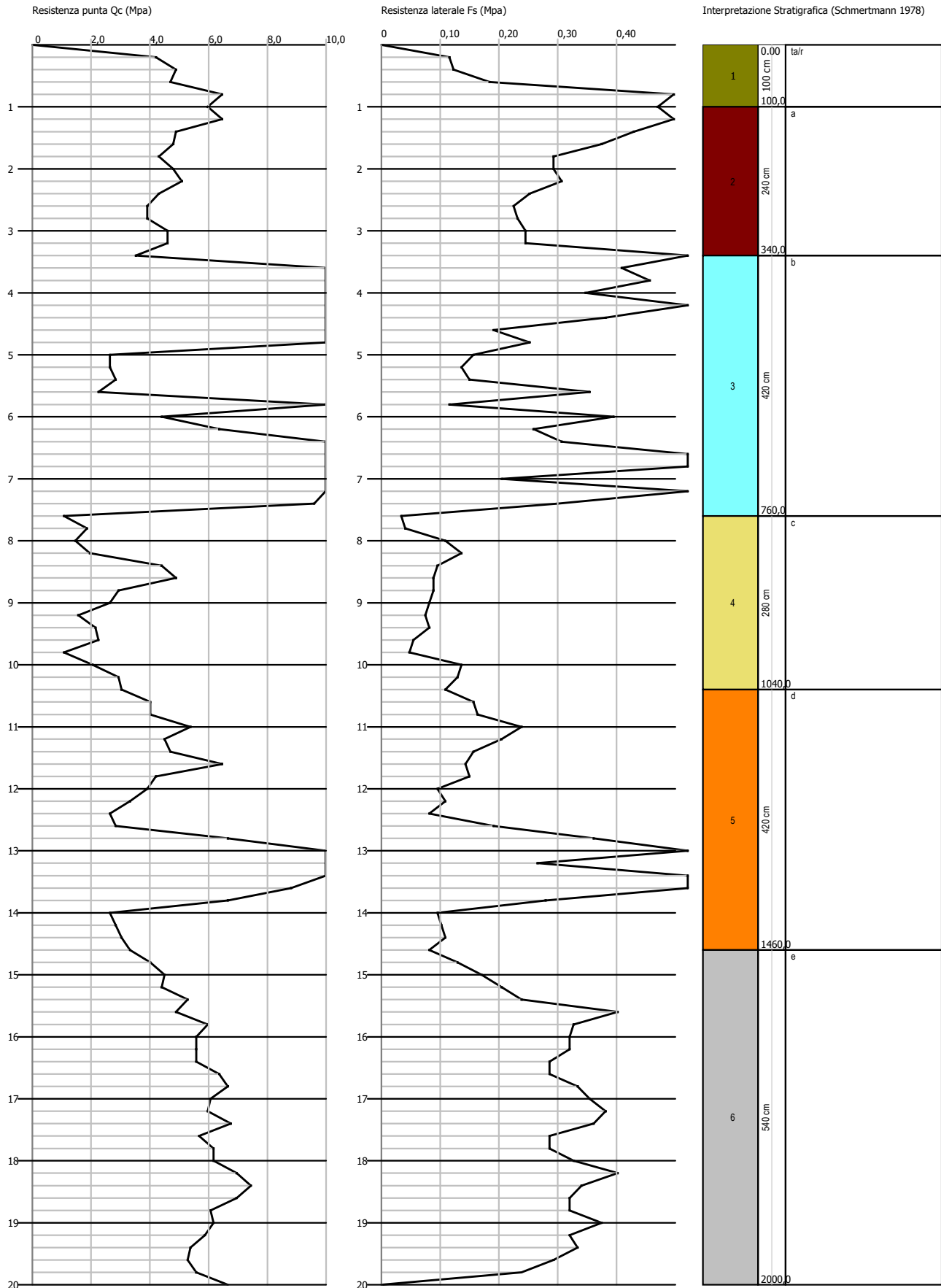
49	9,80	C	36,0	33,1	3,2	11,9	1,6	18,0	18,8	--	--	--	247,19
50	10,00	C	68,6	69,7	6,2	17,6	4,5	19,3	20,0	--	--	--	278,72
51	10,20	CI	98,1	102,7	8,8	21,9	<0.5	19,9	20,7	11,8	23,0	5,9	314,81
52	10,40	CI	101,3	106,2	9,1	22,4	<0.5	20,0	20,7	12,2	23,1	6,1	318,17
53	10,60	CI	134,0	142,8	12,1	26,6	<0.5	20,4	21,2	19,7	24,4	8,0	342,13
54	10,80	CI	134,0	142,7	12,1	26,6	<0.5	20,4	21,2	19,1	24,3	8,0	342,94
55	11,00	CI	179,8	194,0	8,1	31,8	0,6	20,9	21,7	27,0	25,7	10,8	370,06
56	11,20	CI	150,4	160,8	6,8	28,5	<0.5	20,6	21,4	21,3	24,7	9,0	354,66
57	11,40	CI	156,9	168,0	7,1	29,2	<0.5	20,7	21,5	22,0	24,8	9,4	359,28
58	11,60	I	--	--	9,7	35,5	0,7	17,7	20,6	30,7	26,3	12,9	390,01
59	11,80	CI	140,6	149,3	12,7	27,3	<0.5	20,5	21,3	17,9	24,1	8,4	350,97
60	12,00	CI	130,8	138,1	11,8	26,2	<0.5	20,4	21,2	15,3	23,7	7,8	345,40
61	12,20	CI	111,1	115,9	10,0	23,7	<0.5	20,1	20,9	10,2	22,8	6,7	332,28
62	12,40	CI	88,3	90,0	7,9	20,6	<0.5	19,7	20,5	5,0	21,5	5,3	314,23
63	12,60	C	94,8	97,2	8,5	21,5	5,0	19,8	20,6	--	--	--	306,68
64	12,80	CI	222,3	240,5	10,0	36,2	0,6	21,3	22,1	28,7	26,0	13,3	397,80
65	13,00	CI	346,5	380,0	15,6	47,4	0,9	22,1	22,8	40,9	28,1	20,8	445,62
66	13,20	I	--	--	29,1	69,5	1,7	18,6	21,6	58,4	31,1	38,8	522,32
67	13,40	CI	552,4	611,4	24,9	63,1	1,4	22,8	23,6	53,4	30,2	33,1	502,95
68	13,60	C	294,2	320,7	13,2	42,9	>9	21,8	22,6	--	--	--	381,35
69	13,80	CI	222,3	239,6	10,0	36,2	0,6	21,3	22,1	26,4	25,6	13,3	401,81
70	14,00	CI	88,3	88,7	7,9	20,6	<0.5	19,7	20,4	5,0	20,9	5,3	319,25
71	14,20	CI	94,8	95,9	8,5	21,5	<0.5	19,8	20,6	5,0	21,2	5,7	325,59
72	14,40	CI	101,3	103,1	9,1	22,4	<0.5	19,9	20,7	5,0	21,5	6,1	331,65
73	14,60	CI	111,1	114,0	10,0	23,7	<0.5	20,1	20,9	5,0	21,9	6,7	340,01
74	14,80	CI	134,0	139,6	12,1	26,6	<0.5	20,4	21,2	9,9	22,7	8,0	356,98
