

COMUNE DI IMOLA (BO)

INDAGINI GEOLOGICHE ESEGUITE SUI TERRENI UBICATI IN LOCALITÀ CARLINA, VIA MONTANARA, IMOLA (BO), INTERESSATI DAL PROGETTO DI EDIFICAZIONE DI UN COMPLESSO RESIDENZIALE.

RELAZIONE GEOLOGICA



DATA: APRILE 2021

COMMITTENTE: ALBA PROGETTI SOC. COOP.

COMM. 005.21

Spazio riservato per timbro e firma degli Enti Competenti

Timbro e firma
dott. geol. Gabriele Cesari
(n. 824 Ordine Geologi Emilia Romagna)

dott. geol. Rocco Carbonella
(n. 1073 Ordine Geologi Emilia Romagna)

Sommario

1.	Premessa	2
2.	Normativa di riferimento	3
3.	Inquadramento Geologico.....	4
3.1	Caratteri stratigrafici, litologici e morfologici	4
3.2	Caratteri idrologici e superficiali.....	9
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 piezocono (CPTU)	17
4.2	Indagini geofisiche con metodologia HVSR e MASW/Re.Mi.....	26
5.	Modello geologico-stratigrafico del sito	34
6.	Caratterizzazione sismica del sito.....	39
6.1	Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche.....	39
6.2	Amplificazione stratigrafica e topografica	40
7.	Valutazione del potenziale di liquefazione.....	43
8.	Analisi sismica ai sensi della DGR. 630/19	43
8.1	Valutazione della risposta sismica locale e microzonazione sismica dell'area in oggetto 43	
9.	Conclusioni	51

ELENCO ALLEGATI:

- DESCRIZIONE PROVE PENETROMETRICHE CPT
- DESCRIZIONE INDAGINI HVSR
- DESCRIZIONE INDAGINI MASW/RE.MI.

1. Premessa

Su richiesta dei committenti So.G.E.I. S.r.l. - Aurora Seconda Soc. Coop.va - ZiniElio, è stata redatta la presente relazione che restituisce i risultati della campagna di indagini geognostiche eseguita sui terreni ubicati in località Carlina, Via Montanara, Imola (BO), interessati dal progetto di edificazione di un complesso residenziale.

Le indagini sono state eseguite al fine di caratterizzare e modellare il sito dal punto di vista geologico, rivolte alla ricostruzione dei caratteri geologici, sismici e idrogeologici.

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

- n°5 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU);
- n°1 indagine geofisica con metodologia MASW, finalizzata alla caratterizzazione della risposta sismica del sito, ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17/01/2018;
- n°4 indagini geofisiche a stazione singola HVSr,

Tali indagini hanno permesso di ricostruire un modello geologico “allo scopo di costituire un utile elemento di riferimento per il progettista al fine di inquadrare i problemi geotecnici e per definire il programma delle eventuali indagini geotecniche integrative” (§ 6.2.1, D.M. 17/01/2018).

Le necessarie verifiche di sicurezza relative alle interazioni delle strutture in progetto con i terreni saranno parte integrante della specifica relazione geotecnica, come previsto dalla vigente normativa in materia di costruzioni.

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, CSLP;
- ✓ 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

3.1 Caratteri stratigrafici, litologici e morfologici

Dal punto di vista geologico, il territorio in cui ricade l'area di studio fa parte del sistema montuoso dell'Appennino Settentrionale, una catena montuosa formata dalla sovrapposizione di "falde tettoniche", strutturalmente inquadrabile nel contesto del modello di prisma d'accrescimento.

Le principali unità tettoniche (falde) che a partire dall'Eocene-Cretaceo superiore hanno formato il prisma di accrescimento sono denominate come segue (dall'alto verso il basso in ordine di sovrapposizione):

- Unità liguri (Liguridi)
- Unità subliguri
- Falda toscana
- Unità umbro-romagnole e marchigiano-adriatiche.

Secondo il modello del prisma d'accrescimento le Liguridi sovrastano geometricamente le Unità subliguri che, a loro volta si pongono al di sopra della Falda toscana e delle Successioni Umbro-Romagnola e Marchigiano-Adriatica, etc.; a complicare ulteriormente tale quadro strutturale (semplificato) interverrebbero accavallamenti tettonici fuori sequenza e faglie distensive neotettoniche (Figura 1 e Figura 2).

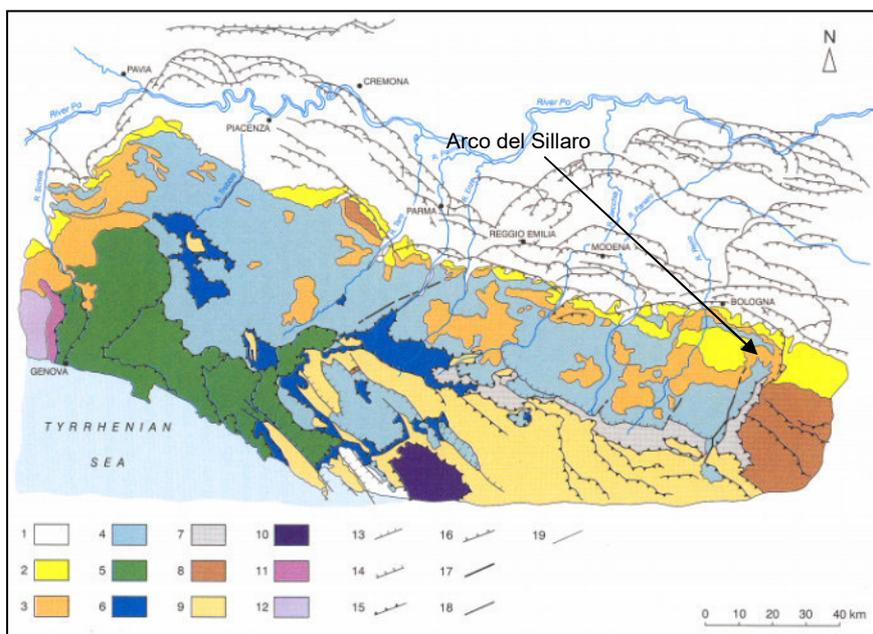


Figura 1. Carta geologica schematica dell'Appennino Settentrionale (Estratto da Bettelli & De Nardo, 2001). LEGENDA: 1) depositi quaternari; 2) Depositi marini del Miocene Sup.-Pleistocene; 3) Successione epiligure; 4) Unità liguri esterne; 5) Unità liguri interne; 6) Unità subliguri; 7) Unità tettonica Sestola-Vidiciatico e Melange di Firenzuola; 8) Unità umbro-romagnole; 9) Unità toscane; 10) Unità metamorfiche toscane; 11) Zona Sestri-Voltaggio; 12) Gruppo di Voltri; 13) Faglie dirette; 14) Faglie dirette (nel sottosuolo); 15) Faglie inverse e sovrascorimenti; 16) Faglie inverse (nel sottosuolo); 17) Faglie trascorrenti, di strappo o di trasferimento; 18) Faglie ad alto angolo a cinematica ignota (nel sottosuolo); 19) Limiti litologici.

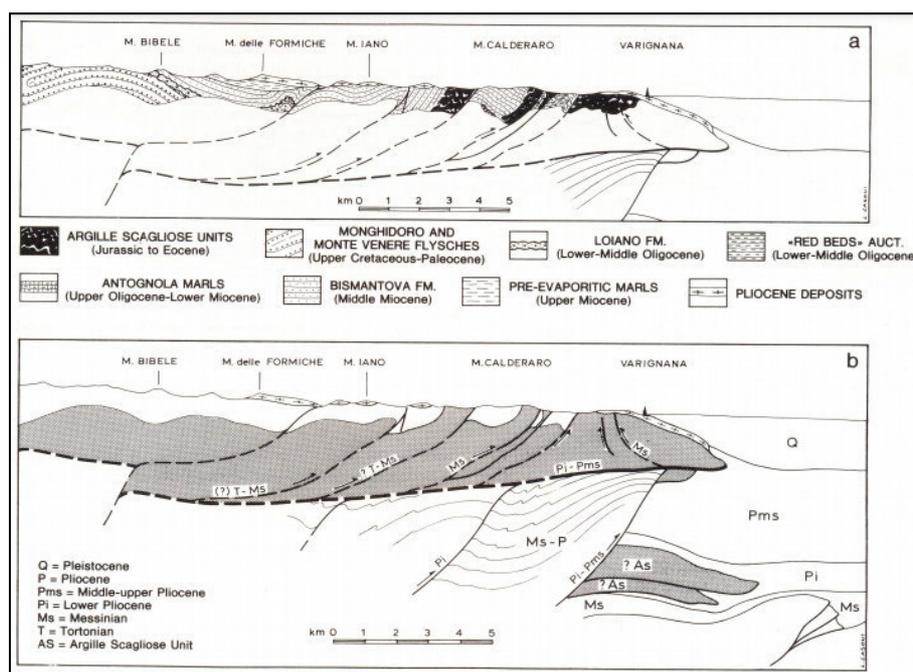


Figura 2. Sezione Geologica attraverso la coltre ligure del bolognese tra Monghidoro, Varignana (Castel San Pietro) e il margine padano (da Castellarin & Pini, 1989)

I processi orogenetici che hanno dato luogo alla formazione della catena appenninica settentrionale che si sarebbero delineati per un lungo periodo (oltre 60 milioni di anni) avrebbero avuto luogo principalmente al di sotto del livello del mare. Durante tale intervallo di tempo, sulle falde tettoniche che formano la parte superiore del prisma d'accrezione appenninico (Liguridi e Subliguridi), sarebbe continuata la deposizione sedimentaria con la formazione della Successione Epiligure; quest'ultima rappresenta pertanto il risultato della sedimentazione in ambiente marino avvenuta, durante la costruzione del prisma d'accrezione dell'Appennino Settentrionale, tra l'Eocene e la fine del Miocene.

La stessa attuale distribuzione geografica delle unità tettoniche, e delle successioni sedimentarie, all'incirca secondo fasce subparallele alla direzione del crinale appenninico principale (circa NO-SE a ovest del Sillaro e NNO-SSE ad est) riflette sostanzialmente la strutturazione a grande scala della catena (prisma d'accrezione). La stessa tettonica estensionale più recente (ultimi 5-7 milioni di anni) che ha interessato soprattutto, ma non esclusivamente, le regioni situate a meridione dello spartiacque principale (Toscana settentrionale) segue dei lineamenti strutturali disposti sempre secondo una direzione NO-SE/NNO-SSE.

L'evoluzione tettonica della catena appenninica si è sviluppata e continua anche ai giorni nostri; a testimonianza di ciò si possono richiamare le strutture tettoniche che hanno controllato la sedimentazione nel bacino padano, talora dislocando pure le unità sedimentarie più recenti plio-pleistoceniche di ambiente marino (che affiorano nei pressi del margine pedecollinare) e i depositi continentali del Pleistocene e dell'Olocene) che affiorano principalmente nelle valli o che formano il sottosuolo della pianura).

Inoltre, la frequente attività sismica che si riscontra soprattutto nell'area di pianura, ma anche nell'alto Appennino, è la testimonianza diretta e attuale che l'evoluzione della catena non si è ancora conclusa.

Dal punto di vista litostratigrafico e strutturale, il territorio in cui ricade l'area in esame può essere suddiviso in quattro settori distinti (Figura 3):

- settore sud, delimitato verso nord dalla fascia di affioramento delle evaporiti messiniane (così detta Vena del Gesso) e a ovest dalle strutture di accavallamento del così detto sistema dell'Arco del Sillaro. Nel settore in oggetto affiorano principalmente rocce afferenti al Dominio paleogeografico Umbro-Romagnolo appartenenti alla Formazione Marnoso-Arenacea;
- settore ovest, dove affiorano rocce afferenti principalmente ai Domini Ligure e Subligure, nonché alla sovrastante Successione epiligure;
- settore centrale (o settore collinare) nel quale affiorano principalmente rocce ascrivibili al Dominio Padano Adriatico e in particolare appartenenti alla Formazione delle Argille Azzurre e alla formazione delle Sabbie di Imola (così dette Sabbie Gialle) che sul margine collinare sono ricoperte in discordanza dai depositi continentali pleistocenici che formano i terrazzi morfologici del margine pedecollinare;
- settore nord, corrispondente al settore di pianura del Circondario, che è caratterizzato da un sottosuolo formato dai depositi continentali dell'alta e media pianura bolognese con spessori che raggiungono anche alcune centinaia di metri sul substrato marino.

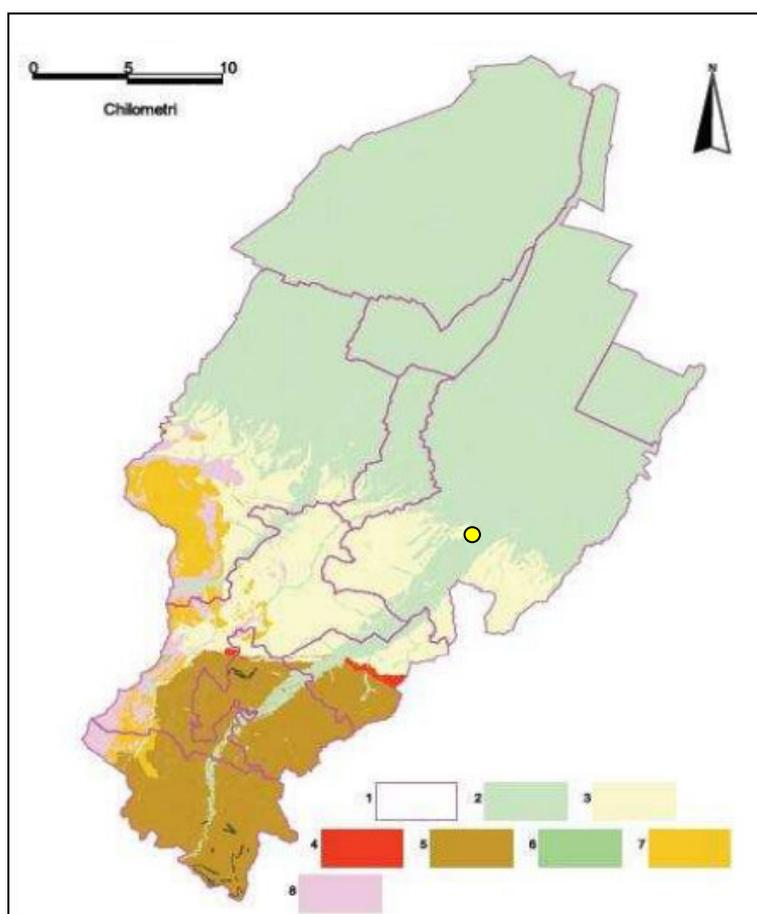


Figura 3. Domi paleogeografici: le diverse rocce ascrivibili a varie unità litostratigrafiche e successioni sono riconducibili a domini paleogeografici distinti. Legenda: 1) confini comunali; 2) Depositi fluviali terrazzati e della pianura (Settore Nord); 3) Rocce del Dominio Padano-Adriatico (Settore centrale); 4) Evaporiti messiniane (Settore sud); 5) Rocce del Dominio Umbro-romagnolo (settore sud), 6) Rocce del Dominio Subligure (Settore ovest); 7) Rocce appartenenti alla Successione Epiligure (Settore ovest); 8) Rocce del Dominio Ligure (settore ovest). (Elaborato sulla base dei dati della Carta Geologica dell'Appennino emiliano-romagnolo alla scala 1:10.000, forniti dall'Ufficio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna). Il punto in giallo indica l'area oggetto di studio.

L'area oggetto di studio ricade nel settore nord, in cui affiora il *Subsistema di Villa Verrucchio* (AES7), costituita da ghiaie rilasciate dal torrente Sillaro e sovrastate da limi più o meno sabbiosi, organizzate in alcuni ordini di terrazzi intravallivi. Sono presenti depositi di *Conoide torrentizia inattiva* (i2), depositi alluvionali, prevalentemente ghiaiosi, a forma di ventaglio aperto verso valle, formatosi in corrispondenza dello sbocco di valli e vallecole trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua, attualmente non soggetti ad evoluzione (Figura 4). Il limite inferiore di tali depositi continentali è erosivo e discordante sui sottostanti depositi di origine marina, rappresentati dalle *Argille Azzurre* (FAAps), costituite da argille, argille marnose e argille siltose strutturalmente ordinate, stratificate, con eventuale rara presenza di livelli arenitici.

