

CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA

COMUNE DI MARZABOTTO

EX CARTIERA BURGO – LAMA DI RENO

**RELAZIONE GEOLOGICO SISMICA PER IL PROGETTO DI
RIGENERAZIONE DELL'AREA NELL'AMBITO DEL PIANO INTEGRATO
DELLA CITTA' METROPOLITANA**



Committente: Comune di Marzabotto

Il Professionista incaricato: Dott. Geol. Piero Cavarocchi



Bologna, settembre 2022

OGGETTO DEL DOCUMENTO

La presente relazione geologico sismica è stata redatta su incarico dell'Amministrazione Comunale di Marzabotto a supporto del progetto di riqualificazione dell'area della ex cartiera Burgo ubicata in località Lama di Reno.

L'intervento di riqualificazione prevede, come si legge nel Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP), di *“trasformare l'area della ex cartiera in uno spazio polifunzionale in grado di soddisfare la domanda di sviluppo di servizi ed infrastrutture di tipo sociale, destinate agli abitanti della frazione di Lama di Reno, quali ad esempio la realizzazione di servizi di prossimità, ma che sia anche in grado di rivolgersi ad un bacino di utenza a livello metropolitano, nazionale ed internazionale, prevedendo spazi idonei ad accogliere attività produttive quali ad esempio la realizzazione di un hub dedicato alle start up e spazi da destinati ad attività culturali ed artistiche anche a carattere temporaneo”*.

Allo scopo di fornire una documentazione di gara il più possibile dettagliata, si è proceduto allo studio delle caratteristiche geologiche del sottosuolo partendo da una preventiva ricerca bibliografica, che ha permesso di acquisire alcuni dati ricavati da indagini geognostiche e/o sismiche eseguite in tempi remoti all'interno dello stabilimento e più recentemente in aree limitrofe. Dopo aver valutato il materiale raccolto si è passati alla definizione di un'apposita campagna di indagini geognostiche e sismiche da eseguirsi nell'area di studio, allo scopo di verificare direttamente la natura dei terreni presenti nel primo sottosuolo e di valutare eventuali variazioni tessiturali nell'area interessata dall'intervento.

E' stata quindi realizzata un'apposita campagna di indagini in situ, campagna descritta nel seguente elenco:

- 1) Quattro sondaggi geognostici a carotaggio continuo spinti fino alla profondità di circa 6/7 metri dal pc; all'interno del foro, durante le fasi di perforazione, sono state eseguite prove SPT per verificare il grado di addensamento dei principali livelli incoerenti attraversati;
- 2) misura delle velocità sismiche dei primi 30 metri di sequenza mediante un'indagine MASW e due campagne HVSR – Tromino Engi, tarate sui risultati dei sondaggi geognostici.

I dati così raccolti hanno permesso di ricostruire la sequenza stratigrafica del terreno che caratterizza l'area su cui è stata costruita la cartiera.

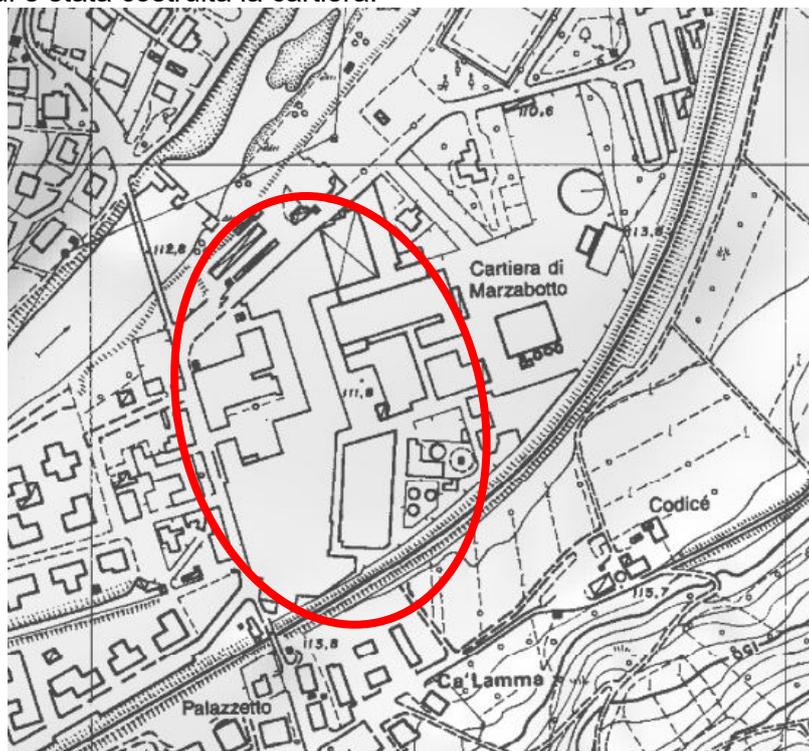


Fig. 1 – ubicazione dell'area su cartografia tecnica (dal sito web del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna)

Lex cartiera occupa un'ampia area posta tra l'alveo del Fiume Reno, che scorre a nord, e la linea ferroviaria che collega Bologna e Pistoia, ferrovia che segna i confini meridionale ed orientale dell'area industriale.

Dell'originale complesso produttivo, il Comune di Marzabotto ha da qualche anno acquistato la porzione occidentale, quella che ospitava i fabbricati destinati ad uffici, ad officine, oltre a depositi di combustibile, la centrale termica e diversi padiglioni entro i quali si svolgevano diverse fasi del processo industriale.

La porzione orientale dell'originale area industriale è invece occupata dalla DISMECO, un'azienda specializzata nello smaltimento e trattamento degli RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche).

Prendendo in considerazione la cartografia edita dalla Regione Emilia Romagna in scala 1:10.000 (Carta Tecnica Regionale), l'area ricade all'interno della sezione 237030 "Sasso Marconi" (si veda la fig.1).

Fase di studio:

- raccolta dati bibliografici, geologici e geognostici;
- rilevamento diretto delle caratteristiche dei terreni e dell'intorno della zona di interesse;
- elaborazione dati e stesura relazione finale

Lo studio è stato condotto in osservanza delle norme vigenti, in particolare delle NTC illustrate nel DM 17 gennaio 2018.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Geologia: l'area ricade all'interno di un ampio terrazzo alluvionale che si estende per una lunghezza di circa 1500 metri in corrispondenza di un'ansa del Fiume Reno, in destra idrografica. I sedimenti superficiali sono in prevalenza sabbiosi, limosi e limoso sabbiosi, passanti a depositi più francamente incoerenti (ghiaie e sabbie) appartenenti al sistema deposizionale dei terrazzi del Fiume Reno. **Formazione geologica:** Subsintema di Ravenna – Unità di Modena

Caratteristiche tessiturali, sedimentologiche e stratigrafiche sintetiche

AES - SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE

Ghiaie, sabbie, limi ed argille di piana intra-valliva, di conoide e di piana alluvionale.

Sintema parzialmente suddiviso in subsintemi limitati, in affioramento, da scarpate di terrazzo fluviale e paleosuoli e nel sottosuolo della pianura da bruschi contatti fra depositi fini alluvionali e palustri su depositi grossolani di conoide e di piana alluvionale. Dove AES non è suddivisa in subsintemi è costituita da depositi fini prevalentemente limoso-argillosi, intensamente pedogenizzati, con spessore massimo di 20 metri circa. Spessore massimo in pianura circa 300 m.

Pleistocene medio – Olocene.

AES8a – Unità di Modena

Nei settori intravallivi, da ghiaie prevalenti organizzate in 2 ordini di terrazzi alluvionali. Negli sbocchi vallivi e nella piana alluvionale ghiaie, sabbie, limi ed argille. Limite superiore sempre affiorante dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro privo di reperti archeologici romani, o più antichi, non rimaneggiati. Limite inferiore dato da una superficie di erosione fluviale nelle aree intra Spessore massimo in pianura 7 metri, nel sottosuolo circa 10m.

(Età post-romana (IV-VI sec. d.C. - Attuale; datazione archeologica).

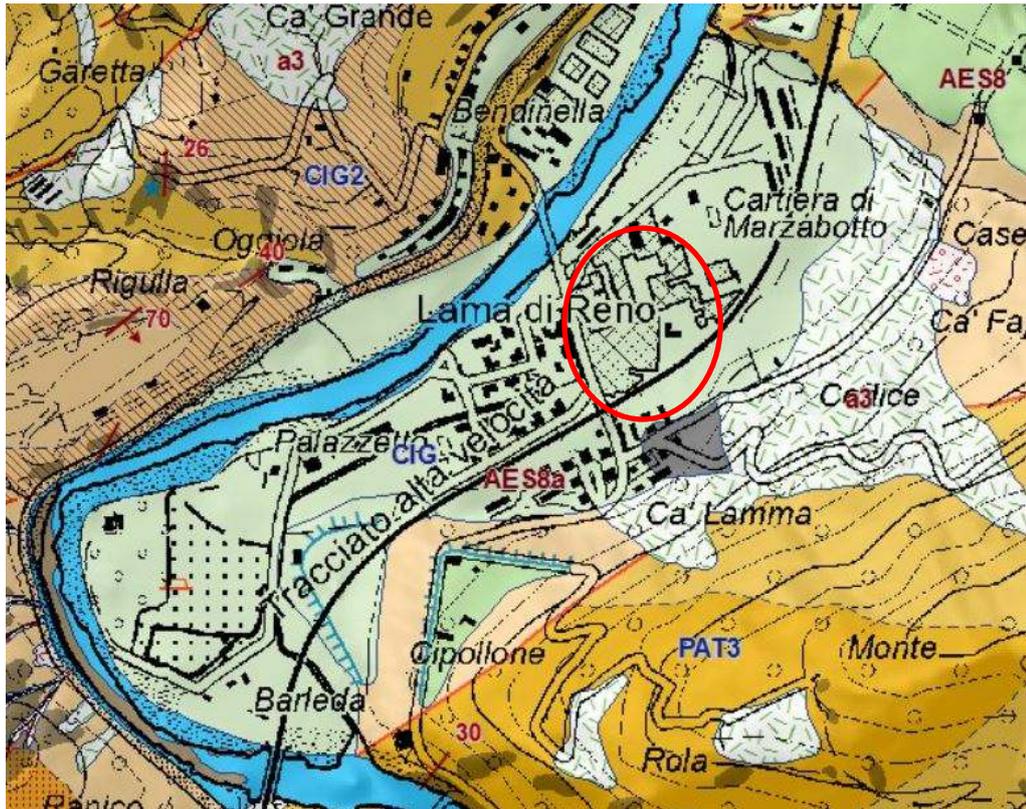


Fig. 2: ubicazione dell'area di studio su stralcio della Carta Geologica dell'Emilia Romagna alla scala 1:5.000 tratta dal sito della cartografia geologica on line della RER. Cartografia che evidenzia la presenza e l'estensione dei sedimenti attribuiti alle coperture quaternarie.



Fig. 3: ubicazione dell'area di studio su stralcio della Carta Geologica dell'Emilia Romagna alla scala 1:5.000 tratta dal sito della cartografia geologica on line della RER. Cartografia che evidenzia i confini stratigrafici tra le diverse Formazioni del substrato.

Al di sotto delle coperture quaternarie, come si può apprezzare nella Fig.3, nell'area in studio sono presenti litotipi riconducibili prevalentemente alla Formazione di Cigarello (**CIG**).

Questa è costituita da marne siltoso-sabbiose, talora argillose, grigie, grigio scure o beiges se alterate, bioturbate e fossilifere; sono presenti sia bioclasti che biosomi (Lamellibranchi, Gasteropodi, talora Echinidi). Stratificazione generalmente poco evidente per l'assenza di livelli grossolani e per la bioturbazione. Localmente affiorano intervalli di slump e di strati sottili arenaceo-pelitici tabulari con A/P < 1. Localmente, verso la base, possono essere presenti livelli discontinui di vulcanoclastiti ricche di cristalli millimetrici di biotite, o calcareniti grossolane giallastre in strati spessi. Ambiente di sedimentazione di piattaforma esterna e scarpata-bacino. Il limite inferiore è per alternanza o sfumato con PAT. Lo spessore varia da qualche decina di metri a circa 500 metri.
(Langhiano - Serravalliano)

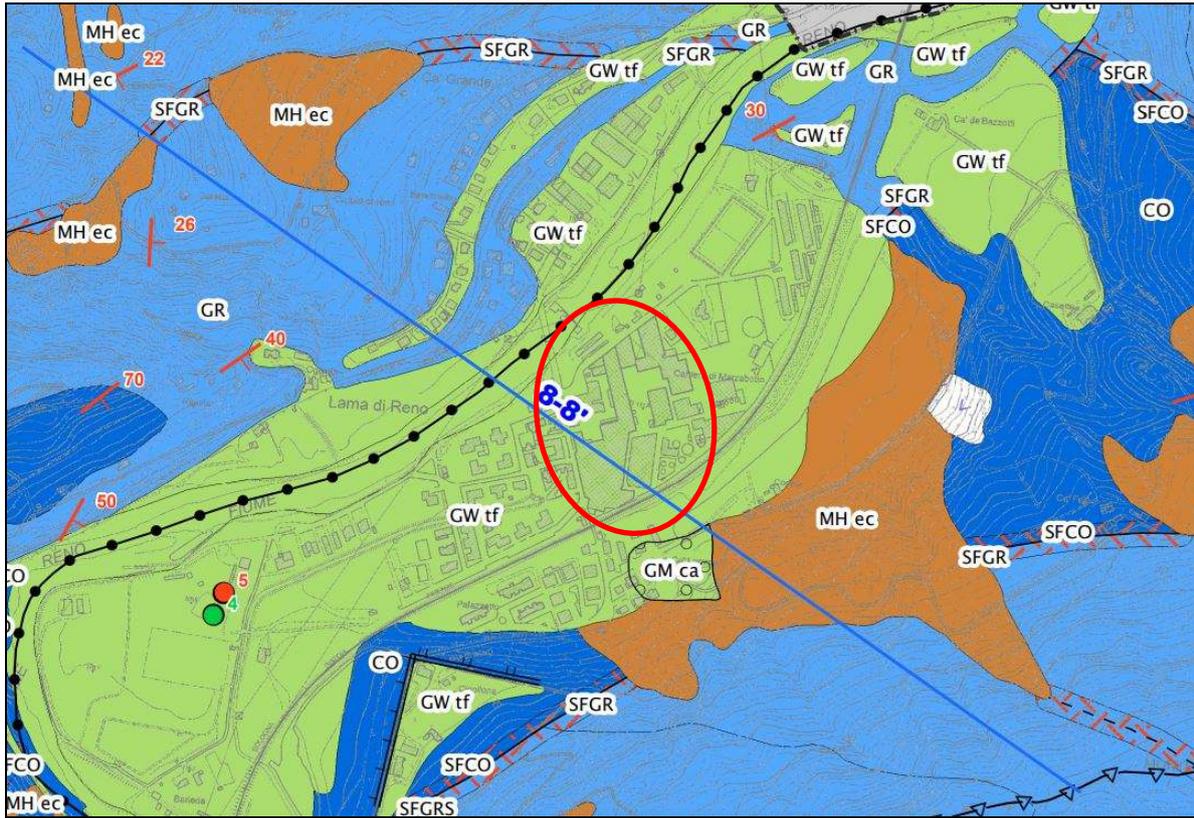
Una stretta fascia limitata alla porzione settentrionale dell'area dello stabilimento industriale è inserita tra quelle classificate come appartenenti alla Formazione di Pantano (**PAT**).