75	15,00	CI	150,4	157,8	6,8	28,5	<0.5	20,6	21,4	12,8	23,2	9,0	368,06
76	15,20	CI	147,1	154,0	6,6	28,1	<0.5	20,6	21,4	11,8	23,0	8,8	366,66
77	15,40	CI	176,5	186,9	7,9	31,4	<0.5	20,9	21,7	16,6	23,9	10,6	384,47
78	15,60	C	163,4	172,1	7,4	30,0	8,0	20,7	21,5	--	--	--	350,57
79	15,80	CI	199,4	212,4	9,0	33,8	<0.5	21,1	21,9	19,3	24,3	12,0	397,73
80	16,00	CI	186,3	197,5	8,4	32,5	<0.5	21,0	21,8	17,0	23,9	11,2	391,65
81	16,20	CI	186,3	197,4	8,4	32,5	<0.5	21,0	21,8	16,6	23,9	11,2	392,29
82	16,40	CI	186,3	197,2	8,4	32,5	<0.5	21,0	21,8	16,3	23,8	11,2	392,91
83	16,60	CI	212,5	226,5	9,6	35,2	<0.5	21,2	22,0	19,7	24,4	12,7	406,72
84	16,80	CI	222,3	237,3	10,0	36,2	<0.5	21,3	22,1	20,6	24,6	13,3	411,99
85	17,00	CI	202,7	215,1	9,1	34,2	<0.5	21,1	21,9	17,6	24,1	12,2	403,17
86	17,20	C	199,4	211,3	9,0	33,8	6,9	21,1	21,9	--	--	--	369,37
87	17,40	CI	225,6	240,5	10,1	36,5	<0.5	21,3	22,1	20,0	24,5	13,5	415,40
88	17,60	CI	189,6	199,9	8,5	32,8	<0.5	21,0	21,8	14,7	23,5	11,4	398,27
89	17,80	CI	205,9	218,1	9,3	34,5	<0.5	21,1	21,9	16,7	23,9	12,4	407,22
90	18,00	CI	205,9	218,0	9,3	34,5	<0.5	21,1	21,9	16,4	23,8	12,4	407,81
91	18,20	CI	232,1	247,2	10,4	37,1	<0.5	21,3	22,1	19,5	24,4	13,9	420,84
92	18,40	CI	248,4	265,5	11,2	38,7	<0.5	21,5	22,2	21,1	24,6	14,9	428,71
93	18,60	CI	232,1	246,9	10,4	37,1	<0.5	21,3	22,1	18,8	24,3	13,9	422,05
94	18,80	CI	202,7	213,7	9,1	34,2	<0.5	21,1	21,9	14,6	23,5	12,2	408,50
95	19,00	CI	205,9	217,2	9,3	34,5	<0.5	21,1	21,9	14,7	23,6	12,4	410,70
96	19,20	CI	196,1	206,0	8,8	33,5	<0.5	21,0	21,8	13,0	23,3	11,8	406,25
97	19,40	C	179,8	187,5	8,1	31,8	5,3	20,9	21,7	--	--	--	369,86
98	19,60	CI	176,5	183,6	7,9	31,4	<0.5	20,9	21,6	9,4	22,6	10,6	396,70
99	19,80	CI	186,3	194,5	8,4	32,5	<0.5	21,0	21,7	10,6	22,8	11,2	402,64
100	20,00	I	--	--	10,0	36,2	<0.5	0,0	0,0	15,4	23,7	13,3	421,39