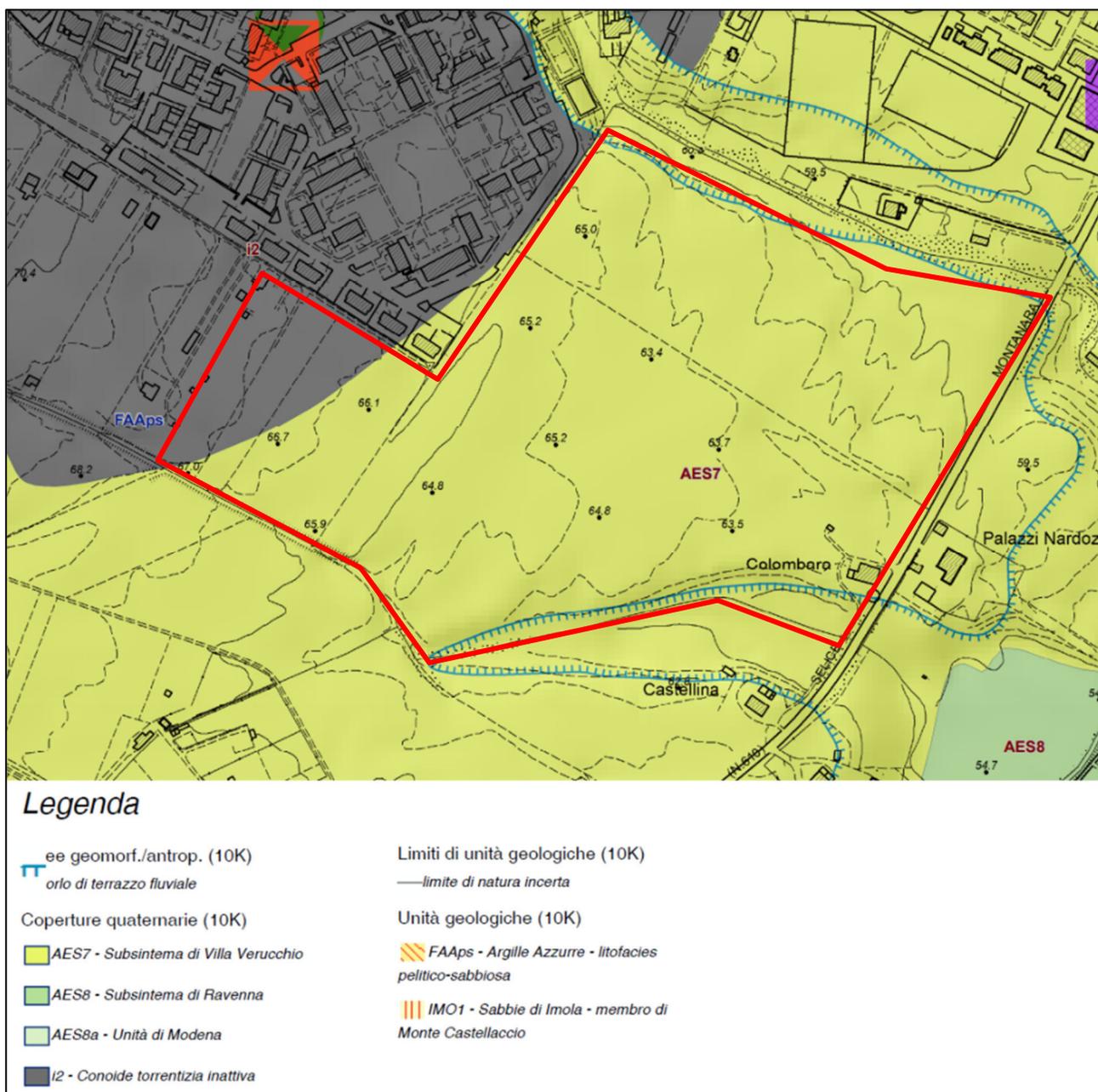


Figura 4. Stralcio della Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna.

Dal punto di vista morfologico il settore nord (di pianura) presenta forme poco pronunciate se non localmente in corrispondenza dei corsi d'acqua principali.

Il trend topografico generale dell'area in esame è caratterizzato dalla presenza di una superficie ampia e sostanzialmente regolare, debolmente immergente in direzione ENE, in direzione del Fiume Santerno. Tale superficie si è originata con la messa in posto dei depositi alluvionali di conoide, seguentemente reinciati dal Fiume Santerno e da altri affluenti, come il Fosso Carlina, con la formazione di terrazzi fluviali (Figura 5).

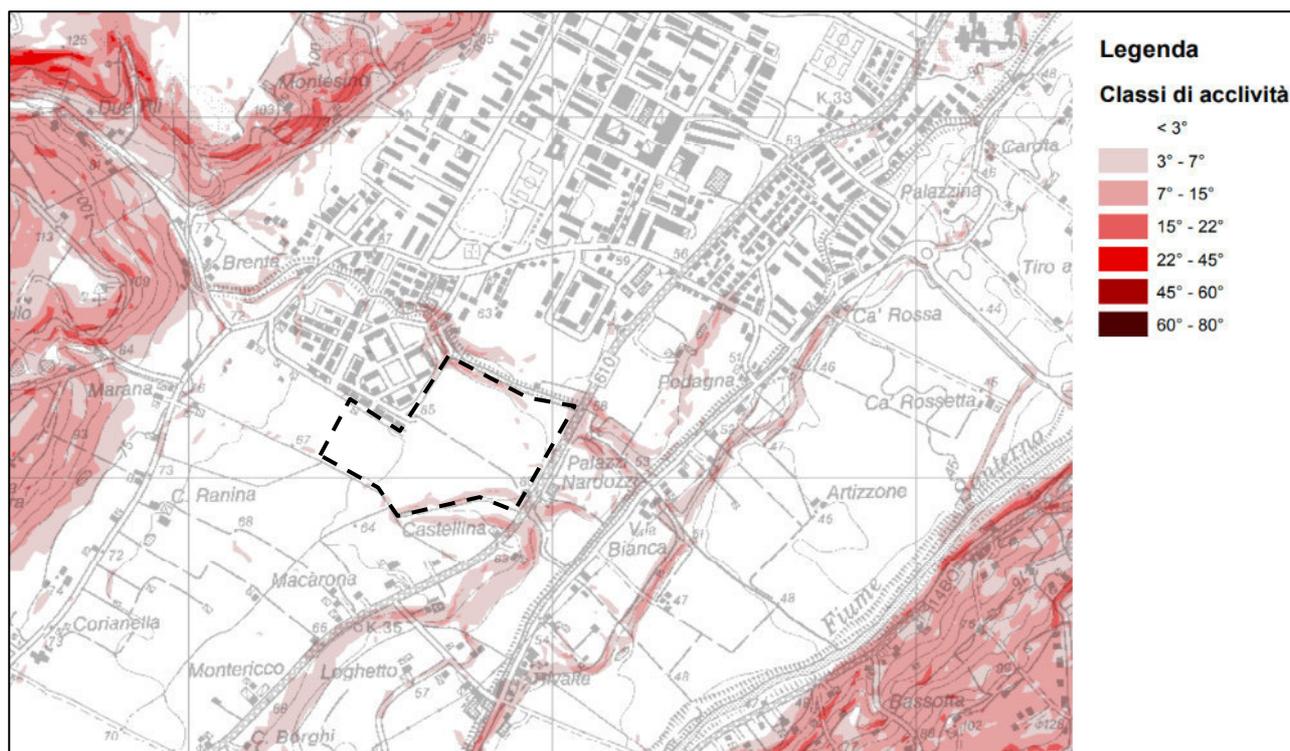


Figura 5. Stralcio carta delle acclività del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Imola.

3.2 Caratteri idrologici e superficiali

Ad Est, poco distante dal sito in esame scorre il fiume Santerno in direzione SW-NE. La distanza dell'alveo del Fiume rispetto al sito in esame è tale da non rappresentare un elemento di rischio.

Il sito è collocato in una zona confinante tra un'area maggiormente a vocazione rurale e il centro abitato di Imola. La regimazione delle acque superficiale è attribuita quindi sia al reticolo idrografico che al reticolo fognario del centro abitato.

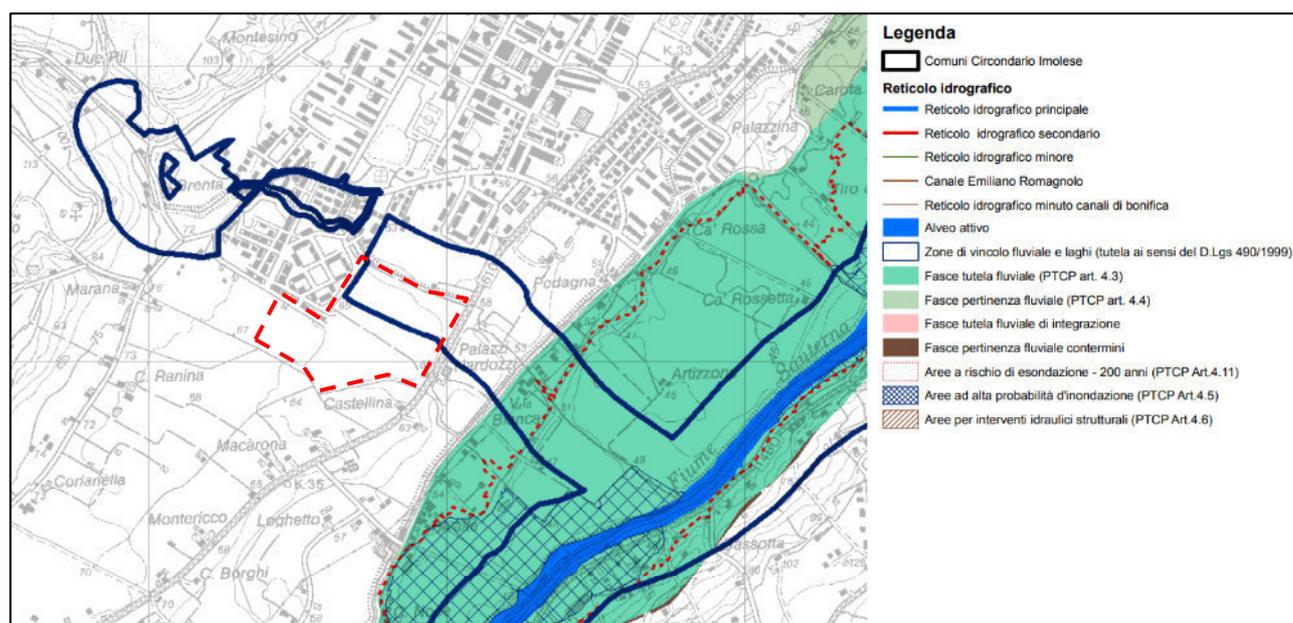


Figura 6. Stralcio carta degli aspetti morfologici del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Imola.

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 914**, che in letteratura è definita dalla scomposizione della fascia sismogenetica appenninica che da Parma si estende fino all'Abruzzo. Di conseguenza "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)". In particolare, la zona sismogenetica 914, insieme alla zona 913 e 918, è "caratterizzata da terremoti storici che raramente hanno raggiunto valori molto elevati. Le profondità ipocentrali sono mediamente maggiori in questa fascia di quanto non siano nella fascia più esterna...".

In base al database delle sorgenti sismogenetiche italiane DISS 3.2.1, il sito in oggetto risulta collocato poco distante dell'estremo N della Sorgente Sismogenetica Composita ITCS001 "Castel San Pietro Terme-Meldola": le magnitudo massime attese dei sismi riconducibili a questa sorgente, come desumibile dal database, sono stimate pari a $M_w = 5,8$.

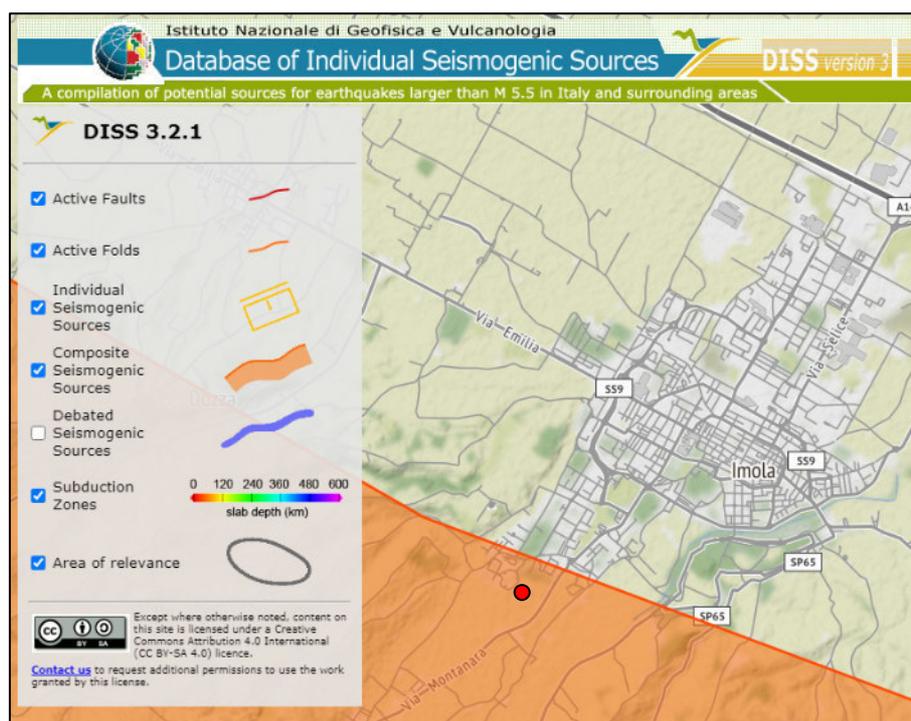


Figura 7. Distribuzione delle "zone" sismogeniche, riportata dal DISS 3.2.1. Il punto rosso evidenzia l'ubicazione dell'area in esame.

3.4 Storia sismica del territorio

Il territorio in esame è stato più volte interessato da fenomeni sismici; la ricostruzione di una storia sismica del Comune di Imola 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>.

Il diagramma riportato di seguito, proveniente dalla stessa fonte bibliografica, riporta la collocazione temporale (in ascissa) e l'intensità al sito in corrispondenza dell'area oggetto del presente studio (in ordinata) degli eventi sismici, limitatamente a quelli con intensità epicentrale uguale o superiore a 3.

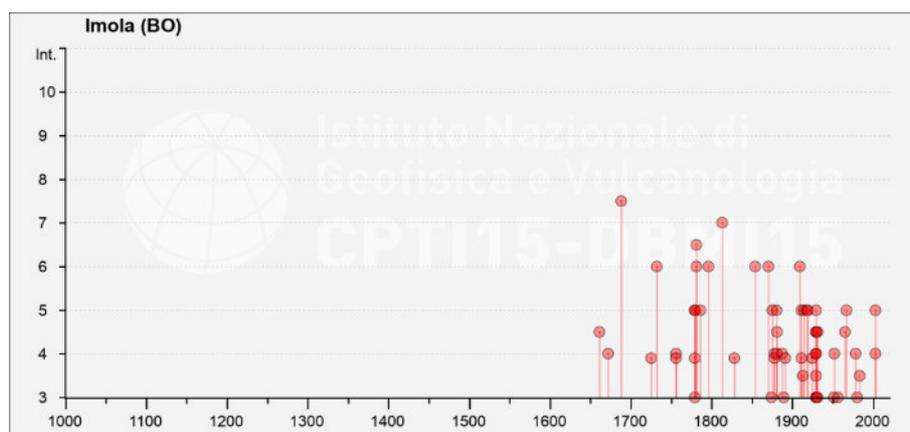


Figura 8. Diagramma che riporta le intensità al sito (I_s) in occasione degli eventi sismici con intensità epicentrale uguale o superiore a 3.

3.5 Sintesi di quanto riportato dagli strumenti di pianificazione

Per quanto riguarda gli strumenti di pianificazione vigenti, si segnalano gli allegati al **Piano Strutturale Comunale (PSC)** del Nuovo Circondario Imolese.

Dall'analisi della **Tavola 4 – Carta comunale delle aree suscettibili di effetti sismici locali** del PSC del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Fontanelice, si evince che l'area in esame è prossima ad aree potenzialmente soggette ad amplificazione per caratteristiche litologiche (Figura 5).

Dall'analisi del Piano Stralcio di bacino dell'Autorità di Bacino del Reno, nell'area in esame non vengono evidenziate aree sottoposte a pericolo alluvione.