Si tratta di areniti siltose fini e finissime, grigie (beige se alterate), alternate a peliti marnose e siltose grigio-chiare; stratificazione generalmente poco marcata o addirittura impercettibile a causa dell'intensa bioturbazione, quando visibile di spessore medio; sono presenti resti di Echinidi, Gasteropodi e Lamellibranchi. Alla base talora affiorano delle areniti glauconitiche. Talora la parte alta degli strati arenacei è gradata e con laminazione ondulata. Localmente si intercalano strati arenacei risedimentati medi, mal strutturati, di colore nocciola. Verso l'alto affiorano livelli di marne siltose grigio-azzurre laminate. Il limite inferiore è netto, discordante, su CTG; talora la base è elisa tettonicamente. Sedimentazione in ambiente da litorale a piattaforma esterna. La potenza è fino a circa 500 m.

(Burdigaliano sup. - Langhiano inf)

Informazioni da bibliografia sulla geologia dell'area in studio sono disponibili nella relazione redatta a febbraio 2021 dallo Studio CENTROGEO di Correggio (RE) a supporto della Microzonazione Sismica del territorio comunale: "Modellazione e caratterizzazione geologico sismica e geotecnica". Nel testo, relativamente alla "Carta geologico tecnica" (la Fig. 4 mostra il particolare della zona in studio), si legge che questa è stata predisposta partendo "dalla cartografia geologica, rilevata alla scala 1:10.000, che costituisce la base per i fogli CARG 1:50.000 e dalla cartografia delle aree suscettibili di effetti locali: Tav 2C IV - V del P.T.C.P. della Provincia di Bologna, evidenzianti le condizioni del dissesto del territorio"; l'elaborato cartografico "è stato redatto integrando le sopra citate cartografie con i dati dei processi di dissesto acquisiti dal Servizio geologico e sismico R.E.R. aggiornati fine 2019, con rilievi diretti e con i dati ottenuti dalle indagini e prospezioni direttamente effettuate nella zona."

Dall'analisi della carta si evidenzia come l'area in esame presenta come terreni di copertura sedimenti incoerenti (ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaie e sabbie), riconducibili ad un ambiente genetico e deposizionale di terrazzo fluviale.



Figg.4: ubicazione dell'area di studio su stralcio della Carta Geologica tecnica allegata allo studio di Microzonazione sismica di febbraio 2021. La linea blu rappresenta la traccia della sezione geologica.

Morfologia e morfodinamica

La zona in cui ricade l'area di studio è quella tipica di un terrazzo alluvionale, caratterizzato da una superficie sostanzialmente pianeggiante, priva di rilievi e debolmente inclinata verso l'alveo del Fiume Reno che, con la sua azione erosiva/deposizionale, ha dato vita a queste particolari forme del territorio. Per queste sue intrinseche peculiarità queste aree sono state in passato oggetto di importanti interventi edificatori e di pieno sfruttamento delle superfici anche a scopo di incrementare e favorire la viabilità (in questo caso la linea ferroviaria Bologna Pistoia), azioni queste che hanno determinato una forzata antropizzazione con la conseguente cancellazione delle originali morfologie.

La quota topografica dell'area può essere indicata mediamente pari a circa 110 m slm.

Nelle zone acclivi che delimitano la fascia incisa dal corso del Fiume Reno sono presenti forme di dissesto di scarso rilievo, classificate quali "Depositi di versante" (a3), la cui attribuzione genetica permane incerta.

Idrogeologia generale

Nel corso dell'esecuzione dei sondaggi geognostici sono stati posizionati, al termine della perforazione e all'interno dei fori, tre piezometri del tipo NORTON allo scopo di verificare la presenza di un livello di falda.

Nei giorni successivi si è proceduto alla misura del livello piezometrico che è stato rinvenuto all'interno dei sedimenti incoerenti grossolani (ghiaie) a profondità comprese tra 4,0 e 4,5 metri dal pc.

La figura sottostante (foto satellitare) mostra l'ubicazione dei piezometri installati nel mese di agosto us.

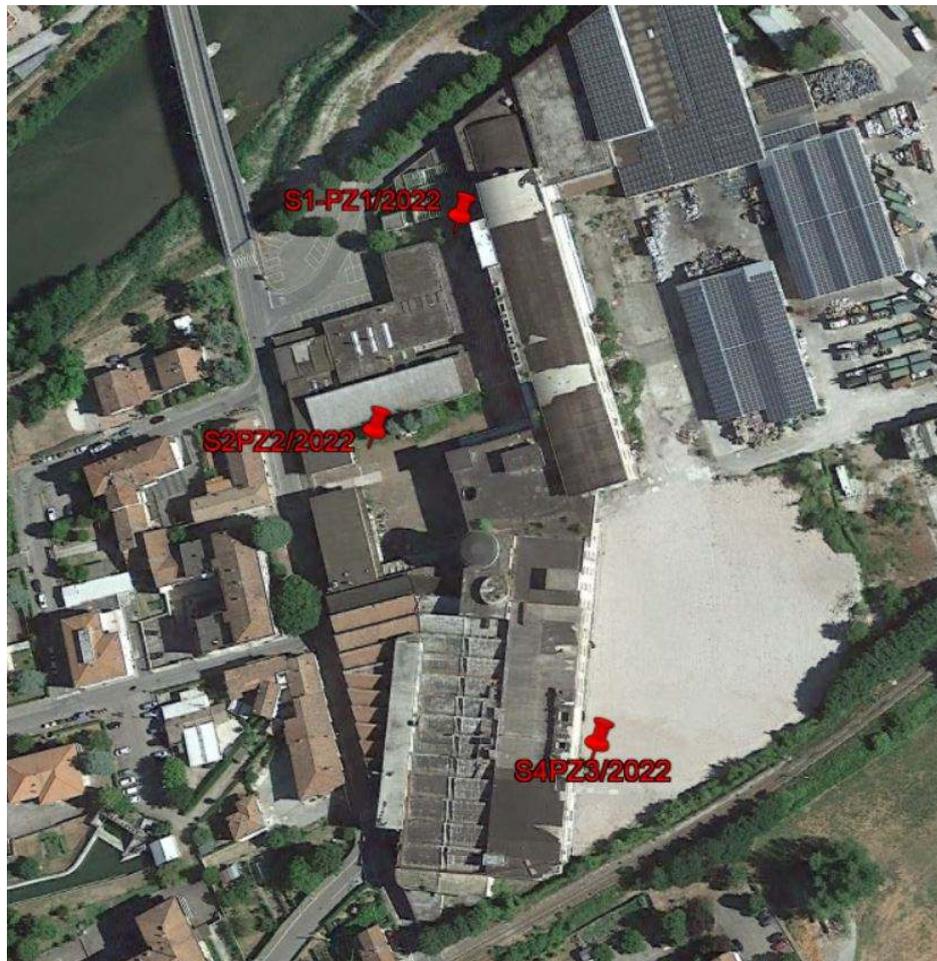


Fig. 5: ubicazione dei piezometri installati all'interno dell'area in studio.

Confrontando questi dati con le colonne stratigrafiche risultanti dalle perforazioni dei sondaggi è stato possibile verificare che lo spessore della falda non supera i 3 metri, avendo quale base impermeabile il tetto delle formazioni semilitoidi che si rinviene a profondità mediamente pari a 6 metri dal pc.

Nella tabella che segue vengono riportati i valori della profondità della falda rilevati con un'apposita sonda piezometrica: avendo avuto modo di misurare, con un buon grado di precisione, la quota slm dei singoli punti, è stato possibile ricavare la quota slm del tetto della falda.

Il confronto tra questi dati ha permesso di valutare come nelle giornate di misura il flusso delle acque sotterranee fosse verso nord, verso l'alveo del Fiume Reno che quindi funge da elemento drenante del sistema idrogeologico locale.

Tabella 1 – rilievi profondità falda

	data letture	profondità da orlo pozzetto (m)	quota slm testa pozzetto piezometro	quota slm falda
PZ1	16/08/2022	4,60	112,11	107,51
	19/08/2022	4,53		107,58
PZ2	16/08/2022	4,54	112,43	107,89
	19/08/2022	4,43		108,00
PZ3	16/08/2022	4,25	112,84	108,59
	19/08/2022	4,12		108,72

INDAGINI IN SITU

Data del rilievo: agosto 2022

Tipo di rilievo effettuato: geognostico e idrogeologico

Tipologia di prove geognostiche eseguite:

- n° 4 sondaggi a carotaggio continuo, spinti fino a profondità comprese tra 6,5 e 7,5 metri dal pc, effettuate in data 9 e 10 agosto 2022;
- N° 1 prova MASW e n°2 misura HSRV (tromino Engy) per la ricostruzione delle caratteristiche sismiche della sequenza litologica, eseguite in data 16 agosto 2022;

DESCRIZIONE DELLE INDAGINI E LORO METODOLOGIA

Al fine di valutare la successione stratigrafica ed il comportamento geotecnico dei terreni costituenti il primo sottosuolo dell'area in studio, è stata eseguita un'apposita indagine geognostica consistente in quattro sondaggi a carotaggio continuo utilizzando una sonda ELLETTARI. Le prove sono state distribuite in modo da coprire il più omogeneamente possibile l'intera estensione dell'area di progetto in funzione degli spazi disponibili. Lo scopo è stato quello di ottenere informazioni sufficientemente dettagliate per poter ricostruire, anche se in maniera schematica, il modello geologico del primo sottosuolo e per valutare le caratteristiche geomeccaniche dei possibili terreni di fondazione.

Per l'ubicazione delle prove geognostiche si vedano la planimetria di Fig. 6 e le foto che seguono.

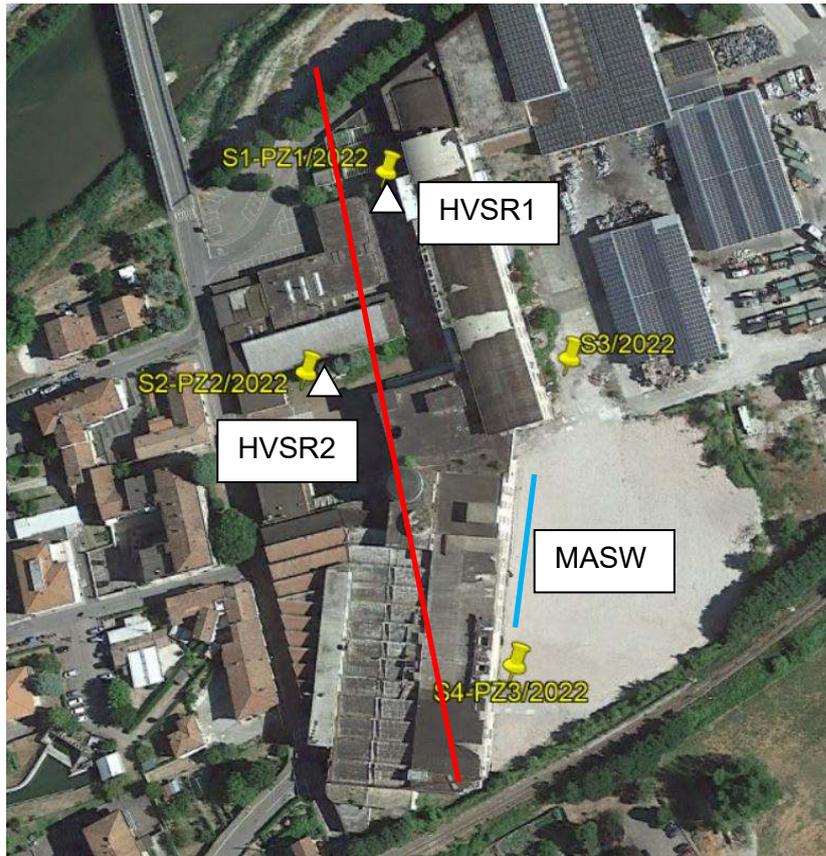


Fig.6: ubicazione dei sondaggi geognostici (in giallo), dell'indagine MASW (linea azzurra), delle prove HVSR (triangolo bianco) e traccia della sezione del modello geologico (linea rossa).



S1-PZ1/2022



S2-PZ2



S3



S4-PZ3

Fig.7: posizionamento della sonda in corrispondenza dei punti dei sondaggi geognostici.

METODOLOGIE DI PROVA

Sondaggio meccanico

L'indagine geognostica si è basata esclusivamente sull'esecuzione di sondaggi geognostici, scelta resasi obbligatoria avendo verificato da fonti bibliografiche la natura incoerente dei sedimenti presenti nel primo sottosuolo. Solo con questo metodo è stato possibile infatti attraversare e recuperare in superficie i terreni che caratterizzano la successione stratigrafica: le aliquote che vengono portate alla luce sono conservate all'interno di specifiche cassette catalogatrici che ne consentono il trasporto e la conservazione in ambienti al chiuso, a disposizione per eventuali successive verifiche.

All'interno del foro, durante la perforazione, è stato possibile eseguire prove del tipo SPT (Standard Penetration Test) che permettono di acquisire dati numerici relativi alla resistenza alla penetrazione di una punta sollecitata da una massa battente: in questo modo è possibile ricavare parametri geomeccanici di sedimenti grossolani (sabbie e ghiaie) addensati o semilitoidi altrimenti non ottenibili con altre tecniche di indagine.

ANALISI DEI RISULTATI

RISULTATI DELL'INDAGINE GEOGNOSTICA

Come evidenziato in precedenza, i sondaggi geognostici a carotaggio continuo hanno permesso di ricostruire la successione stratigrafica del primo sottosuolo: le tabelle seguenti riportano, schematizzate, le colonne litologiche.

SONDAGGIO S1-PZ1/2022

Prof. Strato (m)	Descrizione Litologica	Comp. Geotecnico
1,10	Riporto	
2,00	Sabbia fine debolmente limosa	Incoerente/Coesivo
6,30	Ghiaia in matrice limoso sabbiosa	Incoerente
6,80	Substrato semilapideo	Coesivo/Incoerente

SONDAGGIO S2-PZ2/2022

Prof. Strato (m)	Descrizione Litologica	Comp. Geotecnico
0,20	Pavimentazione in blocchetti di porfido e sottofondo	
1,80	Riporto	
3,00	Sabbia grossolana	Incoerente
6,30	Ghiaia in matrice limoso sabbiosa	Incoerente
6,80	Substrato semilapideo	Coesivo/Incoerente

SONDAGGIO S3/2022

Prof. Strato (m)	Descrizione Litologica	Comp. Geotecnico
0,20	Asfalto e sottofondo	
0,80	Riporto	
1,50	Limo e limo sabbioso	Coesivo
3,50	Sabbia fine debolmente limosa	Incoerente/Coesivo
5,00	Ghiaia in matrice limoso sabbiosa	Incoerente
6,50	Substrato semilapideo	Coesivo/Incoerente

SONDAGGIO S4-PZ3/2022

Prof. Strato (m)	Descrizione Litologica	Comp. Geotecnico
0,60	Macerie da demolizione	
1,50	Riporto	
2,40	Sabbia grossolana con ciottoli	Incoerente
3,50	Sabbia medio/fine debolmente limosa	Incoerente/Coesivo
6,80	Ghiaia in matrice limoso sabbiosa	Incoerente
7,50	Substrato semilapideo	Coesivo/Incoerente

Di seguito viene riportata la documentazione fotografica che mostra la successione stratigrafica attraversata con i diversi sondaggi.

In allegato vengono fornite le colonne stratigrafiche dei sondaggi con una dettagliata descrizione dei singoli livelli e i risultati delle prove eseguite in situ sulle carote campionate, utilizzando il pocket penetrometer e lo scissometro, oltre all'indicazione dei risultati delle prove SPT.