Probe CPT - Cone Penetration CPT-2
 Strumento utilizzato PAGANI TG 63 (200 kN)

Committente: Studio Testoni Architetti
 Cantiere: "PdC Arcipelago AUCS"
 Località: via Salvo D'acquisto - Comune di Ozzano dell'Emilia (BO)

Data: 15/07/2021





Committente: Studio Testoni di Architettura

Cantiere: Comparto AUC5 – Comune di Ozzano dell'Emilia (BO)

HVSR-1

Instrument: TEB-0551/01-20

Data format: 16 bit

Full scale [mV]: 179

Start recording: 15/07/2021 08:58:08 End recording: 15/07/2021 09:18:08

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analysis performed on the entire trace.

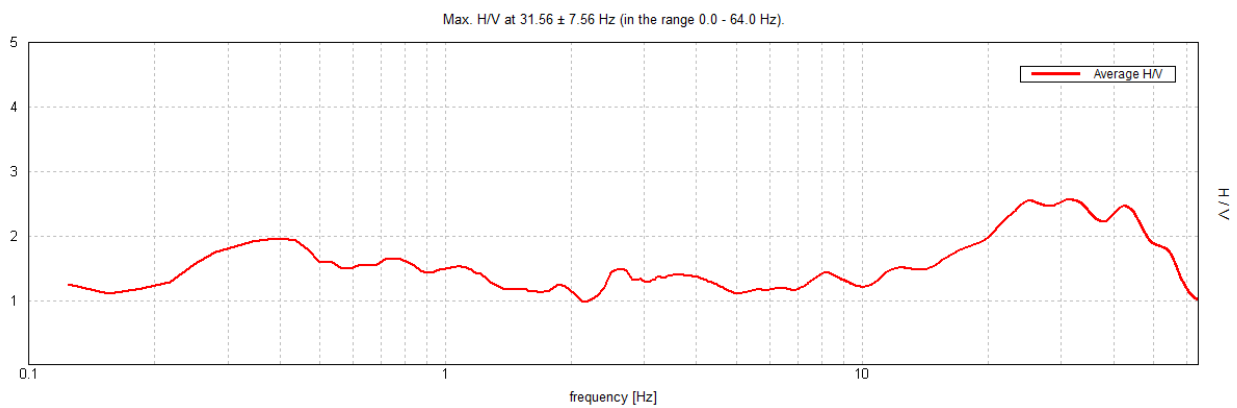
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

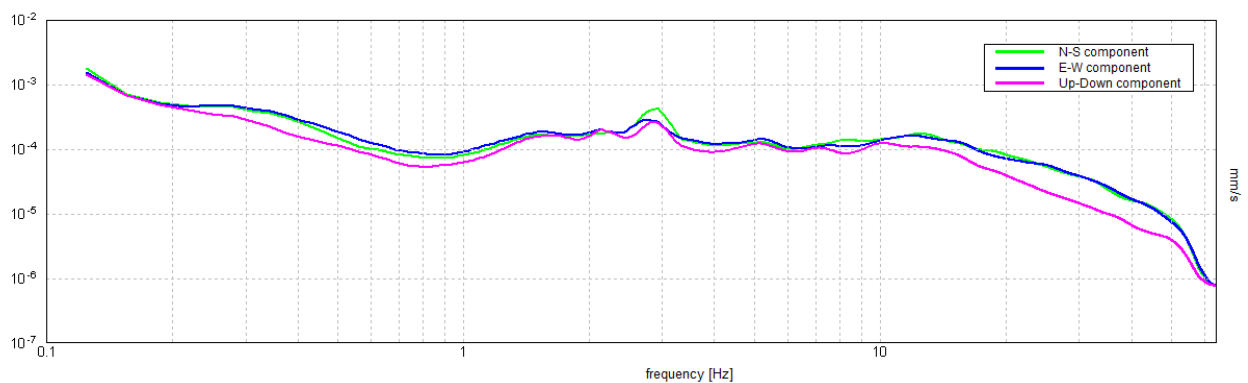
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

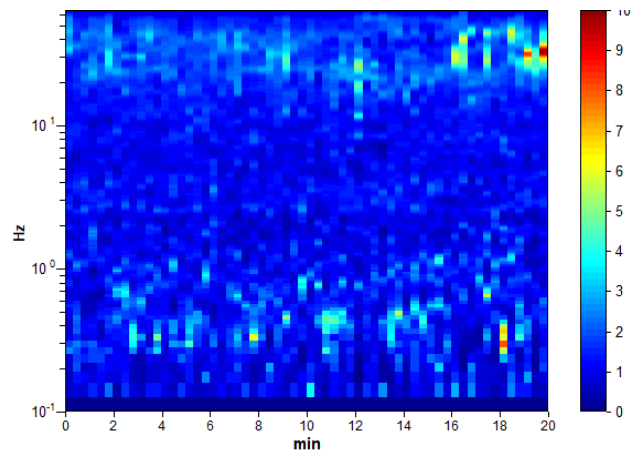
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