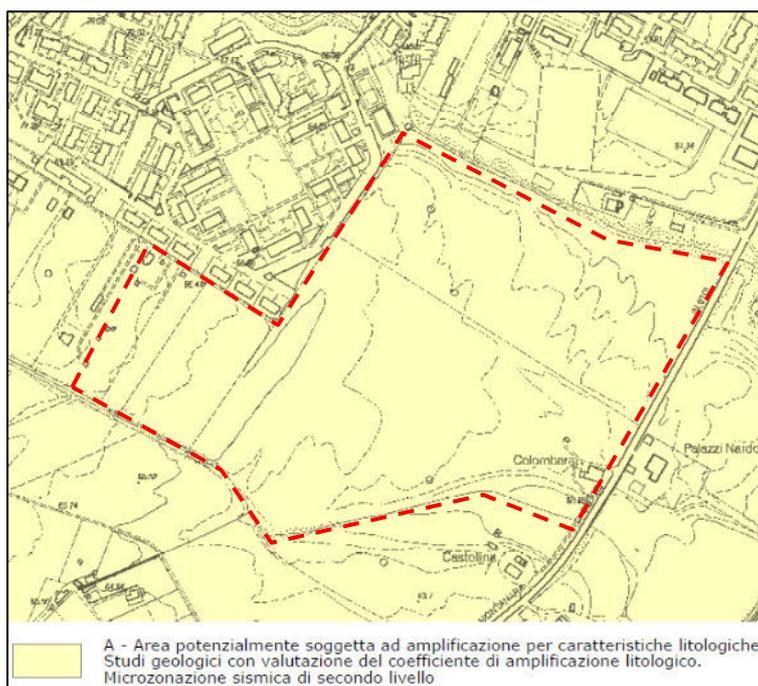


Figura 9. Stralcio Tavola 5, Foglio 4 – Carta comunale delle aree suscettibili di effetti sismici locali (Analisi di II livello). (Stralcio Tavola 5, Foglio 4 del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Imola).

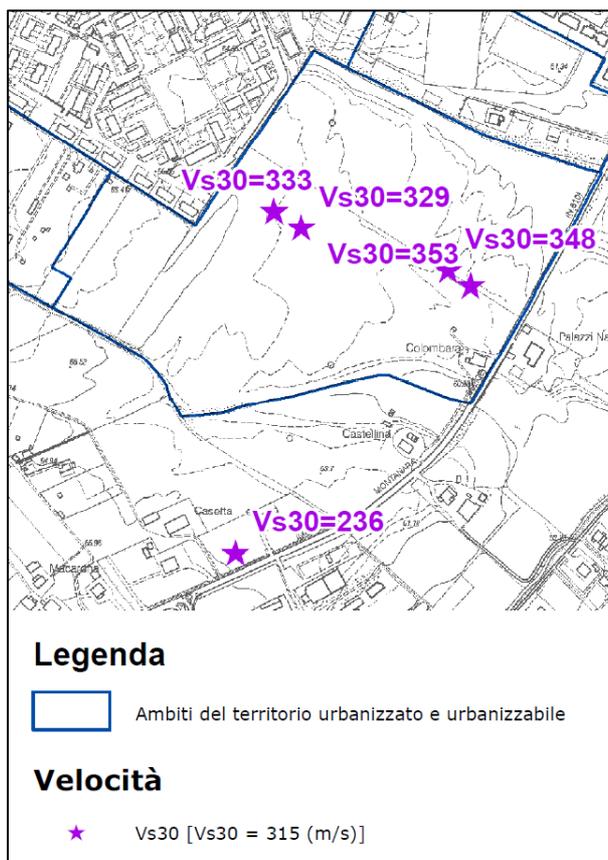


Figura 10. Carta delle velocità. (Stralcio Tavola 6, Foglio 4 del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Imola).

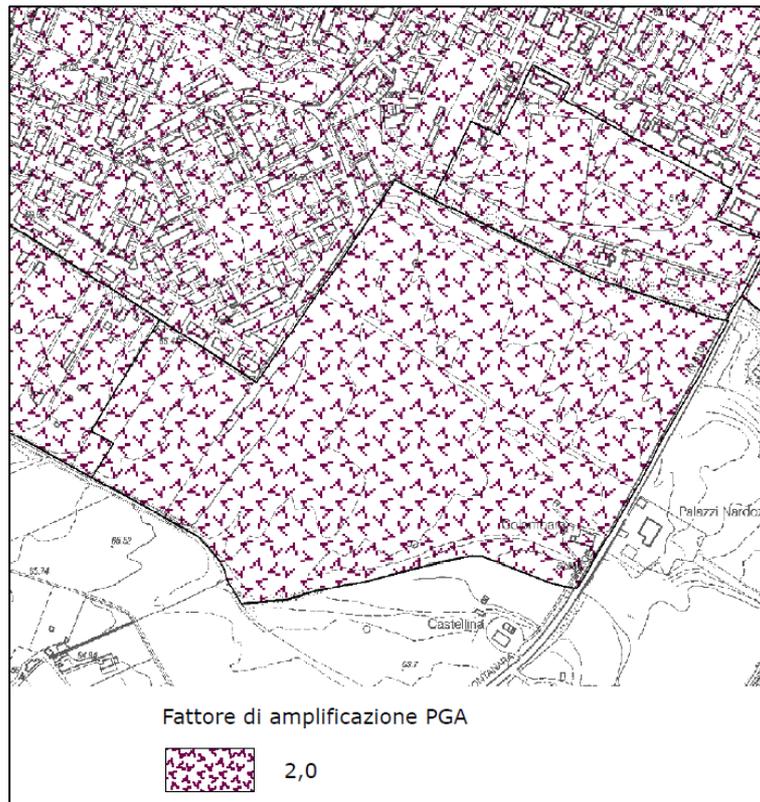


Figura 11. Carta di microzonazione sismica – Fattori di amplificazione PGA (Analisi di II livallo).
(Stralcio Tavola 7, Foglio 4 del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Imola).

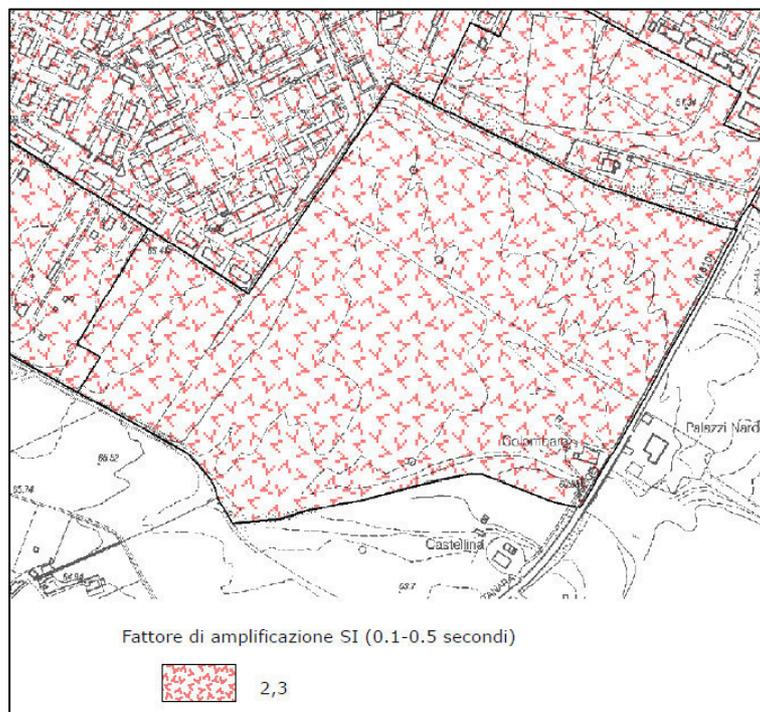


Figura 12. Carta di microzonazione sismica – Fattori di amplificazione SI (0.1-0.5 secondi) (Analisi di II livallo).
(Stralcio Tavola 8, Foglio 4 del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Imola).

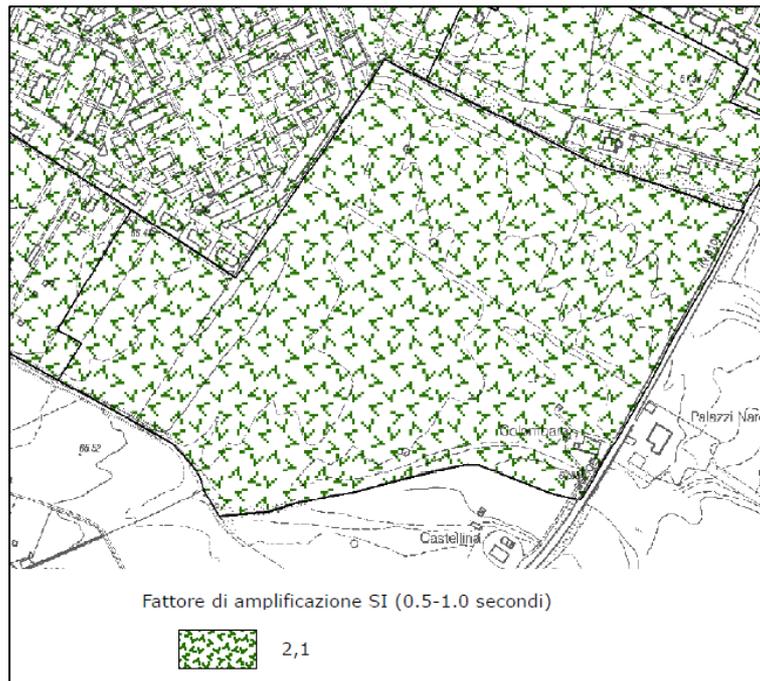


Figura 13. Carta di microzonazione sismica – Fattori di amplificazione SI (0.5-1.0 secondi) (Analisi di II livello).
(Stralcio Tavola 9, Foglio 4 del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Imola).

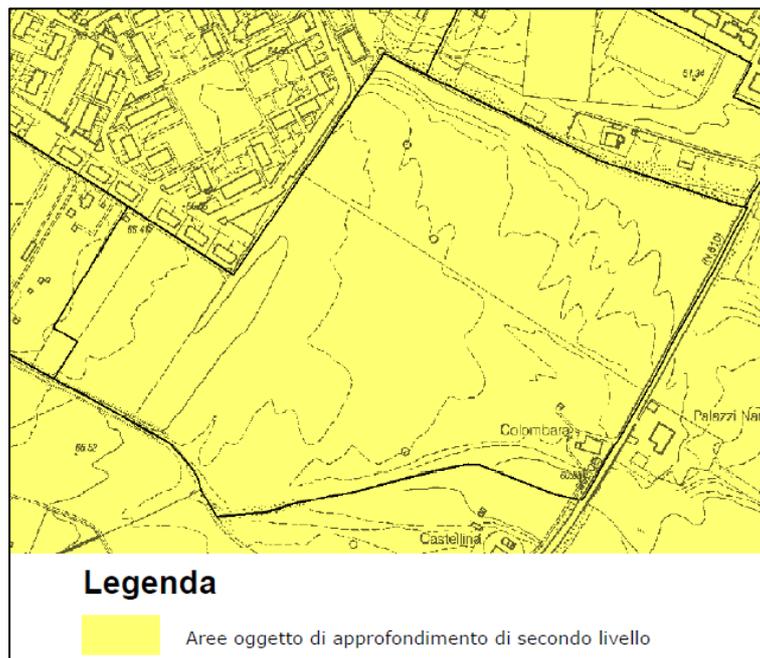


Figura 14. Carta di sintesi.
(Stralcio Tavola 10, Foglio 4 del Nuovo Circondario Imolese, Comune di Imola).

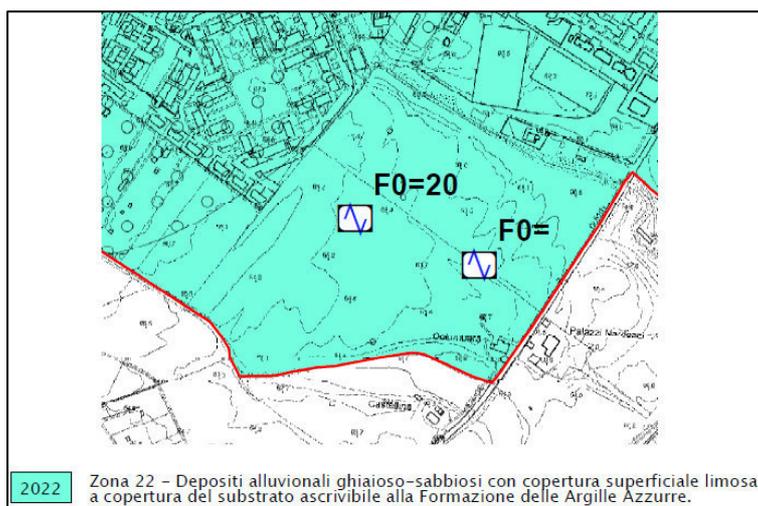


Figura 15. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.
(Stralcio Carta delle MOPS, Comune di Imola).

4. Indagini geognostiche

Il modello geologico sviluppato sulla base della documentazione bibliografica consultata, dei sopralluoghi eseguiti e dell'esperienza acquisita nel corso delle indagini precedentemente pregresse, è stato sottoposto a verifica mediante la realizzazione di n° 5 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU), n° 4 indagini geofisiche realizzate con metodologia HVSR e n°1 indagine geofisica realizzata con metodologia MASW, finalizzata alla caratterizzazione della risposta sismica del sito (ai sensi del D.M. 17/01/2018).

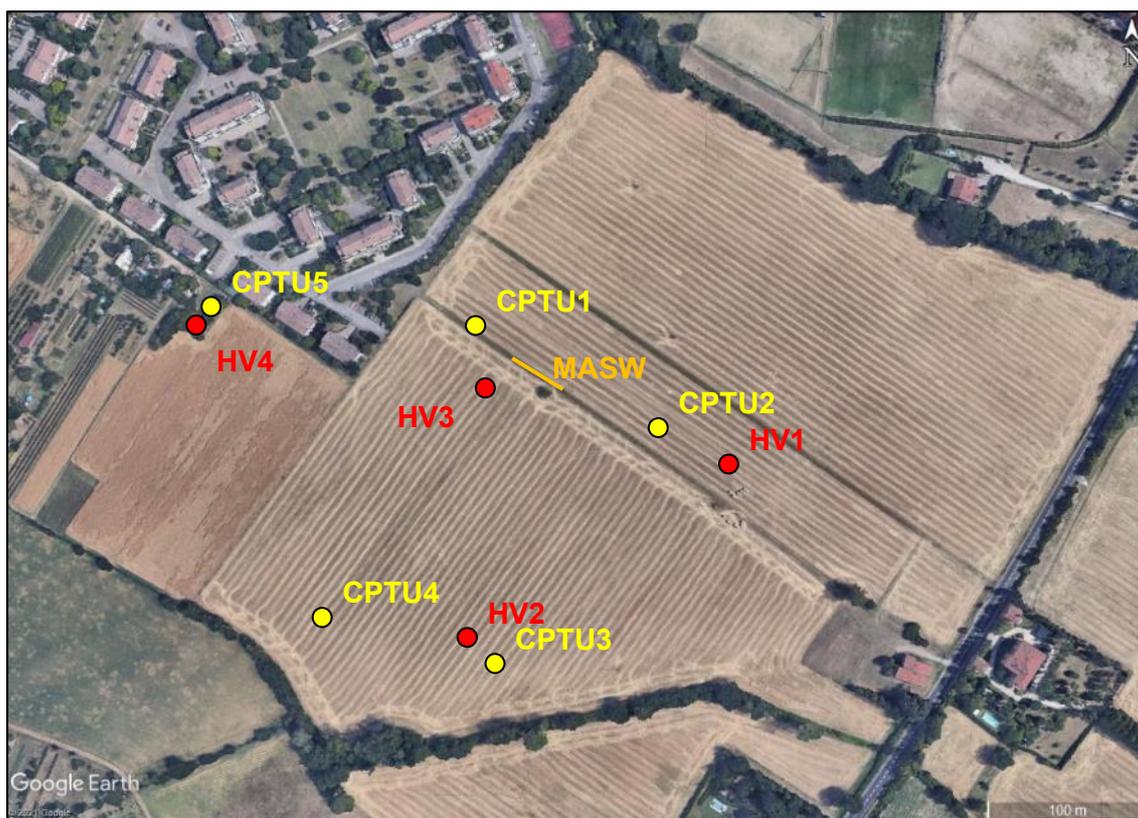


Figura 16. Ubicazione indagini.

4.1 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)

Le prove penetrometriche eseguite, il cui principio di funzionamento è riportato tra gli allegati al presente documento, hanno raggiunto la condizione di rifiuto strumentale ad una profondità 3,32 m (CPTU-1), 2,17 m (CPTU-2), 1,38 m (CPTU-3), 1,69 m (CPTU-4) e 4,68 m (CPTU-5).

All'interno del foro di indagine non è stata riscontrata la presenza d'acqua. Considerata la litologia presente, non è da escludersi l'instaurarsi di moti di filtrazione negli strati più superficiali a seguito di eventi particolarmente piovosi.

