

INTERVENTO

**FONDO COMPLEMENTARE AL PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA  
PROGRAMMA "SICURO, VERDE E SOCIALE: RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA"**

**PROGETTO DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA PER ADEGUAMENTO SISMICO E  
MIGLIORAMENTO ENERGETICO DELL'EDIFICIO POSTO IN VIA GALILEI 1  
COMUNE DI IMOLA**

LOTTO **3050/PN**

**PROGETTO ESECUTIVO**

TAV. RGEOL		OGGETTO GENERALI: Relazione Geologica	DATA  Settembre 2022				
SCALA -			N. DISEGNO				
VERSIONE	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO		APPROVATO
00	PRIMA EMISSIONE		Giugno 2022		N. LEONE		N. LEONE
01	REVISIONE 1		Settembre 2022		N. LEONE		N. LEONE
02							
03							

<p><b>Il Progettista Architettonico</b></p> <p>Ing. Nicola Leone SIDEL Ingegneria Srl Via Isonzo, 13 40055 Villanova di Castenaso (BO)</p>	<p><b>Il Progettista Strutturale</b></p> <p>Ing. Nicola Leone SIDEL Ingegneria Srl Via Isonzo, 13 40055 Villanova di Castenaso (BO)</p>	<p><b>Il Progettista Impianti Elettrici</b></p> <p>Ing. Nicola Leone SIDEL Ingegneria Srl Via Isonzo, 13 40055 Villanova di Castenaso (BO)</p>	<p><b>Il Progettista Impianti Meccanici</b></p> <p>Ing. Nicola Leone SIDEL Ingegneria Srl Via Isonzo, 13 40055 Villanova di Castenaso (BO)</p>
<p><b>Il Coordinatore della Sicurezza in Fase Progettuale</b></p> <p>Ing. Nicola Leone SIDEL Ingegneria Srl Via Isonzo, 13 40055 Villanova di Castenaso (BO)</p>	<p><b>Il Coordinatore per la progettazione</b></p> <p>Ing. Nicola Leone SIDEL Ingegneria Srl Via Isonzo, 13 40055 Villanova di Castenaso (BO)</p>		
<p><b>Responsabile del Procedimento</b></p> <p>Ing. Antonio Frighi ACER Bologna Piazza della Resistenza, 4 40122 Bologna</p>	<p><b>Il Dirigente Responsabile del Servizio Tecnico</b></p> <p>Ing. Antonio Frighi ACER Bologna Piazza della Resistenza, 4 40122 Bologna</p>	<p><b>Il Direttore Generale</b></p> <p>Avv. Francesco Nitti ACER Bologna Piazza della Resistenza, 4 40122 Bologna</p>	<p><b>Il Presidente</b></p> <p>Marco Bertuzzi ACER Bologna Piazza della Resistenza, 4 40122 Bologna</p>

**LOCALITA':** IMOLA

**OGGETTO:** FONDO COMPLEMENTARE AL PIANO NAZIONALE DI RIPRESA  
E RESILIENZA  
PROGRAMMA "SICURO, VERDE E SOCIALE:  
RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA"

PROGETTO DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA PER  
ADEGUAMENTO SISMICO E MIGLIORAMENTO ENERGETICO  
DELL'EDIFICIO POSTO IN VIA GALILEI 1

# INDAGINE GEOLOGICA - SISMICA



# COMUNE DI IMOLA (BO)

INDAGINE GEOLOGICA-SISMICA ESEGUITA SUI  
TERRENI DI SEDIME DEI CONDOMINI GESTITI DA  
ACER, SITUATI IN VIALE G. GALILEI, 1, 3, 5, 7

Committente: SIDEL Spa

Rif. Int. Comm. n° P141.22 – Luglio 2022

## RELAZIONE GEOLOGICA

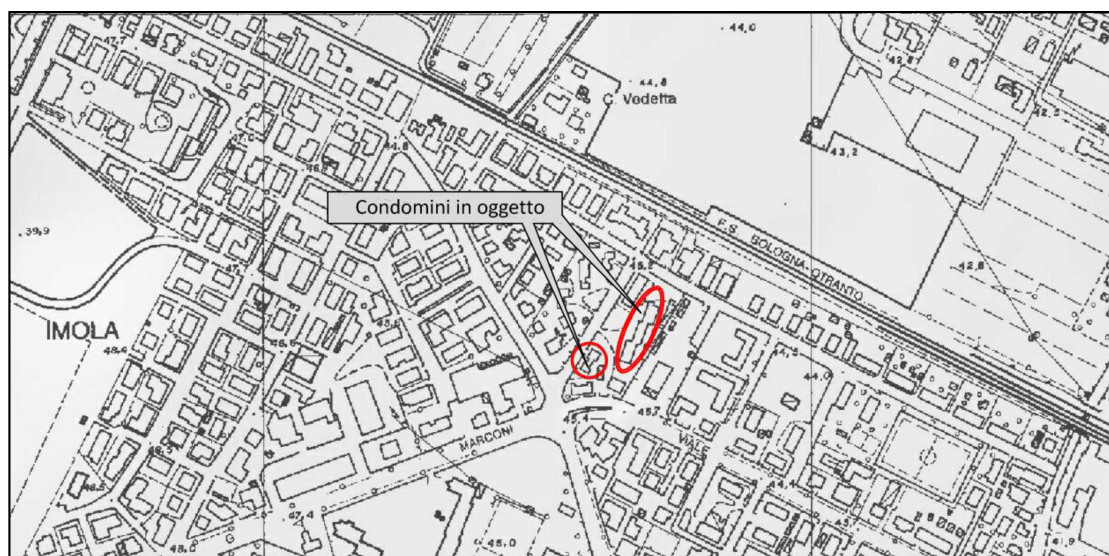
*Dott. Geol. Tiziano Righini*

Iscritto all'Ordine Geologi Emilia-Romagna, n° 1038



*Dott. Geol. Carlo Berti Ceroni*

Iscritto all'Ordine Geologi Emilia-Romagna, n° 1241



## **INDICE**

<b>1 Premessa.....</b>	<b>2</b>
<b>2 Normativa di riferimento.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Inquadramento geologico generale .....</b>	<b>3</b>
3.1 Caratteri stratigrafici, litologici e morfologici .....	3
3.2 Caratteri idrologici superficiali e sotterranei .....	4
3.3 Caratteristiche tettonico-strutturali e sismogenetiche del territorio.....	9
3.4 Storia sismica del territorio .....	10
3.5 Sintesi di quanto riportato dagli strumenti di pianificazione.....	13
<b>4 Indagini geognostiche.....</b>	<b>16</b>
4.1 Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT) .....	17
4.2 Prova penetrometrica dinamica super-pesante (DPSH) .....	19
<b>5 Assetto litostratigrafico e parametrizzazione fisico-meccanica dei terreni .....</b>	<b>21</b>
<b>6 Caratterizzazione sismica del sito .....</b>	<b>25</b>
6.1 Categoria di sottosuolo e condizioni topografiche .....	25
6.1.1 Amplificazione stratigrafica e topografica.....	27
6.2 Considerazioni in merito alle frequenze del sottosuolo .....	29
6.3 Il fenomeno della liquefazione.....	30
6.3.1 Criteri di previsione e metodi per la valutazione del potenziale di liquefazione .....	30
6.3.2 Valutazione del rischio di liquefazione dei terreni.....	32



---

## **RELAZIONE GEOLOGICA**

### **1 Premessa**

Su incarico della Sidel Spa è stata redatta la presente relazione riguardante le risultanze di un'indagine condotta sui terreni su cui insiste un complesso condominiali (gestiti da ACER), situati in via Galilei, 1, 3, 5, 7, in comune di Imola (BO).

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 della cartografia tematica disponibile in letteratura ed un sopralluogo per acquisire direttamente la natura litologica dei terreni, le caratteristiche morfologiche, idrologiche superficiali e sotterranee dell'area.

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

- n. 1 prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT);
- n. 1 prova penetrometrica dinamica super-pesante (DPSH).

Inoltre, si è fatto riferimento a:

- alle indagini geofisiche (n° n. 2 rilevazioni di microtremori condotte con metodologia HVSR a stazione singola e n° 1 indagine MASW) realizzate, nel mese di novembre 2021, dal Dott. Geol. Mirco Marinelli e rese disponibili dalla Committente.
- N° 1 sondaggio geognostico a c.c. continuo commissionato dal sottoscritto in occasione di una precedente indagine svoltasi in via Marconi, nel mese di giugno 2022.

Tale indagine ha 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 della gru 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, CSLLPP;
- ✓ 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

I Condomini in oggetto sono ubicati in via Galilei, 1, 3, 5, 7, in prossimità dell’intersezione tra tale asse viario e la via Pampera, in Comune di Imola (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 pari a circa m. 45,2-45,5 s.l.m.

Poiché il sito in esame è ubicato all’interno del centro abitato, gran parte delle peculiarità morfologiche dell’intorno risultano obliterate dal processo di urbanizzazione: il trend topografico generale è, in ogni caso, caratterizzato dalla presenza di superfici debolmente immergenti in direzione N-NE, verso la Pianura Padana.

L’esame dell’estratto della Carta Geologica riportato in allegato al presente documento (in scala 1:5.000) evidenzia come l’area in esame insista su un complesso di depositi sedimentari continentali di

origine alluvionale, attribuibili alla conoide del Fiume Santerno. Questo corpo geologico, dalla classica forma a ventaglio, trae la propria origine dalla deposizione dei sedimenti trasportati dall'omonimo corso d'acqua in corrispondenza del suo sbocco in pianura, dove la diminuzione del gradiente morfologico e l'espansione della corrente fluviale, non più incanalata nella vallata, determinavano un brusco calo della capacità di trasporto della corrente stessa e il conseguente rilascio dei materiali trasportati con gradazione decrescente verso valle. L'elevata erodibilità di alcuni dei litotipi affioranti in corrispondenza del bacino del Fiume Santerno hanno provocato l'instaurarsi di una velocità di deposizione molto elevata, e alla messa in posto di spessori di sedimenti molto elevati: l'alternanza di periodi di piena (nell'ambito dei quali venivano depositati materiali "grossolani") e di magra/"morbida" (nell'ambito dei quali venivano deposti materiali "fini") è responsabile per la configurazione stratigrafica della conoide, caratterizzata dall'alternanza di livelli sabbiosi/ghiaiosi e limosi/argillosi.

Il **Foglio 239 "Faenza"** della Carta Geologica d'Italia riporta la presenza, nel sottosuolo dell'area in esame, di depositi denominati **"sabbie e limi di canale, argine e rotta fluviale"**, costituiti da *"sabbie, da finissime a grossolane, più o meno limose...alternate a limi, limi sabbiosi e subordinatamente limi argillosi...Localmente presenti ghiaie"*. Dal punto di vista stratigrafico, tali depositi sono attribuiti al **Subsistema di Ravenna (AES8)**, un'unità stratigrafica a limiti inconformi risalente al Pleistocene superiore – Olocene.

### 3.2 Caratteri idrologici superficiali e sotterranei

Come accennato in precedenza, la deposizione dei sedimenti alluvionali presenti nel sottosuolo del sito in oggetto è attribuibili al Fiume Santerno: attualmente, a seguito di una progressiva migrazione in direzione E del suo alveo causata da fattori topografici e tettonici, questo corso d'acqua scorre in direzione SW-NE circa 2,0 km a SE del sito, descrivendo un'ampia ansa in prossimità all'abitato di Imola.

Poiché il sito in oggetto è ubicato all'interno del centro abitato, la regimazione delle acque meteoriche è affidata alla rete fognaria urbana.

Nell'ambito della campagna di indagini condotta presso il sito in oggetto, non è stata rinvenuta una falda idrica sotterranea, per lo meno fino alle massime profondità raggiunte: tale mancato rinvenimento risulta compatibile con quanto noto da studi condotti in precedenza, in base ai quali il livello piezometrico dovrebbe attestarsi ad una profondità di soggiacenza di circa m. 12,0-15,0 dal piano campagna locale.

Tuttavia, tale livello deve essere considerato suscettibile di ampie oscillazioni correlate all'andamento delle precipitazioni, con particolare riferimento ad eventuali innalzamenti che potrebbero verificarsi in periodi caratterizzati da apporti meteorici intensi e/o abbondanti: inoltre, non si può escludere che, nelle medesime circostanze, 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.

Per quanto riguarda gli strumenti di pianificazione territoriale, la cartografia della pericolosità del Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) classifica l'area in esame come **P2-M** (media probabilità; tempo di ritorno ( $Tr$ ) = 100 anni <  $Tr$  < 200 anni). Inoltre, la cartografia degli elementi esposti evidenzia la presenza, nell'intorno del sito in oggetto, di zone urbanizzate, infrastrutture strategiche e strutture strategiche e sede di attività collettive (scuole), nonché di reti per la distribuzione dei servizi. Inoltre, l'area in esame risulta compresa in un'area a **potenziale rischio significativo (APSFR)**.

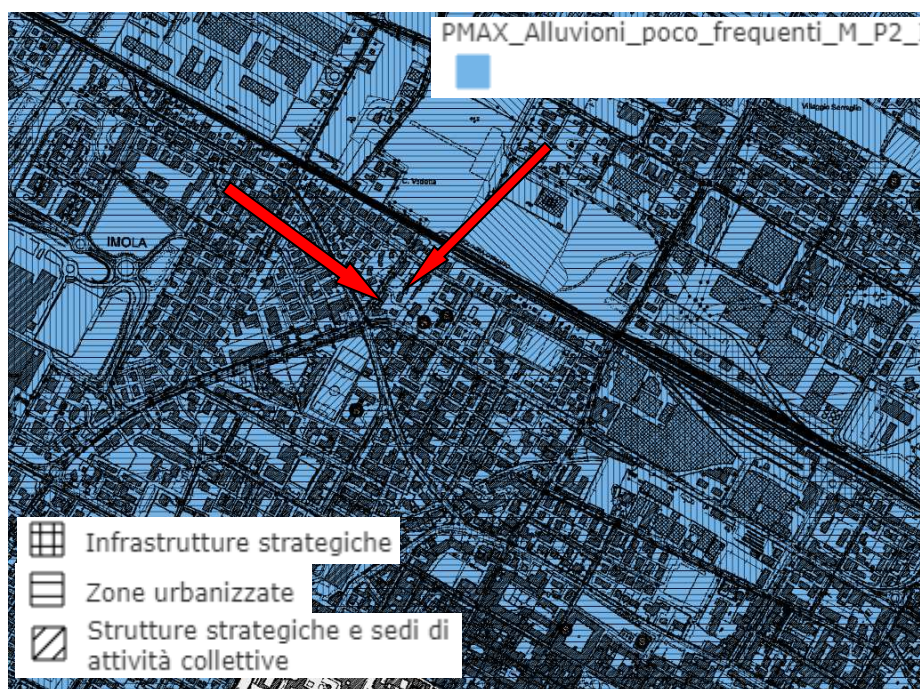


Fig.1: Estratto della cartografia della pericolosità del PGRA. Le frecce rosse indicano la posizione dei condomini in oggetto

Su tali basi, la cartografia del rischio del succitato PGRA attribuisce all'area in esame una classe di rischio **R2-Rischio Medio**, mentre alle sedi stradali degli assi viari antistanti il sito in oggetto è attribuita una classe di rischio **R1-Rischio Moderato**.