SINGLE COMPONENT SPECTRA



H/V TIME HISTORY



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. H/V at 31.56 ± 7.56 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	31.56 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	37875.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 1516 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	10.688 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	58.906 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.56 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.23939 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	7.55576 < 1.57813		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.4032 < 1.58	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 f_0	0.2 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Committente: Studio Testoni di Architettura

Cantiere: Comparto AUC5 – Comune di Ozzano dell'Emilia (BO)

HVSR-2

Instrument: TEB-0551/01-20

Data format: 16 bit

Full scale [mV]: 179

Start recording: 15/07/2021 11:23:03 End recording: 15/07/2021 11:43:03

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analyzed 92% trace (manual window selection)

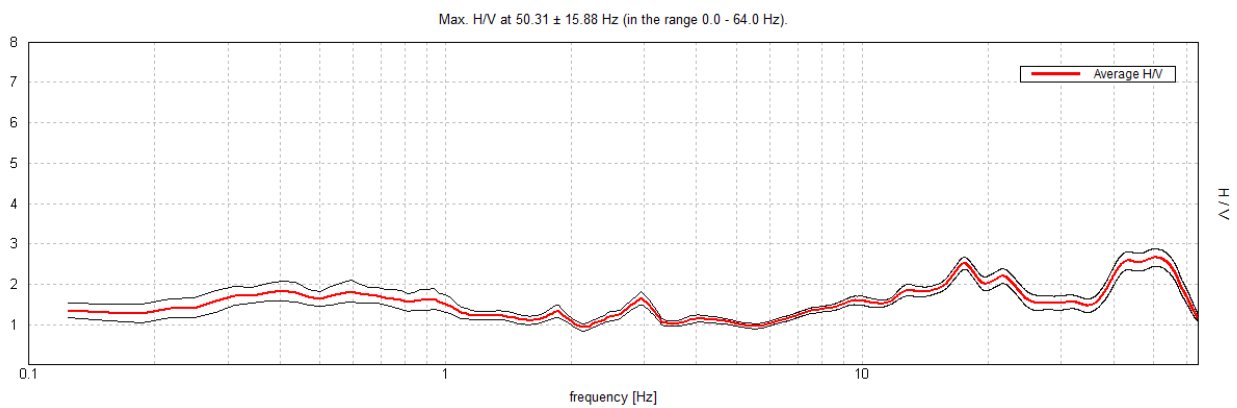
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

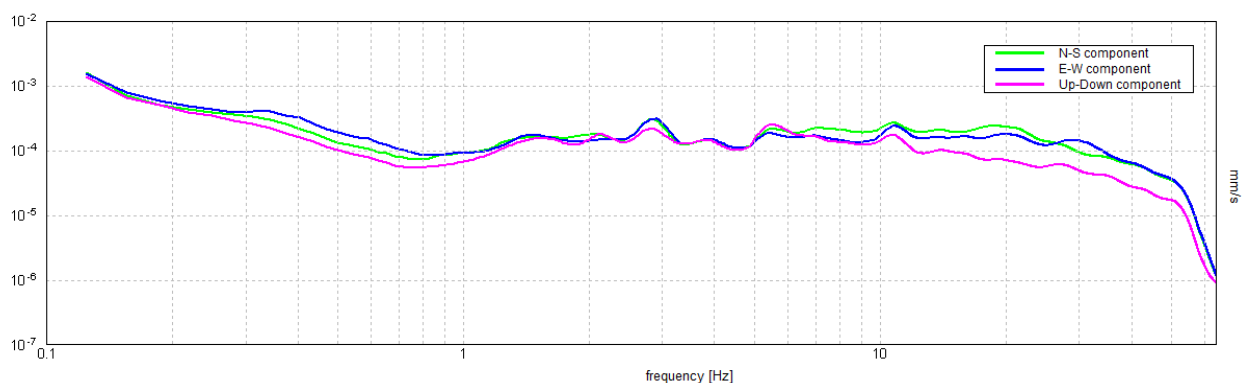
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

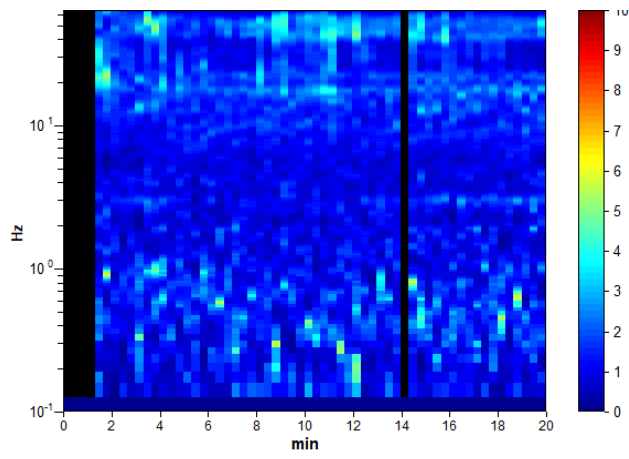
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