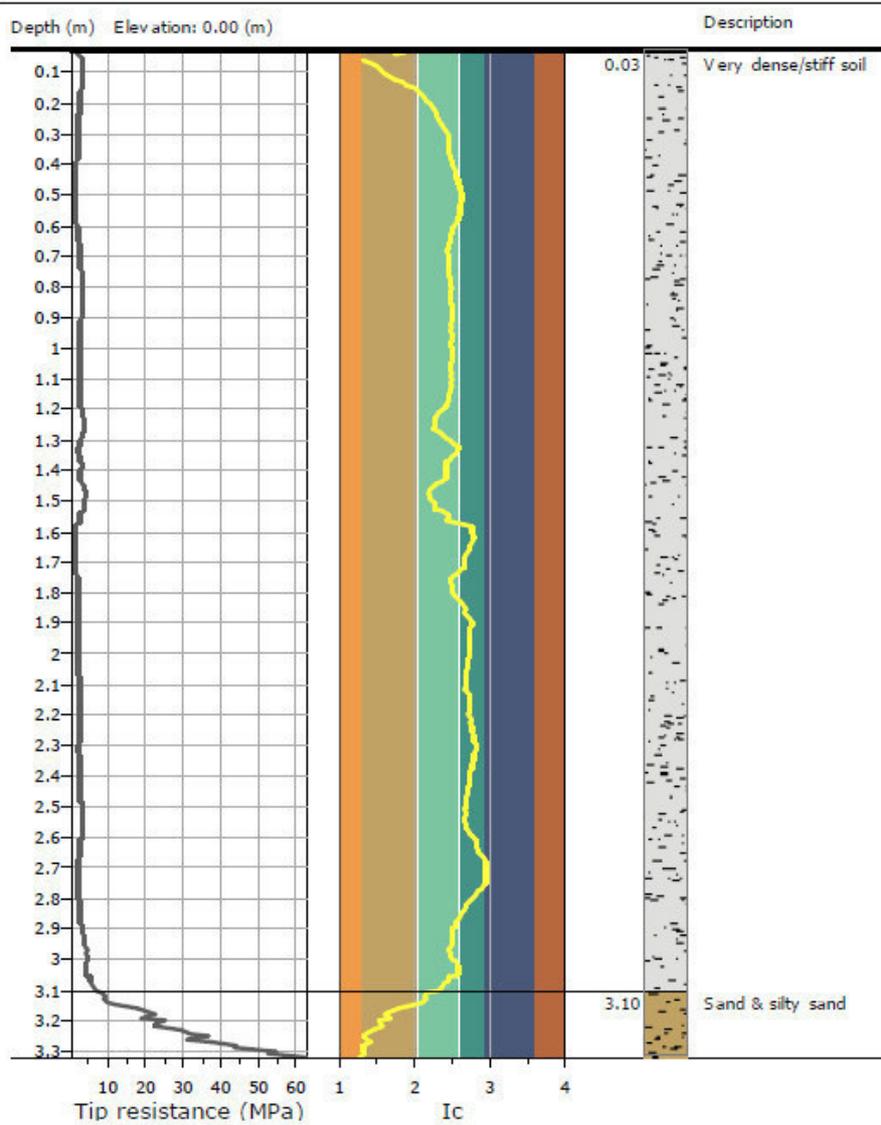
Le prove penetrometriche evidenziano una stratigrafia costituita da limi argillosi con intercalazioni limoso-sabbiose, sovrastanti un basamento costituito da ghiaie e sabbie, nelle quali le CPTU raggiungono la condizione di rifiuto.

Di seguito si riportano le variazioni dei parametri geotecnici con la profondità, relativi alle prove penetrometriche.



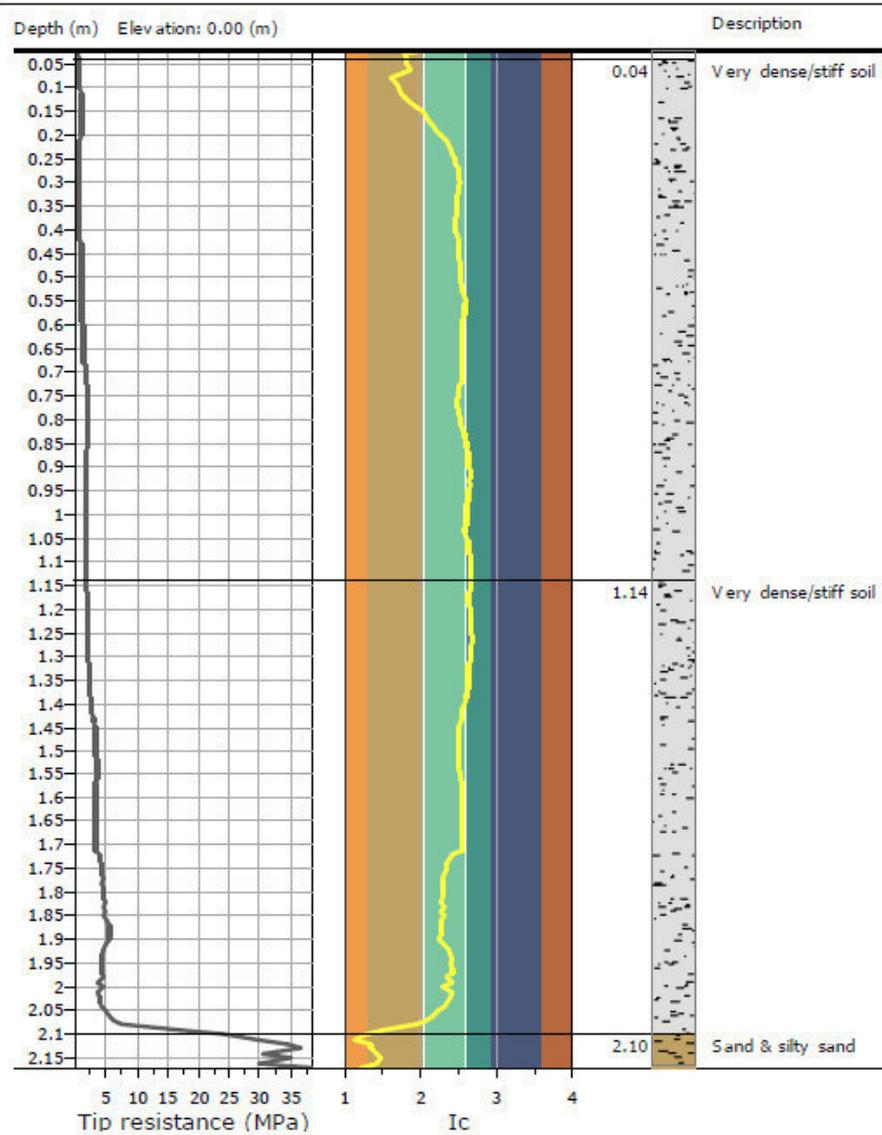
Figura 17. Esecuzione prove penetrometriche statiche CPTU.

Project:
Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA



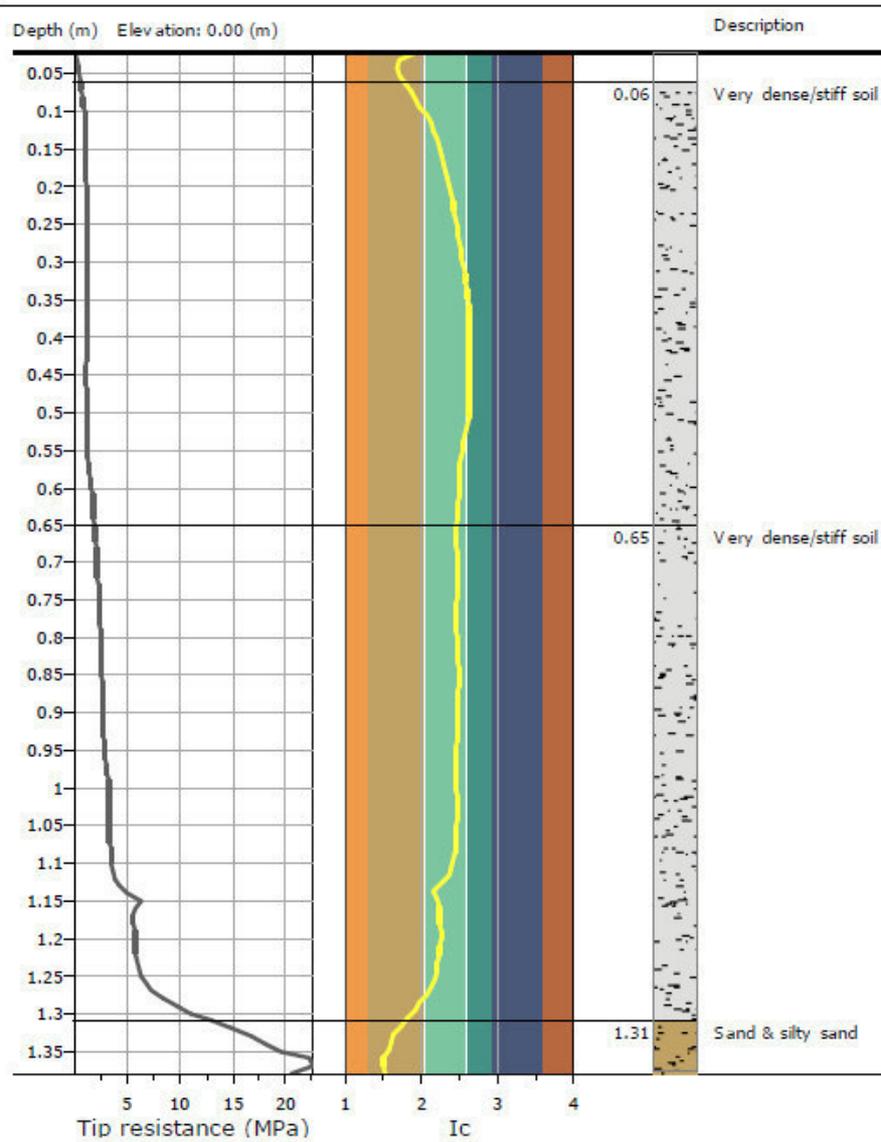
Prova penetrometrica CPTU-1

Project:
Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA



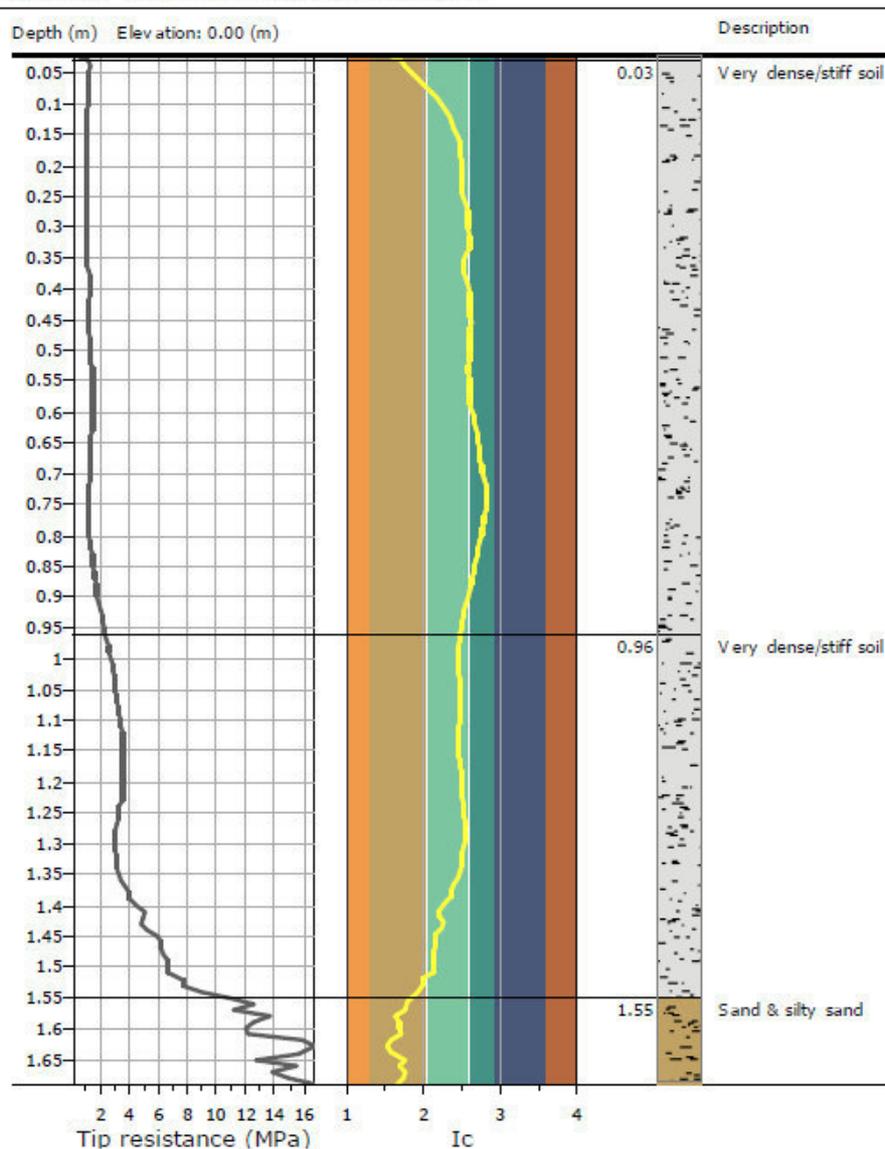
Prova penetrometrica CPTU-2

Project:
Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA



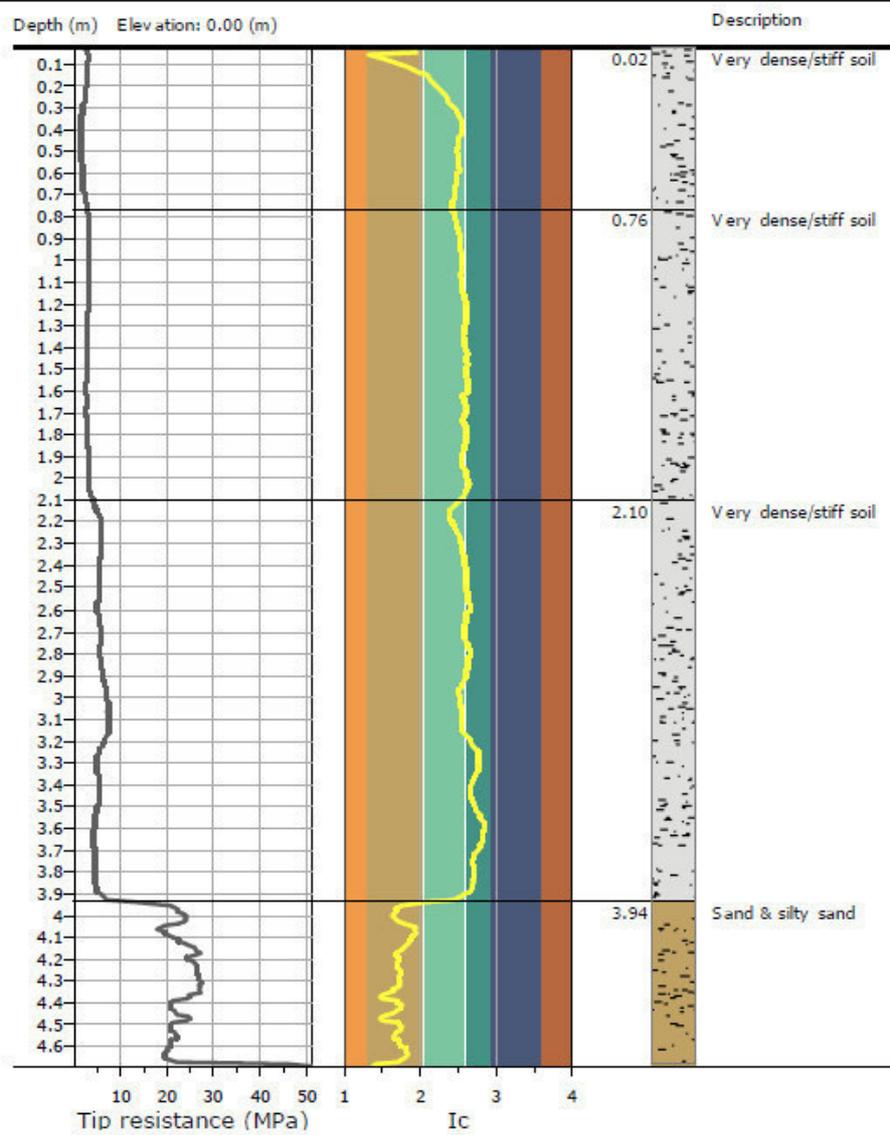
Prova penetrometrica CPTU-3

Project:
Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA



Prova penetrometrica CPTU-4

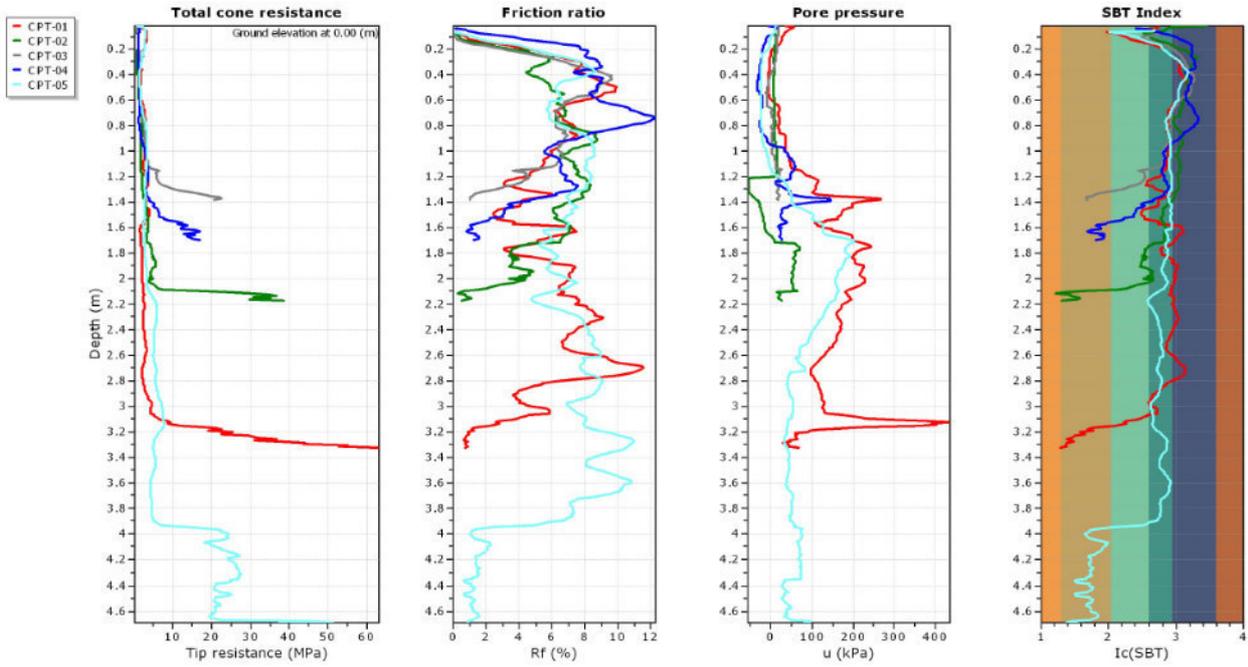
Project:
Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA