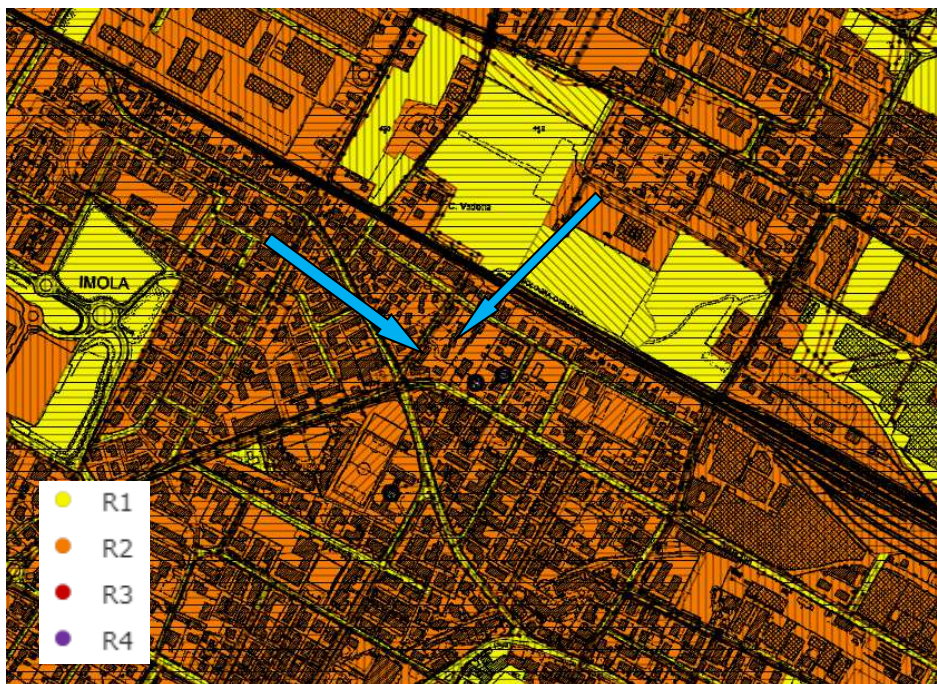


Fig.2: Estratto della cartografia del rischio del PGRA. Le frecce azzurre indicano la posizione dei condomini in oggetto

La Tav.3.3-IV della **“Carta di area vasta del rischio idraulico, rischio da frana e stabilità dei versanti”** del Piano Territoriale Metropolitano (PTM) della Città Metropolitana di Bologna recepisce le indicazioni del PGRA, classificando l’area in esame come **“Scenario P2 derivato dal reticolo secondario di pianura (RSP)”**. Inoltre, la medesima cartografia include l’area in esame nell’**“ambito di controllo degli apporti d’acqua in pianura”**.

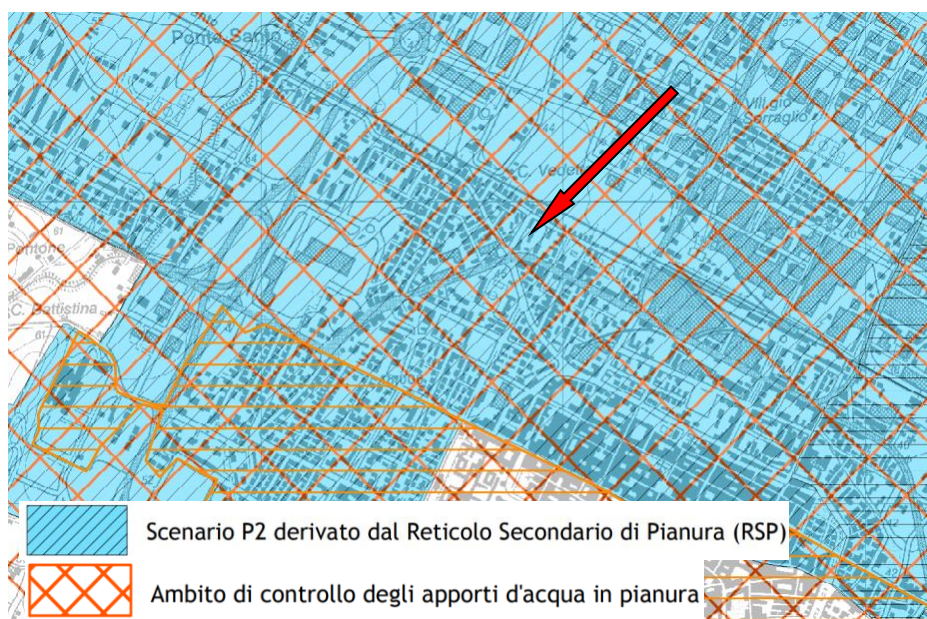


Fig.3: Estratto della Tav.3.3-IV del PGRA. La freccia rossa indica la posizione del sito in oggetto



La **Tav.2B-Sud** del PTCP – Allegato A al PTM della Città Metropolitana di Bologna 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"*.

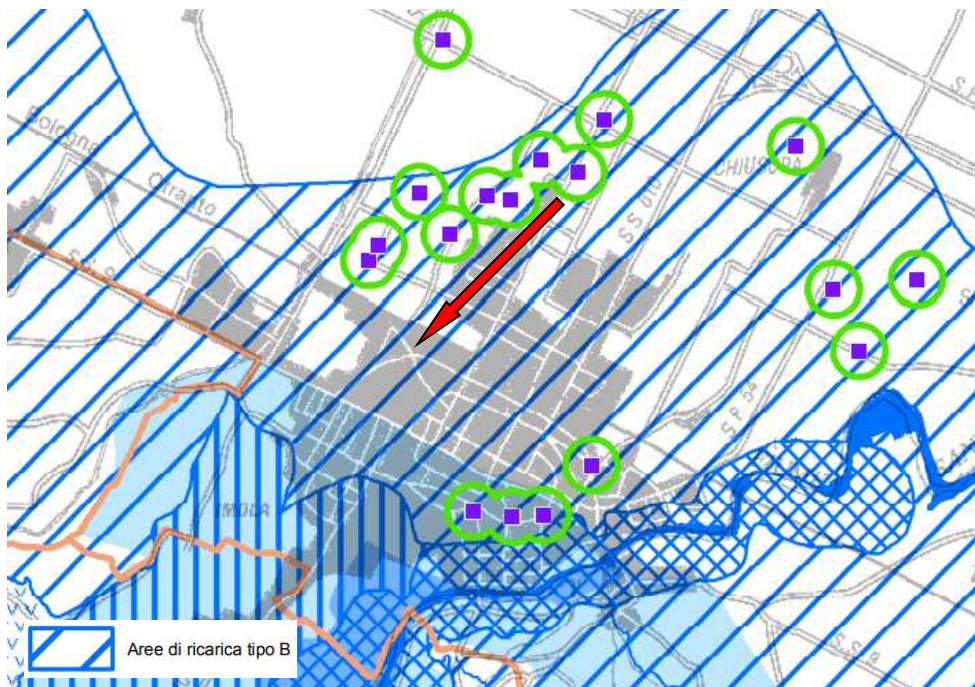
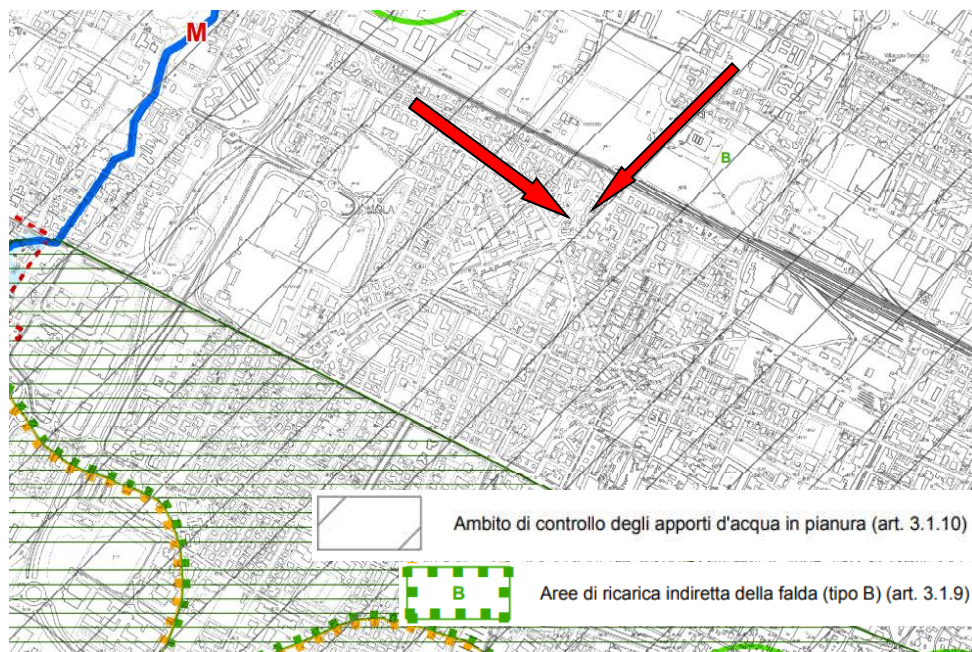


Fig.4: Estratto della Tav.2B-Sud del PTCP-Allegato A al PTM. La freccia rossa indica la posizione del sito in oggetto

La **Tav.3.2** della carta *"Tutele relative a vulnerabilità e sicurezza del territorio"* del Piano Strutturale Comunale (PSC) del Comune di Imola recepisce le indicazioni degli strumenti di pianificazione territoriale sovraordinati, includendo l'area in esame nell'*"ambito di controllo degli apporti d'acqua in pianura"* e tra le *"aree di ricarica indiretta della falda (tipo B)"*.



*Fig.5: Estratto della Tav.3.2 del PSC. Le frecce rosse indicano la posizione dei condomini 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 ed 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, l'individuazione della Zona sismo genetica 914 *"...è motivata dalle peculiari caratteristiche di rilascio della sismicità (nella fattispecie la frequenza degli eventi)"* (Meletti C. & Valensise G., 2004).

In base al **database delle sorgenti sismogenetiche italiane DISS 3.3.0**, il sito in oggetto risulta collocato a N della **Sorgente Sismogenica Composita (CSS) ITCS001 "Castel San Pietro Terme - Meldola"**: la magnitudo massima associata a tale sorgente è stata stimata pari a **Mw=6,5**.

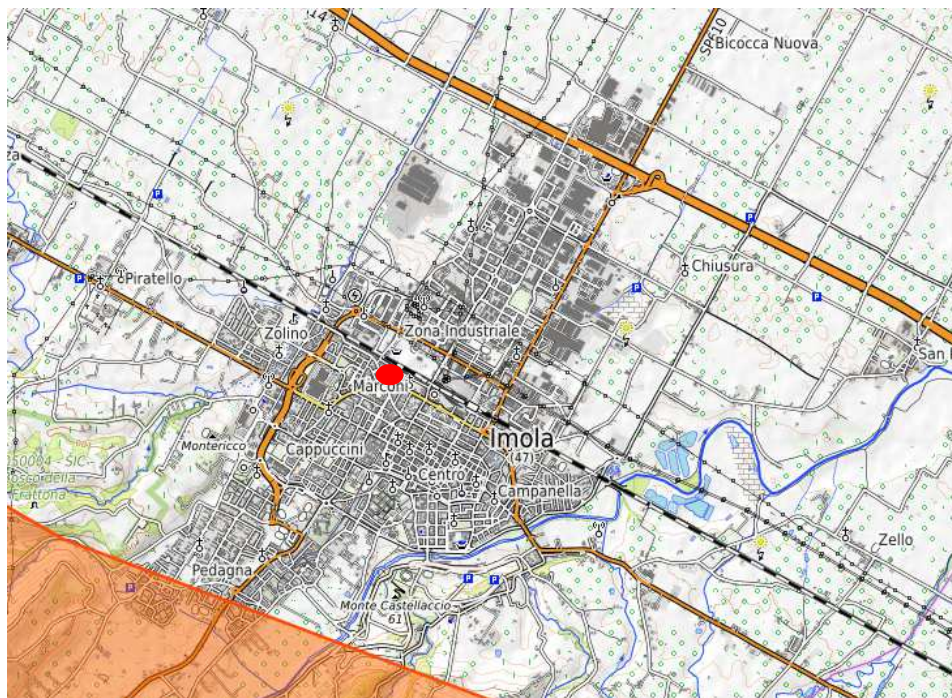

































Fig.6: Distribuzione delle "zone" sismogeniche, riportata dal DISS 3.2.1: il punto rosso evidenzia l'ubicazione dell'area in esame.

### 3.4 Storia sismica del territorio

Il territorio in esame è stato più volte interessato da fenomeni sismici; la ricostruzione della 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>.

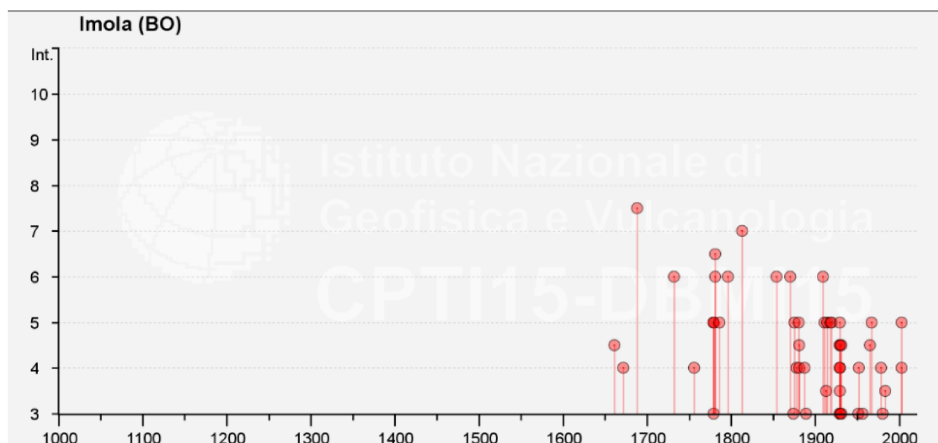
La tabella seguente riporta l'elenco degli eventi sismici storici che hanno interessato l'area in esame, indicandone l'intensità al sito, l'anno in cui tale evento si è verificato e la denominazione dell'evento stesso.