SINGLE COMPONENT SPECTRA



H/V TIME HISTORY



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. H/V at 50.31 ± 15.88 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	50.31 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	55343.8 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 1244 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	62.406 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.66 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.31563 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	15.88037 < 2.51563		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.2154 < 1.58	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 f_0	0.2 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

COMUNE DI OZZANO EMILIA

REGIONE EMILIA-ROMAGNA
CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA

***Determinazione della categoria di suolo di fondazione
eseguita sulla base della velocità equivalente di
propagazione delle onde di taglio S ($V_{s,eq}$) dei terreni
costituenti l'area denominata Comparto AUC 5***

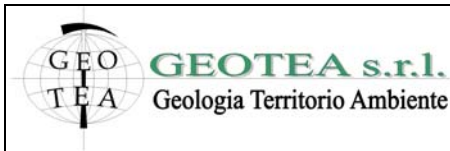


GEOTE A SRL
Via della Tecnica 57/A4
40068 San Lazzaro di Savena (BO)
Tel 0516255377 – Cell 349 7846581
Fax 0514998378
E-mail geotea.srl@database.it

Committente: ENERGYKEY S.R.L.

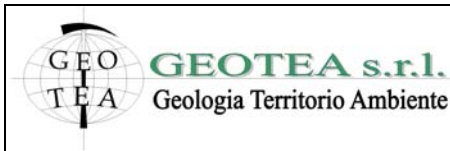
Dott. Geol. Stefano Maggi

Data indagine 15/07/2021
Commessa 21.355



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-REMI per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area denominata Comparto AUC 5 – nel comune di Ozzano Emilia (BO).

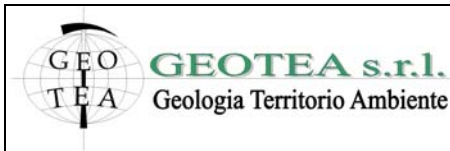
SOMMARIO.....	
2 IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO	3
3 PREMESSE	4
4 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI	5
4.1 Introduzione generale	5
4.2 Tecnica MASW	6
4.3 Tecnica Re.Mi.	7
5 Risultati indagine	8
5.1 TECNICA IN ARRAY	8
6 MODELLO DI SOTTOSUOLO PROPOSTO PER IL SITO	9
7 CONCLUSIONI	10



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-REMI per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area denominata Comparto AUC 5 – nel comune di Ozzano Emilia (BO).

2 IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO

- Il presente documento viene identificato con il numero 21.355 rev. n° 0;
- Le indagini e il lavoro svolto sono stati coordinati dal Dott. Geol. Stefano Maggi;
- Il presente documento è stato redatto dal Dott. Geol. Stefano Maggi in data 15/07/2021;
- Il documento si compone di n° 9 fogli



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-REMI per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area denominata Comparto AUC 5 – nel comune di Ozzano Emilia (BO).

3 PREMESSE

Presso l'area denominata Comparto AUC 5 nel comune di Ozzano Emilia (BO), in data 15/07/2021 è stata effettuata un'indagine geofisica mediante misura a stazione singola con tecnica *HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)* al fine di ottenere la classificazione del tipo di suolo presente nel sito, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S ($V_{s,eq}$), in ottemperanza a quanto riportato nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 17 gennaio 2018.

La presente indagine geofisica è consistita in:

- N. 1 Profilo sismico in array di superficie con tecnica MASW-REMI

Il profilo sismico MASW-REMI è stato eseguito con sismografo ECHO 24 canali modello Ambrogeo.

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è "GRILLA"© Release 2010 ver. 6.0 beta (All rights reserved).

4 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI

4.1 Introduzione generale

Le tecniche basate sullo studio della propagazione delle onde superficiali vengono introdotte per la prima volta nell'ambito della comunità geofisica e geotecnica negli anni novanta. Le tecniche MASW, Re.Mi., ESAC sono metodi di indagine mediante i quali è possibile costruire un profilo di velocità delle onde di taglio (V_s) in relazione alla profondità (V_s versus *profondità*), attraverso l'analisi delle onde superficiali tipo Rayleigh (onde R). Tali tecniche permettono quindi di ottemperare a quanto previsto nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni", secondo il quale i terreni, su cui devono essere eseguite opere edili di una certa rilevanza, devono essere classificati sulla base del parametro V_{s30} . La classificazione prevista per i terreni comprende cinque categorie definite da una simbologia alfanumerica da A ad E e successive integrazioni $S1$ e $S2$. A ciascuna di queste categorie corrisponde una valutazione quantitativa della risposta sismica dei terreni sottoposti ad una accelerazione sismica attesa, predefinita per ciascuna classe. Il parametro V_{s30} rappresenta la media ponderata dei valori di velocità delle onde di taglio S nei primi 30 metri di sottosuolo indagato e viene espressa matematicamente dalla seguente equazione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad \text{dove} \quad \begin{array}{l} V_{s30} : \text{velocità media ponderata delle onde di taglio "S";} \\ h_i : \text{spessore dello strato esimo;} \\ v_i : \text{velocità delle onde di taglio "S" nello strato esimo.} \end{array}$$