Prova penetrometrica CPTU-5

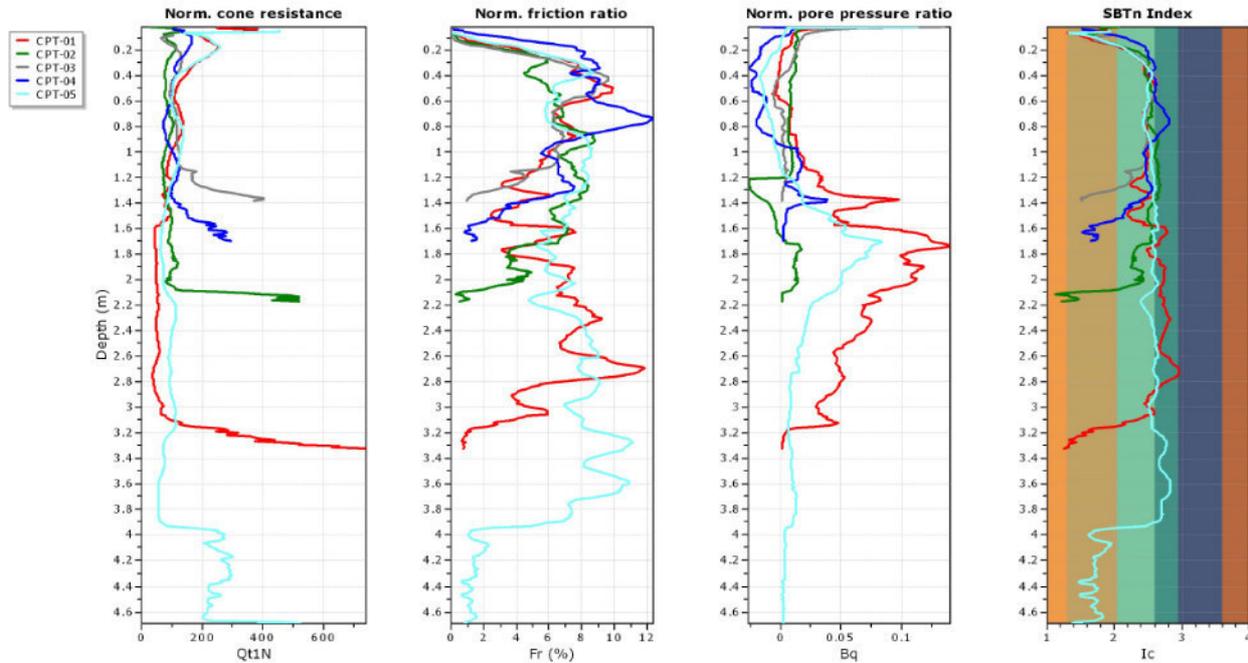
Project:
 Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA

Overlay basic interpretation plots



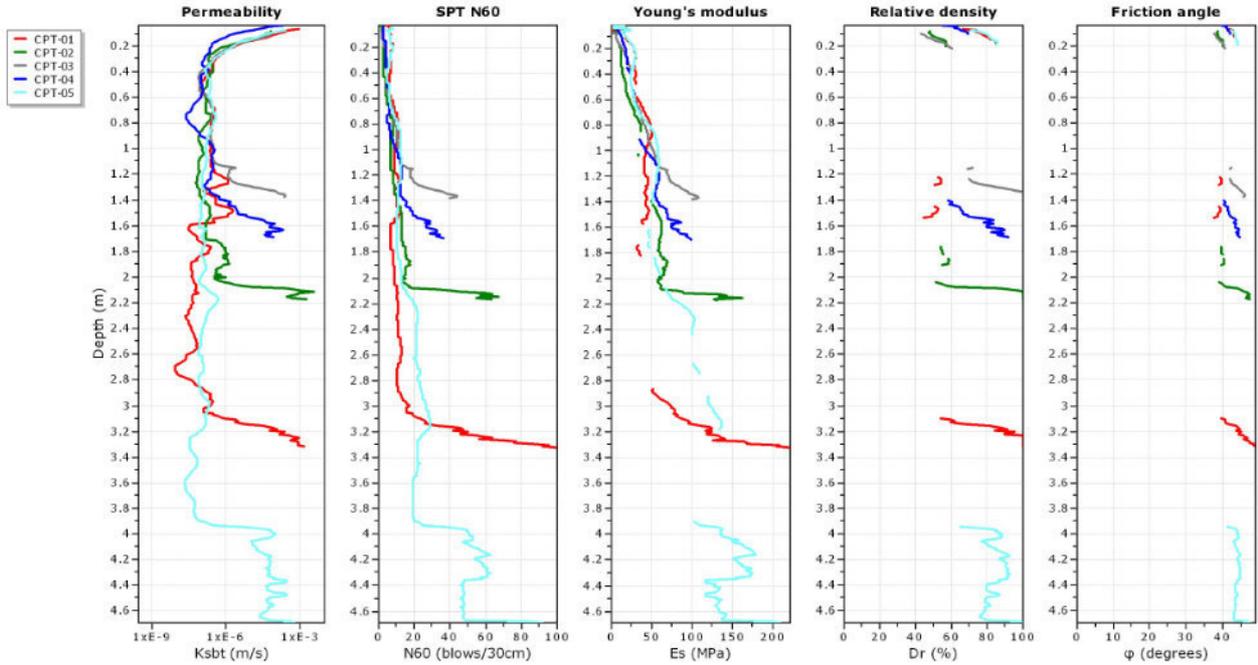
Project:
 Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA

Normalized basic plots



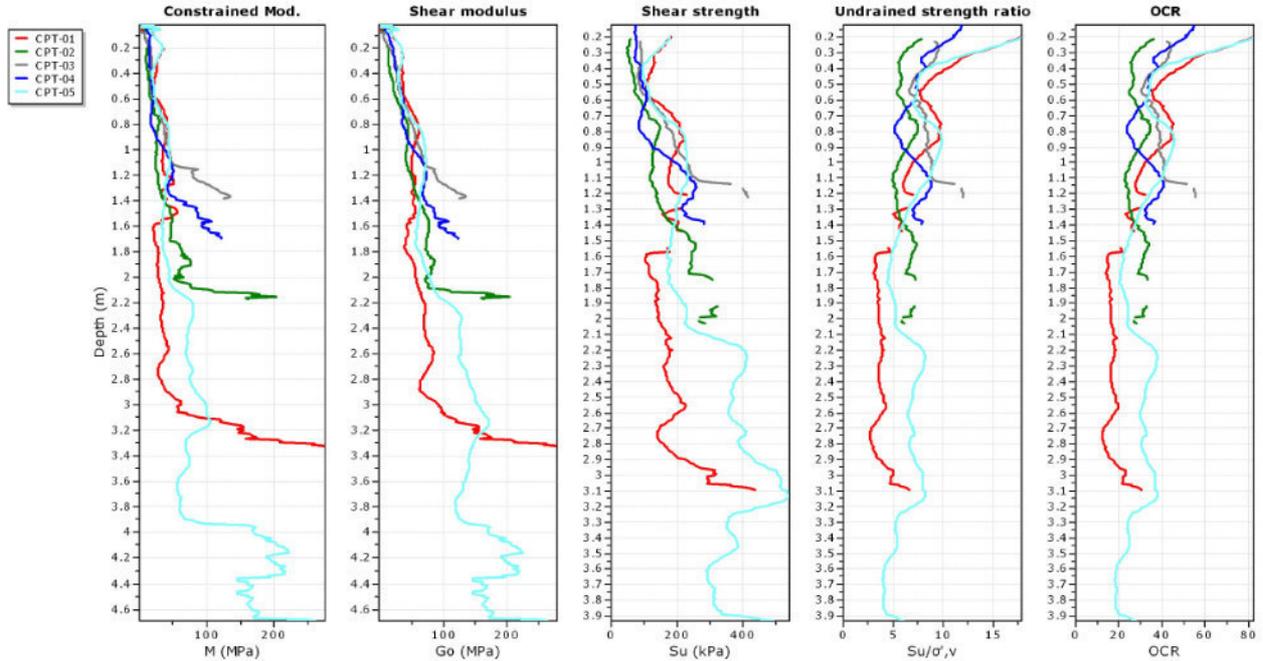
Project:
 Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA

Overlay estimation plots (1)



Project:
 Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA

Overlay estimation plots (2)



Project:
Location: IMOLA LOTTIZZAZIONE CARLINA

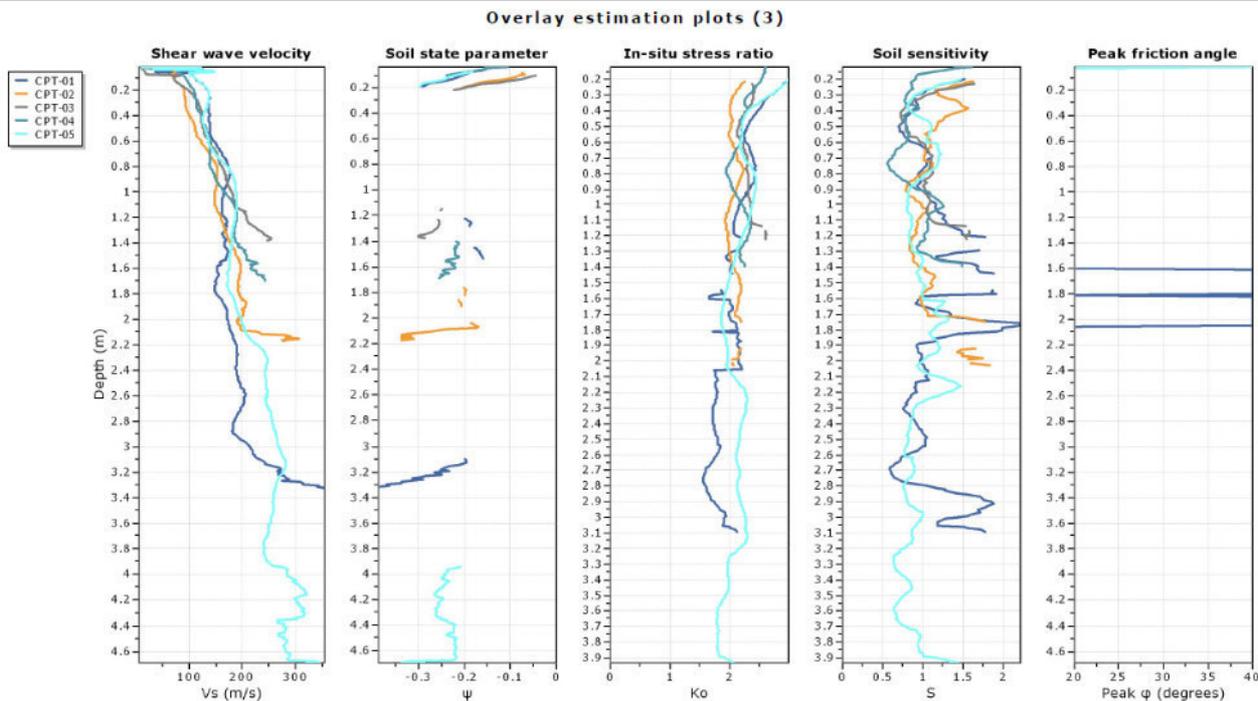


Figura 18. Variazione dei parametri geotecnici con la profondità, relativi alle prove penetrometriche CPT-1 e CPT-2.

4.2 Indagini geofisiche con metodologia HVSR e MASW/Re.Mi.

Per determinare la velocità di propagazione delle onde di taglio (S) nel sottosuolo del sito in oggetto, è stata compiuta un'indagine geofisica costituita da un array, con metodologia MASW/Re.Mi e quattro letture a stazione singola HVSR (si rimanda all'allegato tecnico per la descrizione).

L'elaborazione dei risultati dell'indagine condotta ha permesso di calcolare un valore della velocità equivalente delle onde di taglio, in questo caso coincidente con la V_{s30} del sottosuolo. Nel caso in esame, l'analisi della prove geofisiche hanno fornito una **$V_{s30} = 318$ m/s**.

Va sottolineato che le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (cfr. § 3.2.2, D.M. 17/01/2018) riportano che "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".



Figura 19. Indagini sismiche con metodologia HVSR.



Figura 20. Indagine sismica con metodologia MASW.

CARLINA HV3

Instrument: TEP-0123/01-10

Data format: 16 bit

Full scale [mV]: 51

Start recording: 25/03/2021 10:16:40 End recording: 25/03/2021 10:36:41

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

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

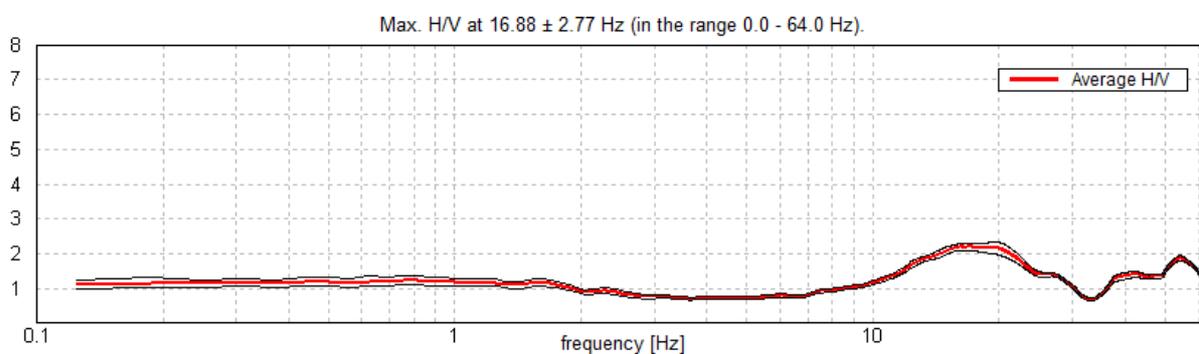
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 10 s

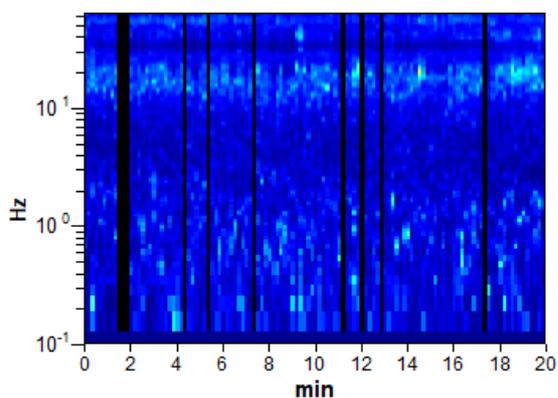
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