Int.	Anno Me Gi Ho Mi Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
4-5	 1661 03 22 12 50	Appennino forlivese	79	9	6.05
4	 1672 04 14 15 45	Riminese	92	8	5.59
7-8	 1688 04 11 12 20	Romagna	39	8-9	5.84
F	 1725 10 29 17 40	Appennino tosco-emiliano	28	8	5.67
6	 1732 08 09	Romagna	3	6	4.63
4	 1756 10 06 20	Costa pesarese	7	4-5	3.93
F	 1756 10 22	Golfo di Manfredonia	4	5-6	4.40
3	 1779 06 01 23 55	Bolognese	8		
5	 1779 06 04 07	Bolognese	12	7	5.22
5	 1779 06 10 08 35	Bolognese	10		
F	 1779 07 14 19 30	Bolognese	17		
5	 1779 11 23 18 30	Bolognese	14	5	4.70
6-7	 1781 04 04 21 20	Faentino	96	9-10	6.12
6	 1781 07 17 09 40	Faentino	46	8	5.61
5	 1786 12 25 01	Riminese	90	8	5.66
6	 1796 10 22 04	Emilia orientale	27	7	5.45
7	 1813 09 21 07 45	Romagna	12	7	5.28
F	 1828 10 08 22 30	Romagna	8	5-6	4.57
6	 1854 06 16 13 25	Imola	9	5	4.57
6	 1870 10 30 18 34	Forlivese	41	8	5.61
2-3	 1873 09 17	Appennino tosco-ligure	64	6-7	5.26
3	 1874 10 07	Imolese	60	7	4.96
5	 1875 03 17 23 51	Costa romagnola	144	8	5.74
4	 1878 03 12 21 36	Bolognese	31	6	4.84
F	 1878 06 04 14 40	Bolognese	13	5	4.52
5	 1880 07 23 01 50	Imola	3	5	4.16
4	 1881 01 24 16 14	Bolognese	38	7	5.22
4-5	 1881 02 14 09 00 3	Appennino bolognese	21	6	4.77
4	 1887 09 30 15 55	Faenza	10	5	4.12
3	 1889 03 08 02 57 0	Bolognese	38	5	4.53
F	 1891 08 01 13 32 2	Lugo	15	4-5	4.36

Int.	Anno Me Gi Ho Mi Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1892 12 29 13 47 4	Castel del Rio	36	5-6	4.37
2-3	1897 12 18 07 24 2	Alta Valtiberina	132	7	5.09
2	1898 01 16 13 10	Romagna settentrionale	110	6	4.59
2	1899 06 26 23 17 2	Valle del Bisenzio	138	7	5.02
6	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
5	1911 02 19 07 18 3	Forlivese	181	7	5.26
F	1911 03 20 15 47	Forlivese	25	6	5.09
NF	1911 09 13 22 29 0	Chianti	115	7	5.08
3-4	1913 07 21 22 35	Appennino romagnolo	43	5-6	4.79
NF	1913 11 25 20 55	Appennino parmense	73	4-5	4.65
5	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5.63
NF	1915 01 13 06 52 4	Marsica	1041	11	7.08
2-3	1916 05 17 12 50	Riminese	132	8	5.82
2-3	1917 12 02 17 39	Appennino forlivese	32	6-7	5.09
5	1918 11 10 15 12 2	Appennino forlivese	187	9	5.96
5	1919 06 29 15 06 1	Mugello	565	10	6.38
F	1924 01 02 08 55 1	Senigallia	76	7-8	5.48
5	1929 04 10 05 44	Bolognese	87	6	5.05
3-4	1929 04 11 00 56	Bolognese	10	4	4.72
3	1929 04 12 00 32	Bolognese	7	4	4.82
4	1929 04 19 04 16	Bolognese	82	6-7	5.13
4	1929 04 20 01 10	Bolognese	109	7	5.36
4-5	1929 04 22 08 26	Bolognese	41	6-7	5.10
4	1929 04 22 14 19	Bolognese	12	5-6	4.61
3	1929 04 29 18 36	Bolognese	45	6	5.20
4-5	1929 05 01 21 13	Imolese	3	4	4.57
4-5	1929 05 11 19 23	Bolognese	64	6-7	5.29
3	1929 07 18 21 02	Mugello	56	6-7	4.96
2	1930 10 30 07 13	Senigallia	268	8	5.83
3	1931 04 05 13 34	Faentino	14	6	4.40
4-5	1931 04 11 01 26	Faentino	19	4-5	4.81
2-3	1931 09 05 01 25 5	Mugello	28	6	4.88
2	1931 12 15 03 23	Mugello	35	6	4.62
SF	1934 05 28 21 09	Faentino	10	4	3.94
3	1951 05 15 22 54	Lodigiano	179	6-7	5.17
4	1952 07 04 20 35 1	Appennino forlivese	64	7	4.94
NF	1953 12 14 07 11 0	Appennino forlivese	48	5-6	4.70
3	1956 04 26 03 00 0	Appennino bolognese	89	6	4.74
NF	1957 08 27 11 54	Appennino modenese	58	5	4.73

Int.	Anno Me Gi Ho Mi Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
4-5	1965 12 18 09 22 2	Pianura romagnola	11	5	4.54
5	1967 12 30 04 19	Emilia Romagna orientale	40	6	5.05
4	1978 12 05 15 39 0	Romagna	34	4-5	4.61
3	1980 11 23 18 34 5	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
3-4	1983 11 09 16 29 5	Parmense	850	6-7	5.04
NF	1984 04 29 05 02 5	Umbria settentrionale	709	7	5.62
2-3	1986 12 06 17 07 1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1989 09 13 21 54 0	Prealpi Vicentine	779	6-7	4.85
2-3	1999 01 25 22 45 5	Appennino forlivese	97	5	4.36
NF	2002 11 02 10 57 4	Ferrarese	79	4	4.21
4	2003 01 26 19 57 0	Appennino forlivese	35	6	4.66
5	2003 09 14 21 42 5	Appennino bolognese	133	6	5.24

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 Imola: tale piano classifica l'area stessa in base ai risultati delle indagini geognostiche e geofisiche condotte in corrispondenza di una determinata area, nonché in base ai valori attesi dei coefficienti di amplificazione stratigrafica (FA PGA, FA SI).

La **TAV.3** della *“Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica”* (MOPS) mostra come il complesso condominiale ricada a “cavallo” delle zone: **“2012 – Zona 12: Limi prevalenti di copertura (2-5 m) su banco ghiaioso plurimetrico sovrastante argille e sabbie antiche o riferibili al substrato marino e**  
**“2011 – Zona 11: Depositi ghiaiosi pluridecametrici con copertura superficiale limosa limo-sabbiosa”**.

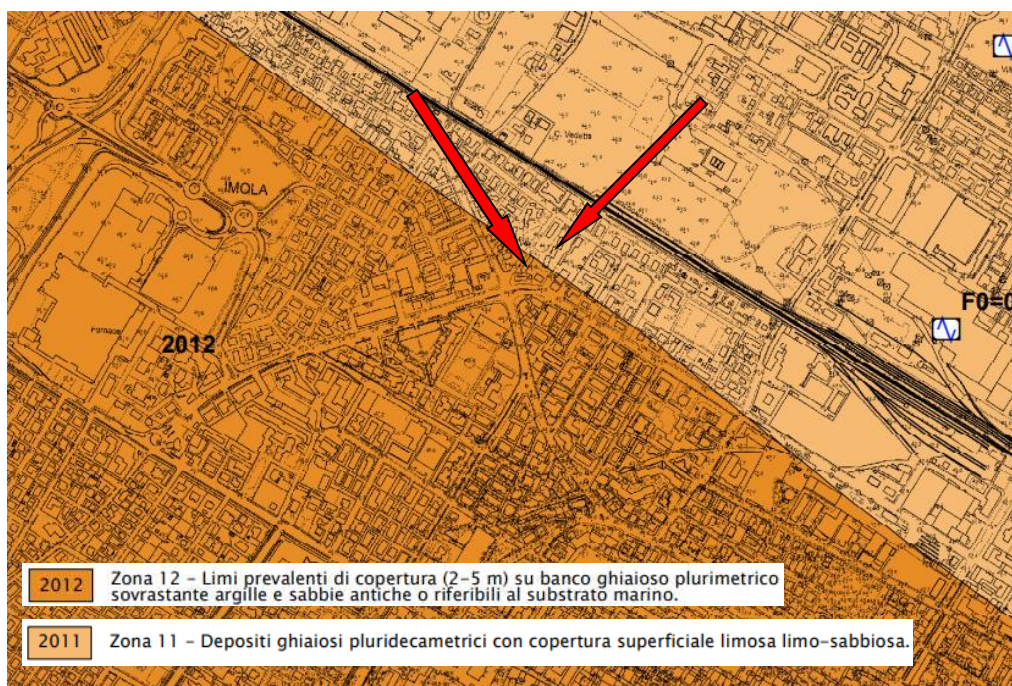


Fig.7: Estratto della Carta delle MOPS. Le frecce rosse evidenziano l'ubicazione dei condomini in oggetto



La **TAV.3** della “**Carta di Microzonazione Sismica FA PGA**” attribuisce all’area in esame un fattore di amplificazione della PGA pari a **FA PGA = 1,5-1,6**.

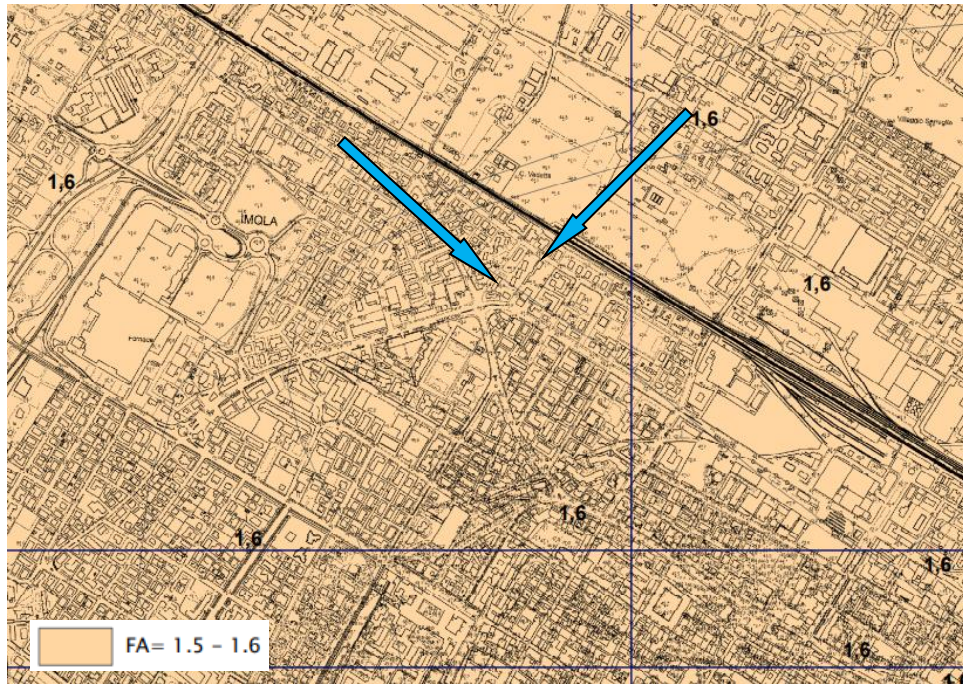


Fig.8: Estratto della Carta FA PGA. Le frecce azzurre indicano la posizione dei condomini in oggetto

La **TAV.3** della “**Carta di Microzonazione Sismica FH 0.1-0.5s**” attribuisce all’area in esame un fattore di amplificazione pari a **FA = 1,7-1,8**.

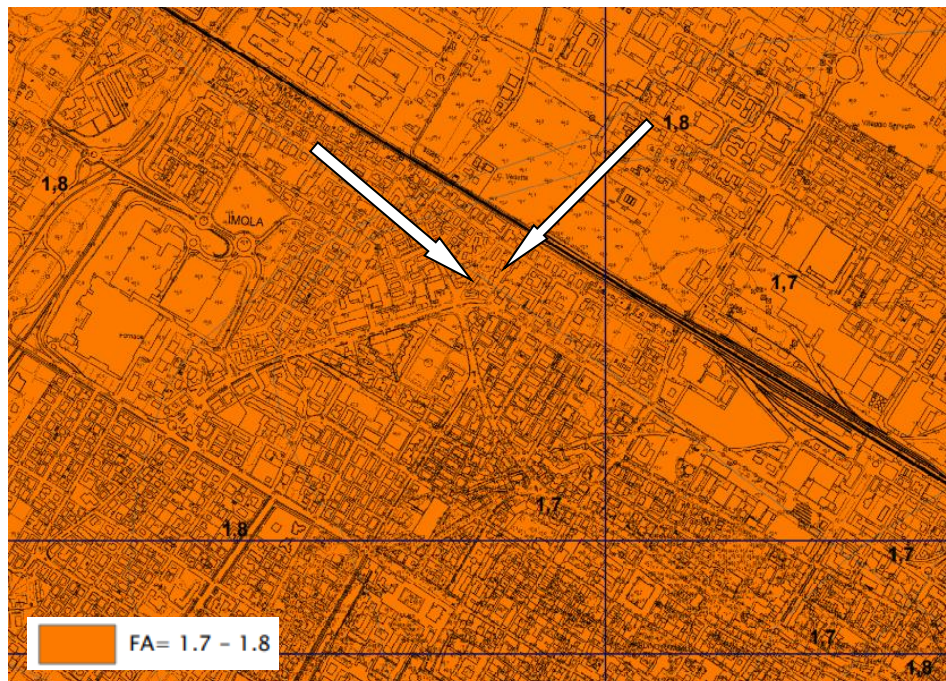


Fig.9: Estratto della Carta FH 0.1-0.5s. Le frecce bianche indicano l’ubicazione dei condomini in oggetto



La **TAV.3** della “**Carta di Microzonazione Sismica FH 0.5-1.0s**” attribuisce all’area in esame un fattore di amplificazione pari a **FA = 1,9-2,0**.



Fig.10: Estratto della Carta FH 0.5-1.0s. Le frecce bianche indicano la posizione dei condomini in oggetto



## 4 Indagini geognostiche

Il modello geologico sviluppato sulla base della documentazione bibliografica consultata e dei sopralluoghi eseguiti, è stato sottoposto a verifica mediante la realizzazione di una campagna di indagini articolatasi nell'esecuzione di:

- n. 1 prova penetrometrica dinamica super-pesante (DPSH);
- n. 1 prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT).

Inoltre si è fatto riferimento a:

- alle indagini geofisiche (n° n. 2 rilevazioni di microtremori condotte con metodologia HVSR a stazione singola e n° 1 indagine MASW) realizzate, nel mese di novembre 2021, dal Dott. Geol. Mirco Marinelli e rese disponibili dalla Committente.
- N° 1 sondaggio geognostico a c.c. continuo commissionato dal sottoscritto in occasione di un'indagine svolta in via Marconi nel mese di giugno 2022.

Per i dettagli di tali indagini (geofisiche/carotaggio) si rimanda direttamente alla relazione tecnica (a firma dott. Marinelli) riportata in allegato al presente documento e alla documentazione di cantiere relativa al carotaggio.

Di seguito, si riporta uno stralcio di foto satellitare su cui è stata evidenziata l'ubicazione delle verticali di indagine.