Sondaggio S1-PZ1/2022 – intervallo di profondità 0.0÷5.0 metri dal pc



Sondaggio S1-PZ1/2022 – intervallo di profondità 5.0÷10.0 metri dal pc



Sondaggio S2-PZ2/2022 – intervallo di profondità 0.0÷5.0 metri dal pc



Sondaggio S2-PZ2/2022 – intervallo di profondità 5.0÷10.0 metri dal pc



Sondaggio S3/2022 – intervallo di profondità 0.0+5.0 metri dal pc



Sondaggio S3/2022 – intervallo di profondità 5.0+10.0 metri dal pc



Sondaggio S4-PZ3/2022 – intervallo di profondità 0.0÷5.0 metri dal pc



Sondaggio S4-PZ3/2022 – intervallo di profondità 5.0÷10.0 metri dal pc

Rilievo della falda

Come riportato in un precedente capitolo, all'interno del foro di tre dei quattro sondaggi geognostici sono stati installati piezometri di tipo NORTON spinti fino a fondo foro: letture eseguite nei giorni seguenti il completamento dell'indagine geognostica hanno evidenziato la presenza del livello della falda a profondità comprese tra 4.0 e 4.5 metri circa dal pc.

PARAMETRI GEOMECCANICI

Gli unici parametri geomeccanici che sono stati ricavati derivano dall'esecuzione, a diverse profondità, delle prove SPT nel corso dell'esecuzione dei sondaggi geognostici a carotaggio continuo.

La tabella seguente riporta sinteticamente i risultati ottenuti oltre ai valori di alcuni dei parametri più significativi ricavati dalla loro interpretazione. I valori di $N_{30 \text{ spt}}$ sono già corretti in funzione della profondità di esecuzione della prova.

Sigla	Profondità	$N_{30 \text{ spt}}$	Litologia	C/A	Dr	ϕ
S1-PZ1/2022	2.50	29	Ghiaia	Addensata	73	36
S1-PZ1/2022	5.00	68	Ghiaia	Molto addensata	90	40
S2-PZ2/2022	3.00	48	Ghiaia e sabbia	Molto addensata	85	39
S2-PZ2/2022	5.50	rif	Ghiaia	Molto addensata	100	43
S3/2022	4.00	20	Ghiaia	Addensata	60	32
S4-PZ3/2022	4.50	25	Ghiaia	Addensata	65	33
S4-PZ3/2022	7.50	rif	Substrato	Molto compatto/accensato	100	43

C/A = Consistenza/ Addensamento rispettivamente per terreni coesivi o incoerenti, Dr = densità relativa (%), ϕ = angolo di attrito interno (°)

MODELLO GEOLITOLOGICO DEL SOTTOSUOLO

Dall'interpretazione e dalla comparazione dei dati ricavati dalle indagini geognostiche è stato possibile ricostruire il modello litostratigrafico del primo sottosuolo nell'area oggetto di studio.

Lo schema allegato, mostra come lungo la direzione S-N la successione stratigrafica appare essere piuttosto uniforme all'interno dell'area indagata: i sedimenti sono per lo più a tessitura grossolana (ghiaie prevalenti con sabbie grossolane o fini).

Come schematizzato nella sezione di Fig. 8, la successione stratigrafica è costituita in superficie da terreni di riporto distribuito abbastanza uniformemente sulla quota del piano di calpestio originale: lo spessore di questo deposito varia tra 1,0 e 1,8 metri. Si segnala che in corrispondenza della porzione meridionale ed orientale dell'area in studio sono stati distribuiti sul piano di campagna esistente durante gli anni dell'esercizio dell'attività produttiva i resti delle operazioni di demolizione di alcuni fabbricati che sorgevano proprio in corrispondenza di quell'area. Lo spessore uniforme aggiunto è quantificabile in circa 60-70 cm.

Sotto lo strato di riporto compaiono sedimenti incoerenti/coesivi costituiti da sabbie e sabbie limose che hanno uno spessore pari a circa 1 metro nella porzione settentrionale, tendente ad aumentare fino a circa 2 metri spostandosi verso sud.

A profondità dal pc comprese tra 2 metri e 3,5 metri dal pc (anche in questo caso in aumento passando dalla porzione settentrionale a quella meridionale) compare il tetto dei sedimenti più francamente incoerenti (ghiaie in scarsa matrice sabbioso limosa): questi sedimenti hanno spessori compresi tra 3,3 e 4,3 metri (al contrario di quanto evidenziato in precedenza, per questi sedimenti lo spessore tende ad aumentare spostandosi da sud verso nord).

Il tetto del substrato semilapideo dei terreni riconducibili alla Formazione di Cigarellino si rinviene ad una profondità piuttosto omogenea lungo la traccia della sezione, corrispondente a circa 6,5 metri dal pc.

Tra gli allegati alla Relazione della Microzonazione sismica redatta dallo Studio CENTROGEO di Correggio (RE), documento citato in precedenza, vi sono una serie di sezioni geologiche che mostrano l'andamento dei contatti stratigrafici/tettonici tra le diverse Formazioni che sono presenti all'interno del territorio comunale: tra queste, la sezione 8-8', ad andamento NW-SE, passa proprio in corrispondenza dell'area della ex cartiera oggetto del presente documento (si veda la Fig.4).

Lo stralcio di questa sezione che più direttamente interessa la ex cartiera viene riportato in Fig.9

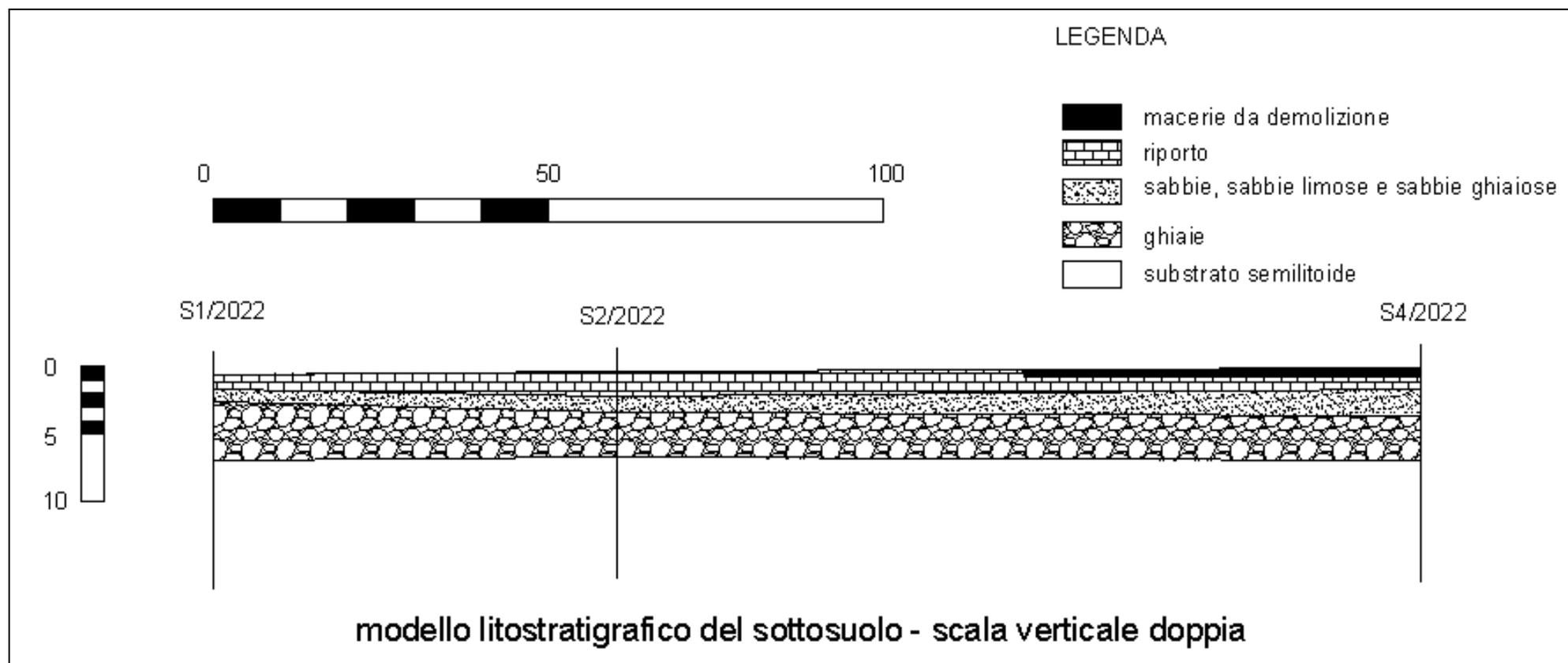


Fig. 8: sezione litostратigrafica

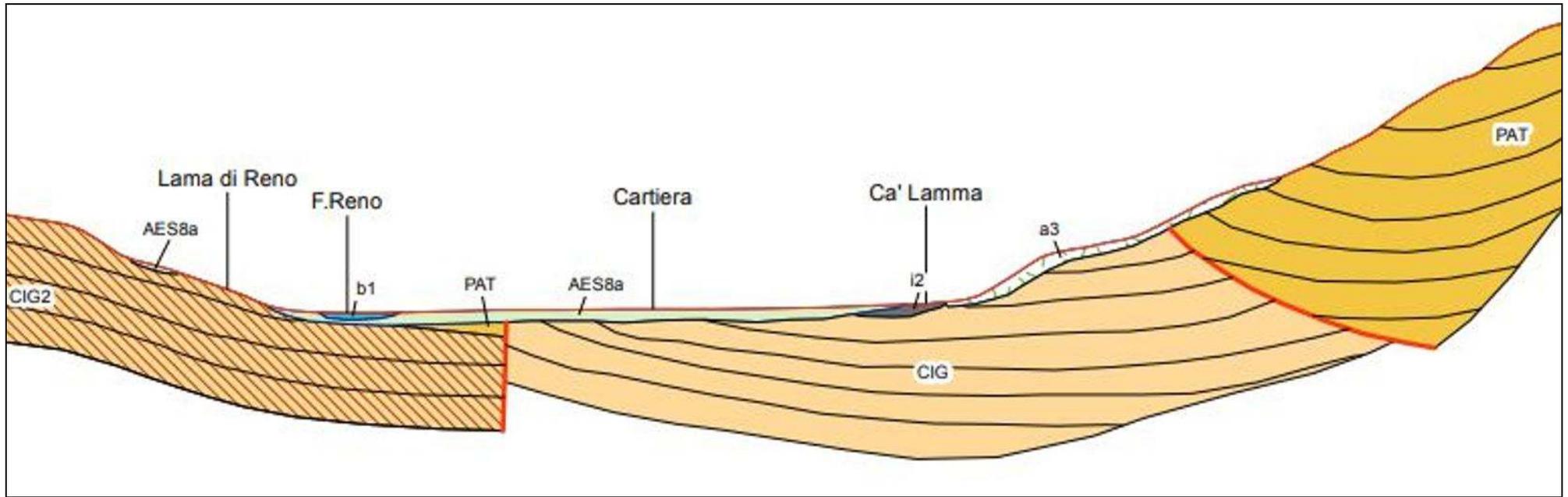


Fig. 9: sezione geologica: estratto dalla sezione 8-8' allegata alla relazione della Microzonazione Sismica del territorio comunale di Marzabotto.

Nella sezione di Fig. 9, che sostanzialmente conferma l'interpretazione dei dati acquisiti in situ mediante i sondaggi a carotaggio continuo, si evidenzia la presenza di una faglia verticale che segna il contatto tettonico tra i sedimenti della Formazione di Cigarello (CIG) e quelli del Membro di Monte Luminasio della stessa Formazione (CIG2). Questa faglia a sviluppo antiappenninico, potrebbe aver svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo del corso del Fiume Reno.

DETERMINAZIONE DEI VALORI GEOMECCANICI CARATTERISTICI PER IL PROGETTO
Procedura per ricavare i valori caratteristici mediante l'analisi statistica per parametri che seguono distribuzione normale (ϕ , γ).

Secondo quanto definito del decreto del 17/01/2018, per la ricostruzione delle caratteristiche geomeccaniche di riferimento dei vari intervalli riconosciuti nella sequenza, si è proceduto alla correlazione dei principali intervalli che costituiscono la sequenza e, quindi, alla individuazione dei valori di angolo di attrito interno, coesione e peso di volume per ognuno di tali intervalli.

Per il calcolo dei principali parametri caratteristici si fa riferimento alla trattazione del Dott. Geol. Luca Nori presentata in occasione del Corso di Aggiornamento Professionale tenutosi il 3 aprile 2009 dal titolo "Caratterizzazione geotecnica e parametri di progetto secondo l'EC 7 e 8 ed il D.M. 14 Gennaio 2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni". Tale giornata di studi è stata organizzata dall'Ordine dei Geologi della Regione Emilia-Romagna, Consulta delle province di Reggio Emilia e Modena.

Di seguito vengono riportati due schemi (elaborati dal Dott. Geol. Paolo Dal Pian) che sintetizzano la procedura e le formule utilizzate per il calcolo dei parametri caratteristici.

Procedura per ricavare i valori caratteristici mediante l'analisi statistica per parametri che seguono distribuzione normale (μ, γ)		
Superficie di rottura grande con compensazione spaziale o strutturale A o B (platea, fondazioni nasstriformi non piccole)	I dati sono "non pochi" (orientativamente $n \geq 5$)	Si ipotizza media campione = media popolazione (controllando la congruenza!)
	Il dato è uno solo, o pochi (orientativamente $n < 5$)	Si ipotizza media campione = valore del singolo dato o media popolazione (controllando la congruenza!)
Superficie di rottura piccola senza compensazione spaziale o strutturale C (pali, piccoli pilinti, rottura locale)	I dati sono "non pochi" (orientativamente $n \geq 5$)	Si ipotizza media campione = media popolazione (controllando la congruenza!)
	Il dato è uno solo, o pochi (orientativamente $n < 5$)	Si ipotizza media campione = valore del singolo dato o media popolazione (controllando la congruenza!)

Procedura per ricavare i valori caratteristici mediante l'analisi statistica per parametri che seguono distribuzione log-normale (Cu, c', E, altri)		
Superficie di rottura grande con compensazione spaziale o strutturale A o B (platea, fondazioni nastriformi non piccole)	I dati sono "non pochi" (orientativamente n ≥ 5)	Si ipotizza media campione = media popolazione (controllando la congruenza!) Si applica il metodo conservativo di Angus: $L_{1-\alpha}(\bar{Y}, S^2) = \bar{Y} + \frac{S^2}{2} - \frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1)}{\sqrt{n}} * \sqrt{S^2 \left(1 + \frac{S^2}{2}\right)}$ dove: <input type="checkbox"/> valore medio del dataset con distribuzione lognormale z distribuzione normale standardizzata t valore della distribuzione di Student ad n-1 gradi di libertà S deviazione standard del campione n numero di dati
	Il dato è uno solo, o pochi (orientativamente n < 5)	Si ipotizza media campione = valore del singolo dato o media popolazione (controllando la congruenza!) Si ipotizza variabilità nota (dati di letteratura o esperienza individuale: six-sigma) Si applica il metodo di Cox: $L_{1-\alpha}(\bar{Y}, S^2) = \bar{Y} + \frac{S^2}{2} \pm z_{1-\frac{\alpha}{2}} * \sqrt{\frac{S^2}{n} + \frac{S^4}{2(n-1)}}$ dove: <input type="checkbox"/> valore medio del dataset con distribuzione lognormale z distribuzione normale standardizzata t valore della distribuzione di Student ad n-1 gradi di libertà S deviazione standard del campione n numero di dati
Superficie di rottura piccola senza compensazione spaziale o strutturale C (pali, piccoli plinti, rottura locale)	I dati sono "non pochi" (orientativamente n ≥ 5)	Si ipotizza media campione = media popolazione (controllando la congruenza!) Si applica la formula opportuna con un foglio di calcolo: INV.LOGNORM(0.05, media log dati, media SD log dati)
	Il dato è uno solo, o pochi (orientativamente n < 5)	Si ipotizza media campione = valore del singolo dato o media popolazione (controllando la congruenza!) Si ipotizza variabilità nota (dati di letteratura o esperienza individuale: six-sigma)
		Si applica la formula opportuna con un foglio di calcolo: INV.LOGNORM(0.05, media SD) con le trasformazioni opportune (*)

• Formule di trasformazione per trovare il valore caratteristico con distribuzioni log-normali e un singolo dato o pochi dati, piccola superficie di rottura

$$\sigma_{\log n} = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_{\text{norm}}^2}{\mu_{\text{norm}}^2} \right)} \quad \mu_{\log n} = \ln(\mu_{\text{norm}}) - \frac{\sigma_{\log n}^2}{2} \quad \text{dove:}$$

σ_{norm}^2 = varianza nota da letteratura o da esperienza

μ_{norm}^2 = valore del singolo dato o della media dei (pochi) dati

Con un foglio di calcolo: $X_k = \text{INV.LOGNORM}(0.05, \sigma_{\log n}, \mu_{\log n})$

Valori di riferimento per il progetto

I parametri geomeccanici riportati nelle tabelle sono da considerarsi quali caratteristici dei terreni presenti nel primo sottosuolo dell'area in esame.