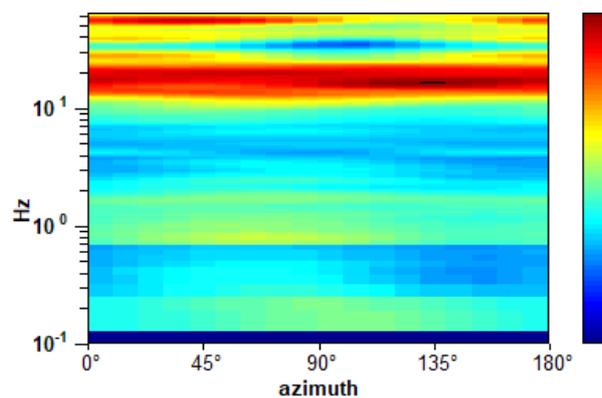
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



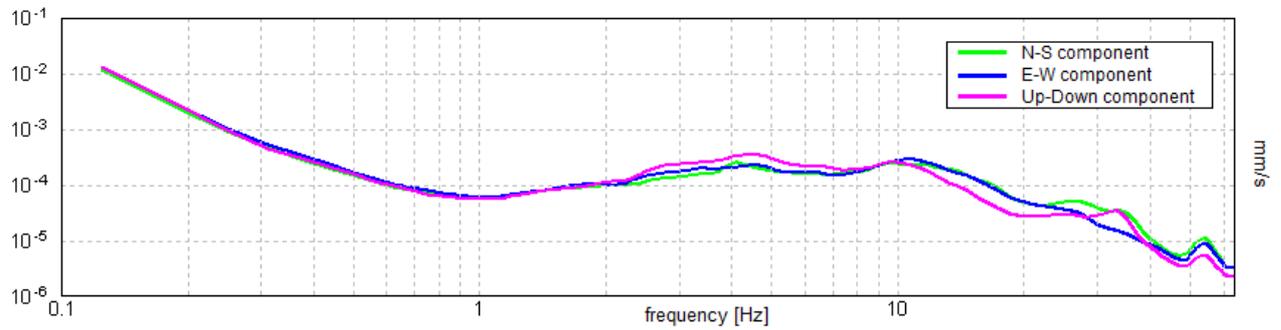
H/V TIME HISTORY



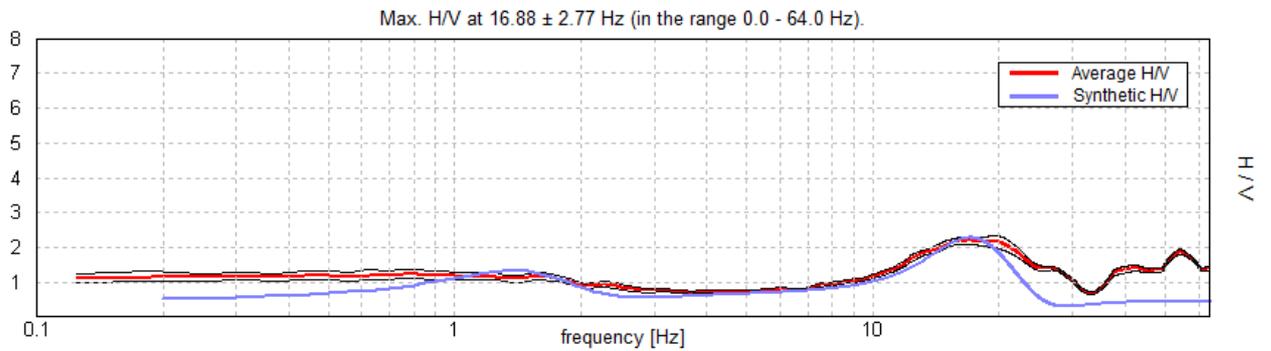
DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

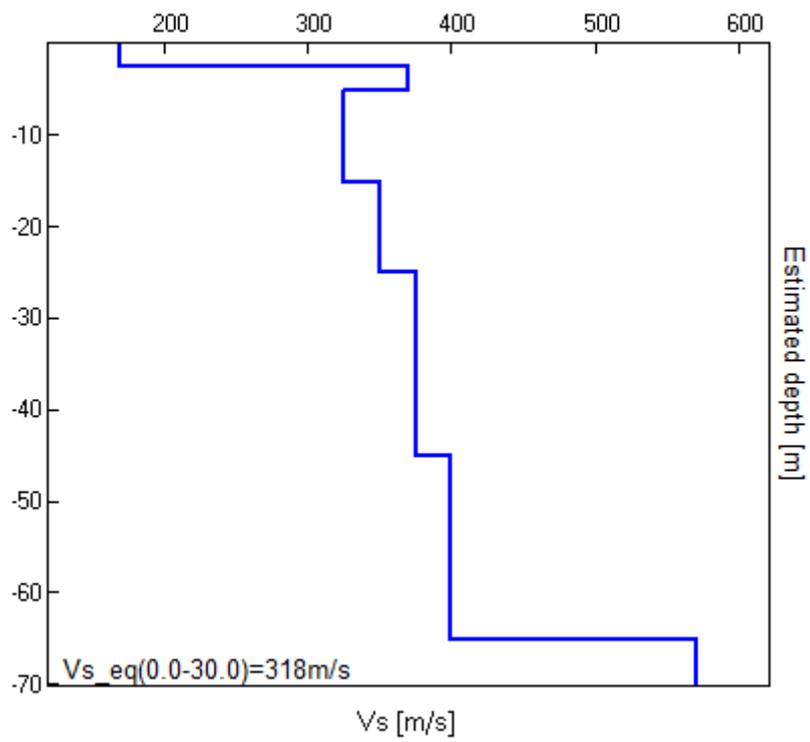


EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
2.60	2.60	170	0.42
5.10	2.50	370	0.42
15.10	10.00	325	0.42
25.10	10.00	350	0.42
45.10	20.00	375	0.42
65.10	20.00	400	0.42
inf.	inf.	570	0.42

$V_{s_eq}(0.0-30.0)=318\text{m/s}$



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

Max. H/V at 16.88 ± 2.77 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	16.88 > 1.00	OK	
$n_c(f_0) > 200$	18562.5 > 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 406 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	9.563 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	29.688 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.20 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.16422 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	2.77121 < 0.84375		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.0995 < 1.58	OK	

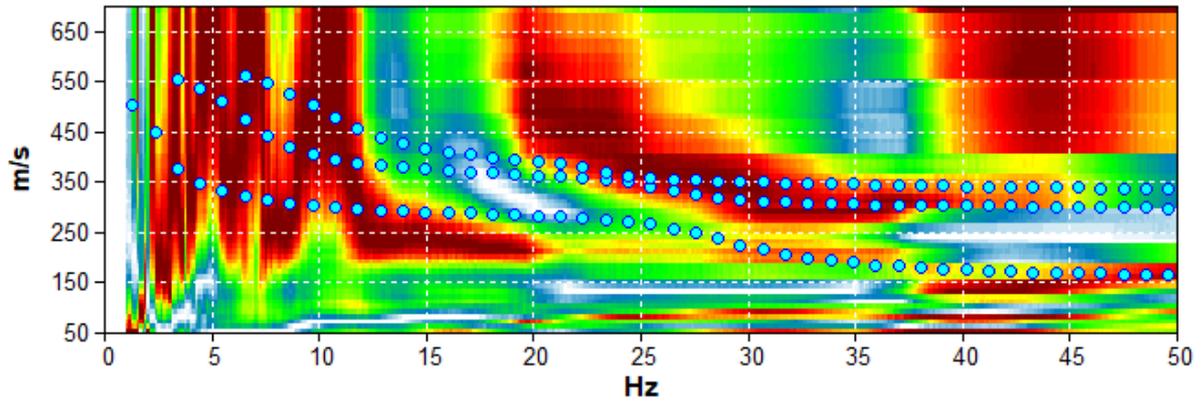
L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak 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

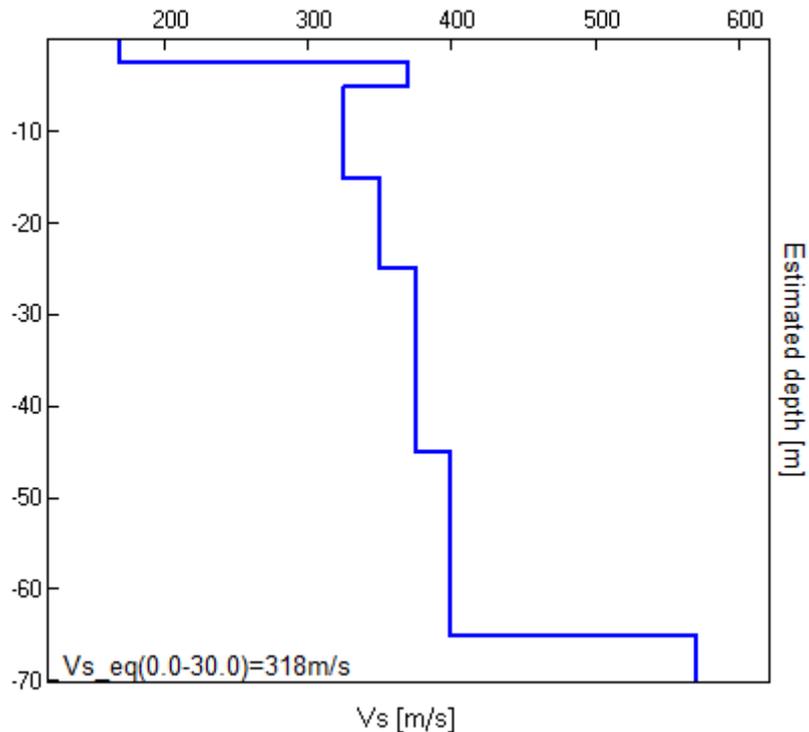
CARLINA MASW

MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
2.60	2.60	170	0.42
5.10	2.50	370	0.42
15.10	10.00	325	0.42
25.10	10.00	350	0.42
45.10	20.00	375	0.42
65.10	20.00	400	0.42
inf.	inf.	570	0.42

Vs_eq(0.0-30.0)=318m/s



In Figura 21 si riporta la sovrapposizione dei rapporti spettrali relativi alle quattro letture tomografiche eseguite. È ben evidente la somiglianza tra le letture tomografiche HV1 e HV2, con i picchi in frequenza a circa 30 Hz e la somiglianza delle letture tomografiche HV3 e HV4, con i picchi in frequenza a circa 20 Hz.

Tali picchi in frequenza indicano i contrasti d'impedenza presumibilmente determinati dal passaggio stratigrafico rappresentato dai materiali più superficiali prevalentemente argillosi e limoso argillosi, con intercalazioni limoso-sabbiose, e le sottostanti ghiaie e sabbie.

Le ghiaie e sabbie, plausibilmente anche le sottostanti Argille Azzurre, presentano velocità delle onde di taglio ben superiori rispetto ai materiali più superficiali.

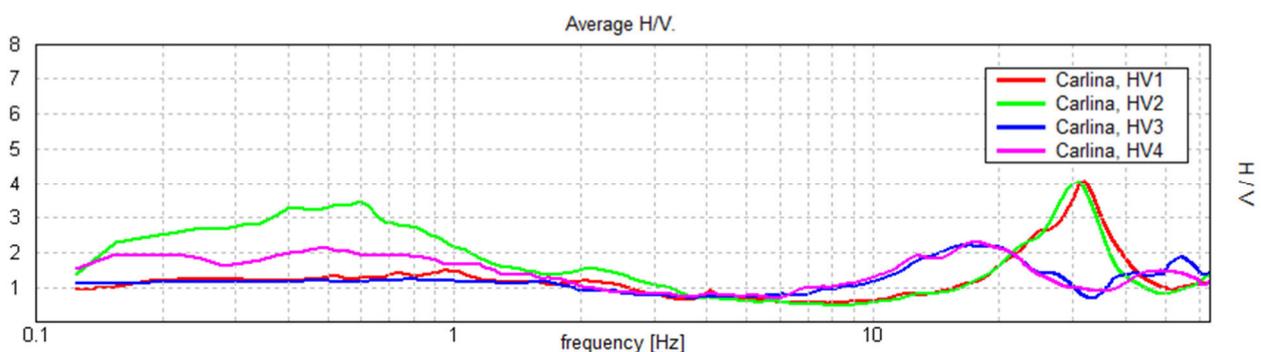


Figura 21. Overlay HV

5. Modello geologico-stratigrafico del sito

Sulla base delle risultanze delle indagini geognostiche descritte nei capitoli precedenti è stato ricostruito l'assetto stratigrafico del sottosuolo.

Le prove penetrometriche evidenziano una stratigrafia costituita da limi argillosi con intercalazioni limoso-sabbiose, sovrastanti un basamento costituito da ghiaie e sabbie, nelle quali le CPTU raggiungono la condizione di rifiuto ad una profondità 3,32 m (CPTU-1), 2,17 m (CPTU-2), 1,38 m (CPTU-3), 1,69 m (CPTU-4) e 4,68 m (CPTU-5). Il limite inferiore di tali depositi continentali è erosivo e discordante sui sottostanti depositi di origine marina, rappresentati dalle *Argille Azzurre*, costituenti il basamento geologico.

Dalle indagini eseguite è stato possibile ricostruire la variazione dello spessore dei limi argillosi superficiali rispetto al p.c., ossia la profondità a cui si attesta il tetto delle ghiaie e sabbie. Tale superficie viene rappresentata da un piano debolmente degradante verso Nord-Ovest, con un'inclinazione inferiore al grado.

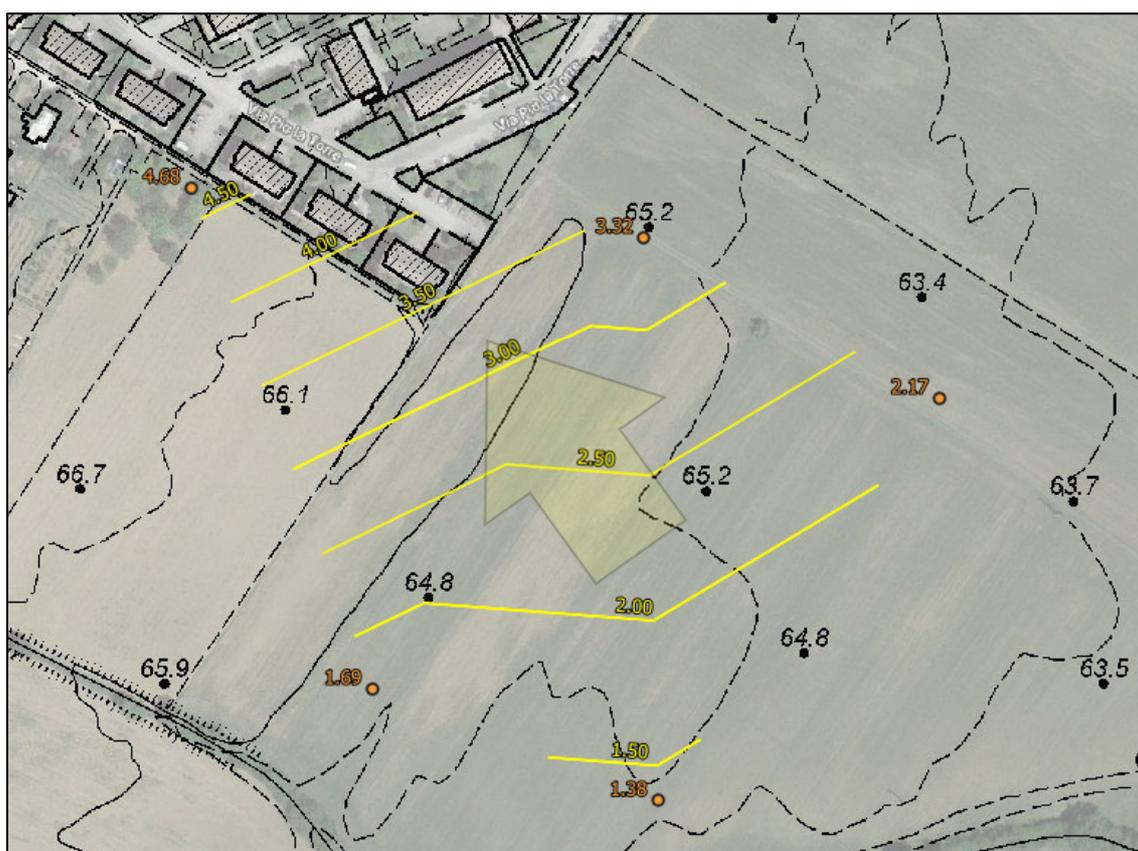
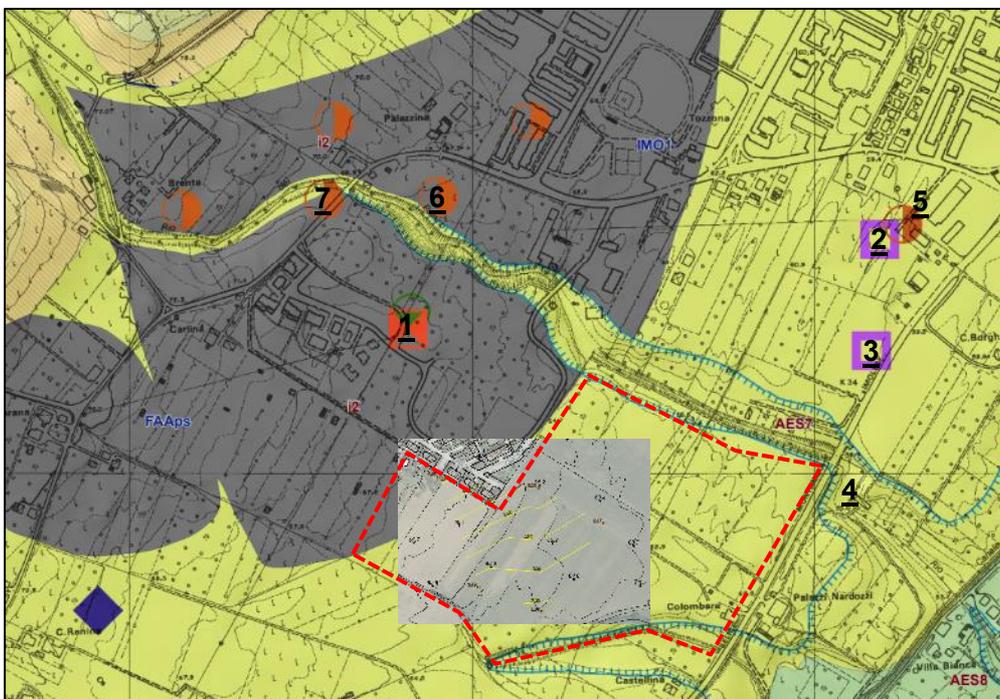


Figura 22. Mappa delle isopache dei depositi limoso argillosi superficiali (Le isolinee gialle congiungono tutti i punti di uguale spessore rispetto al piano campagna, espresse in metri lineari. I punti in arancione indicano gli spessori in metri dei medesimi limi argillosi, direttamente indagati dalle prove CPTU, terminate al raggiungimento delle ghiaie e sabbie) (Base DBTR_CTR5K Regione Emilia-Romagna).