Fig.11: Stralcio di foto satellitare su cui è stata evidenziata l'ubicazione delle verticali di indagine

#### 4.1 Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)

Per l'esecuzione di tale prova 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:

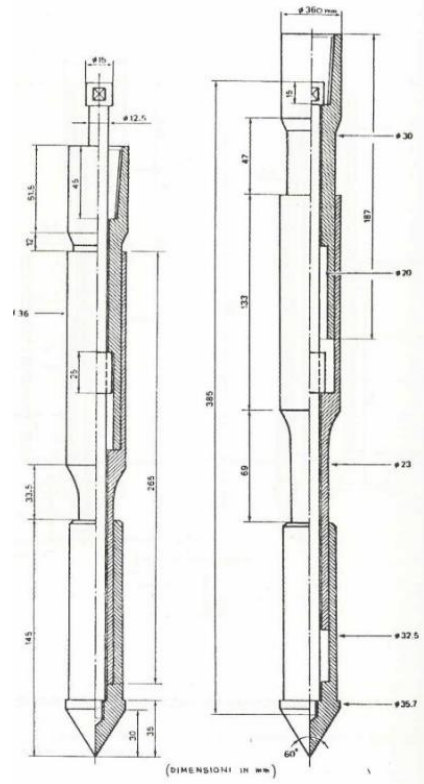
- $L_p$ : spinta necessaria per l'avanzamento della sola punta;
- $L_p+L_l$ : spinta per l'avanzamento della punta e del manicotto;

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	<b>cu</b>	Marsland (1974) e Marsland & Powell (1979)
Modulo edometrico	<b>Mo<sub>ed</sub></b>	Buisman & Sanglerat
Peso di volume terreni coesivi	<b><math>\gamma</math></b>	Meyerhof ed altri
Angolo d'attrito	<b><math>\phi</math></b>	De Beer
Densità relativa	<b>Dr</b>	Lancellotta
Modulo di Young	<b>Ey</b>	Robertson e Campanella (1983)
Peso di volume terreni granulari	<b><math>\gamma</math></b>	Meyerhof

La prova penetrometrica è stata spinta fino ad una profondità di circa m. 6,2 al di sotto della quota dell'area cortiliva circostante, e si è arrestata a seguito del raggiungimento delle condizioni di rifiuto meccanico. Le verifiche condotte all'interno del foro di prova al termine della sua esecuzione non hanno rilevato la presenza di una falda idrica sotterranea, fino alle massime profondità raggiunte.



Foto 1: Prova CPT-1 in esecuzione

## 4.2 Prova penetrometrica dinamica super-pesante (DPSH)

Questa metodologia di indagine prevede l'impiego di penetrometro dinamico super pesante da 63,5 daN di peso di maglio, cadente da un'altezza di cm. 75, con aste di kg 6,5.

I dati, rappresentati come numero di colpi necessari per determinare un avanzamento delle aste nel terreno di cm. 20, vengono riportati in allegato. Le quote dei grafici sono riferite al piano di campagna attuale.

Dalla resistenza alla punta riscontrata nelle prove, applicando la nota "formula degli Olandesi":

$$Q_d = (M^2 \cdot H) / [e \cdot (P+M) \cdot A]$$

dove: M = massa del maglio;

H = altezza di caduta del maglio;

P = peso delle aste;

e = penetr. della punta per un colpo di maglio cadente da altezza H;

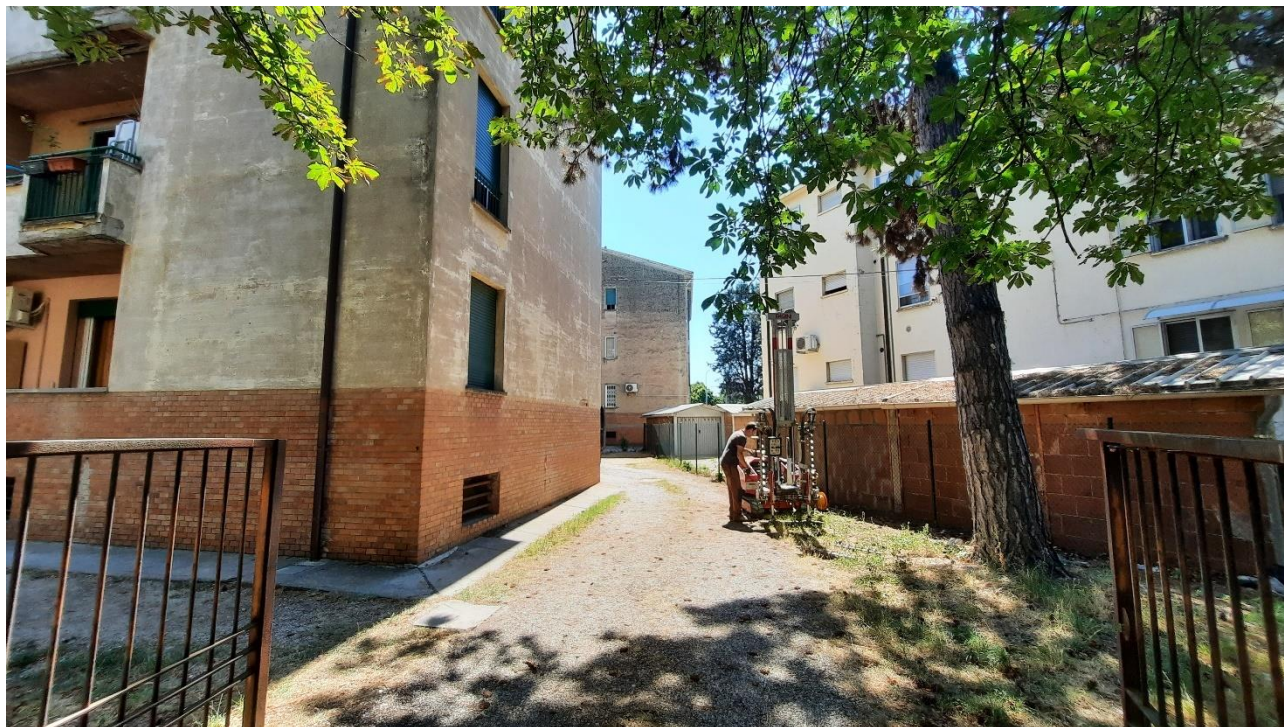
A = sezione della punta (cmq. 20,43).

Si ottiene la resistenza dinamica in MPa, i cui valori sono riportati nelle tabelle allegate unitamente ai principali parametri geotecnici stimati.

La prova è stata spinta fino ad una profondità massima di circa m. 5,4 (DPSH-1) dalla quota del piano campagna locale: in tutti i casi, le prove sono state arrestate al raggiungimento delle condizioni di rifiuto meccanico all'ulteriore avanzamento.

Le verifiche condotte all'interno del foro prodotto, mediante l'impiego di una sonda freaticometrica a filo, hanno dato esito negativo, non avendo rilevato la presenza di acqua nel sottosuolo del sito in oggetto.





*Foto 2: Prova DPSH-1 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 dell'area cortiliva circostante i condomini.

Innanzitutto, è stata individuata la presenza di terreni riportati, rimaneggiati e/o alterati (**Unità litologica TA/R**). Lo spessore di tale Unità Litologica è risultato essere variabile fra circa m. 0,6-1,4.

A partire dalla base della suddetta Unità Litologica, fino a profondità variabili fra circa m. 4,8-5,8 è stata rinvenuta la presenza di argille limose e limi argillosi con grado di consistenza variabile, pertanto tale Unità Litologica è stata suddivisa in 3 Sotto-Unità Litologiche:

- **Sotto-Unità Litologica A1** (riscontrata unicamente in corrispondenza della prova penetrometrica CPT-1) è caratterizzata da valori di consistenza medio-bassi/bassi e si protrae fino ad una profondità di circa m.2,0;
- **Sotto-Unità Litologica A2** (riscontrata in corrispondenza di entrambe le prove penetrometriche) è caratterizzata da valori di consistenza medio-elevati/elevati, si protrae fino a profondità variabili fra circa m. 2,6-5,8. I terreni ascritti a tale Sotto-Unità Litologica risultano essere sovraconsolidati causa disseccamento.
- **Sotto-Unità Litologica A3** (riscontrata in corrispondenza della prova penetrometrica DPSH-1) è caratterizzata da valori di consistenza medi/medio-elevati, si protrae fino a profondità di circa m. 4,8.

I terreni ascritti all'Unità Litologica A presentano caratteri tipici di litotipi suscettibili a fenomeni di ritiro-rigonfiamento volumetrico determinati dalle variazioni di umidità del sottosuolo. Tale suscettibilità è influenzata da notevoli fattori locali (esposizione all'insolazione, granulometria e permeabilità dei terreni, effetti di suzione prodotti dagli apparati radicali delle piante arboree) essa può manifestarsi con differente intensità anche nell'ambito di un medesimo sito, dando luogo a comportamenti differenziali dei terreni. Il progettista dovrà tenere in conto tali aspetti in quanto terreni di tale tipologia possono essere soggetti a fenomeni di ritiro-rigonfiamento che vengono a determinarsi qualora si verifichino variazioni di umidità, solitamente legate alle variazioni meteorologiche stagionali.

La successione stratigrafica prosegue, fino alle massime profondità raggiunte con la presenza di ghiaia, generalmente bene addensata, in matrice sabbiosa fine e medio-fine (**Unità litologica B**). Non si esclude che all'interno dello spessore di tale Unità Litologica possa riscontrarsi la presenza di intervalli costituiti da preponderante sabbia e, subordinatamente da ghiaia. Sulla base dei risultati del sondaggio geognostico a c.c., eseguito in viale Marconi nel mese di giugno 2022, si può affermare che tale banco di ghiaia si protragga fino a profondità di circa m. 15,0.

Per quanto riguarda la circolazione idrica sotterranea, sulla base di conoscenze derivanti da pregressi studi effettuati in zone limitrofe a quelle in esame, la falda idrica sotterranea dovrebbe attestarsi a profondità variabili fra m. 12,0-15,0. Tale livello piezometrico può subire fluttuazioni in ragione dell'andamento delle precipitazioni meteoriche.

Nella tabella riassuntiva successiva si riporta il quadro lito stratigrafico 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**.



ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO DEL SOTTOSUOLO E PARAMETRIZZAZIONE MECCANICA DEI TERRENI DERIVANTI DA PROVA PENETROMETRICA STATICA (CPT-1) (Valori nominali)										
UNITÀ LITOLOGICA	PROFONDITÀ (m. da p. c. a.)		DESCRIZIONE	cu	Mo <sub>ed</sub>	Dr	φ	Ey	γ	γ <sub>sat</sub>
	Da	a		(kPa)	(MPa)	(%)	(°)	(MPa)	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )
<b>TA/R</b>	0,0	1,4	Terreni riportati, rimaneggiati e/o alterati	-	-	-	-	-	18,2-20,4 [19,0]	19,0-21,6 [20,3]
<b>A</b>	<b>A1</b>	1,4	Argille limose e limi argillosi con grado di consistenza medio-basso/basso	36-52 [43]	3,2-4,7 [3,8]	-	-	-	18,3-19,0 [18,6]	19,1-19,7 [19,4]
	<b>A2</b>	2,0	Argille limose e limi argillosi con grado di consistenza medio-elevato/elevato (sovracconsolidati causa essiccamento)	79-154 [118]	6,9-12,9 [10,2]	-	-	-	19,6-20,7 [20,3]	20,4-21,5 [21,0]
<b>B</b>	5,8	6,2	Ghiaia addensata in matrice sabbiosa fine con possibili intervalli a preponderante componente sabbiosa	-	-	80-100	31-33	38-59	19,5-20,0*	21,0-22,0*

\*valori stimati

**ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO DEL SOTTOSUOLO E PARAMETRIZZAZIONE MECCANICA DEI TERRENI DERIVANTI DA PROVA PENETROMETRICA STATICA**

**(DPSH-1)**

UNITÀ LITOLOGICA	PROFONDITÀ (m. da p. c. a.)		DESCRIZIONE	cu	Mo <sub>ed</sub>	Dr	$\phi$	Ey	$\gamma$
	Da	a		(kPa)	(MPa)	(%)	(°)	(MPa)	(kN/m <sup>3</sup> )
<b>TA/R</b>	0,0	0,6	Terreni riportati, rimaneggiati e/o alterati	-	-	-	-	-	18,5-19,1 [18,8]
<b>A</b>	<b>A2</b>	0,6	Argille limose e limi argillosi con grado di consistenza medio-elevato/elevato (sovracconsolidati causa essiccamento)	99-156 [127]	4,8-6,0 [5,4]	-	-	-	18,9-19,3 [19,1]
	<b>A3</b>	2,6	Argille limose e limi argillosi con grado di consistenza medio/medio-elevato	70-99 [82]	4,2-4,8 [17,4]	-	-	-	18,6-18,9 [18,7]
<b>B</b>	4,8	5,4	Ghiaia addensata in matrice sabbiosa fine con possibili intervalli a preponderante componente sabbiosa	-	-	80-100	27-31	19-57	19,9-21,7

## 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 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  $V_s$ ".*

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

<b>Categoria</b>	<b>DESCRIZIONE</b>
<b>A</b>	<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>B</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.
<b>C</b>	<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.
<b>D</b>	<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
<b>E</b>	<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.

Pertanto, 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 MASW-HVSR ha permesso di stimare 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 332 m/s: si ritiene, pertanto, che il sottosuolo del sito in oggetto sia attribuibile 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	$S_T$
<b>T1</b>	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	1,0
<b>T2</b>	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1,2
<b>T3</b>	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1,2
<b>T4</b>	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	1,4

Il sito in oggetto è ubicato su una superficie pianeggiante: di conseguenza, l'area in esame è riconducibile 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.*

L'indagine tromografica condotta con metodologia HVSR a stazione singola ha 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	0,7-0,9 Hz; 13,0-14,0 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.

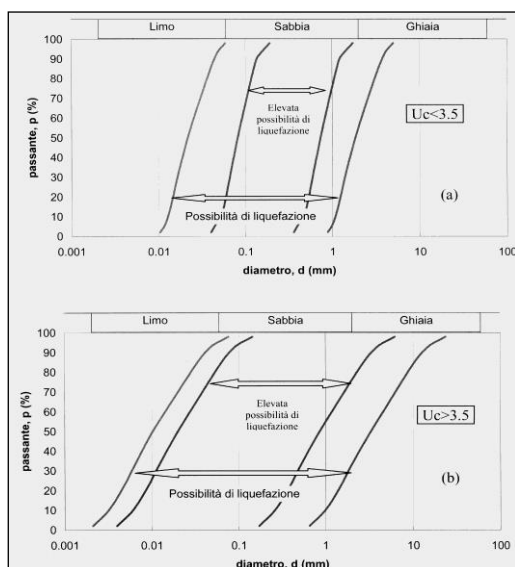
È possibile raggruppare la grande molteplicità di metodi per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei depositi in quattro classi:

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 individuati sono risultati, infatti, caratterizzati da eterogeneità granulometrica e grado addensamento medio/elevato (Unità litologica B, cfr. Cap.5): inoltre, non è stata rinvenuta traccia della presenza di una falda idrica sotterranea, fino alla massima profondità indagata.