I dati ricavati in situ caratterizzano l'intervallo costituito da sedimenti grossolani (ghiaie) posti a contatto con il substrato.

Lo spessore di questi sedimenti è compreso tra 3.3 e 4.3 metri, ad eccezione del sondaggio S2, nel quale si riduce in maniera significativa, risultando non superiore a 1.5 metri.

I risultati delle SPT nelle ghiaie sembrano evidenziare una divisione dello spessore complessivo in due porzioni, aventi caratteristiche di addensamento e geomeccaniche differenti: un livello superficiale meno addensato ed un secondo, più profondo e più addensato. Ad ognuno dei due livelli è stato attribuito uno spessore variabile tra 1,5 e 2,0 metri.

Lo strato di ghiaie rinvenuto nel sondaggio S3 è stato equiparato al livello superficiale meno addensato.

Per quanto riguarda il substrato semilapideo, i parametri riportati in tabella sono stati ricavati attribuendo a questi sedimenti un comportamento assimilabile a quello di terreni incoerenti.

Nella tabella che segue vengono riportati i valori caratteristici relativi agli intervalli distinti.

Definizione intervallo	Sondaggio – intervallo di profondità (m da pc)	Densità (%)	$\Phi_k(^{\circ})$
Ghiaie – livello superficiale	S1 - 2.0÷4.0	65	33
	S2 - 3.0÷4.5		
	S3 - 3.5÷5.0		
	S4 - 3.5÷5.0		
Ghiaie – livello profondo	S1 - 4.0÷6.3	85	41
	S2 - 4.5÷6.3		
Substrato semilapideo	S4 - > 6.8	95	42

I dati sopra indicati derivano da una trattazione statistica e dovranno essere attentamente valutati dal tecnico progettista.

ANALISI SISMICA A SCALA DI AREA VASTA

L'analisi che segue è stata condotta secondo le indicazioni contenute nel DM 17/1/2018 con i relativi allegati e circolari applicative.

In via preliminare si è ritenuto importante evidenziare che il territorio comunale di Marzabotto si colloca interamente all'interno della Zona Sismogenetica 913 (Dorsale Ferrarese).

Zona Sismogenetica 913: rappresenta la porzione più esterna della fascia in compressione dell'Appennino Settentrionale caratterizzata dallo sprofondamento passivo della litosfera adriatica (placca tettonica "Adria") sotto il sistema di catena nell'Arco Appenninico Settentrionale (placca tettonica "Northern Apenninic Arc") con cinematismi attesi di sovrascorrimenti e faglie trascorrenti aventi assi SW-NE; i terremoti storici hanno raggiunto valori pari a $M = 5,9$; le zone ipocentrali si verificano generalmente a profondità comprese tra 6 e 8 Km con profondità efficace di 7 km; nella Zona Sismogenetica 912 è previsto, sulla base dei meccanismi focali, valori di massima magnitudo pari a $M_{max} = 6,14$.

Pericolosità sismica

La pericolosità e il rischio sismico del territorio nazionale sono stati affrontati dal Servizio Sismico Nazionale (SSN), utilizzando il calcolo probabilistico di Cornell, risalente alla fine degli anni '60, in grado di considerare tutte le possibili sorgenti influenzanti il moto del terremoto.

Il Servizio Sismico Nazionale, per tutto il territorio nazionale, ha elaborato la pericolosità sismica di base di cui al DM 14.1.2008 che rappresenta l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

La pericolosità sismica di base è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa ag in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR, nel periodo di riferimento VR.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- ag accelerazione orizzontale massima al sito;
- Fo valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale.
- T*C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Le stazioni di riferimento che quantificano la pericolosità sismica di base per il territorio comunale di Marzabotto consentono di verificare che il territorio comunale presenta i seguenti dati di pericolosità (Figura 10):

- accelerazione di picco per suoli di tipo A con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni per un periodo di ritorno di 475 anni. $PGA = 0,150 - 0,175$;

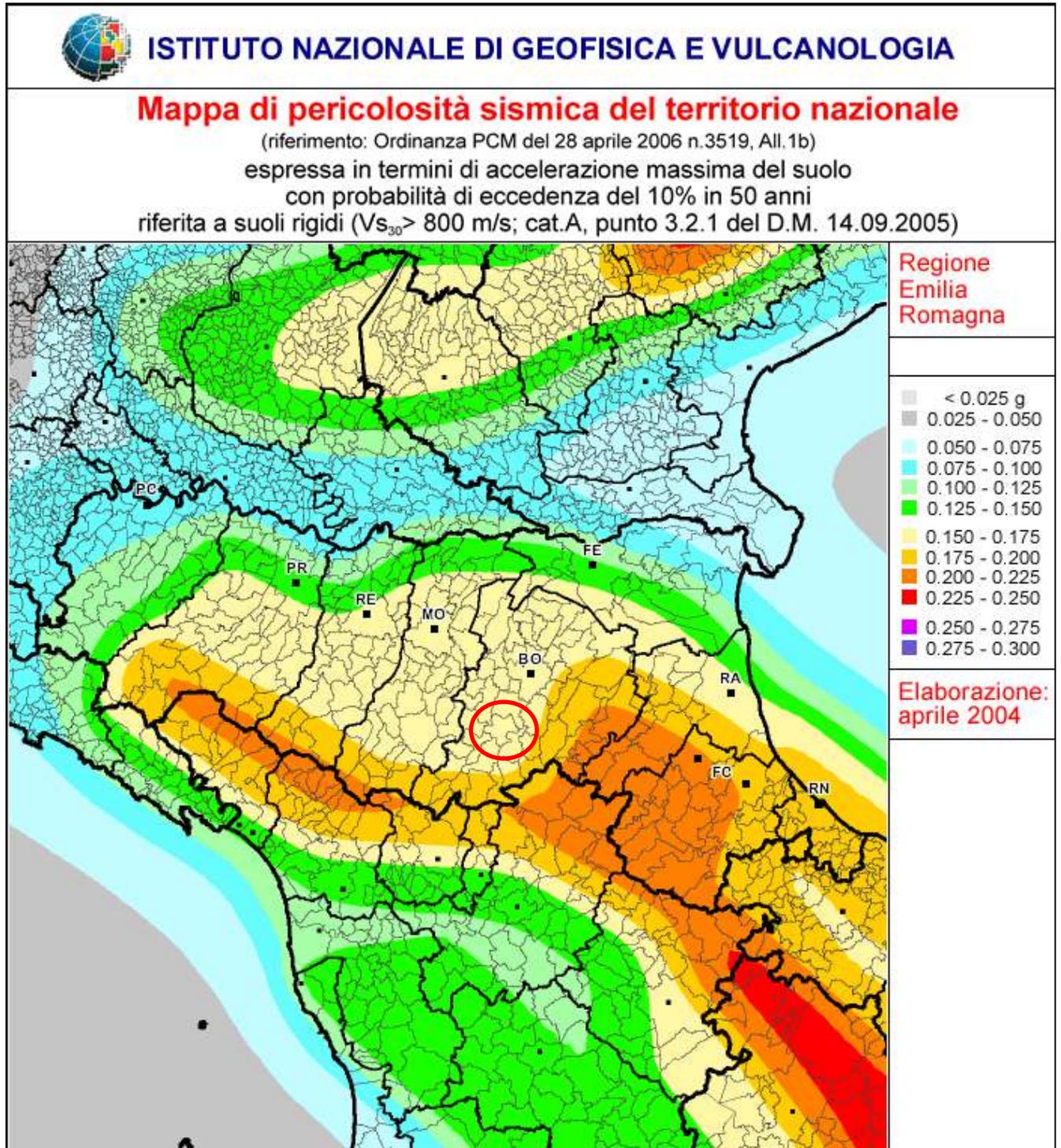
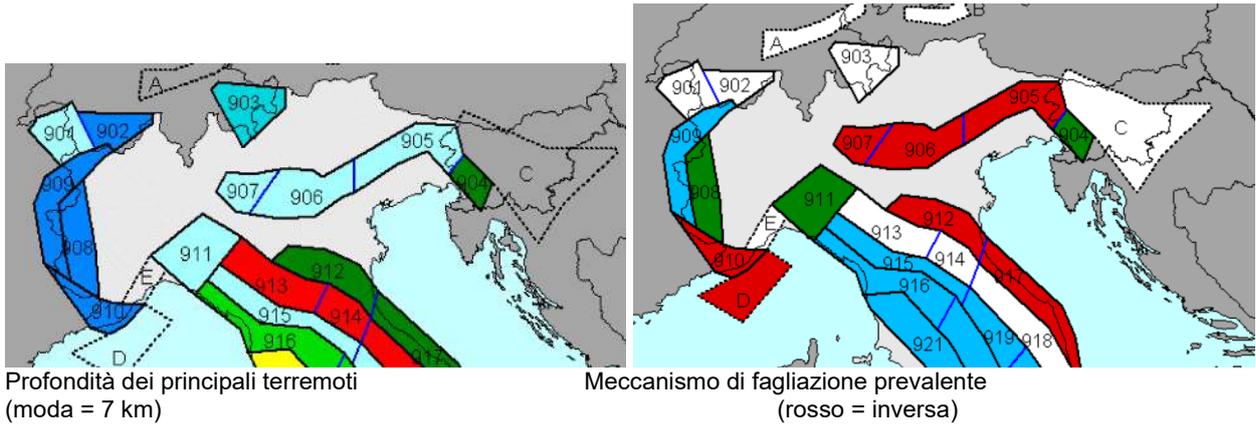


Fig. 10: pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3519 del 28 aprile 2006; dal sito INGV

Le sottostanti figure inquadrano la zona di studio all'interno della zonazione sismogenetica ZS9 e sono tratte dall'Appendice 2 al Rapporto conclusivo a Cura di C. Meletti e G. Valensise (Marzo 2004).



Le figure mettono in luce come nella zona sorgente 913, quella in cui ricade il territorio comunale di Marzabotto, denominata “Appennino Emiliano Romagnolo”, sia caratterizzata da eventi aventi le caratteristiche indicate nello specchio, tratti dall’atlante della sismicità strumentale (1983 – 2002) dell’INGV e rielaborati statisticamente per la definizione delle caratteristiche sismogenetiche. La zona sorgente 913 rappresenta una fascia di transizione nella quale convivono meccanismi di fagliazione diversi, essenzialmente compressivi a Nord-Ovest e distensivi a Sud-Est.

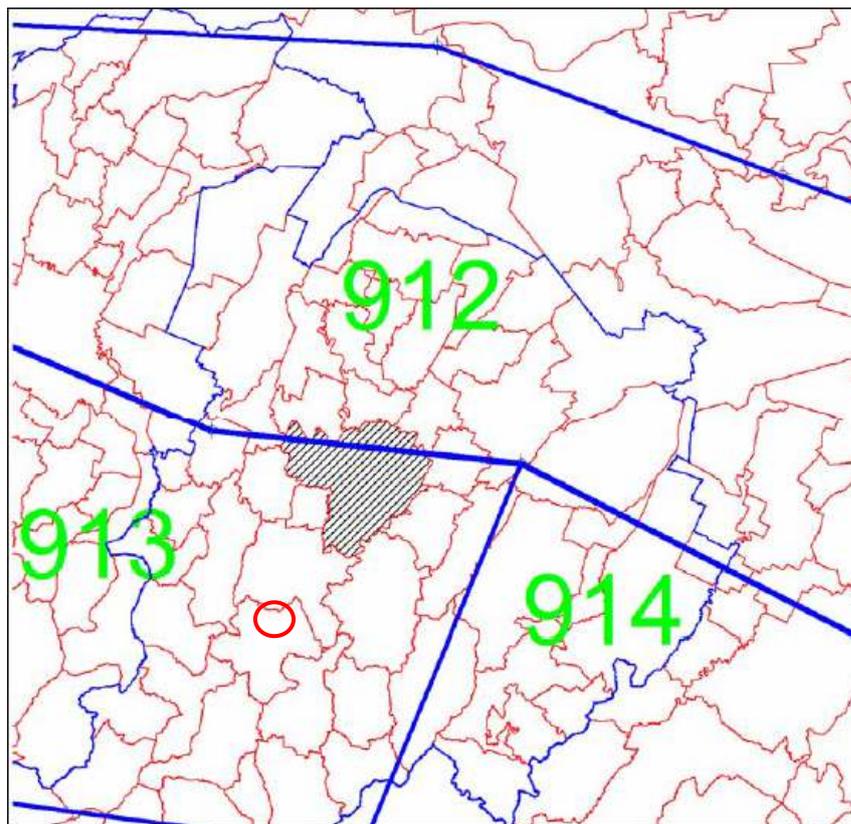


Fig.11: dettaglio della zonizzazione sismogenetica del territorio comunale di Marzabotto

La tabella seguente schematizza alcuni dati sismici della zona sismica nella quale è inserito il territorio del comune di Marzabotto.

Zona	Numero eventi Md>2	Numero eventi Md>2	Numero eventi Md>2	Magnitudo massima Md	Classe di profondità (km)	Profondità efficace (km)
912	180	141	54	4.6	5-8	7
913	767	362	100	4.8	12-20	13

I dati caratteristici della sismicità hanno consentito di classificare secondo i criteri della vecchia normativa l'intero territorio nazionale: il comune di Marzabotto, e dunque il lotto di progetto ricade in zona sismica 3, caratterizzata da un rapporto $A/g = 0,15$ (sismicità bassa).