Esistono diversi tipi di onde superficiali, oltre alle già citate onde di *Rayleigh* ($P+S_v$), si conoscono le onde di *Love* (Sh) e le onde di *Lamb*. Le onde di *Rayleigh* rappresentano la componente principale delle onde superficiali e sono generate dall'interazione tra onde di compressione (o di volume) P e onde di taglio verticali S_v ogniqualevolta si è in presenza di una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo. Le onde R si propagano alla superficie libera (vedi Fig. 1) con un moto ellittico retrogrado (moto antiorario) che si inverte alla profondità di $\lambda/2\pi$ (dove λ è la lunghezza d'onda). L'ampiezza di tale spostamento decresce secondo una legge esponenziale, pertanto diviene rapidamente trascurabile con la profondità.

L'utilizzo delle onde superficiali di tipo *Rayleigh* per la costruzione di un profilo di velocità delle onde di taglio V_s è giustificato da una serie di fattori:

- La percentuale di energia convertita in onde R è nettamente predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione di onde P (7%) e onde S (26%);
- il metodo d'analisi basato sulle onde R non è limitato, al contrario del metodo basato sulla rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità;
- buona risoluzione, a differenza della tecnica a riflessione;

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-REMI per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area denominata Comparto AUC 5 – nel comune di Ozzano Emilia (BO).

- ❑ la propagazione delle onde di *Rayleigh*, anche se influenzata dalla V_p (velocità delle onde di compressione P) e dalla densità del mezzo, è funzione innanzitutto della V_s che rappresenta appunto il parametro fondamentale per la caratterizzazione geotecnica di un sito;
- ❑ la tecnica in questione è inoltre particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti ed ambienti rumorosi.

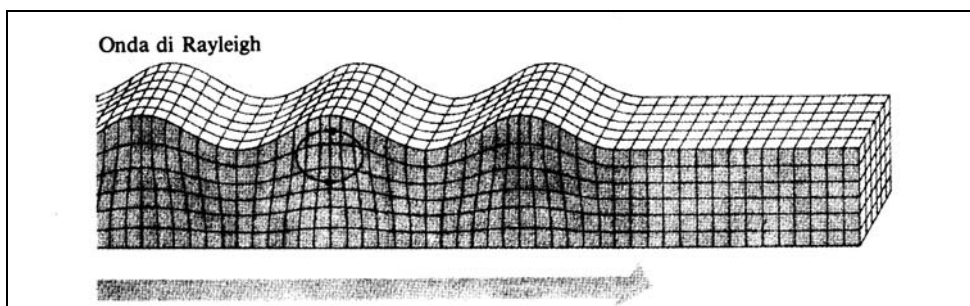


Figura 1 - Modalità di propagazione delle onde R

Tenuto conto dei fattori sopraelencati, l'elemento fondamentale che permette l'impiego di tecniche basate sulle onde superficiali e le onde *Rayleigh*, è una caratteristica chiamata *dispersione*. La dispersione è una proprietà delle onde superficiali che consiste nella deformazione di un treno d'onde dovuta alla variazione di velocità di propagazione al variare della frequenza. Per le onde R questa variazione si manifesta solo all'interno di un mezzo stratificato. In altre parole, ipotizzando una variazione di densità del terreno in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale si propaga con una differente velocità (velocità di fase), e quindi con una diversa lunghezza d'onda; questa proprietà si chiama appunto dispersione.

La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda λ (e quindi per una certa frequenza ν) è influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di $\lambda/2$ (anche se recenti studi hanno posto questo limite a $\lambda/2.5$). Inoltre, la velocità delle onde R (V_r) è pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio (V_s).

Secondo quanto detto appare chiaro come la costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio V_s , ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di *Rayleigh*, sia una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

4.2 **Tecnica MASW**

La procedura *MASW* si può sintetizzare in tre stadi successivi e distinti:

- ❑ acquisizione delle onde superficiali (*ground roll*);
- ❑ costruzione della curva di dispersione : grafico velocità di fase V_r – frequenza ν ,
- ❑ inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale della V_s .

La prima fase viene effettuata direttamente in campagna generando un treno di onde superficiali mediante l'utilizzo di una sorgente sismica attiva, quale generalmente una mazza battente, e uno stendimento lineare di geofoni ricevitori (vedi Fig. 2). L'indagine svolta nel presente lavoro è stata condotta utilizzando la

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-REMI per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area denominata Comparto AUC 5 – nel comune di Ozzano Emilia (BO).

strumentazione DOLANG JEA 24 descritta nelle premesse.