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**”.

Imola, 18/07/2022

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
- PROVA PENETROMETRICA CPT: TABELLE E GRAFICI
- PROVA PENETROMETRICA DPSH: TABELLE E GRAFICI
- SONDAGGIO S1 ESEGUITO IN VIALE MARCONI: LOG STRATIGRAFICO, PROVE S.P.T. E DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA
- INDAGINE GEOFISICA: RELAZIONE TECNICA



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



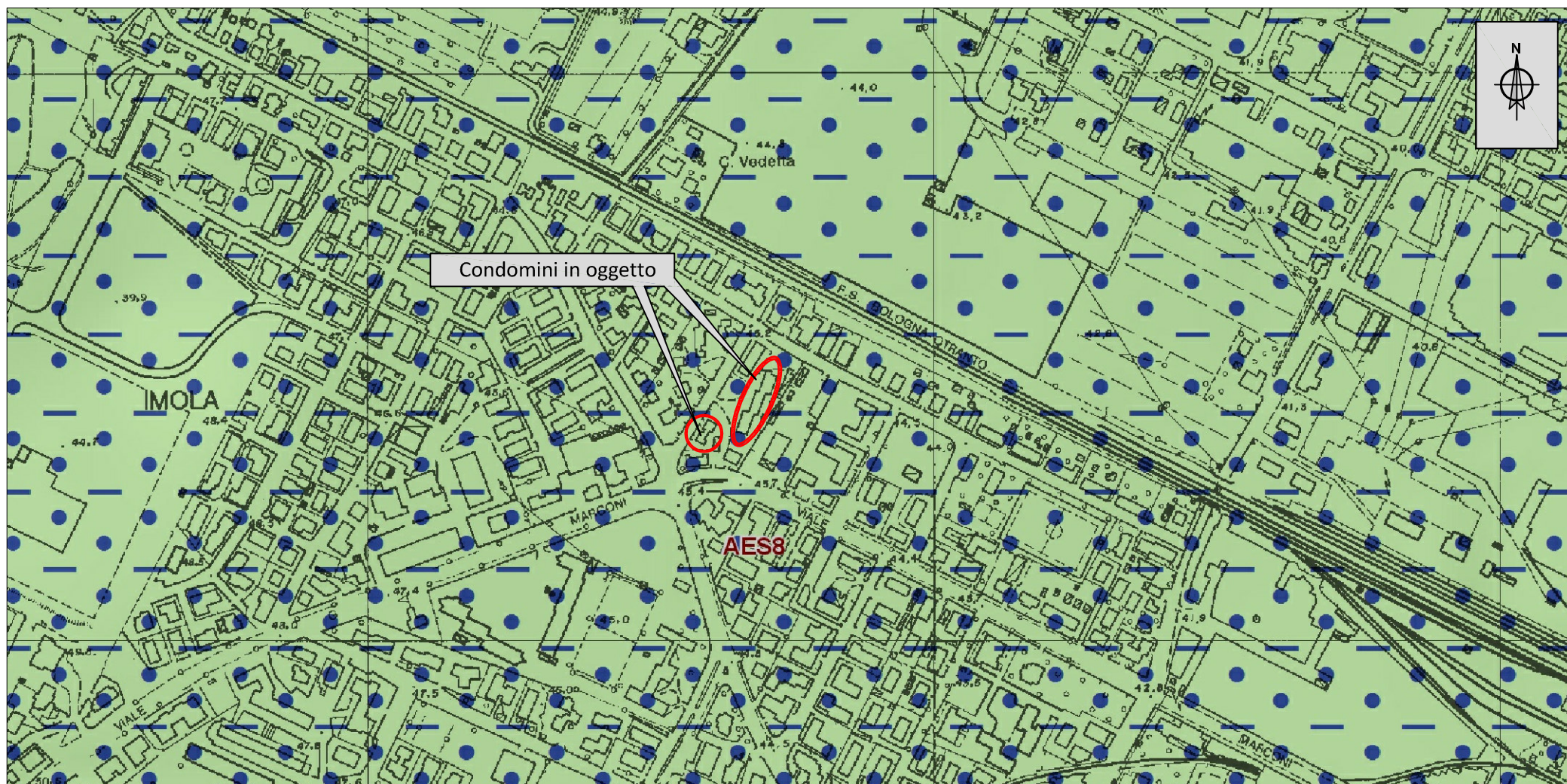
\* fonte: Carta Geologica d'Italia: Progetto CARG - Regione Emilia-Romagna




EnergyKey s.r.l.  
via Cogne, 25 - Imola (BO)  
Tel. 0542 696453  
info@energykey.it



# ESTRATTO CARTA GEOLOGICA - scala 1:5.000\*



## Legenda

 AES8: Subsistema di Ravenna

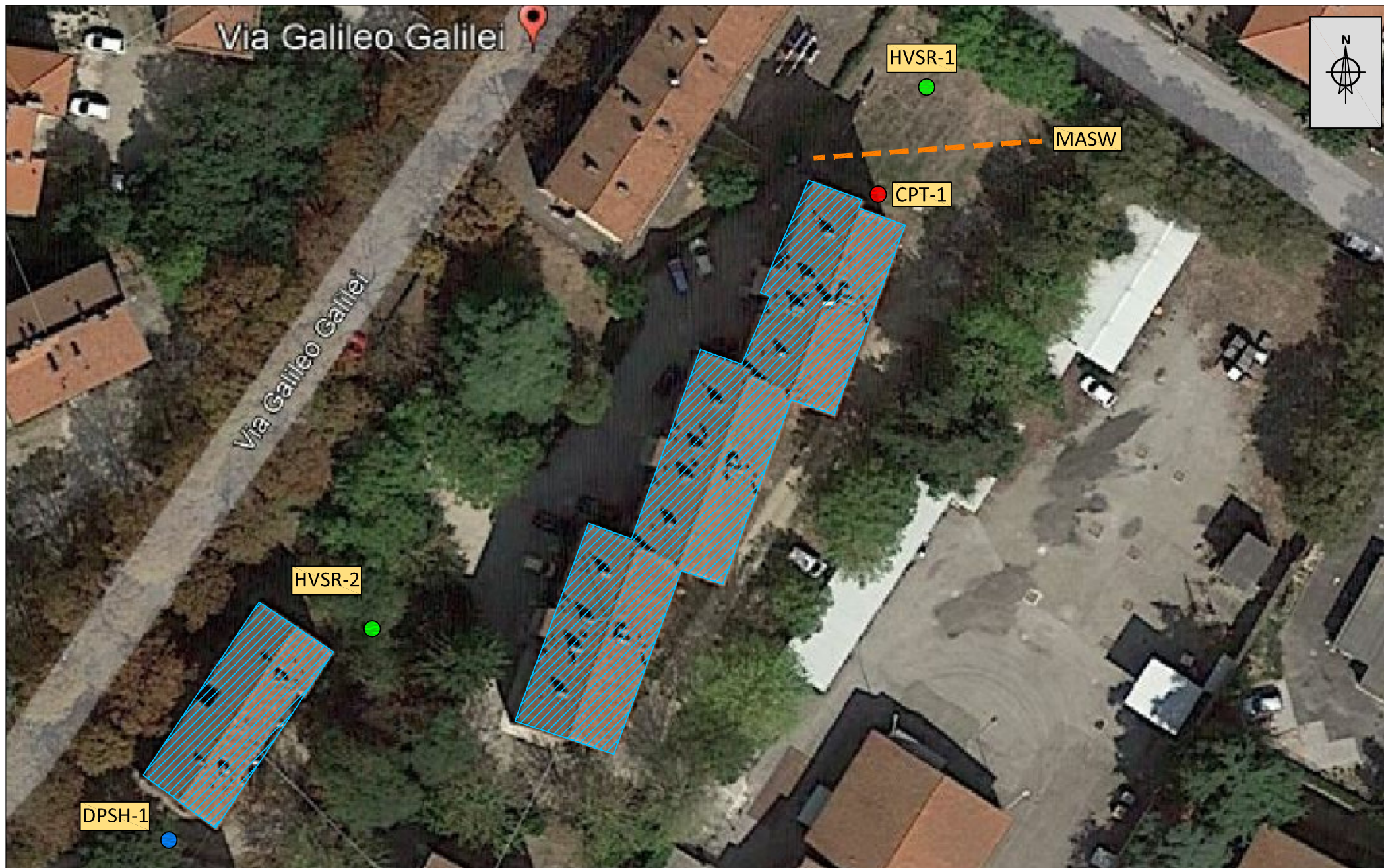
\* fonte: Carta Geologica d'Italia: Progetto CARG - Regione Emilia-Romagna



EnergyKey s.r.l.  
via Cogne, 25 - Imola (BO)  
Tel. 0542 696453  
info@energykey.it



# UBICAZIONE INDAGINI - scala 1:500



## Legenda

- CPT - Prova penetrometrica statica con punta meccanica
- DPsH - Prova penetrometrica dinamica super-pesante
- HVSr - Rilevazione di microtremori con metodologia HVSr a stazione singola (Nov. 2021)

----- MASW (Nov. 2021)



EnergyKey s.r.l.  
via Cogne, 25 - Imola (BO)  
Tel. 0542 696453  
info@energykey.it

## STIMA PARAMETRI GEOTECNICI CPT-1

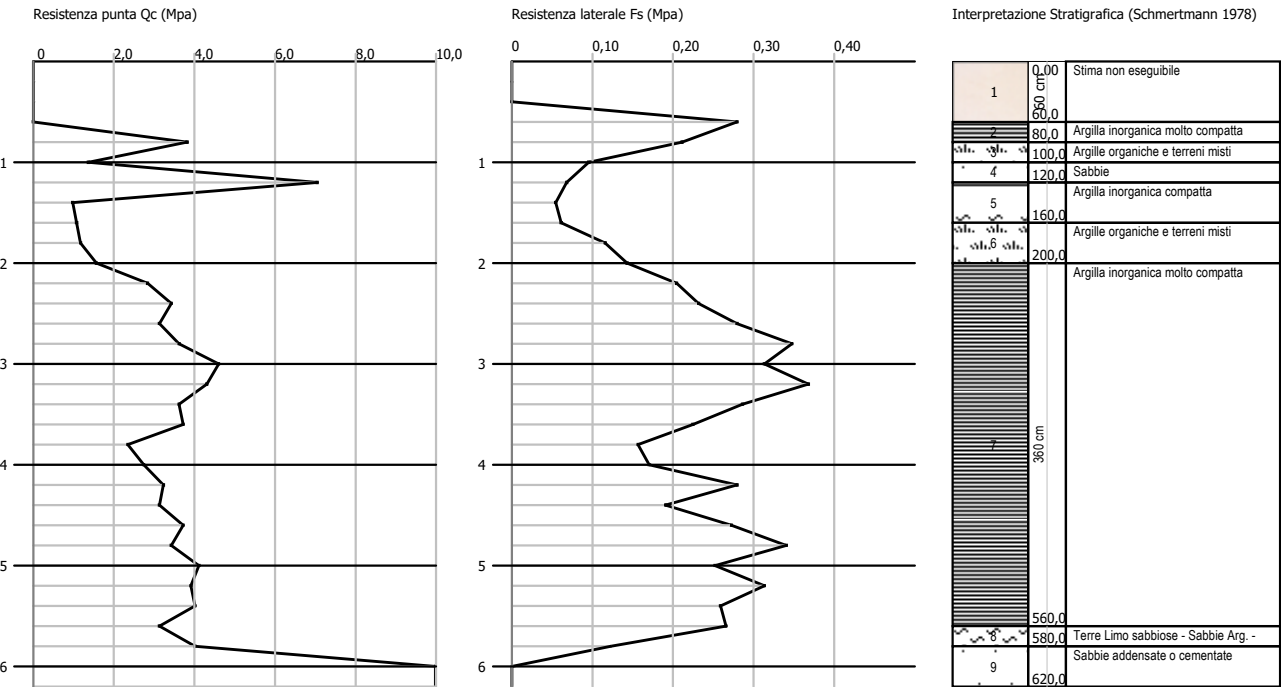
Nr:	Numero progressivo strato
Prof:	Profondità strato (m)
Tipo:	C: Coesivo. I: Incoerente. CI: Coesivo-Incoerente
Cu:	Coesione non drenata (KPa)
Eu:	Modulo di defomazione non drenato (Mpa)
Mo:	Modulo Edometrico (Mpa)
G:	Modulo di deformazione a taglio (Mpa)
OCR:	Grado di sovraconsolidazione
Puv:	Peso unità di volume (KN/m <sup>3</sup> )
PuvS:	Peso unità di volume saturo (KN/m <sup>3</sup> )
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	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	--	--	--	0,00
3	0,60	C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	--	--	--	0,00
4	0,80	C	127,5	143,3	11,5	25,8	9,0	20,4	21,2	--	--	--	150,06
5	1,00	C	45,8	51,3	4,1	13,8	6,5	18,8	19,5	--	--	--	147,87
6	1,20	I	--	--	10,6	37,5	>9	18,6	21,6	90,5	37,3	14,1	268,37
7	1,40	C	32,7	36,3	2,9	11,2	4,5	18,2	19,0	--	--	--	158,29
8	1,60	C	36,0	39,8	3,2	11,9	5,0	18,3	19,1	--	--	--	167,37
9	1,80	C	39,2	43,4	3,5	12,5	5,5	18,5	19,3	--	--	--	175,42
10	2,00	C	52,3	57,9	4,7	14,9	7,5	19,0	19,7	--	--	--	189,76
11	2,20	C	94,8	105,6	8,5	21,5	9,0	19,9	20,7	--	--	--	216,35
12	2,40	C	114,4	127,5	10,3	24,1	9,0	20,3	21,0	--	--	--	228,64
13	2,60	C	104,6	116,3	9,4	22,8	9,0	20,1	20,9	--	--	--	229,22
14	2,80	C	120,9	134,6	10,9	24,9	9,0	20,3	21,1	--	--	--	239,31
15	3,00	C	153,6	171,2	6,9	28,9	9,0	20,7	21,5	--	--	--	253,78
16	3,20	C	143,8	160,0	12,9	27,7	9,0	20,6	21,4	--	--	--	254,35
17	3,40	C	120,9	134,1	10,9	24,9	9,0	20,3	21,1	--	--	--	249,69
18	3,60	C	124,2	137,6	11,2	25,3	9,0	20,4	21,2	--	--	--	253,89
19	3,80	C	78,5	86,0	7,1	19,1	9,0	19,6	20,4	--	--	--	236,18
20	4,00	C	91,5	100,5	8,2	21,0	9,0	19,9	20,6	--	--	--	245,31
21	4,20	C	107,9	118,8	9,7	23,3	9,0	20,1	20,9	--	--	--	255,14
22	4,40	C	104,6	115,0	9,4	22,8	9,0	20,1	20,9	--	--	--	256,04
23	4,60	C	124,2	136,9	11,2	25,3	9,0	20,4	21,2	--	--	--	266,42
24	4,80	C	114,4	125,7	10,3	24,1	9,0	20,2	21,0	--	--	--	264,65
25	5,00	C	137,3	151,3	12,4	26,9	9,0	20,5	21,3	--	--	--	275,67
26	5,20	C	130,8	143,8	11,8	26,2	9,0	20,5	21,2	--	--	--	275,31
27	5,40	C	134,0	147,3	12,1	26,6	9,0	20,5	21,3	--	--	--	278,53
28	5,60	C	104,6	114,0	9,4	22,8	9,0	20,1	20,9	--	--	--	268,13
29	5,80	CI	134,0	147,0	12,1	26,6	>9	20,5	21,3	40,7	23,4	8,0	312,09
30	6,00	I	--	--	28,1	68,0	>9	0,0	0,0	84,3	30,6	37,5	461,43
31	6,20	I	--	--	44,1	89,6	>9	0,0	0,0	96,7	32,5	58,8	519,16