In riferimento ai dati nell'allegato A4 della Delibera della Giunta Regionale Emilia Romagna n° 30/2019, alla zona sismogenetica del territorio comunale di Marzabotto compete un valore dell'accelerazione orizzontale media dello spettro di risposta elastico, corrispondente a:

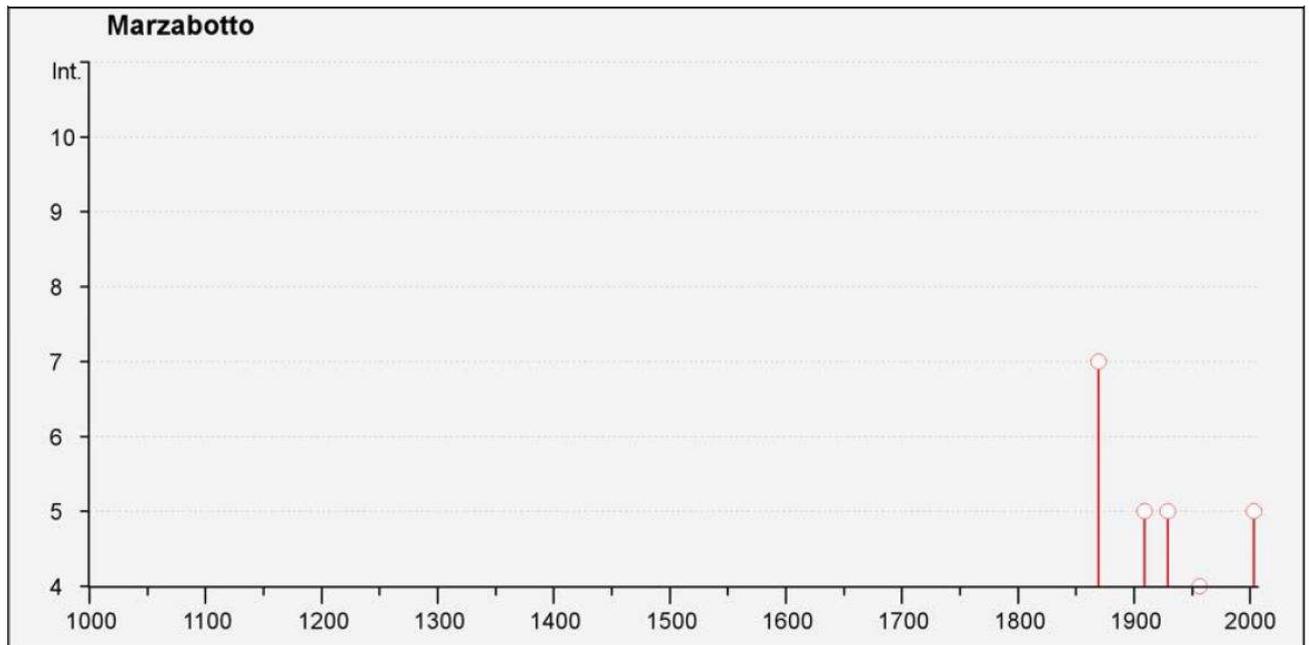
Marzabotto $agref = 0,161 g$

ANALISI SISMICA STORICA

La seguente figura con la relativa tabella mostrano i principali terremoti registrati a Marzabotto con I_s superiore a 5.

I dati sono desunti dalla seguente pubblicazione:

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. *CPT115, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT115>



Storia sismica di Marzabotto Numero di eventi: 7					
Effetti	In occasione del terremoto del:				
I[MCS]	Data	Ax	Np	Io	Mw
7	1869 06 25 13:58	Media valle del Reno	18	7-8	5.42 ±0.48
5	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	799	6-7	5.53 ±0.09
5	1929 04 20 01:09	Bolognese	109	7	5.34 ±0.13
4	1956 04 26 03:00	Appennino tosco-emiliano	75	6	4.77 ±0.14
NF	1986 12 06 17:07	BONDENO	604	6	4.61 ±0.10
NF	1992 04 17 11:59	Monteveglia	56	4-5	4.32 ±0.18
5	2003 09 14 21:42	Appennino bolognese	133	6	5.29 ±0.09

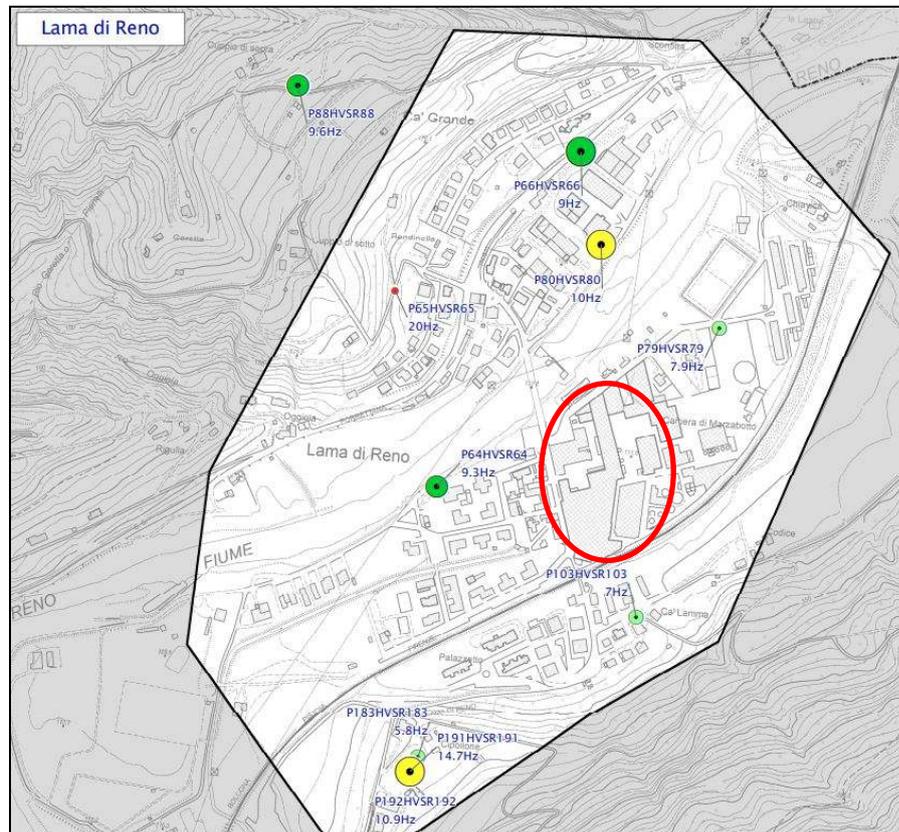
Fig.12: storia sismica del Comune di Marzabotto (dal Database Macrosismico Italiano – DBMI 15 V4.0 – INGV)

ANALISI SISMICA A SCALA LOCALE

I dati presentati consentono di definire il modello sismico del suolo alla scala vasta. Il passo successivo consiste nel calare tali dati nella specifica area di intervento.

Informazioni sui principali parametri sismici del territorio in esame si possono recuperare nelle tavole allegate al citato studio di Microzonazione Sismica del 2021: di seguito vengono proposti stralci relativi agli elaborati cartografici prodotti per la Microzonazione Sismica di I° e II° livello.

Carta delle frequenze naturali del terreno



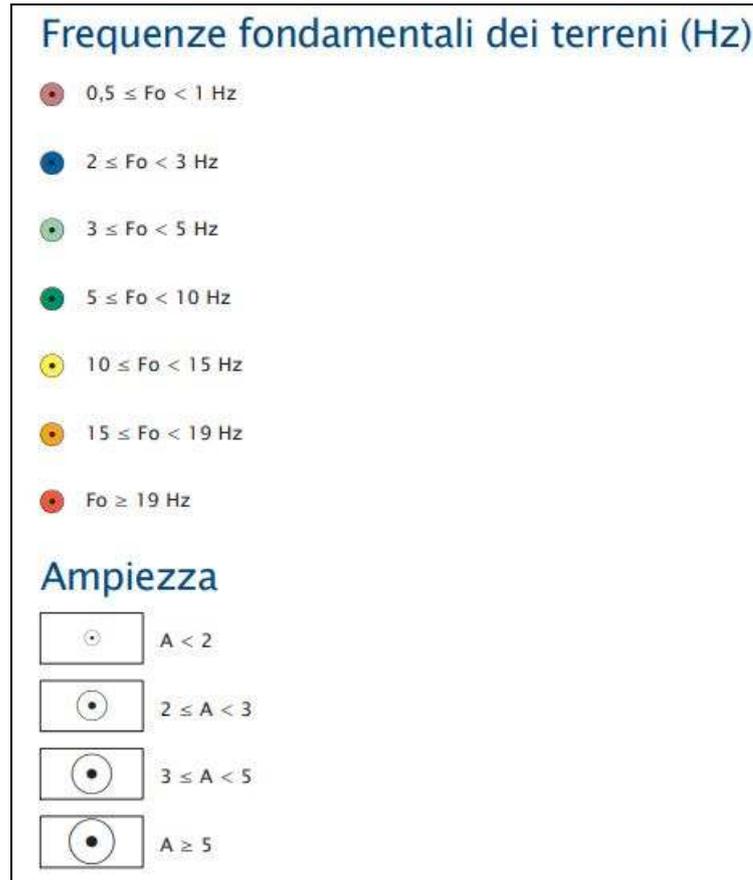
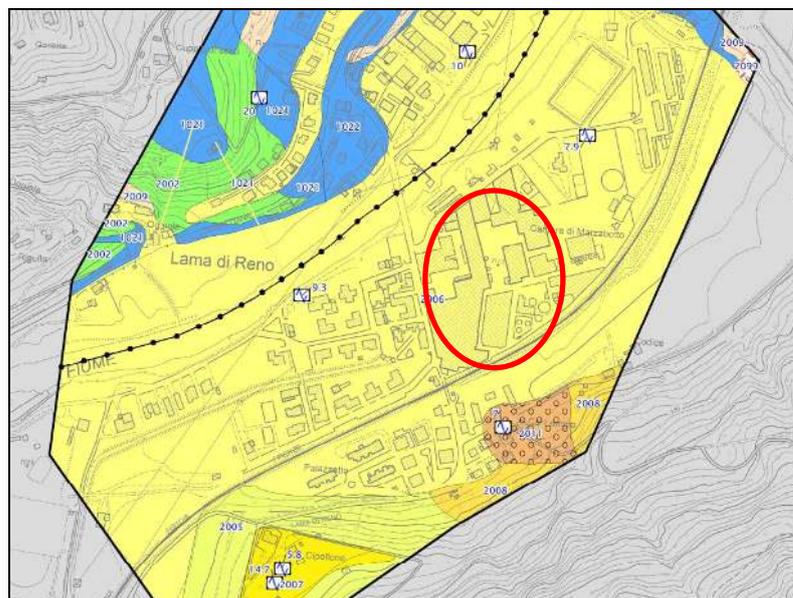


Fig.13: estratto dalla Carta delle frequenze naturali del terreno – Microzonazione Sismica 2021

La cartografia evidenzia come all'interno dell'area della ex cartiera non fossero state eseguite indagini in grado di determinare il valore di questo parametro: nei dintorni le indagini hanno indicato valori compresi tra 7 e 9 Hz. In occasione della redazione del presente documento, le indagini di tipo HVSr hanno confermato questo dato: il valore ricavato in corrispondenza delle due prove eseguite è stato pari a circa 8 Hz (si veda la relazione sismica allegata).

Microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)



2006	Depositi alluvionali ghiaioso sabbiosi ben assortiti di spessore da 9 a 15 m e $V_s = 250 \div 420$ m/sec su substrato arenitico-arenaceo pelitico, talora conglomeratico stratificato o marnoso siltoso non stratificato con $V_s < 750$ m/sec.
------	--

Fig.14: estratto dalla Carta delle Microzone Omogenee in prospettiva sismica (MOPS) – Microzonazione Sismica 2021

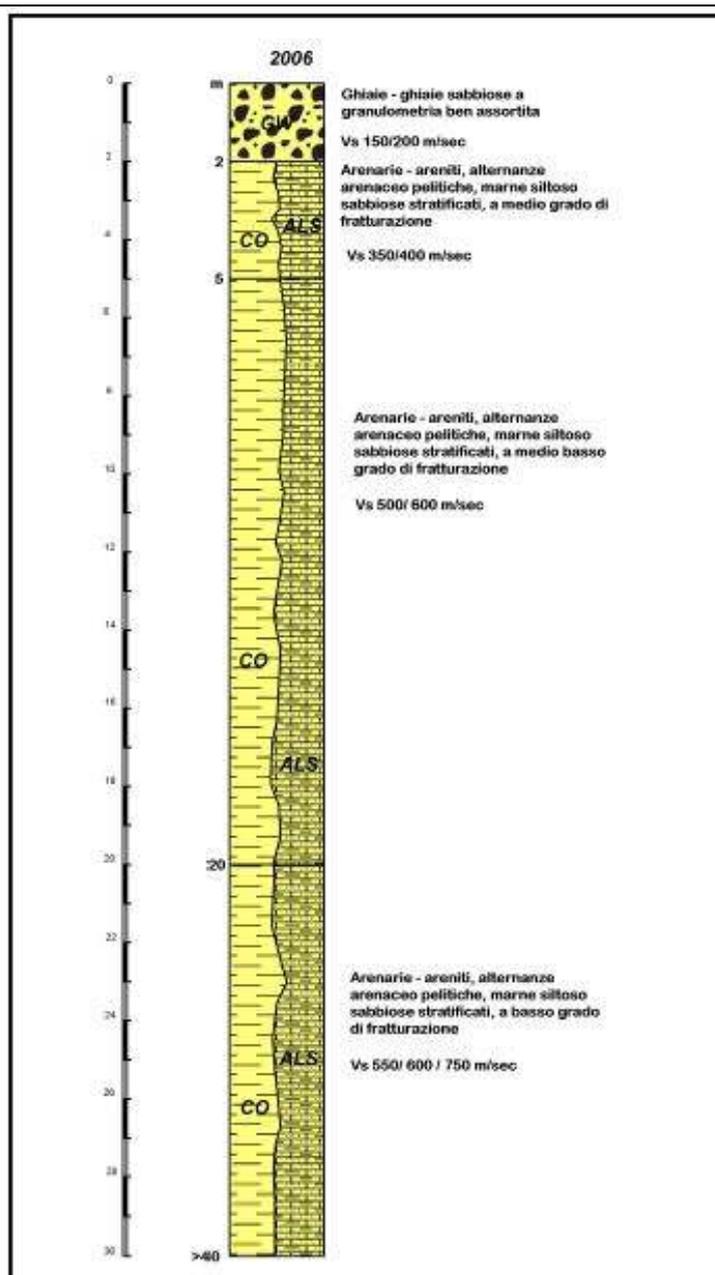
L'area interessata è inserita tra le zone suscettibili di amplificazioni locali: sono quelle con caratteristiche stratigrafiche, morfologiche locali, variazioni stratigrafiche laterali di scarsa rilevanza, in presenza di substrato affiorante a comportamento non rigido: $V_s < 800$ m/sec. e di coperture con spessori tali da indurre effetti locali.

In particolare la tipologia 2006 indica "Aree stabili con presenza di depositi alluvionali": gli effetti attesi per questa categoria sono amplificazione per effetti litologico stratigrafici, cedimenti, per densificazione, addensamento di sottili strati limoso sabbiosi.

All'interno di queste zone è richiesto un III° grado di approfondimento solo nel caso in cui siano presenti materiali con caratteristiche geotecniche scadenti (strati sabbiosi scarsamente addensati).

Nell'area della ex cartiera non si verificano queste condizioni, conseguentemente è sufficiente un livello di approfondimento di II° livello.

Di seguito viene riportato il modello litologico stratigrafico ed il risentimento sismico definiti per la zona 2006 (estratto dalla citata relazione di Microzonazione Sismica – 2021).



2006 - Depositi alluvionali ghiaiosi – ghiaioso sabbiosi a granulometria ben assortita, con spessori da 7 a 10/12 m, su substrato arenitico – arenaceo pelitico stratificato o coesivo sovraconsolidato, a medio elevata consistenza, a comportamento non rigido: Vs < 600/750 m/sec

Effetti attesi: amplificazione per caratteristiche litostratigrafiche.