Quanto sopra descritto trova riscontro con le informazioni e dati reperiti dalla Cartografia Geologica della Regione Emilia-Romagna e dalle indagini geognostiche realizzate dallo scrivente in zone limitrofe al sito in esame.



Indagini limitrofe (Cartografia Geologica dell'Emilia-Romagna).

Di seguito si riportano informazioni e dati delle indagini geognostiche limitrofe al sito in esame.

1 – Prova penetrometrica dinamica

DATI LITOLOGICI				
Zona	Da (mt)	0 ÷	A (mt)	-0,5 ÷
terreno vegetale				
Zona	Da (mt)	-0,5 ÷	A (mt)	-3,5 ÷ -5
argille limoso sabbiose e argille limose				
Zona	Da (mt)	-3,5 ÷ -5	A (mt)	-5 ÷ -5,2
sabbie limoso argillose e ghiaie				

2 – Carotaggio continuo

profondità (m) scala	idrologia	colonna stratigrafica	Descrizione ed osservazione dei terreni	S.P.T.				
				profondità	Nc	carotaggio %	Pocket Penetrometer	Tor Vane
0.8			Limi sabbiosi di colore nocciola; - terreni compatti asciutti.					
			Ghiaia medio grossolana in matrice sabbiosa; - terreno mediamente addensato.					
2.6			Limo argilloso grigio azzurro con abbondanti screziature nocciola; - consistenza plastica dura ed umidità scarsa.					
3.5								

3 – Carotaggio continuo

profondità (m) scala	idrologia	colonna stratigrafica	Descrizione ed osservazione dei terreni	S.P.T.				
				profondità	Nc	carotaggio %	Pocket Penetrometer	Tor Vane
1.1			Limi sabbiosi di colore marrone; - terreni compatti asciutti.					
			Ghiaia medio grossolana in abbondante matrice sabbiosa; - terreno scarsamente addensato.					
2.2			Limo argilloso grigio azzurro con abbondanti screziature nocciola; - consistenza plastica dura ed umidità scarsa.					
3.5								
			Argille limose grigio azzurre; - terreno molto compatto scarsamente imbibito.					
6.0								

4 – Carotaggio continuo

5		Coltre superficiale limoso-argillosa	(0 – 2,50)	2.50
		Ghiaia eterometrica	(2,50 – 4,00)	4.00
10		Argilla Consistente riconducibile alla Formazione delle Argille Azzurre del Pliocene	(4,00 – 100,00)	

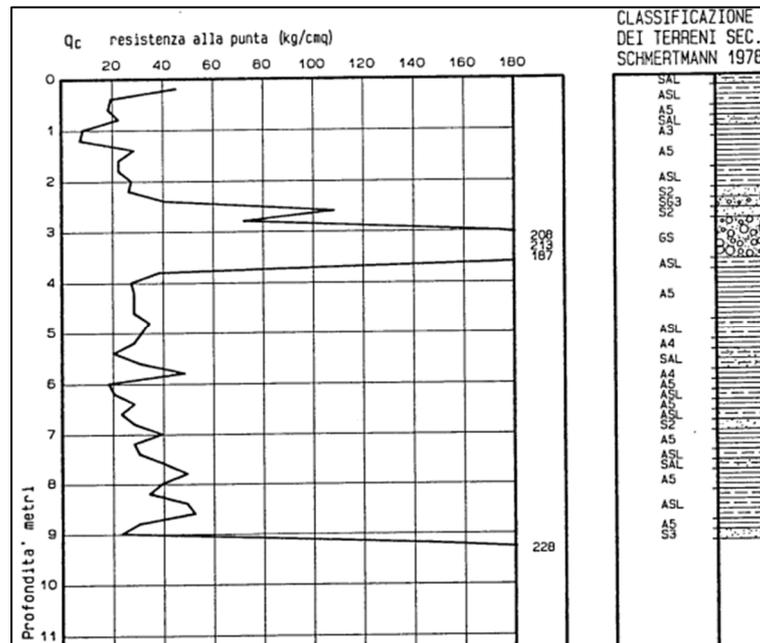
5 – Carotaggio continuo

S.P.T.		CAMPIONI		STRATIGRAFIA	Prof (m)
Prof	Tipi-Valori	Prof	Tipi		
				T.V. Saturato	-0,5
	1			Argilla debole limosa colore nocciolo, molto umidante, (nona consolidata)	
	2			essente -> presenza di olivelli	-2,3
	3			ghiaie e sabbie medie sabbie sabbie-arg. a righe in matrice sabbie robusta, nocciolo, med. sabbie, med. umide	-4,1
	4				
	5			Argilla deb. limosa da gesso chiaro a pessante da med. e costante, deb. umide.	
	6			(presenza di livelli con limoso - argilloso)	
	7				-7,4

6 – Prova penetrometrica dinamica

DATI LITOLOGICI				
Zona	Da (mt)	0 +	A (mt)	-1 +
terreno agrario argilloso in parte sovraconsolidato				
Zona	Da (mt)	-1 +	A (mt)	-7 + -9
argille limose con livelli di sabbie argillose				
Zona	Da (mt)	-7 + -9	A (mt)	-9 + -11
ghiaie e sabbie con livelli di argille				

7 – Prova penetrometrica statica



Tali informazioni, congiuntamente e concordemente alle indagini eseguite, contribuiscono a caratterizzare con maggior dettaglio la geometria dello strato di ghiaie e sabbie.

Pertanto, lo strato di ghiaie e sabbie, sovrastato da uno strato di limi argillosi con intercalazioni limoso-sabbiose, viene individuato come un livello di circa 2 metri di spessore immergente verso Nord-Ovest, ad ovest ad una profondità di circa 9 metri dal p.c., ad Est ad una profondità di circa 1-2 metri dal p.c..

Il limite inferiore, come precedentemente descritto, è erosivo e discordante sui sottostanti depositi di origine marina, rappresentati dalle *Argille Azzurre*.

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

Tabella 1. Zone sismiche (Allegato 1, OPCM 3274/2003).

Il Comune di Imola (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 ".

L'elaborazione dei risultati delle indagini geofisiche ha permesso di stimare valori del parametro V_{s30} pari a **318 m/s**: di conseguenza, **il sottosuolo del sito in oggetto è classificabile in 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 informazioni dettagliate in merito all'effettiva profondità di imposta delle fondazioni nel momento in cui vengono scritte queste note, **l'elaborazione è stata riferita al piano campagna locale.**

6.2 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 : in ragione della categoria di sottosuolo risultante dalla specifica indagine si definisce quindi un coefficiente S_s che quantifica l'amplificazione stratigrafica.

Alla **categoria di sottosuolo C**, determinata per il sito oggetto del presente studio, corrisponde la seguente formulazione del coefficiente $S_s=1.00 \leq 1.70-0.60 \cdot F_0 \cdot a_g/g \leq 1.50$ e del coefficiente

$$C_c=1.10 \cdot (T^*_c)^{-0.33}.$$

Per quanto concerne la valutazione dell'influenza delle *condizioni topografiche* in merito alla risposta sismica del suolo, la detta normativa (D.M. 17 gennaio 2018) per configurazioni superficiali semplici adotta la classificazione riportata nella seguente tabella. *“Le categorie topografiche riportate 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).

Il sito in oggetto è ubicato in un'area sostanzialmente pianeggiante e, di conseguenza, è attribuibile alla **categoria topografica T1** ed 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:

$$S = S_s \cdot S_T$$

Quanto riportato precedentemente ha lo scopo di aiutare nella determinazione dei coefficienti sismici, da adottare in fase di progettazione (Figura 23 e Figura 24), e della pericolosità sismica di base. A titolo di esempio si riportano i valori relativi alla Categoria II *“Affollamento normale. Assenza di funzioni pubbliche e sociali...”*.

Stati limite

Classe Edificio

II. Affollamento normale. Assenza di funz. pubbliche e sociali...

Vita Nominale 50

Interpolazione Media ponderata

CU = 1

Stato Limite	Tr [anni]	a _g [g]	F _o	Tc* [s]
Operatività (SLO)	30	0.067	2.403	0.260
Danno (SLD)	50	0.085	2.392	0.268
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.206	2.456	0.299
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.257	2.509	0.313
Periodo di riferimento per l'azione sismica:	50			

Figura 23. Stati limite per edifici di categoria II.

Coefficienti sismici

Tipo Stabilità dei pendii e fondazioni

Muri di sostegno che non sono in grado di subire spostamenti.

H (m) 1 us (m) 0.1

Cat. Sottosuolo C

Cat. Topografica T1

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,50	1,50	1,40	1,31
CC Coeff. funz categoria	1,64	1,62	1,56	1,54
ST Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00	1,00

Acc.ne massima attesa al sito [m/s²] 0.6

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.020	0.026	0.081	0.094
kv	0.010	0.013	0.040	0.047
Amax [m/s²]	0.983	1.257	2.824	3.307
Beta	0.200	0.200	0.280	0.280

Figura 24. Coefficienti sismici e pericolosità sismica per edifici di categoria II.

7. Valutazione del potenziale di liquefazione

Nel linguaggio tecnico con il termine liquefazione 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 a eguagliare la pressione totale di confinamento, cioè fino a quando gli sforzi efficaci si riducono a zero.

Sulla base dei risultati delle indagini geognostiche svolte, date le caratteristiche stratigrafiche e litologiche si ritiene che, nel sottosuolo del sito in oggetto, non siano presenti condizioni potenzialmente predisponenti l'insorgere di fenomeni di liquefazione in caso di evento sismico.

8. Analisi sismica ai sensi della DGR. 630/19

In conformità a quanto riportato nei capitoli precedenti del presente documento, in relazione all'area in esame è possibile affermare che:

- Concordemente a quanto riportato dallo Studio di Microzonazione del PSC del Nuovo Circondario Imolese (cfr. § 3.5) e nel cap. 6 della presente relazione, nel sottosuolo dell'area in esame non è stata rilevata la presenza di condizioni potenzialmente predisponenti l'insorgere di fenomeni di liquefazione in caso di sisma;
- L'area in esame risulta pianeggiante/sub-pianeggiante;
- I risultati delle indagini hanno evidenziato la sostanziale regolarità del modello lito-stratigrafico alla scala dell'area in esame;
- La Tavola 10, Foglio 4 dello Studio di Microzonazione Sismica del PSC del Nuovo Circondario Imolese inserisce l'area in esame tra quelle "...oggetto di approfondimento di secondo livello" (Figura 14).

Di conseguenza, la seconda fase di analisi è stata compiuta conformemente al II livello di approfondimento (analisi semplificata), secondo le modalità indicate al § 4.1 della D.G.R. 630/2019.

8.1 Valutazione della risposta sismica locale e microzonazione sismica dell'area in oggetto

Secondo quanto riportato nel §A2.1 dell'Allegato A2 alla D.G.R. 630/2019, per calcolare i Fattori di Amplificazione nell'ambito dell'analisi condotta al II livello di approfondimento "...devono essere realizzate indagini geotecniche e geofisiche che permettano di definire lo spessore H del deposito

di copertura e la velocità equivalente delle onde di taglio per lo spessore considerato (V_{SH} e V_{S30})...”, secondo la formula di seguito riportata:

$$V_{SH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

Dove:

- N numero degli strati del profilo sismico corrispondenti alla copertura.
- H spessore totale (in m) dei terreni di copertura o profondità del tetto del substrato rigido.
- h_i spessore (in m) dello strato i-esimo (fino al substrato rigido).
- V_{S_i} velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino al substrato rigido).

Nell'ambito dell'analisi condotta al II livello di approfondimento, l'amplificazione sismica deve essere quantificata tramite una serie di **fattori di amplificazione (FA)** dati dal rapporto tra gli spettri di risposta elastici di output, alla superficie del suolo in esame, e lo spettro di risposta elastica di input, al suolo di riferimento, per prefissati intervalli di periodi (T), calcolati per un tempo di ritorno $TR=475$ anni e smorzamento ($\zeta = 5\%$).

In particolare:

- **Accelerazione di picco orizzontale (PGA)**: accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ alla superficie del sito.

Il fattore di amplificazione (F_{PGA}) è dato dal rapporto tra l'accelerazione massima a periodo zero ($T=0$) alla superficie del sito e l'accelerazione massima a periodo zero ($T=0$) al suolo di riferimento.

$$F_{PGA} = PGA/PGA_0$$

- **Intensità spettrale (SA)**: il fattore di amplificazione (FA) è dato dal rapporto tra l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito (SA) e l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento (SA_0).

$$FA = SA/SA_0$$

Il fattore di amplificazione FA_{SA} deve essere calcolato per quattro distinti intervalli di periodo proprio (T).

	T ₁	T ₂
SA1	0,1 s	0,5 s
SA2	0,4 s	0,8 s
SA3	0,7 s	1,1 s
SA4*	0,5 s	1,5 s

- **Intensità spettrale (SI)**: il fattore di amplificazione (FH) è dato dal rapporto tra l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) alla superficie del sito (SI) e l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento (SI₀).

$$FH = SI/SI_0$$

Il fattore di amplificazione FH deve essere calcolato per tre distinti intervalli di periodo proprio (T)

	T ₁	T ₂
SI1	0,1 s	0,5 s
SI2	0,5 s	1,0 s
SI3*	0,5 s	1,5 s

Va sottolineato che i fattori di amplificazione SA4 ed SI3 sono richiesti unicamente per studi in aree di pianura o di costa.

I risultati delle indagini svolte sul sito in oggetto e dell'esame di quanto riportato dalla letteratura tematica consultata hanno evidenziato che nel sottosuolo del sito in oggetto è presente un primo intervallo costituito da terreni prevalentemente fini (limi argillosi) che sovrastano un intervallo ghiaioso e sabbioso. Il substrato invece risulta costituito da depositi sedimentari marini riconducibili alla Formazione delle Argille Azzurre (FAAps).

L'assetto stratigrafico dell'area in esame è quindi riconducibile all'ambito di **MARGINE**, descritto al punto A 2.1.2 dell'Allegato A2 alla D.G.R. 630/2019 come "*settore di transizione fra la zona collinare ... e la pianura caratterizzato da terreni prevalentemente fini (argille, limi o sabbie), sovrastanti orizzonti grossolani (ghiaie, ghiaie sabbiose, sabbie ghiaiose)*"; il substrato geologico è *generalmente costituito da sabbie marine o transazionali pleistoceniche (Sabbie Gialle) o dalla successione pelitica plio-pleistocenica (Argille Azzurre)*".

In particolare, l'ambito in oggetto è assimilabile al **MARGINE tipo A**, "*caratterizzato da terreni fini o grossolani poco consolidati, di spessore non superiore a 30 m, sovrastanti orizzonti prevalentemente grossolani a comportamento più rigido... H è riferito allo spessore di sedimenti fini o grossolani poco consolidati sovrastanti i sedimenti continentali più rigidi*".