Probe CPT - Cone Penetration CPT-1  
Strumento utilizzato PAGANI TG 63 (200 kN)

Committente: Sidel Spa  
Cantiere: condomini ACER via Galilei  
Località: Imola (BO)

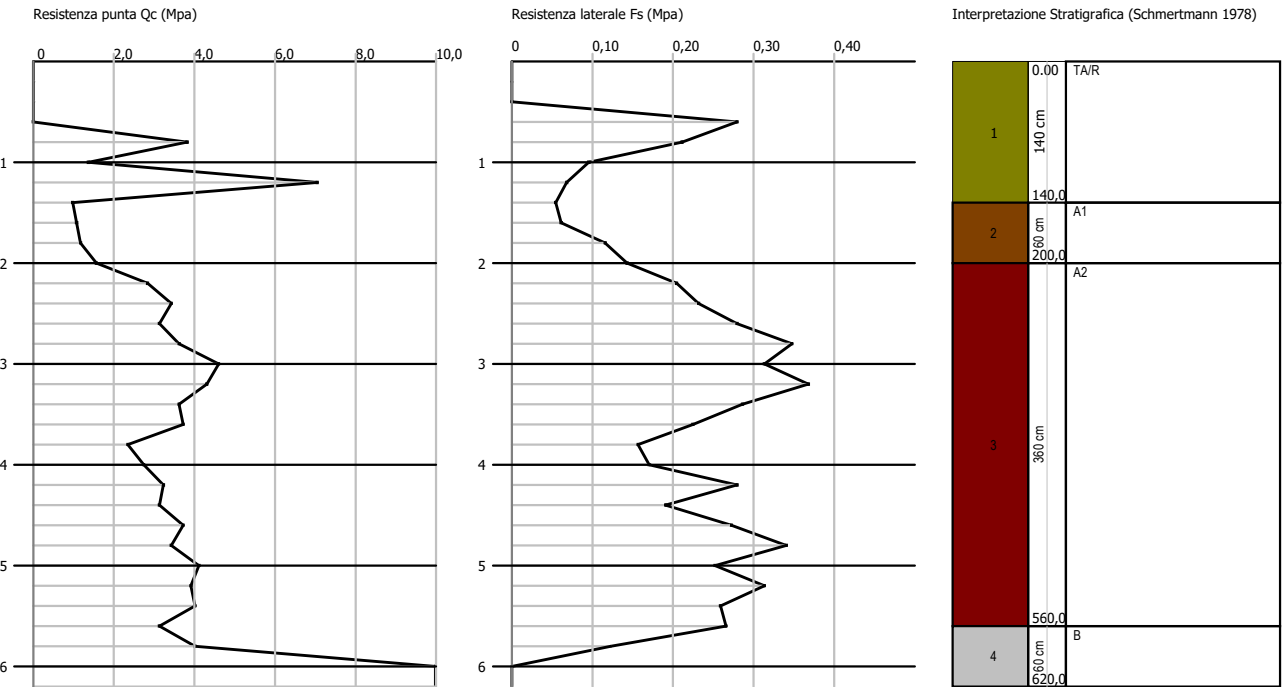
Data: 15/07/2022



Probe CPT - Cone Penetration CPT-1  
Strumento utilizzato PAGANI TG 63 (200 kN)

Committente: Sidel Spa  
Cantiere: condomini ACER via Galilei  
Località: Imola (BO)

Data: 15/07/2022





## PROVA PENETROMETRICA DPSH-1

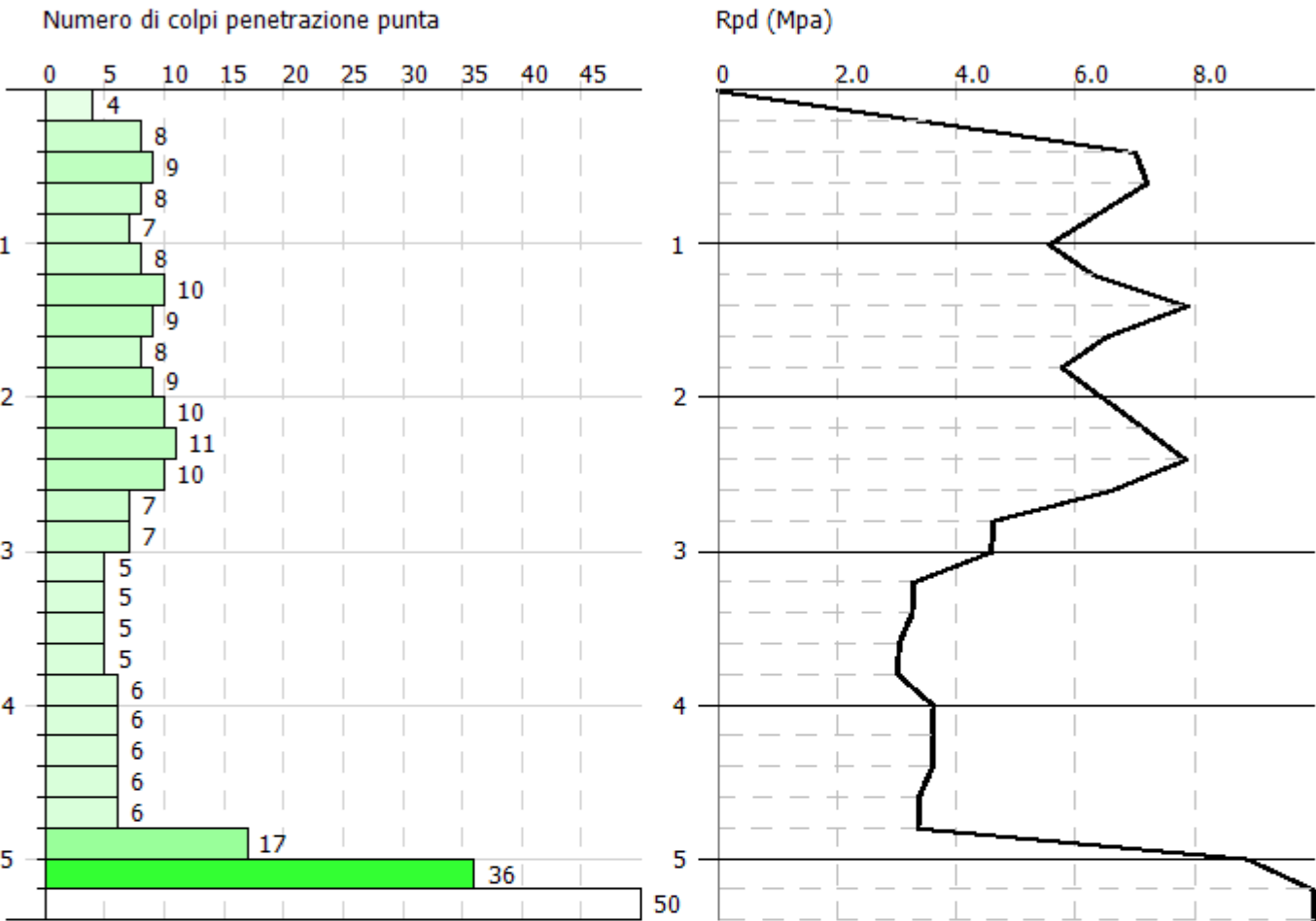
Strato	Prof.	Nspt	$\gamma$ (kN/mc)	$\phi$ (°)	cu (kPa)	Mo (MPa)	Ey (MPa)	$\nu$	G (MPa)	Vs (m/s)	Dr (%)
1	0.2	5.88	18.5	25.65	56.19	3.88	4.61	0.34	33.7	59.6	60.09
2	0.4	11.76	18.96	28.13	113.36	5.06	9.23	0.33	64.66	83.06	82.81
3	0.6	13.23	19.07	28.42	127.78	5.36	10.38	0.33	72.23	93.55	85.57
4	0.8	11.76	18.96	27.82	113.36	5.06	9.23	0.33	64.66	97.82	78.7
5	1	10.29	18.85	27.17	99.05	4.77	8.07	0.33	57.03	100.33	71.92
6	1.2	11.76	18.96	27.52	113.36	5.06	9.23	0.33	64.66	106.73	75.2
7	1.4	14.7	19.18	28.21	142.1	5.65	11.53	0.33	79.75	114.57	82.27
8	1.6	13.23	19.07	27.66	127.78	5.36	10.38	0.33	72.23	115.65	76.43
9	1.8	11.76	18.96	27.06	113.36	5.06	9.23	0.33	64.66	116.09	70.64
10	2	13.23	19.07	27.35	127.78	5.36	10.38	0.33	72.23	121.05	73.51
11	2.2	14.7	19.18	27.59	142.1	5.65	11.53	0.33	79.75	125.68	76.05
12	2.4	16.17	19.28	27.8	156.51	5.95	12.69	0.32	87.22	130.03	78.33
13	2.6	14.7	19.18	27.28	142.1	5.65	11.53	0.33	79.75	129.98	73.39
14	2.8	10.29	18.85	25.77	99.05	4.77	8.07	0.33	57.03	124.03	60.4
15	3	10.29	18.85	25.62	99.05	4.77	8.07	0.33	57.03	125.75	59.46
16	3.2	7.35	18.62	24.2	70.51	4.17	5.77	0.34	41.57	120.18	49.51
17	3.4	7.35	18.62	24.06	70.51	4.17	5.77	0.34	41.57	121.64	48.83
18	3.6	7.35	18.62	23.91	70.51	4.17	5.77	0.34	41.57	123.03	48.17
19	3.8	7.35	18.62	23.77	70.51	4.17	5.77	0.34	41.57	124.35	47.54
20	4	8.82	18.74	24.32	84.73	4.47	6.92	0.34	49.34	129.65	51.4
21	4.2	8.82	18.74	24.17	84.73	4.47	6.92	0.34	49.34	130.9	50.74
22	4.4	8.82	18.74	24.03	84.73	4.47	6.92	0.34	49.34	132.11	50.1
23	4.6	8.82	18.74	23.88	84.73	4.47	6.92	0.34	49.34	133.28	49.49
24	4.8	8.82	18.74	23.73	84.73	4.47	6.92	0.34	49.34	134.4	48.9
25	5	24.99	19.87	27.53	243.11	7.73	19.61	0.3	131.32	162.23	81.3
26	5.2	52.92	21.2	30.2	519.56	13.35	41.52	0.25	265.85	186.15	100
27	5.4	73.5	21.69	31.25	724.32	17.5	57.66	0.2	362.03	198.51	100



PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH-1  
Strumento utilizzato... DPSH TG 63-200 PAGANI

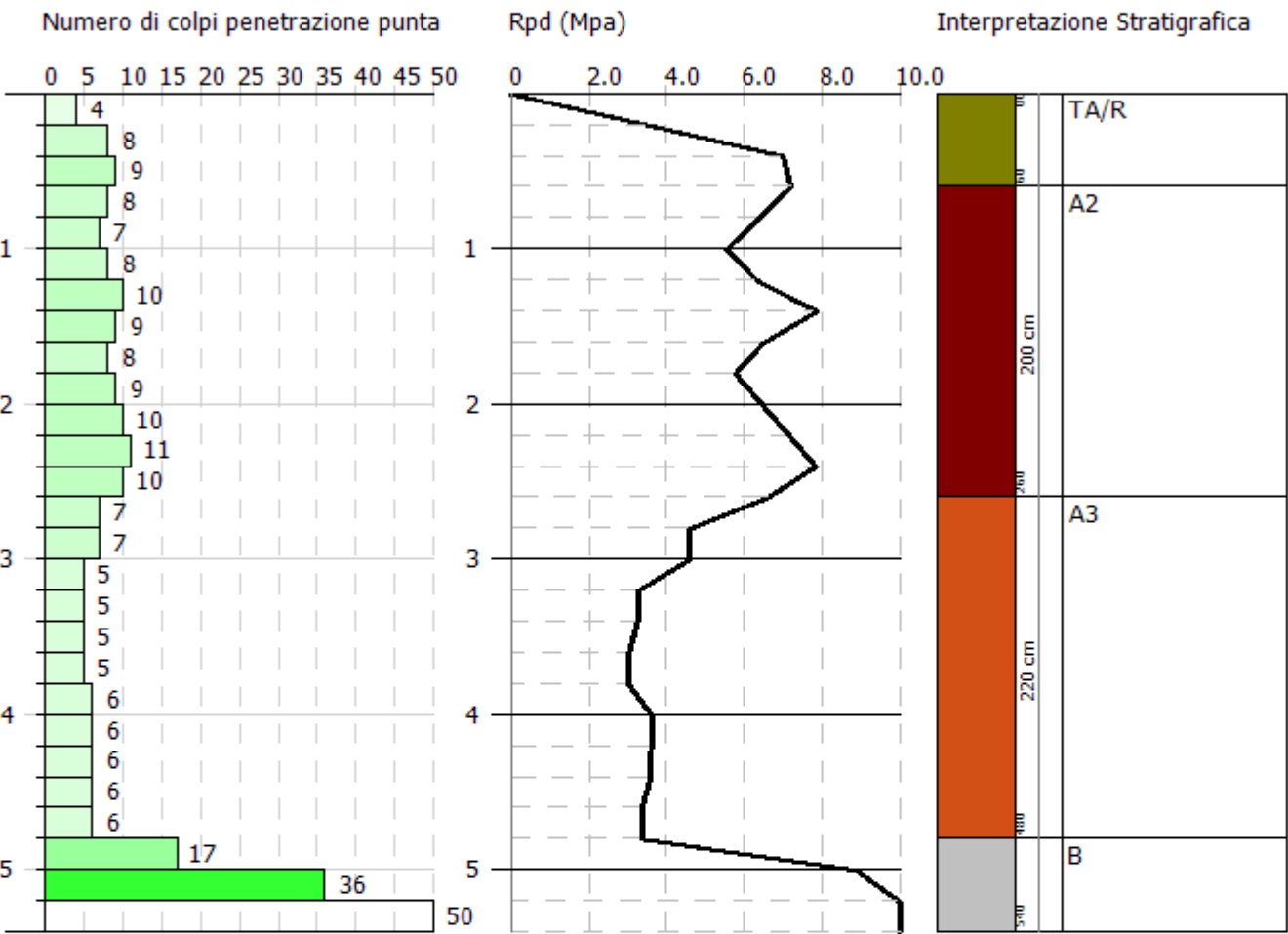
Committente: Sidel Spa  
Descrizione: Condomini ACER via Galilei  
Localita': Imola (BO)

Scala 1:50



Committente: Sidel Spa  
Descrizione: Condomini ACER via Galilei  
Localita': Imola (BO)

Scala 1:50



[illegible]

## DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



*Foto 1: Sondaggio S1 in esecuzione*



*Foto 2: Sondaggio S1 – Cassetta 1 - Profondità 0,0-5,0 m.*





Foto 3: Sondaggio S1 – Cassetta 2 - Profondità 5,0-10,0 m.