Studi richiesti: valutazione del coefficiente di amplificazione stratigrafico.

Microzonazione sismica: approfondimenti di II° livello, nei casi di pendenza $\geq 15^\circ$ valutazione dell'amplificazione per effetti della topografia.

FA.PGA: 1,4 - 1,6

FA.IS 0,1-0,5 sec: 1 - 1,5

FA.IS 0,5-1,0 sec: 1 - 1,4

Carta delle velocità delle onde di taglio S (VS)



Determinazioni della Vs da prove di sismica passiva con tecnica a stazione HVSR

● H01 Valori di Vsh, H e Vs30 (m/sec)

Fig.15: estratto dalla Carta delle Velocità delle onde di taglio S (VS) – Microzonazione Sismica 2021

Nell'area in esame non sono presenti analisi che hanno portato ad un dimensionamento di questo parametro: nelle vicinanze sono stati calcolati valori del parametro VS₃₀ compresi tra 450 e 750 m/sec. Dalle indagini sismiche appositamente eseguite di recente all'interno della ex cartiera è risultato un valore di VS₃₀ pari a 524 m/sec (si veda la documentazione allegata).

Carta dei fattori di amplificazione dell'accelerazione massima orizzontale F.a.P.G.A.

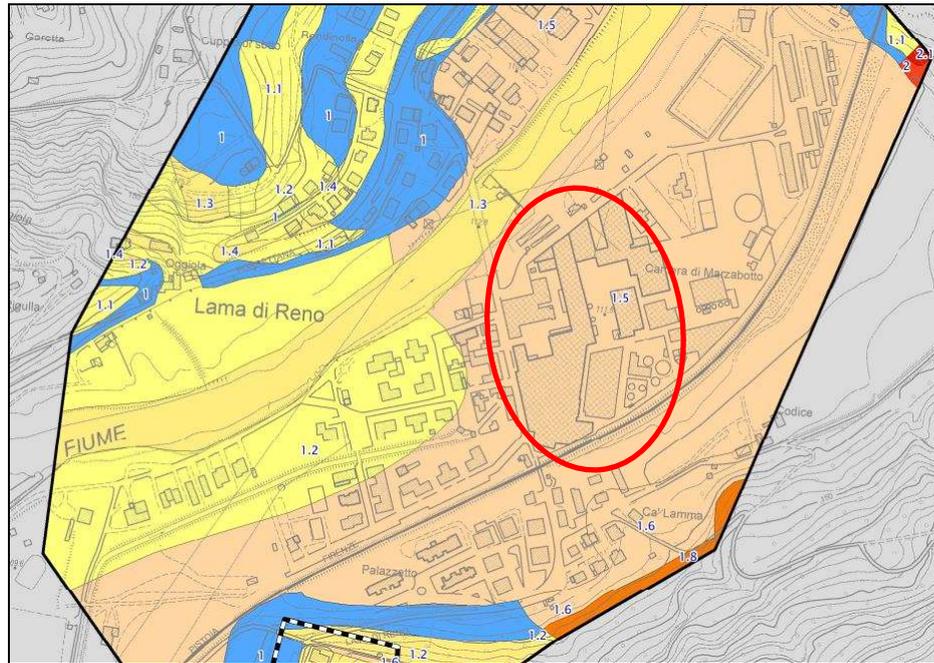
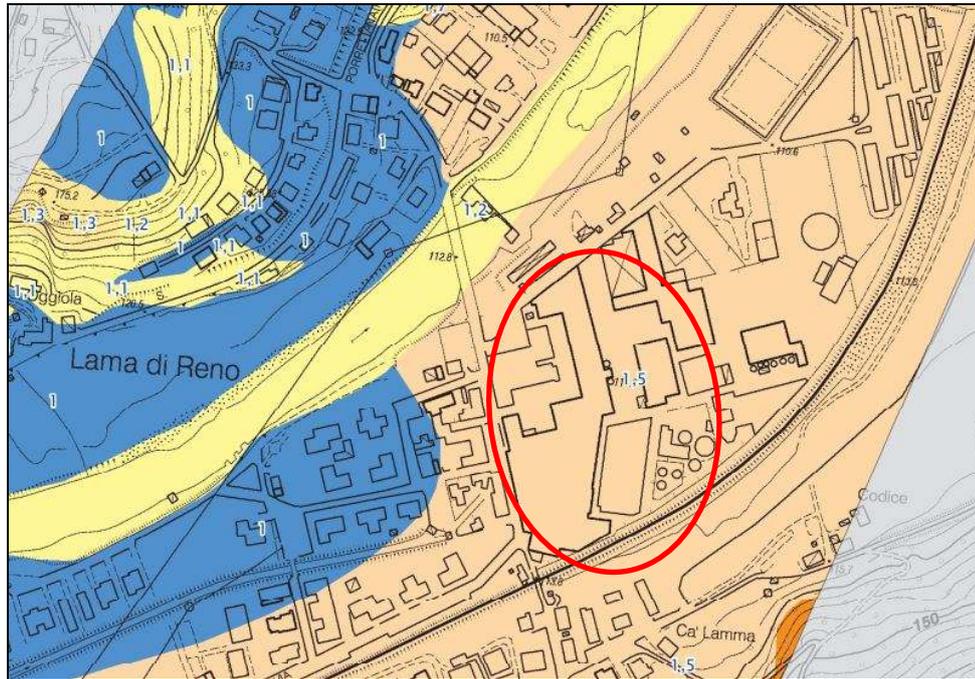


Fig.16: estratto dalla Carta dei fattori di amplificazione dell'accelerazione massima orizzontale F.a.P.G.A. – Microzonazione Sismica 2021

Dalla carta di fig.16 si evidenzia che per l'area della ex cartiera Burgo, il fattore di amplificazione F.a.P.G.A. è uniformemente pari a 1,5.

Carta dei fattori di amplificazione di intensità di Housner in termini di velocità nell'intervallo FH $0.1 < T < 0.5$ sec.



Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Fattori di amplificazione di intensità sismica Housner nei periodi tra 0,1 – 0,5 sec.

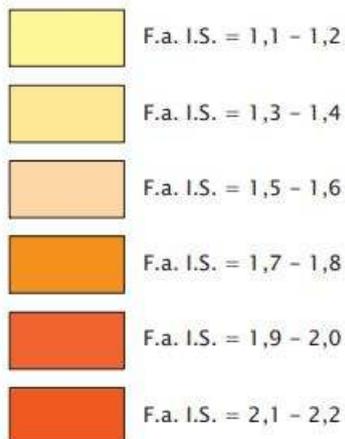
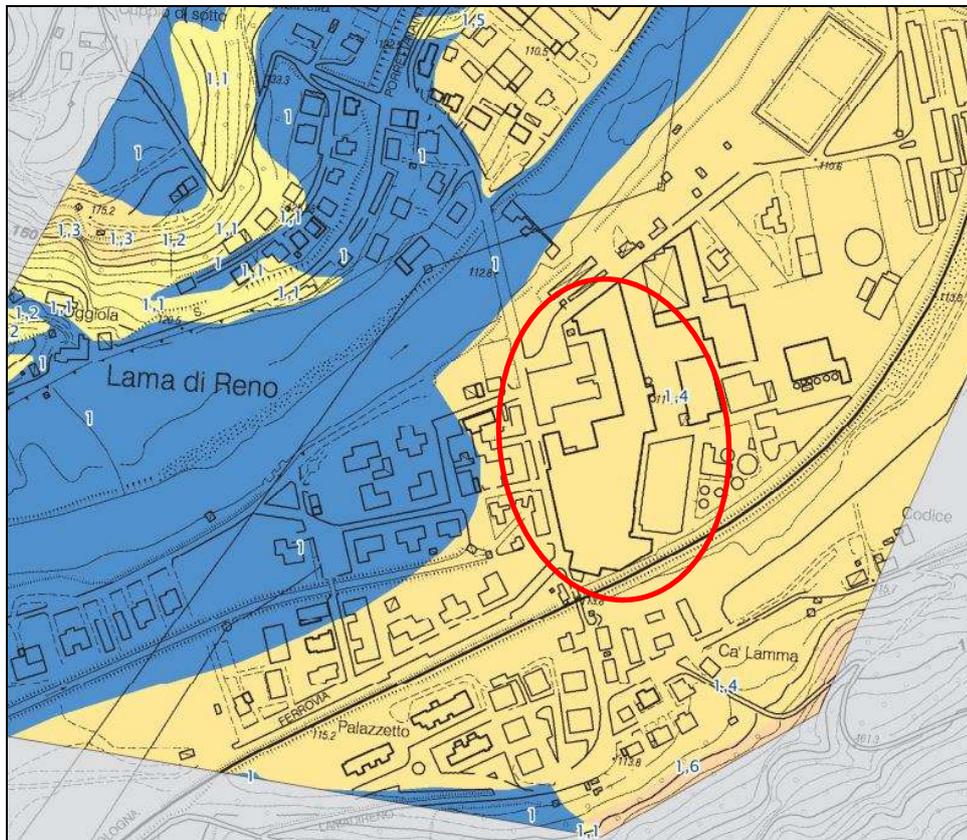


Fig. 17: estratto dalla Carta dei fattori di amplificazione di intensità sismica di Housner nei periodi 0.1-0.5 sec. – Microzonazione Sismica 2021

Dalla carta di fig.17 si evidenzia che per l'area della ex cartiera Burgo, il fattore di amplificazione di intensità sismica di Housner nei periodi $0.1 < T < 0.5$ è uniformemente pari a 1,5.

Carta dei fattori di amplificazione di intensità di Housner in termini di velocità nell'intervallo FH 0.5<T<1.0 sec.



Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Fattori di amplificazione di intensità sismica Housner nei periodi tra 0,5 – 1,0 sec.

	F.a. I.S. = 1,1 - 1,2
	F.a. I.S. = 1,3 - 1,4
	F.a. I.S. = 1,5 - 1,6
	F.a. I.S. = 1,7 - 1,8

Fig.18: estratto dalla Carta dei fattori di amplificazione di intensità sismica di Housner nei periodi 0.5-1.0 sec. – Microzonazione Sismica 2021

Dalla carta di fig.18 si evidenzia che per l'area della ex cartiera Burgo, il fattore di amplificazione di intensità sismica di Housner nei periodi 0.5<T<1.0 è uniformemente pari a 1,4.

Carta dei fattori di amplificazione in termini accelerazione nell'intervallo FH 0.1<T<0.5 sec.

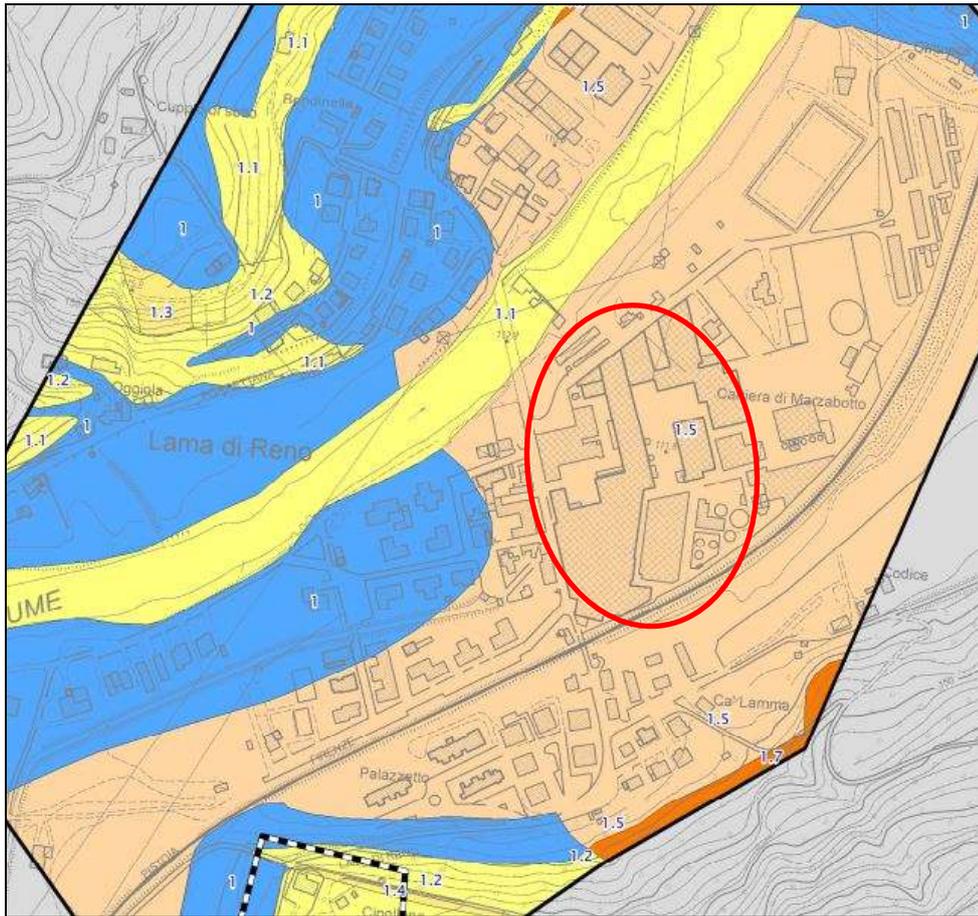


Fig.19: estratto dalla Carta dei fattori di amplificazione dello spettro in pseudoaccelerazione nei periodi 0.1-0.5 sec. – Microzonazione Sismica 2021

Dalla carta di fig.19 si evidenzia che per l'area della ex cartiera Burgo, il fattore di amplificazione dello spettro in pseudoaccelerazione nei periodi $0.1 < T < 0.5$ è uniformemente pari a 1,5.

Carta dei fattori di amplificazione in termini accelerazione nell'intervallo FH $0.4 < T < 0.8$ sec.