Nel caso in esame i parametri da adottare per la valutazione dei fattori di amplificazione sono i seguenti:

$$H = 1,5-4,5 \text{ m}$$

$$V_{SH} = 170 \text{ m/s, calcolata con la formula per la } V_{SH} \text{ riportata nel presente paragrafo.}$$

La determinazione dei **fattori di amplificazione sismica**, è stata quindi effettuata sulla base degli abachi riportati al § A2.1.2 dell'Allegato A2 alla già citata delibera e, più in particolare, "*MARGINE tipo A*".

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,1	1,8	1,5		
10	2,3	2,2	2,0	1,8		
15	2,1	2,1	2,0	1,8		
20	2,1	2,1	2,0	1,9		
25	2,0	2,0	2,0	1,9		
30	1,9	1,9	1,9	1,9		

Fattore di Amplificazione PGA

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,0	1,7	1,5		
10	2,5	2,3	2,0	1,8		
15	2,4	2,4	2,1	1,9		
20	2,3	2,3	2,1	2,0		
25	2,2	2,2	2,1	2,0		
30	2,0	2,0	2,0	1,9		

Fattore di Amplificazione SA1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,9	1,7	1,7	1,6		
10	2,7	2,2	1,9	1,8		
15	3,3	2,9	2,3	2,0		
20	3,4	3,1	2,6	2,2		
25	3,3	3,2	2,8	2,4		
30	3,1	3,1	2,8	2,5		

Fattore di Amplificazione SA2(0,4s≤T≤0,8s)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,6	1,6	1,6	1,6		
10	2,0	1,8	1,7	1,7		
15	2,9	2,3	2,0	1,9		
20	3,4	2,8	2,3	2,0		
25	3,9	3,4	2,7	2,3		
30	3,8	3,6	3,0	2,5		

Fattore di Amplificazione SA3 (0,7s≤T≤1,1s)

V_{sH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,2	1,9	1,7	1,6		
10	2,6	2,4	2,0	1,8		
15	2,6	2,5	2,2	1,9		
20	2,5	2,5	2,3	2,0		
25	2,3	2,3	2,2	2,1		
30	2,1	2,1	2,1	2,0		

Fattore di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

V_{sH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,8	1,7	1,6	1,6		
10	2,3	2,0	1,8	1,7		
15	3,2	2,6	2,1	2,0		
20	3,5	3,1	2,5	2,1		
25	3,7	3,4	2,8	2,4		
30	3,6	3,5	3,0	2,6		

Fattore di Amplificazione **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)

In base alle indicazioni di cui al § 4.1.1. della D.G.R. 630/2019, è stato calcolato anche il parametro H_{SM} che esprime lo **scuotimento atteso al sito** in oggetto in valore assoluto (considerando i valori di accelerazione espressi in cm/s^2), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI_{UHS}) diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

Dove

ASI_{UHS} rappresenta l'integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per un intervallo di periodi $0,1s < T < 0,5s$

ΔT rappresenta l'intervallo di periodi considerato (in questo caso 0,4s)

FA fattore di amplificazione in accelerazione calcolato per lo stesso intervallo di periodo

Il valore dell'Acceleration Spectrum Intensity $ASI_{UHS}/\Delta T$ è stato ottenuto direttamente dal file "all_4_coord.kmz" disponibile on-line nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna: tale file riporta i valori del rapporto $ASI_{UHS}/\Delta T$ calcolati per ogni punto della griglia INGV (nel caso in esame, è stato selezionato il punto maggiormente prossimo all'area in esame).

$$ASI_{UHS}/\Delta T = ASI_{0105}/0,4s = 456,50835$$

$$FA_{SA1(0,1s-0,5s)} = 2,0$$

$$H_{SM} = 913,02$$

Il valore calcolato è in linea con i valori di riferimento attesi per l'area in esame, desunti dagli studi compiuti a scala regionale.

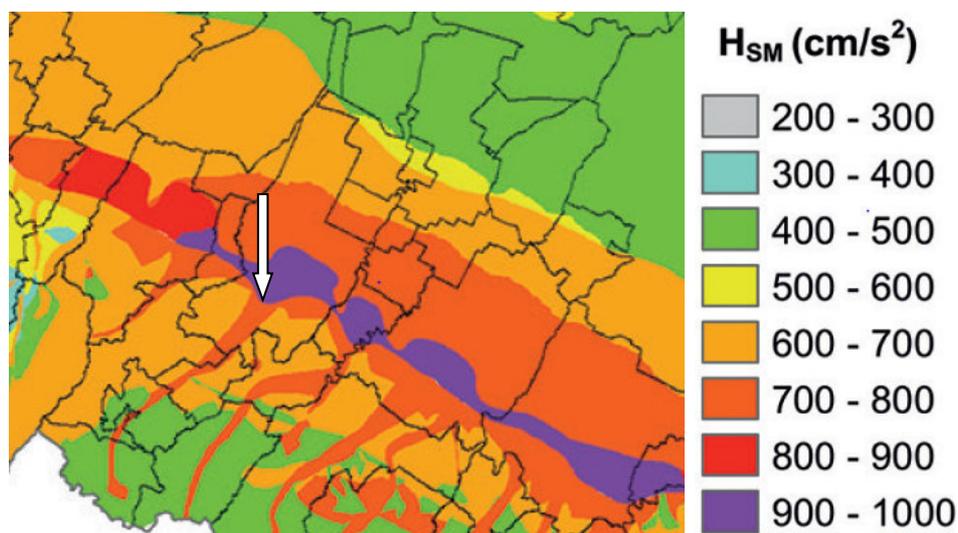


Figura 25. Estratto di cartografia che evidenzia i valori attesi di HSM in Emilia Romagna. La freccia bianca evidenzia la posizione del sito in oggetto.

I valori del parametro H_{SM} sono stati inoltre discretizzati su base semi-quantitativa, mediante l'utilizzo di correlazioni empiriche tra il parametro H_{SM} stesso, la PGA, ed il danno potenziale atteso.

seismic hazard	low-very low	moderate-low	moderate	high	very high
H_{SM} (cm/s ²)	≤ 180	180 < H_{SM} ≤ 340	340 < H_{SM} ≤ 650	650 < H_{SM} ≤ 1240	> 1240
potential damage	none - very light	very light - moderate	moderate - heavy	heavy	very heavy
instrumental intensity	≤ VI	VII	VIII	IX	≥ X

Figura 26. Tabella che evidenzia la discretizzazione dei valori di HSM in relazione ad altri parametri (Naso & alii, 2019).

In conclusione, si riporta una tabella riepilogativa contenente i valori dei fattori di amplificazione determinati per mezzo degli abachi di cui al § A2.1.2 dell'Allegato A2 alla D.G.R. 630/2019.

FA PGA	2,1
FA SA1	2,0
FA SA2	1,7
FA SA3	1,6
FA SI1	1,9
FA SI2	1,7
H_{SM}	913,02

9. Conclusioni

Su richiesta dei committenti So.G.E.I. S.r.l. - Aurora Seconda Soc. Coop.va - ZiniElio, è stata redatta la presente relazione che restituisce i risultati della campagna d'indagine geognostica eseguita sui terreni ubicati in località Carlina, Via Montanara, Imola (BO), interessati dal progetto di edificazione di un complesso residenziale.

In sito è stata realizzata una campagna d'indagini geognostiche articolatasi nella realizzazione di:

- n°5 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU);
- n°1 indagine geofisica con metodologia MASW, finalizzata alla caratterizzazione della risposta sismica del sito, ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17/01/2018;
- n°4 indagini geofisiche a stazione singola HVSAR,

Tali indagini hanno permesso di ricostruire un modello geologico del sito, costituito da limi argillosi con intercalazioni limoso-sabbiose, sovrastanti un basamento costituito da ghiaie e sabbie, nelle quali le CPTU raggiungono la condizione di rifiuto strumentale ad una profondità 3,32 m (CPTU-1), 2,17 m (CPTU-2), 1,38 m (CPTU-3), 1,69 m (CPTU-4) e 4,68 m (CPTU-5).

È stato dunque possibile ricostruire la variazione dello spessore dei limi argillosi superficiali rispetto al p.c.. Tale superficie viene rappresentata da un piano debolmente degradante verso Nord-Ovest, con un'inclinazione inferiore al grado.

Il limite inferiore di tali depositi continentali (ghiaie e sabbie) è erosivo e discordante sui sottostanti depositi di origine marina, rappresentati dalle *Argille Azzurre*.

A seguito di quanto in precedenza esposto ed in conformità alle norme dettate dal D.M. 17/01/2018 si esprime parere favorevole di fattibilità geologica dell'opera.

Imola, aprile 2021

Dott. Geol. Gabriele Cesari

Dott. Geol. Rocco Carbonella



PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PIEZOCONO (CPTU)

Questa tipologia di prova è un'evoluzione della prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT).

La prova consiste nell'infissione nel terreno di una batteria di aste precedute da una punta dotata di trasduttori e filtro poroso. Queste caratteristiche permettono alla prova di registrare in continuo valori di resistenza alla punta q_c , resistenza laterale f_s , pressione neutra u e angolo di inclinazione della batteria di aste. 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 contenute nelle pubblicazioni di Robertson et al. (2012) e Robertson (2009).

Qui di seguito vengono riportate le tabelle con le caratteristiche tipiche del penetrometro utilizzato.

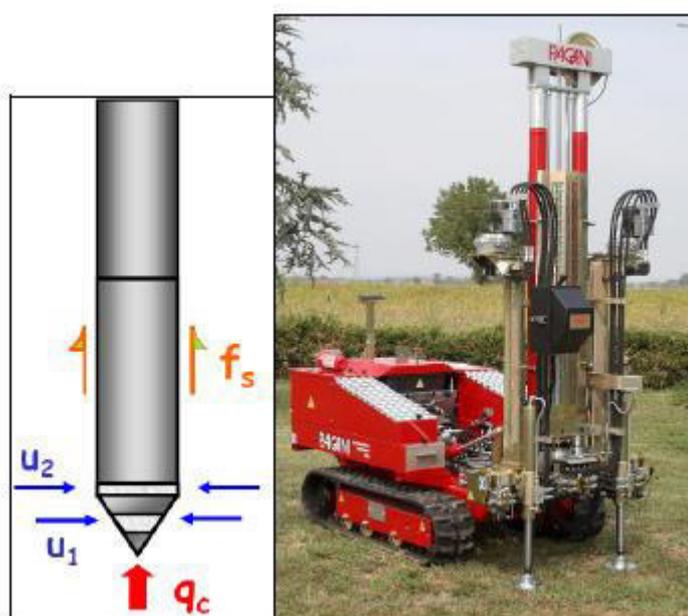


Figura 1. Strumentazione per prova CPTU

Tab. 3.2 – Caratteristiche penetrometro		
Pesi e dimensioni		
H (mm)		1520
L (mm)		2450
P (mm)		1120
Peso (kg)		1140
Dati tecnici		
Motore	Tipo	Diesel 2 cil.
	Potenza	18 (13.5) - 3600
	Raffreddamento	Acqua
Traslazione	Cingolato a trasmissione	Cingolato Gommato
	Velocità di traslazione (km/h)	0 ÷ 2
	Pendenza Max %	25
Pompa Idraulica	Numero di Pompe	2
	Max. pressione operativa (bar)	315
Stabilizzatori	Numero	3
	Tipo	Idraulico
CPT		
Max pressione operativa (bar)		240
Forza di infissione (kN)		200
Forza di estrazione (kN)		205
Velocità di infissione senza carico (cm/sec)		0 ÷ 10
Velocità di estrazione senza carico (cm/sec)		0 ÷ 7.5
Corsa (mm)		1250
ANCORAGGIO		
Motori idraulici con riduttore		4
Coppia [kgm]		160
Sistema di ancoraggio		Aste elicoidali composte
Aste elicoidali Ø x L (mm)		100 x 750

Tabella 1. Caratteristiche penetrometro

INDAGINE GEOFISICA HVSR CON TROMOGRAFO (*TROMINO*)

Per la realizzazione del rilievo H.V.S.R. è stato impiegato uno strumento marca Micromed, modello *Tromino Engy* 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). Una volta effettuato tale confronto è possibile effettuare una stima indicativa del valore del parametro V_{s30} .

Sul piano esecutivo, l'indagine tromografica 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).



Tabella 1. Esempio di tromografo utilizzato per l'indagine geofisica HVSR

INDAGINE GEOFISICA MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*)/Re.Mi (*Refraction Microtremor*).

Per determinare la velocità di propagazione delle onde di taglio (S) nel sottosuolo del sito in oggetto, è stata compiuta un'indagine geofisica in array, con metodologia MASW/Re.Mi.

Le due tecniche si differenziano tra loro per le modalità di energizzazione.

In particolare la MASW prevede la generazione di onde sismiche tramite un idonea attrezzatura (es. mazza strumentata) posta lungo la linea di stendimento dei geofoni. La prova permette di ricostruire l'assetto sismo-stratigrafico del sottosuolo partendo dall'analisi delle onde registrate dai geofoni.

Per quanto riguarda invece la metodologia Re.Mi, questa permette di misurare le onde superficiali generate dal rumore ambientale. Questo metodo permette di determinare il profilo di velocità delle onde di taglio fino ad un massimo di 100 m di profondità dal piano campagna.

L'impiego congiunto di entrambe le tecniche consente di ampliare l'intervallo di frequenze entro cui la curva di dispersione "combinata" può essere determinata, consentendo di determinare il profilo della velocità delle onde di taglio fino a profondità superiori a quanto raggiungibile con una singola tecnica.

I dati rilevati (elaborati per mezzo del software GRILLA) vengono poi impiegati per l'analisi delle onde superficiali registrate e nella determinazione dello spettro di potenza, dal quale è stata ricavata la curva di dispersione delle onde "R". Si è quindi proceduto alla ricostruzione di un **profilo 1D di velocità delle onde "S"** compatibile con la curva di dispersione rilevata in campo.

Va sottolineato che le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (cfr. § 3.2.2, D.M. 17/01/2018) riportano che *"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"*.

Ulteriori dettagli riguardo i risultati ottenuti, sono contenute nella specifica relazione tecnica allegata al presente documento.

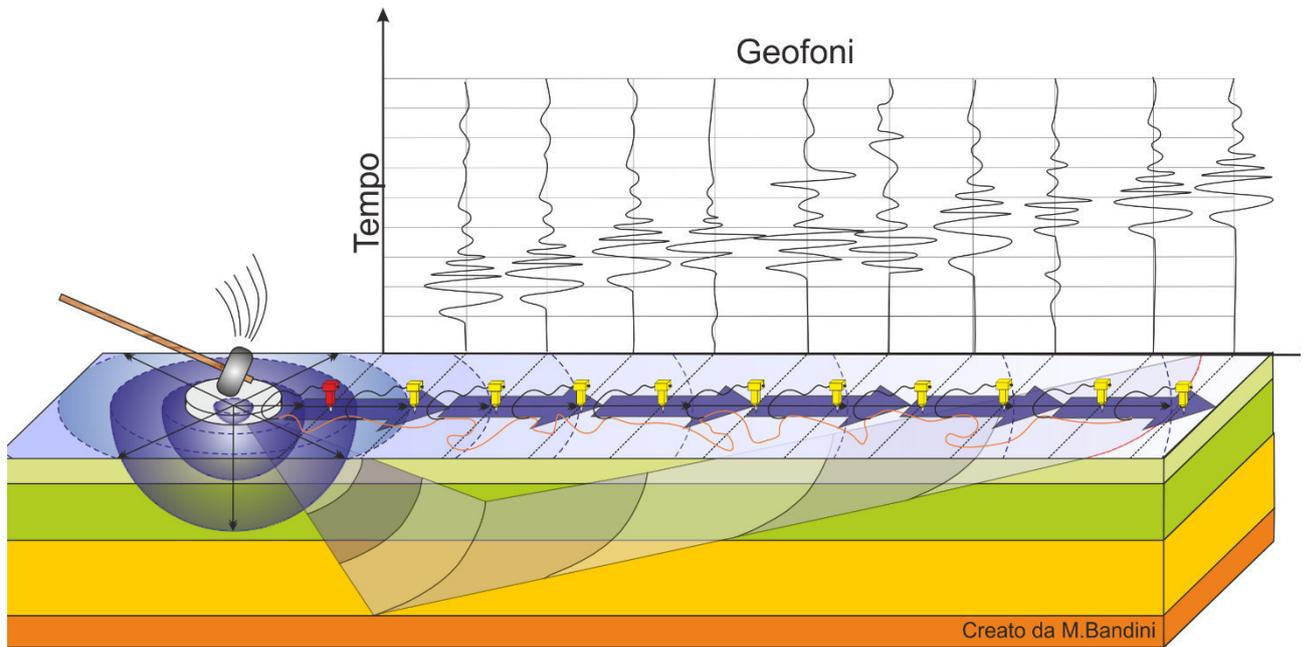


Figura 1. Raffigurazione dell'esecuzione di una indagine MASW/Re.Mi (da "geostru.eu").