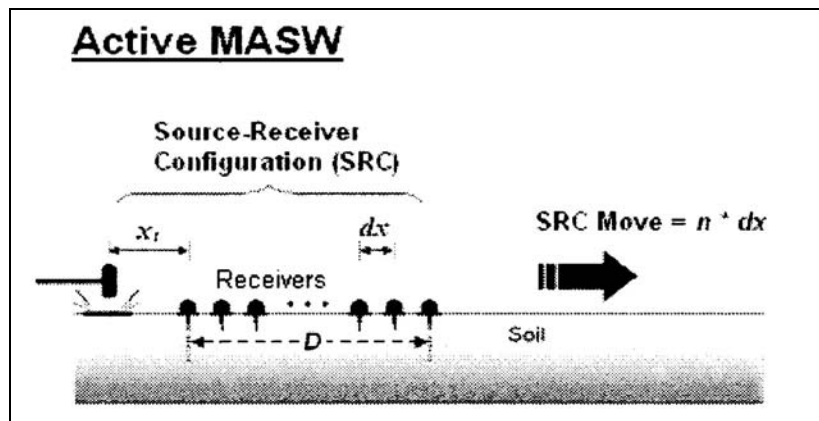


Figura 2 - MASW : stendimento lineare e sorgente attiva

Mediante il software si procede alla lettura dei dati acquisiti (*common-shot gather*) e al calcolo dello spettro di velocità di fase (trasformata di Fourier) dal quale è possibile estrarre la curva di dispersione sperimentale.

Si procede quindi alla definizione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio S.

L'elaborazione dei dati acquisiti, avvenuta mediante software Grilla, è riportata in dettaglio nel rapporto d'indagine allegato alla presente relazione.

4.3 Tecnica Re.Mi.

A differenza del convenzionale metodo MASW, il quale prevede l'utilizzo di una sorgente sismica attiva (es: mazza battente), la tecnica Re.Mi. utilizza onde di superficie generate passivamente dall'ambiente circostante. L'origine di questo cosiddetto "rumore di fondo" è sia di tipo naturale (onde oceaniche di marea, perturbazioni atmosferiche) sia di tipo antropico (traffico veicolare, industrie, ferrovie, etc...).

L'utilizzo di profili di geofoni a geometria lineare, genera il problema della sovrastima della velocità di fase (velocità apparente) nello spettro di velocità che si ottiene dall'elaborazione dei dati. La velocità apparente nello spettro deriva dal fatto che la direzione di propagazione delle onde (rumore di fondo) non necessariamente è parallela allo stendimento di geofoni. Per questo motivo la pratica comune prevede che il picking sulla curva di dispersione sperimentale venga eseguito non in corrispondenza del massimo di energia, ma in corrispondenza del bordo inferiore.

Il metodo Re.Mi. eseguito nel presente studio ha sfruttato la stessa geometria di profilo utilizzata per il metodo MASW. Solitamente il campionamento complessivo è della durata di qualche minuto.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-REMI per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area denominata Comparto AUC 5 – nel comune di Ozzano Emilia (BO).

5 RISULTATI INDAGINE

5.1 TECNICA IN ARRAY

Strumentazione utilizzata.....Sismografo digitale 24 canali – 24 bit modello Dolang
 Numero di geofoni verticali (frq. Propria 4.5 Hz).....12
 Spaziatura tra i geofoni.....3.00 m
 Frequenza di campionamento.....2.090 Hz (MASW) – 156 Hz (Re.Mi.)
 Lunghezza traccia acquisita.....1 sec (MASW) – 60 sec (Re.Mi.)
 Sorgente.....mazza (8 Kg) e rumore ambientale