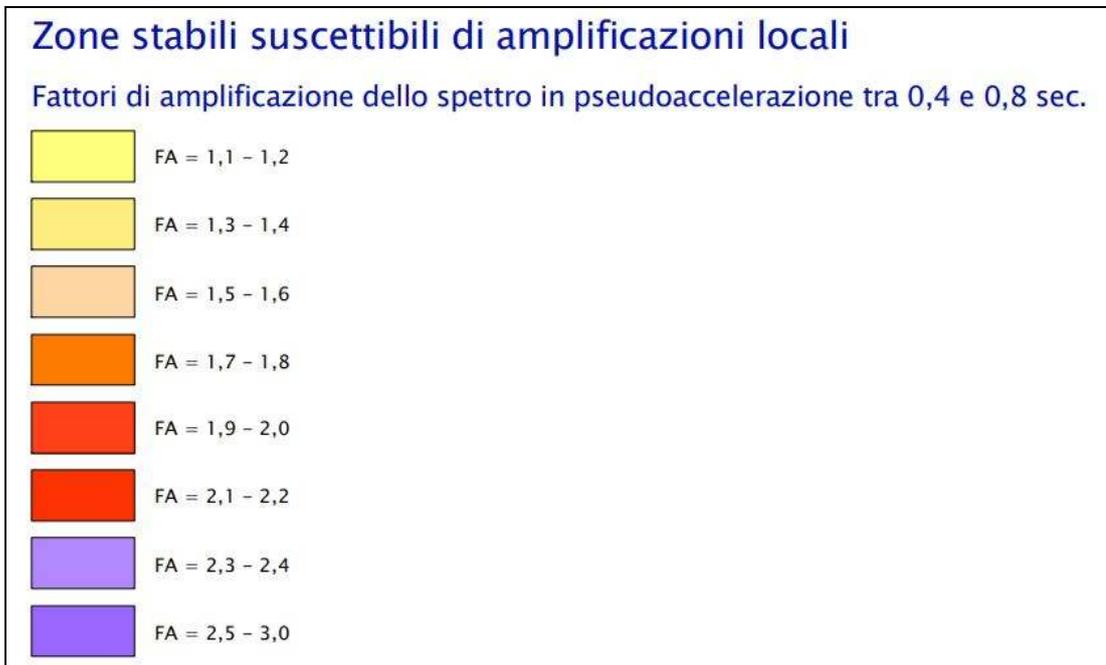
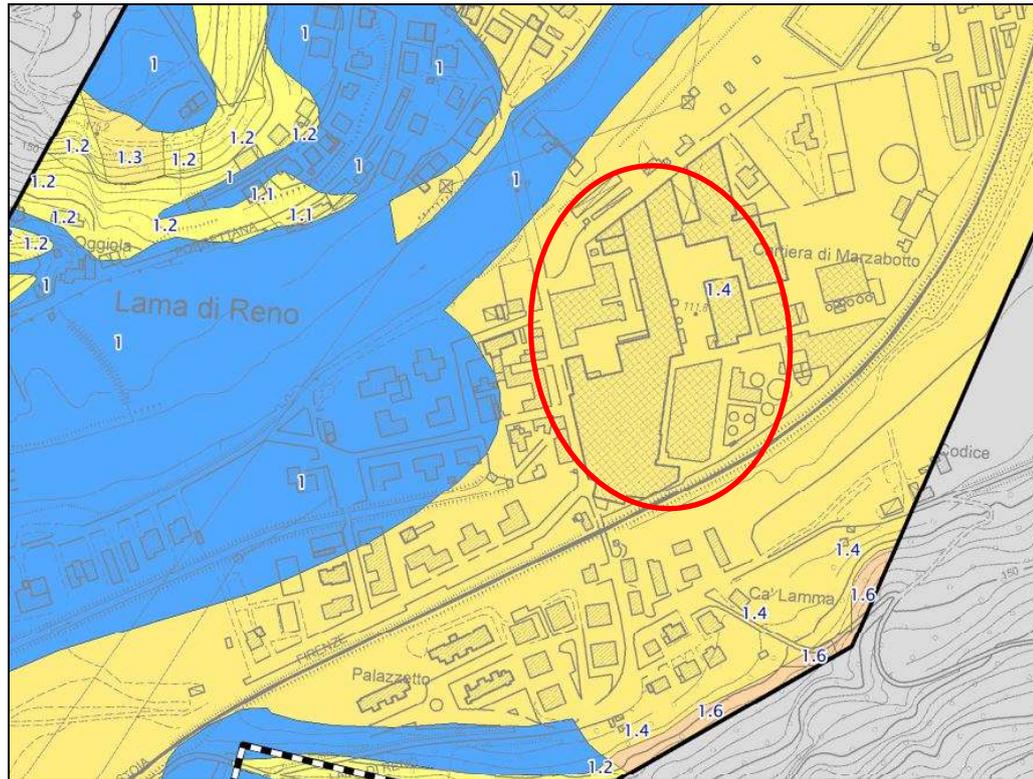


Fig.20: estratto dalla Carta dei fattori di amplificazione dello spettro in pseudoaccelerazione nei periodi 0.4-0.8 sec. – Microzonazione Sismica 2021

Dalla carta di fig.20 si evidenzia che per l'area della ex cartiera Burgo, il fattore di amplificazione dello spettro in pseudoaccelerazione nei periodi $0.1 < T < 0.5$ è uniformemente pari a 1,4.

Carta dei fattori di amplificazione in termini accelerazione nell'intervallo FH $0.7 < T < 1.1$ sec.

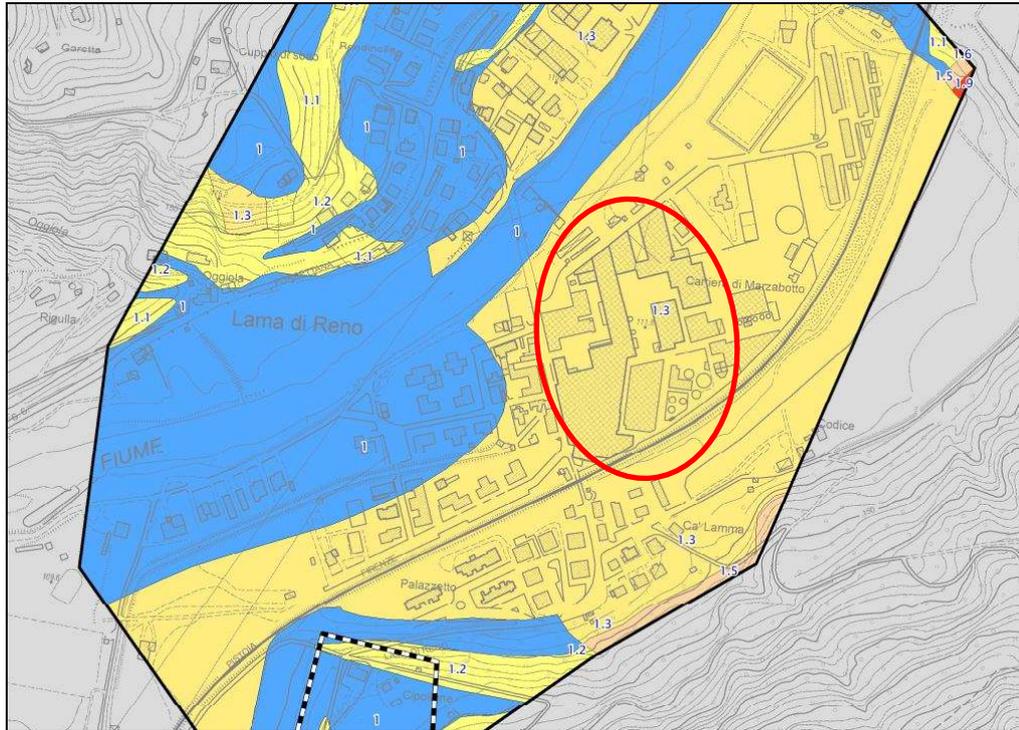


Fig.21: estratto dalla Carta dei fattori di amplificazione dello spettro in pseudoaccelerazione nei periodi 0.4-0.8 sec. – Microzonazione Sismica 2021

Dalla carta di fig.21 si evidenzia che per l'area della ex cartiera Burgo, il fattore di amplificazione dello spettro in pseudoaccelerazione nei periodi $0.7 < T < 1.1$ è uniformemente pari a 1,3.

Carta del livello di pericolosità nell'intervallo H_{SM} FH $0.1 < T < 0.5$ sec.

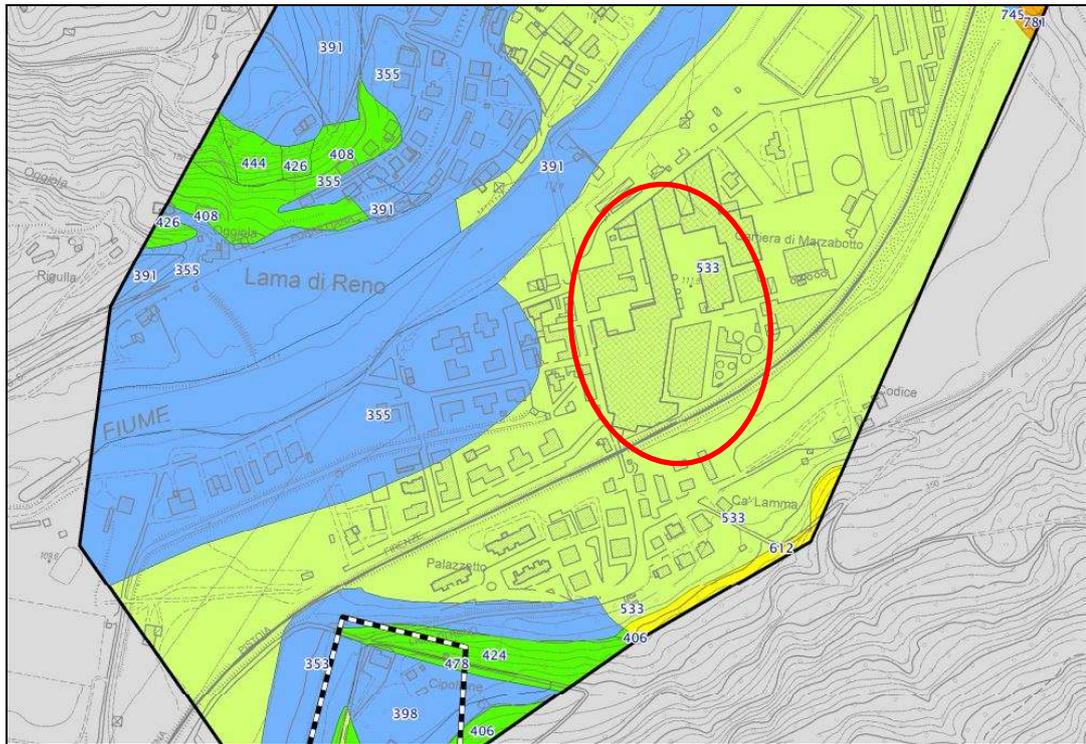


Fig.22: estratto dalla Carta dei fattori di amplificazione dello spettro in pseudoaccelerazione nei periodi 0.4-0.8 sec. – Microzonazione Sismica 2021

Dalla carta di fig.22 si evidenzia che per l'area della ex cartiera Burgo, il livello di pericolosità nell'intervallo $0.1 < T < 0.5$ sec. è uniformemente pari a $533 \text{ cm}/\text{sec}^2$, corrispondente ad una classe di media pericolosità.

Liquefazione

Con tale termine s'intende la perdita totale di resistenza dei terreni saturi soggetti a sollecitazioni statiche o dinamiche, in conseguenza delle quali il terreno si comporta come una massa viscosa avendo raggiunto una condizione di fluidità. Questo comportamento è tipico delle 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, stato nel quale gli sforzi efficaci si riducono a zero.

La liquefazione di un deposito può avvenire sia in condizioni statiche sia sotto sollecitazioni dinamiche cicliche. Vengono identificati in bibliografia tre principali meccanismi di liquefazione:

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

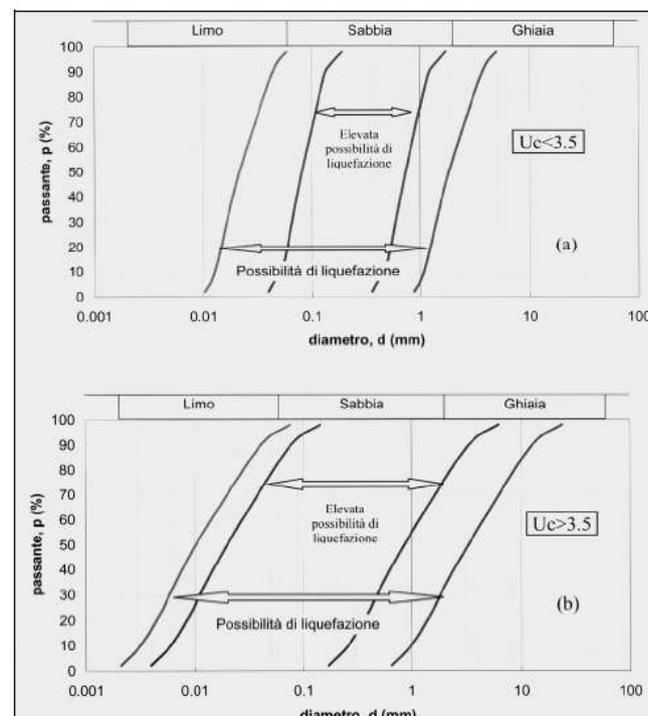
Criteri di previsione e metodi per la valutazione del potenziale di liquefazione

Per la stima di dettaglio della probabilità di liquefazione in un deposito sabbioso in caso di sisma sarebbe necessaria la conoscenza approfondita di tutti i fattori che determinano almeno in linea potenziale, il fenomeno. Risulta chiaro che è praticamente impossibile inglobare in un unico modello matematico tutti i parametri rappresentativi della liquefazione e per questo si ricorre a delle semplificazioni basate su studi recenti:

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.

Da tali studi derivano i primi criteri empirici di previsione, basati sulle caratteristiche granulometriche e sullo stato di addensamento, cui sono seguiti metodi via via più complessi, che tengono conto di un numero di parametri sempre più elevato. Tali metodi per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei depositi sono classificabili in:

1. **Criteri empirici:** i parametri sono desunti da prove di identificazione o da misure della densità relativa ovvero da prove penetrometriche standard
2. **Metodi semplificati:** derivano dal confronto fra le sollecitazioni di taglio che producono liquefazione e quelle indotte dal terremoto e richiedono la valutazione dei parametri sia relativi all'evento sismico sia alle caratteristiche del deposito



3. **Metodi di analisi dinamica semplificata:** necessitano della determinazione della storia delle sollecitazioni delle tensioni e deformazioni di taglio alle varie profondità, conseguente ad un input sismico, definito da una storia di accelerazioni riferibile al substrato roccioso

4. **Metodi dinamici avanzati:** vengono ricostruiti 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.

Motivi di esclusione della verifica a liquefazione
L'analisi preliminare della sismicità del sito e delle caratteristiche geotecniche del deposito, si permette di verificare se la probabilità che si verifichi la liquefazione sia bassa o nulla. Lo studio specifico può dunque essere omesso nel

caso si manifesti almeno una delle seguenti circostanze (come richiede la NTC D.M. 14/01/08):

- eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;
- 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 $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} 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 $U_c > 3,5$.

Se lo studio mettesse in luce la suscettibilità alla liquefazione del terreno, e gli effetti conseguenti fossero tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorrerebbe procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o al trasferimento del carico agli orizzonti più profondi non suscettibili di liquefazione.

Stima della liquefacibilità

Nel caso oggetto di studio si fa rilevare che *gli intervalli della sequenza non contengono livelli sabbiosi saturi ovvero di potenza superiore a 1 metro lungo tutto lo spessore indagato con i sondaggi*. Per questo motivo, considerando la presenza di un livello di falda alla profondità di circa 4,5 metri dal pc, il rischio di liquefazione all'interno del volume significativo di suolo viene considerato non significativo.

Definizione della categoria di sottosuolo

Attraverso l'interpretazione dei sondaggi appositamente eseguiti all'interno dell'area in studio, unita alla campagna sismica anch'essa eseguita nella medesima area di progetto, è stato possibile ricostruire la risposta sismica locale, termine con il quale si intende l'insieme delle modifiche che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base posta ad una certa profondità nel sottosuolo, subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie.

Il sito, infatti è stato sottoposto ad una indagine che ha consentito di ricostruire i seguenti aspetti (per via diretta ed indiretta):

- stratigrafia con dettagliata definizione dell'andamento dei contatti dei livelli litologici riconosciuti nei primi 7 metri dal p.c.,
- profili delle velocità delle onde sismiche trasversali e longitudinali entro ogni livello litologico riconosciuto,
- caratteristiche meccaniche dei terreni, con riferimento al loro comportamento dinamico,
- morfologia dell'area.