Foto 4: Sondaggio S1 – Cassetta 3 - Profondità 10,0-15,0 m.



## RISULTATI PROVE S.P.T. IN FORO DI SONDAGGIO

## CORRELAZIONI

## DATI

TERRENI GRANULARI

TERRENI COESIVI
-----------------

[illegible]

---

***Comune di Imola (BO)***

**RELAZIONE GEOFISICA**

*Valutazione del parametro  $V_{S30}$  e determinazione della categoria del suolo di fondazione c/o edifici in via Galilei 3-5-7 e via Galilei 1 nel Comune di Imola (BO)*

Novembre 2021

---

## **1. PREMESSA**

Presso gli edifici in via Galilei 3-5-7 e in via Galilei 1 nel comune di Imola, in data 19/11/2021 sono state effettuate indagini geofisiche mediante profilo in array con tecnica MASW (multichannel analysis of surface waves) e misure 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 ( $V_s$ ,  $E_q$ ), in ottemperanza a quanto riportato nel decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17.01.2018 e della circolare applicativa.

Le indagini geofisiche sono consistite in:

- N. 1 profilo sismico con tecnica MASW;
- N. 2 misure a stazione singola con tecnica HVSr (HVSr1, HVSr2).

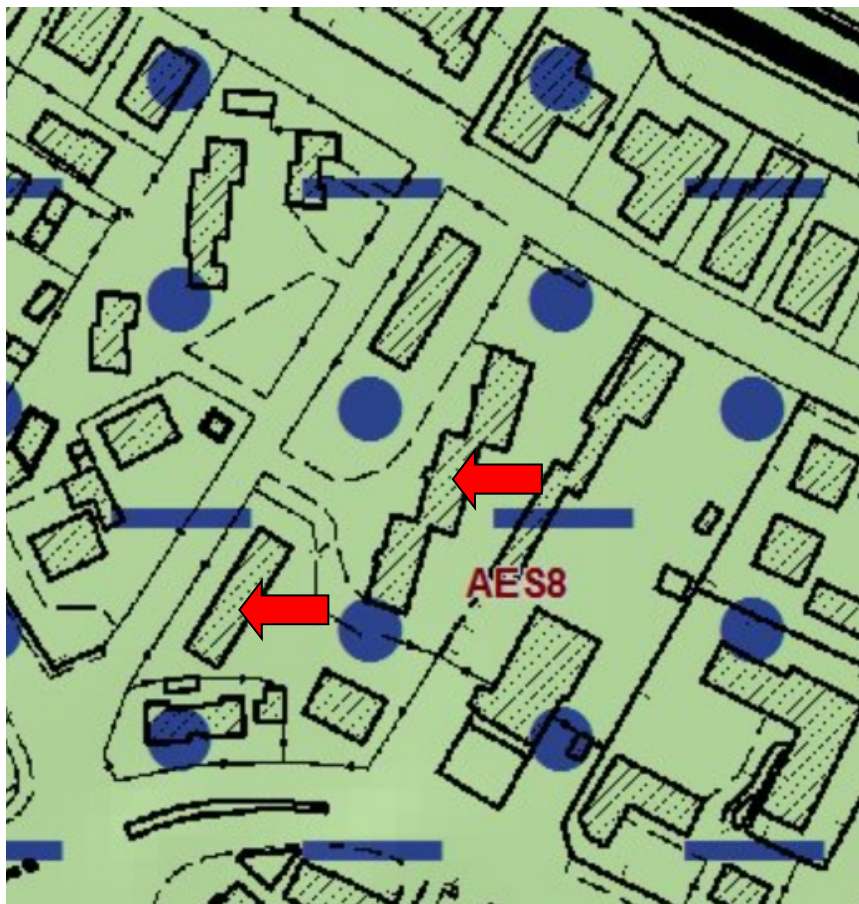
Il profilo MASW è stato eseguito con sismografo Sismografo: Dolang DBS280.

Le misure a stazione singola sono state eseguite con tromografo digitale modello "Tromino" della Micromed S.p.A.


## 1.1 BREVE INQUADRAMENTO GEOLOGICO E UBICAZIONE INDAGINI

Si riporta breve inquadramento geologico – litostratigrafico dell'area.


Nell'area in studio si ha la presenza di coperture quaternarie appartenenti al Subsistema di Ravenna (AES8) costituiti in superficie da sabbia limosa di piana alluvionale con sottostante contatto con sabbie e ghiaie.



### Ambienti deposiz. e litologie

 Sabbia Limosa - Piana alluvionale

### Coperture quaternarie

 AES8 - Subsistema di Ravenna



Le indagini eseguite sono riportate nella Tavola 1 sotto riportata costituita da un estratto “Google maps”.



**TAVOLA 1:** Ubicazione dello stendimento MASW (linea rossa) e indagini HVS R1 e HVS R2

## 2. DESCRIZIONE DELLE INDAGINI

### 2.1 TECNICA MASW

L'indagine sismica di tipo MASW (multichannel analysis of surface waves) è una tecnica di analisi del sottosuolo che sfrutta la propagazione delle onde superficiali nel terreno per determinare l'andamento della velocità delle onde S.

In particolare, consente l'analisi di onde di superficie "R-Rayleigh" (onda di superficie composta da un movimento ellittico e retrogrado) con modelli matematici avanzati per l'analisi in mezzi a differente rigidità.

La registrazione avviene utilizzando la strumentazione classica per le indagini sismiche a rifrazione, ovvero tramite uno stendimento lineare composto da geofoni posti a distanza fissa tra loro. Per il seguente lavoro è stato effettuato il metodo attivo, ovvero le onde superficiali sono state prodotte da una sorgente impulsiva sul piano campagna.

La modellazione viene eseguita simulando, a partire da un modello geotecnico sintetico caratterizzato da spessore, densità, coefficiente di Poisson, velocità delle onde S e velocità delle Onde P. La curva di dispersione teorica la quale lega velocità di propagazione delle onde ( $c$ ) alla lunghezza e frequenza d'onda, segue la seguente relazione:

$$c = \lambda \nu$$

Modificando i parametri del modello geotecnico sintetico, si può ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale: questa fase è detta di inversione e consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi a differente rigidità.

La strumentazione utilizzata ed i parametri utilizzati per l'acquisizione dei dati in campagna vengono sinteticamente indicati di seguito:

- Sorgente: mazza da 10 kg su piattello metallico
- Numero di battute: 3
- Distanza sorgente dal primo geofono: 1.5m
- Geofoni: verticali con frequenza propria di 4.5 Hz
- Numero di geofoni: 12
- Distanza intergeofonica: 1.5m
- Lunghezza dello stendimento: 16.5m
- Sismografo: Dolang DBS280
- Unità di acquisizione: notebook + sistema sismico digitale
- Software di post-processing: Easy Masw (Geostru Software)
- Frequenza di campionamento: 512 Hz
- Tempo di registrazione: 1,2288 sec

Caratteristiche tecniche Sismografo DBS280
<p><b>Resolution real:</b> 24 bit using Delta-Sigma A/D converter</p> <p><b>Available Channels:</b> 12,24</p> <p><b>Number of sample/trace:</b> 256,512,1024,2048,4096,8192,10992</p> <p><b>Sample rate (Hz):</b> 208, 417, 833, 1000, 1667, 3333, 6667</p> <p><b>Sampling time:</b> Up to 78 sec at 208Hz</p> <p><b>Frequency response:</b> 0.1 Hz to 1000 Hz</p> <p><b>Max input signal:</b> +/- 2V at 0 db gain</p> <p><b>Anti alias filter:</b> 500 KHz 12 db/octave</p> <p><b>Digital filter:</b> post processing LC HC</p> <p><b>Dinamic Resolution:</b> &gt; 100 dB at gain 0 and 1770 Hz</p> <p><b>THD noise:</b> less 97 dB</p> <p><b>Recording Format:</b> root xxxx1000.SU extension es: best1000.SU &amp; SEGY SEG2 - under test</p> <p><b>Power supply:</b> From USB no battery needed</p> <p><b>Connectors:</b> DLk25</p> <p><b>Baud Rate:</b> up to 12 Mb/sec</p> <p><b>Triggering:</b> Closing/opening contact software selectable</p> <p><b>System, Software:</b> Runs under Windows XP - Vista- Win7 operating system DBS280 Panel Acq.</p>

L'elaborazione delle indagini eseguite verrà effettuata con software "Easy Masw" della ditta Geostru.

## 2.2 MISURA A STAZIONE SINGOLA H/V: PROCEDURA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La tecnica maggiormente sfruttata per lo studio dei microtremori è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale e conosciuta come HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). È infatti un'opinione accettata in letteratura che le singole componenti del rumore ambientale possono presentare ampie variazioni in funzione dei disturbi naturali ed antropici, mentre il rapporto delle componenti orizzontali e della componente verticale tende a rimanere costante conservando così il picco della frequenza di risonanza fondamentale.

Lo sviluppo di questa metodologia ha visto come massimo fautore Nakamura (1989), il quale si è basato su tre assunzioni fondamentali:

- Considerare l'origine dei microtremori solo da sorgenti superficiali e trascurare le sorgenti profonde.
- Considerare l'amplificazione come conseguenza della propagazione delle onde all'interno di uno strato soffice situato al di sopra di un semispazio rigido e omogeneo tale da creare un forte contrasto di impedenza sismica tra le due parti.
- Considerare la componente verticale del moto non soggetta a fenomeni di amplificazione dallo strato superficiale ad eccezione delle onde di Rayleigh.

Le registrazioni dei microtremori possono offrire un valido aiuto per ricavare indicazioni riguardanti variazioni litostratigrafiche e per la determinazione della velocità delle onde di taglio. In considerazione di quest'ultimo punto risulta evidente il loro utilizzo pratico ai fini del calcolo del parametro VS.

Le registrazioni del rumore sismico ambientale sono state effettuate tramite tromografo digitale Tromino della Micromed S.p.A., il quale permette sia l'acquisizione digitale in alta risoluzione in modo passivo e non intrusivo sia il pre-processing dei dati. È costituito da tre velocimetri elettrodinamici ortogonali (N-S, E-W e in senso verticale) con autobloccaggio in fase di non acquisizione e da un GPS interno.

Considerando il suolo come un corpo viscoelastico risulta possibile effettuare la misurazione delle frequenze proprie di oscillazione, riconosciute come funzioni delle proprietà meccaniche dei materiali e della morfologia attorno al sito in esame.

Tramite lo strumento utilizzato per questa indagine, oltre alla registrazione del rumore sismico, è possibile ricavare queste frequenze di risonanza del sottosuolo e anche quelle degli edifici, conoscendo le quali si creano basi utili in fase di progettazione per evitare la produzione di fenomeni di amplificazione sismica dovuti all'accoppiamento tra le due vibrazioni nel caso coincidessero i loro valori in frequenza.

Ciò produrrebbe un notevole aumento della sollecitazione sulle strutture in caso di evento sismico.

Le principali note tecniche di questo tromografo digitale presentate dalla ditta costruttrice sono di seguito esposte:



PRINCIPALI NOTE TECNICHE	
<b>Alimentazione</b>	2 batterie alcaline x 1.5 VDC AA
<b>Voltaggio interno</b>	+3.3 V, +3.6 V per la sezione analogica
<b>Consumi</b>	75 mW (GPS disattivato), 450 mW (GPS attivo)
<b>Durata delle batterie</b>	80 h di misura continua con GPS disattivato
<b>Numero di canali</b>	3+1 analogici
<b>Amplificatori</b>	tutti canali con input differenziali
<b>Rumore</b>	< 0.5 $\mu$ V r.m.s. @128 Hz sampling
<b>Impedenza dell'input</b>	10 <sup>6</sup> Ohm
<b>Range di frequenze</b>	DC - 360 Hz
<b>Frequenza campionamento</b>	di 16384 Hz per canale
<b>Frequenze sovracampionamento</b>	di 32x, 64x, 128x
<b>Conversione A/D</b>	equivalente a 24 bit
<b>Massimo input analogico</b>	51.2 mV (781 nV/digit)
<b>Display grafico</b>	grafico, 128 x 64 pixel, retroilluminato
<b>Tastiera</b>	4 tasti a membrana
<b>Orologio</b>	interno, permanente con datario e allarme, può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
<b>GPS</b>	12 canali con time-marker (precisione 1 $\mu$ s), può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
<b>Livella</b>	a bolla d'aria, elevata precisione orizzontale, sensibilità 5' d'arco (0.083°)
<b>Conessioni</b>	porta USB, tipo B
<b>Registrazione dati</b>	memoria interna, standard 512 Mb, opzionale fino a 2 Gb
<b>Dimensione e peso</b>	10x14x7.7(altezza)cm 1.1kg contenitore di alluminio
<b>Accoppiamento col terreno</b>	su punte e cuscinetto reologico
<b>Condizioni operative</b>	temperatura -10/+70°C umidità 0-90% senza condensa
<b>Impermeabilità</b>	indice di protezione IP = 65 (resistente alla polvere, resistente agli spruzzi)
<b>Sensori</b>	3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione autobloccaggio quando non in acquisizione

L'elaborazione dei dati prevede i seguenti passaggi ed è stata effettuata tramite software Grilla, in dotazione allo strumento, con cui è possibile effettuare analisi spettrali e analisi HVSR (in funzione del tempo ed in funzione della direzione):

1. suddivisione della registrazione del rumore sismico nelle sue tre componenti in intervalli della durata di qualche decina di secondi ciascuno;
2. analisi spettrale del segnale nelle tre componenti;
3. correzione da andamenti anomali (*detrend*);
4. riduzione della dispersione del segnale (*tapering*);
5. calcolo della FFT (*Fast Fourier Transform*) e analisi spettrale PSD (*Power Spectral Density*);
6. liscio;
7. media degli HVSR calcolati sulla varie finestre.