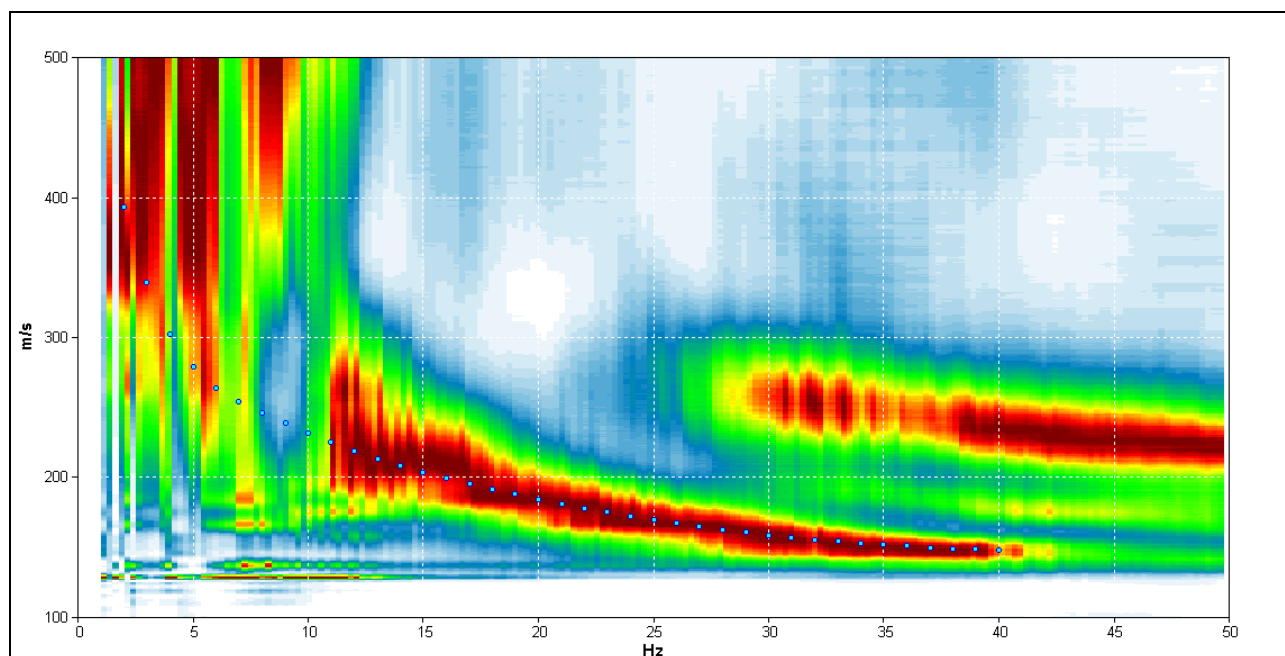


Figura 3 - Spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per il profilo sismico eseguito in array con tecnica MASW-Re.Mi. mediante sismografo digitale Dolang. In blu il modo fondamentale della curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-REMI per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area denominata Comparto AUC 5 – nel comune di Ozzano Emilia (BO).

6 MODELLO DI SOTTOSUOLO PROPOSTO PER IL SITO

Sulla base dei risultati ottenuti e dell'interpretazione dei dati acquisiti, il modello di sottosuolo proposto per il sito in studio in termini di profilo verticale di Vs è il seguente:

Profondità base strato (m)	Spessore (m)	Vs (m/s)
2.00	2.00	150
3.00	1.00	180
5.50	2.50	215
10.00	4.50	245
30.00	20.00	300
70.00	40.00	400
inf.	inf.	500

Tabella 1 – Modello di sottosuolo proposto per il sito

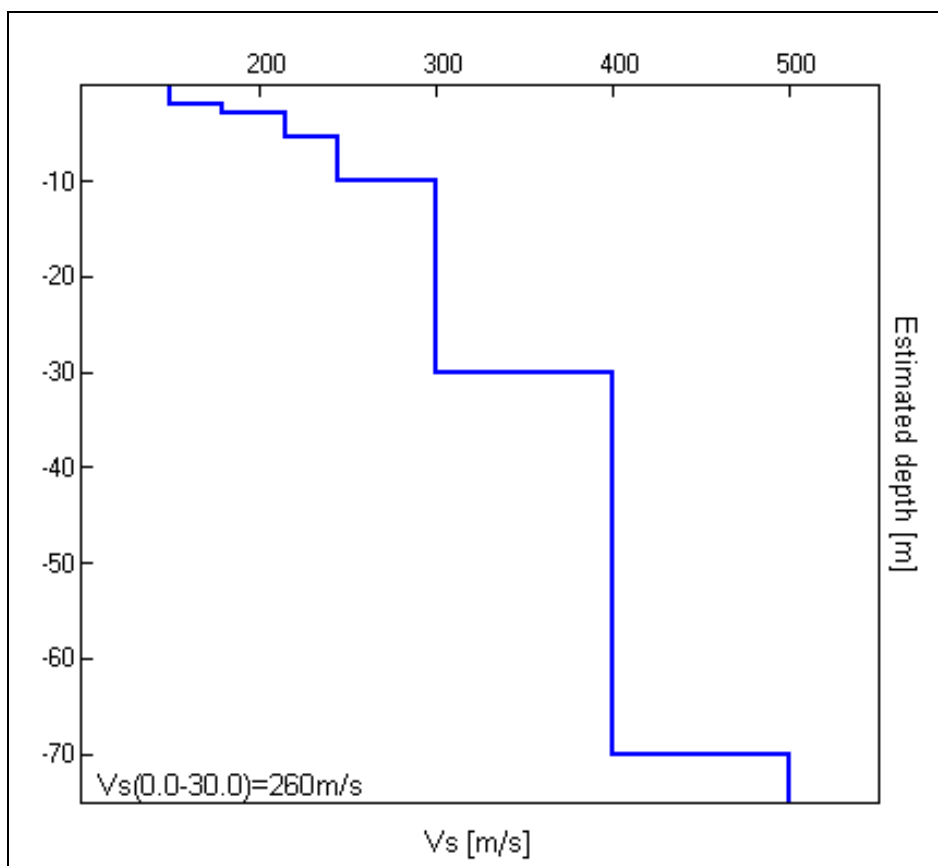
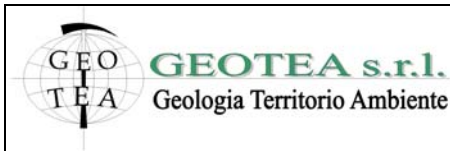


Figura 4 - Modello di velocità delle onde di taglio S



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-REMI per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area denominata Comparto AUC 5 – nel comune di Ozzano Emilia (BO).

7 CONCLUSIONI

Vs,eq=Vs30 [m/s] da quota piano campagna su cui è stata eseguita l'indagine geofisica.....260

La normativa applicata nel presente lavoro è il DM 17 gennaio 2018.

San Lazzaro di Savena, 15/07/2021