Di seguito vengono riportate le informazioni riguardanti l'acquisizione dei dati in campagna:

	HVSR1	HVSR2
Inizio registrazione	Ore 14:42:17 Data 19/11/21	Ore 15:44:41 Data 19/11/21
Fine registrazione	Ore 14:56:17 Data 19/11/21	Ore 15:58:41 Data 19/11/21
Lunghezza della traccia	14'00"	14'00"
Frequenza di campionamento	128 Hz	128 Hz
Dimensione della finestra di suddivisione del tracciato	30 sec	30 sec
Finestra di liscio	Triangolare	Triangolare
Liscio	10%	10%

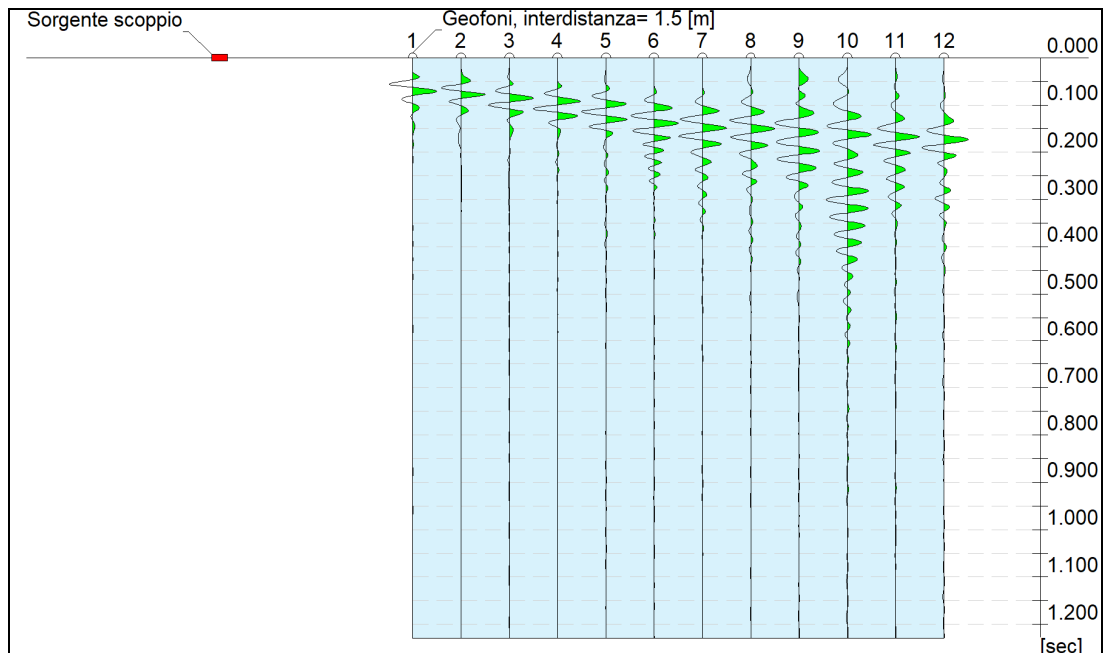
**Tabella 2:** Dati riguardanti l'acquisizione e l'elaborazione.

Le condizioni meteo durante la registrazione sono state buone. Il vento è stato di moderata entità. Lo scrivente ritiene che non ci siano state altre condizioni sfavorevoli atte a produrre vibrazioni aggiuntive a quelle di interesse.

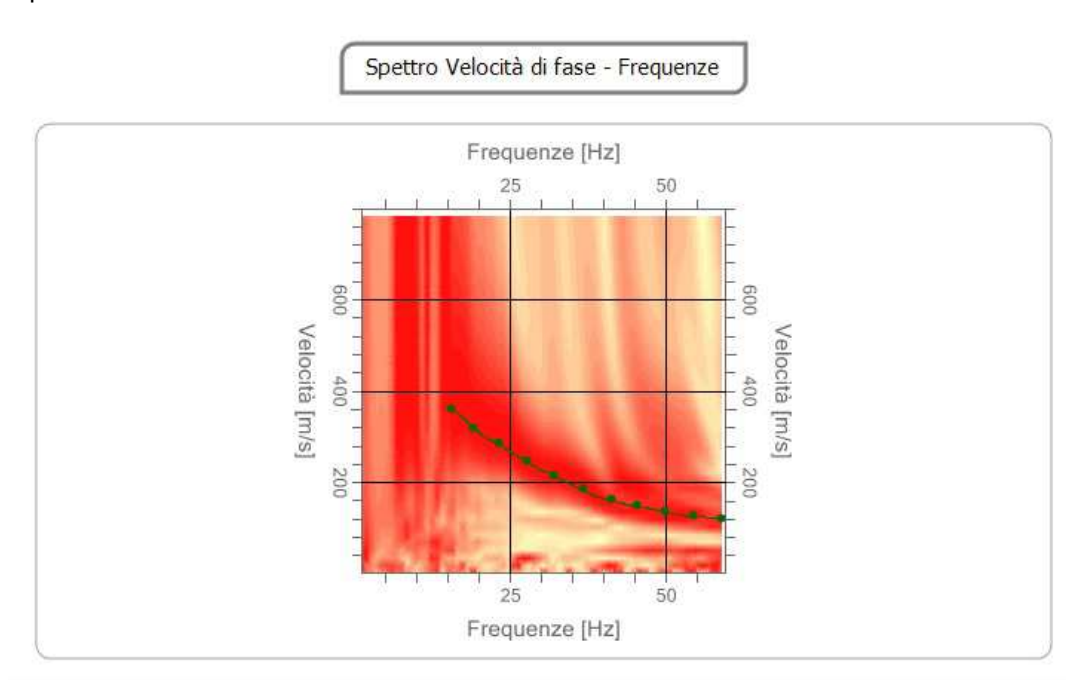
### 3. RISULTATI TECNICA MASW

Acquisizione Tracce MASW:

- Distanza intergeofonica: 1.5m
- Lunghezza dello stendimento: 16.5m



Dopo avere effettuato l'analisi spettrale, il processo di inversione effettuato per stimare la velocità delle onde S porta al tracciamento della curva di seguito esposta (a pallini verdi), la quale deve risultare il più possibile sovrapposta alla zona di massima intensità dello spettro, ovvero alla curva di dispersione. Processo di inversione MASW:

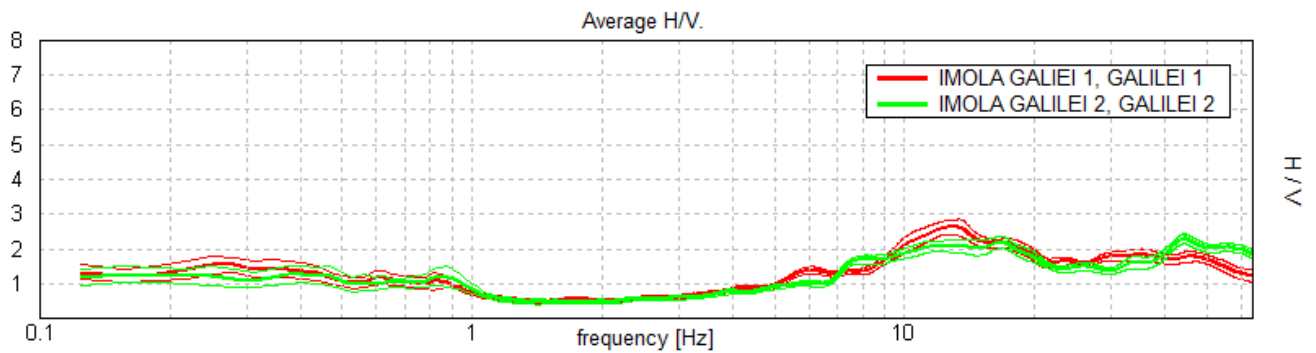


La curva rappresenta il modo fondamentale di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

#### 4. RISULTATI TECNICA HVSR

- Registrazioni effettuate con tromografo digitale Tromino della Micromed S.p.A ed elaborate con software "Grilla"

##### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE (HVSR1–HVSR2)



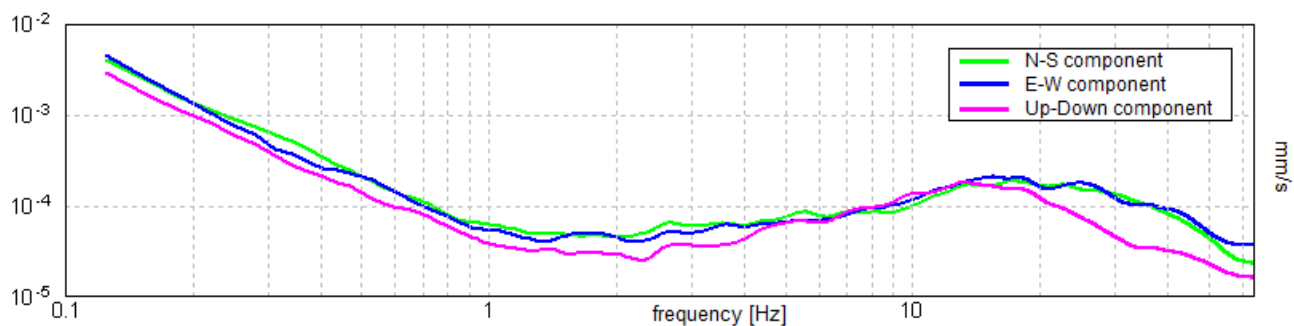
**Curva H/V delle due registrazioni HVSR**

Si può notare come tra le curve delle due registrazioni vi siano differenze minime.

Per il "fit congiunto" con l'analisi MASW è stata utilizzata la registrazione HVSR1. Si riportano le curve di registrazione e quelle teoriche relative ai due modelli di sottosuolo proposti per il sito.

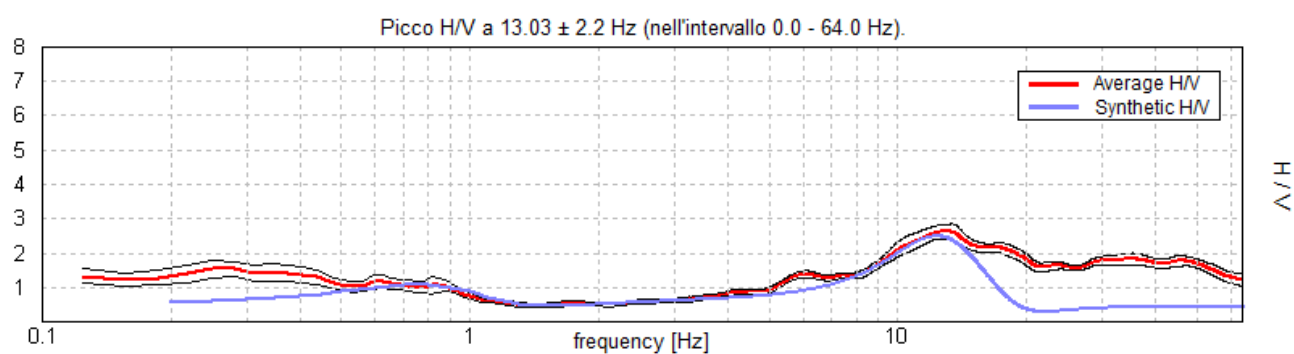


### UTILIZZO INDAGINE HVSR1 PER FIT CONGIUNTO CON MASW



Spettri delle tre componenti ortogonali rilevate nella registrazione HVSR1.

### H/V SPERIMENTALE vs H/V SINTETICO



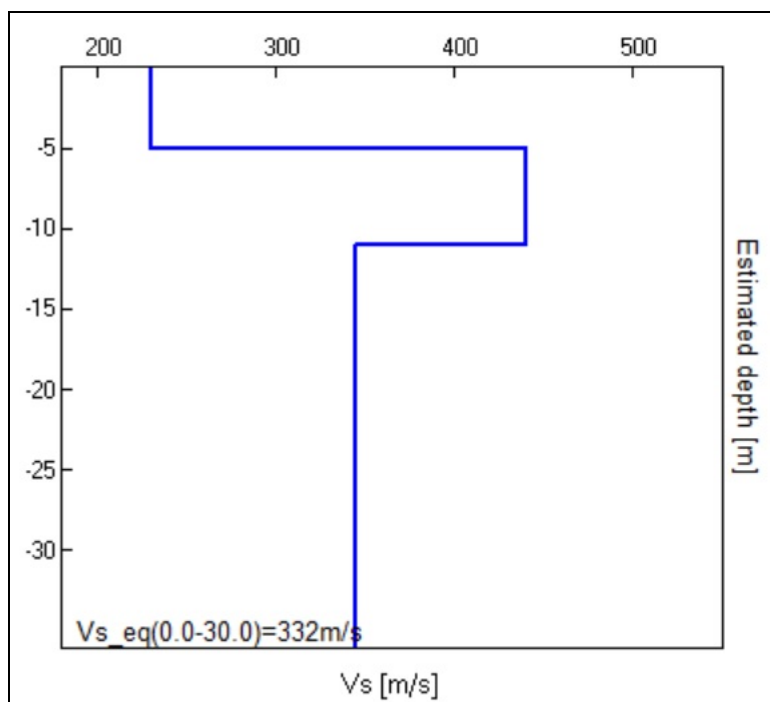
Confronto tra la curva HVSR1 sperimentale registrata nel sito (curva rossa) e teorica (blu) relativa al modello di sottosuolo proposto per il sito

## 5. MODELLI DI SOTTOSUOLO PROPOSTI PER IL SITO

Sulla base dei risultati ottenuti e dell'interpretazione dei dati acquisiti, il modello di sottosuolo proposto per il sito in studio ottenuto mediante "fit congiunto" tra misura HVSR1 e profilo MASW è il seguente:

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/sec]
1	5.0	5.0	230
2	11.0	6.0	440
3	30.0	inf.	345

### Modello di velocità delle onde di taglio S



## 6. VALUTAZIONE DEL PARAMETRO $V_S$ E DETERMINAZIONE DELLA CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE - CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati ricavati nei paragrafi precedenti e ottenuti dalle indagini geofisiche mediante “fit congiunto tra profilo sismico MASW e indagini HVSR” ed in accordo con l'attuale normativa, viene calcolato il valore del parametro  $V_S$  tramite la formula:

$$V_{S, eq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h(strato)}{V_S(strato)}}$$

Per l'area in studio, dal “fit congiunto” tra MASW e HVSR1 rispetto al piano campagna, è stato ottenuto il seguente valore:

$$V_S = V_{S30} = 332 \text{ m/sec}$$

Per le velocità sopra elencate dei terreni in oggetto, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, in entrambe le aree in studio dell'area di servizio, viene associata una categoria di suolo di fondazione di tipo “C” definita:

*C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.*

Tale categoria di suolo, risulta valida anche rispetto al reale piano di posa della fondazione dei due edifici esistenti.

Lo scrivente resta a disposizione per qualsiasi ulteriore chiarimento o caso dubbio.

Bologna, Novembre 2021

Dott. Geol. Mirco Marinelli





**7. FOTO INDAGINI ESEGUITE IL 19/11/2021: PROFILO GEOSISMICO MASW E MISURE A STAZIONE SINGOLA (HVSR1, HVSR2)**