Per gli studi di risposta sismica locale finalizzati alla previsione delle azioni sismiche sui manufatti di progetto è stato caratterizzato il terreno ricostruendo il valore di V_s (velocità delle onde di taglio), G_0 (Modulo di taglio a piccole deformazioni), R (rigidità sismica), E_d (Modulo di elasticità dinamico) e T (periodo fondamentale dell'intervallo) con le equazioni che seguono:

$$G_0 = \gamma_t/g \times (V_s)^2 \quad (\text{Ohta e Goto, 1978})$$

Ove γ_t = peso di volume naturale e g = accelerazione di gravità (9,81 m/sec²).

$$E_d = V_p^2 \times \rho \times [(1 + \nu) \times (1 - 2\nu) / (1 - \nu)]$$

Ove V_p = velocità delle onde longitudinali, ρ = densità del terreno e ν = Modulo di Poisson

$$R = \gamma_t \times V_s$$

$$T = (4 \times H) / V_s$$

Ove H = spessore dell'intervallo considerato

V_s , laddove non direttamente misurato è stato ottenuto attraverso le espressioni che correlano la velocità delle onde sismiche al numero di colpi N_{spt} , tra cui le più note sono quelle di Imai et al. (1982)

Si richiamano brevemente alcuni contenuti del decreto citato.

Il suolo è suddiviso in cinque categorie fondamentali:

	<i>Descrizione del profilo stratigrafico</i>
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti 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 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

In base alle caratteristiche del terreno di fondazione, ricostruite mediante l'apposita campagna geofisica e dei dati bibliografici riferibili alla sequenza più profonda che caratterizza l'area di progetto, è stato possibile verificare che la sequenza può essere assimilata ad un suolo di tipo B. L'esecuzione del profilo mediante il metodo MASW ed il metodo HVSR, infatti, ha consentito di ricavare il parametro V_{s30} richiesto dalla normativa, che è risultato pari a 524 m/sec.

La frequenza di risonanza del sito è risultata pari a circa 0,8 Hz.

Per procedere alla definizione dei parametri sismici richiesti dalla nuova normativa, dunque, va tenuto presente che la zona di progetto ricade in zona sismica 3, caratterizzata da un rapporto $A/g = 0,15$ (sismicità bassa).

Parametri sismici

Tipo di elaborazione: Fondazioni

Sito in esame.

latitudine: 44,3651434858251
longitudine: 11,2179866060914
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 17394 Lat: 44,3624 Lon: 11,1831 Distanza: 2787,665
Sito 2 ID: 17395 Lat: 44,3638 Lon: 11,2529 Distanza: 2782,902
Sito 3 ID: 17172 Lat: 44,4124 Lon: 11,1812 Distanza: 6009,902

Sito 4 ID: 17171 Lat: 44,4110 Lon: 11,1113 Distanza: 9893,522

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: B
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 50anni
Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30 [anni]
ag: 0,056 g
Fo: 2,494
Tc*: 0,257 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 50 [anni]
ag: 0,070 g
Fo: 2,487
Tc*: 0,269 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 475 [anni]
ag: 0,161 g
Fo: 2,490
Tc*: 0,294 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 975 [anni]
ag: 0,202 g
Fo: 2,500
Tc*: 0,306 [s]

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii

SLO:

Ss: 1,200
Cc: 1,440
St: 1,000
Kh: 0,013
Kv: 0,007
Amax: 0,661
Beta: 0,200

SLD:

Ss: 1,200
Cc: 1,430
St: 1,000
Kh: 0,017
Kv: 0,008
Amax: 0,820
Beta: 0,200

SLV:

Ss: 1,200
Cc: 1,400
St: 1,000

	Kh:	0,046
	Kv:	0,023
	Amax:	1,895
	Beta:	0,240
SLC:		
	Ss:	1,200
	Cc:	1,390
	St:	1,000
	Kh:	0,068
	Kv:	0,034
	Amax:	2,376
	Beta:	0,280

Si evidenzia che dal punto di vista topografico l'area ricade in una zona T1 della Tabella 3.2.IV, caratterizzata cioè da superficie pianeggiante. Pertanto il relativo coefficiente di amplificazione topografica vale 1,0.

Si ricorda che le tipologie di opere di progetto appartengono alle costruzioni di Tipo 2 della Tabella 2.4.I del decreto citato, quelle con vita nominale V_N superiore a 50 anni ed alla classe II richiamate nel paragrafo 2.4.2, che si riferisce all'uso previsto dei fabbricati. Pertanto in prima approssimazione il periodo di riferimento massimo ipotizzabile per l'azione sismica vale $50 \times 1,0 = 50$ anni.

CONSIDERAZIONI FINALI

Questo documento contiene i risultati di una specifica campagna di indagini geognostiche e sismiche eseguite allo scopo di acquisire dati necessari per caratterizzare i sedimenti presenti nel primo sottosuolo dell'area della ex Cartiera Burgo, ubicata nel territorio comunale di Marzabotto (BO) e più precisamente in località Lama di Reno.

Per raggiungere questo specifico scopo la campagna geognostica si è basata sull'esecuzione di quattro sondaggi geognostici a carotaggio continuo: viste le indicazioni bibliografiche raccolte che indicavano la presenza di sedimenti quasi esclusivamente incoerenti e caratterizzati da un grado di addensamento da medio ad elevato, non è stato possibile scegliere altri metodi di indagine, quali, per esempio, le prove penetrometriche statiche.

Mediante l'utilizzo dei metodi MASW e HVSR è stato possibile ricavare il valore del parametro VS_{30} e individuare la frequenza naturale dei terreni.

Dall'interpretazione dei dati acquisiti in situ con i sondaggi è risultata una sequenza stratigrafica piuttosto omogenea all'interno dell'area della ex cartiera, sequenza costituita schematicamente in superficie e fino a profondità comprese tra 1,0 e 1,8 metri dal pc da terreni di riporto di varia natura.

Al di sotto compaiono sedimenti incoerenti: dapprima sabbie e sabbie limose per uno spessore pari a circa 1 metro nella porzione settentrionale, tendente ad aumentare fino a circa 2 metri spostandosi verso sud.

A profondità dal pc comprese tra 2 metri e 3,5 metri dal pc (anche in questo caso in aumento passando dalla porzione settentrionale a quella meridionale) compare il tetto dei sedimenti più francamente incoerenti (ghiaie in scarsa matrice sabbioso limosa): questi sedimenti hanno spessori compresi tra 3,3 e 4,3 metri (al contrario di quanto evidenziato in precedenza, per questi sedimenti lo spessore tende ad aumentare spostandosi da sud verso nord).

Il tetto del substrato semilapideo dei terreni riconducibili alla Formazione di Cigarellino si rinviene ad una profondità piuttosto omogenea, corrispondente a circa 6,5 metri dal pc.

All'interno di tre dei quattro sondaggi è stato inserito un piezometro fessurato che ha permesso di verificare la presenza di una falda freatica: il livello è risultato essere a profondità di circa 4,5 metri dal pc: si sottolinea il fatto che questi dati sono stati acquisiti nel corso di una stagione particolarmente secca, con piogge assenti da diversi mesi. Non si esclude quindi che con un regime di precipitazioni più normali il livello della falda non possa risalire anche in maniera significativa.

Dal punto di vista della risposta sismica attesa sul sito le indagini hanno consentito di verificare che i primi 30 metri di sequenza sono caratterizzati da una VS_{30} pari a circa 524 m/sec.: questo valore inserisce l'area in esame all'interno della categoria B (secondo quanto stabilito dalle NTC 2018).

L'assenza di livelli di sedimenti potenzialmente compatibili (sabbie e sabbie limose) aventi spessori superiori a 1 metro e la presenza della falda all'interno delle ghiaie ha escluso che a seguito di eventi sismici di una certa entità possano verificarsi fenomeni di liquefazione.

Bologna, 21/09/2022



NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

“Norme tecniche per le costruzioni D.M. 17 gennaio 2018” e sue circolari applicative.

AGI: raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Giugno 1977;

AGI: raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio, Maggio 1990 (edizione provvisoria);

Eurocodice Ec7 per l'ingegneria geotecnica, Settembre 1988;

ISO 31-11: Quantities and units, Mathematical signs and symbols for use in the physical sciences and technology, 1992;

UNI ISO 2955: Rappresentazione delle unità SI e di altre unità usate nei sistemi con insiemi limitati di caratteri, 1987;

CNR-UNI: norme relative al prelievo di campioni, all'esecuzione di analisi granulometriche, alla determinazione dei limiti di consistenza, alla classificazione di una terra;

ASTM: norme relative alla descrizione di una terra, all'esecuzione di analisi granulometrica per via umida con sedimentazione ed aerometria, alla esecuzione di prova di compressione monoassiale, alla esecuzione di S.P.T., alla esecuzione di C.P.T.

Bibliografia

- Cestari F.: Prove geotecniche in sito; Geo-Graph Ed., Segrate, 1990.
- Lambe W.T., Whitman R.V.: Meccanica dei terreni. Dario Flaccovio Ed., Palermo, 1997.
- Leoni G.: Idrografia e bonifica del bacino del Reno. Consorzio della Bonifica Renana; Bologna, 1994.
- Marchi G.F.: Effetti delle variazioni stagionali di umidità dei terreni coesivi su fabbricati con fondazioni superficiali. Atti del Convegno “La Geotecnica in Italia e in Europa” Università degli Studi di Ferrara, 1993.
- Regione Emilia Romagna: Carta dei Rischi Geo-Ambientali; Bologna, 1994.
- Regione Emilia Romagna: Carta Tecnica Regionale; Bologna.
- Regione Emilia Romagna: I Suoli dell'Emilia Romagna; Bologna, 1994.
- F. Cestari - prove Geotecniche in sito - ed. GEO-GRAPH 1990
- M. Casadio - Il Manuale del Geologo - Pitagora Editrice
- Di Martino - Geotecnica Stradale
- P. Focardi - Prove in sito - Geologia Tecnica 1982
- Piacentini - Righi - Valutazione Compressibilità dei terreni e Consolidamento in base ai risultati di prove penetrometriche statiche - Inarcos Bologna
- P. Ventura - Interpretazione delle prove penetrometriche statiche tramite punta piezometrica
- Pelli - Ottaviani - Definizione della resistenza non drenata delle argille del Mare Adriatico mediante prove penetrometriche statiche R.I.G. 1992

- G. Sanglerat - Le Penetrometre et la reconnaissance des soils - Dunod Paris 1965
- G. Sanglerat - The Penetrometre and soil exploration - ESPC 1972
- A. Flora - Introduzione alle Indagini Geotecniche - Helvelius Edizioni
- C. Guidi - Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni - Vol. I-II - Hoepli (1975)
- F. Gambini - Manuale dei Piloti - Ed. Scac
- Herminier - Theory for the interpretation of penetration test data - Annales I.T.B.T.P. - Congress of Zurich 1953)
- Bellotti-Jamiolkowski-Ghionna-Pedroni - Penetrometro Statico - terreni non coesivi - Atti Convegno Naz. Geotecnica 1983
- R. Lancellotta - Penetrometro Statico - terreni coesivi - Atti Convegno Naz. Geotecnica 1983
- R. Lancellotta - Meccanica dei Terreni - Elementi di Geotecnica - L.E.U. Torino
- S.G.S. - Recommended Standard for Cone Penetration Tests - June 1992
- Sunda Strumentazione Geotecnica - Manuale Uso Penetrometro Statico
- M. Carter (1983) - Geotechnical engineering-Handbook-Pentech Press-London
- F. Colleselli-Soranzo (1980) - Esercitazioni di Geotecnica - Ed. Cleup - Padova
- R.F. Craig (1985) - Soil mechanics - Van Nostraan Reinhold (UH) Co.Ltd
- R.E. Hunt (1986) - Geotechnical engineering techniques and practices - McGraw- Hill - Inc. USA
- M. Pellegrini (1982) - Geologia Applicata - Ed. Pitagora - Bologna
- G. Pilot (1982) - Foundation engineering - Ecole national des ponts et chausees - Paris
- A.G.I. (1977) - Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - AGI - Roma
- Larsson R. (1985) - The CPT test Equipment - testing - evaluation. An situ method for determination of stratigraphy and properties in soil profiles - S.G.I.
- P. Mayne (1992) Tentative method for estimation Gvo from Qc data in sand - Potsdam NY 1991
- Lunne, P.K. Robertson and Powell J.J.M. (1997) - Cone Penetration Test in Geotechnical Pratiche - B.A. & P.
- T. Lunne, A. Kleven (1981) - Role of CPT in North Sea foundation engineering - Session ASCE Nationali Convetion - S. Louis
- T. Lunne, Christoffersen H.P. (1985) - Interpretation of Cone Penetration Data for Offshore Sands - Norwegian Geotechnical Institute 1985 - Pbl. 156
- Jamiolkowski M. et al (1985) New developments in field and laboratory testing of soils
- Kulhawy F.H., Mayne P.H. (1990) - Manual on estimating soil properties for foundation design - Electric Power Research Institute 1990
- Robertson P.K., Campanella R.G., Greig J. et al. (1986) - Use of piezometer cone data - - Use in situ tests in Geotechnical Engineering - ASCE Conference 1986
- Robertson P.K., Campanella R.G. (1983) - Interpretation of cone penetration test - Canadian Geotechnical Journal - 20(4).

ALLEGATO 1

STRATIGRAFIE DEI SONDAGGI

SONDAGGIO: S4

DA METRI: 0,0 A METRI: 7,5

Responsabile:

LUNGHEZZA (m): 7,5

Sonda tipo: Ellettari

Operatore:

LEGENDA:

PROVE S.P.T.: PA Punta aperta - PC Punta chiusa
 CAMPIONI: S Pareti sottili - O Osterberg - M Mazier
 R Rimaneggiato - Rs Rimaneggiato da S.P.T.
 PIEZOMETRI: A Aperto - C Casagrande - E Elettrico
 PERFORAZIONE: CS Carotiere semplice - CD Carotiere doppio - EC Elica continua
 STABILIZZAZIONE: RM Rivestimento metallico
 FB Fanghi bentonitici

% CAROTAGGIO ——— R.Q.D. ———

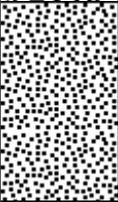
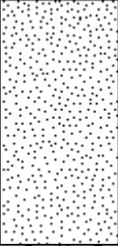
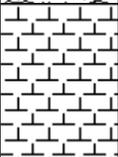
COMMITTENTE: Comune di Marzabotto (BO)

CANTIERE: Ex Cartiera Burgo

LOCALITA': Lama di Reno

DATA INIZIO: 9-8-2022 DATA FINE: 1-1-

QUOTA BOCCAFORO (m s.l.m.):

S.P.T. Prof. Tipo Valori	CAMPIONI		STRATIGRAFIA E DESCRIZIONE	Prof. (m)	Carot. (%) RQD (%) 20 40 60 80	Pocket Test kg/cmq	Vane Test	FALDA		Piezo- metri	Diam. (mm)	Metodo Perf.ne	Metodo Stab.ne
	Prof.	Tipo						Rinv	Stab				
4,5 PC 23 13 12			 Macerie da demolizione	0,6					0,0 (1)				
	1		 Terreno probabile di riporto costituito da una miscela di ghiaia eterometrica e frammenti di laterizi in scarsa matrice limosa.	1,5									
	2		 Sabbia grossolana con scarso limo; presenti sparsi ciottoli (dimensioni massime 3-4 cm).	2,4									
	3		 Sabbia medio-fine con limo.	3,5									
	4		 Ghiaia eterometrica (diametro massimo 7 cm) in matrice sabbioso limosa. Fino a 4.2 metri il colore è nerastro, poi grigio.	6,8									
	6												
	7		 Substrato semilapideo	7,5									
7,5 PC 80	8									A 7,5			

ALLEGATO 2

INDAGINE SISMICA
ELABORATI GRAFICI E NUMERICI

COMUNE DI MARZABOTTO

REGIONE EMILIA-ROMAGNA
CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA

Determinazione della categoria di suolo di fondazione eseguita sulla base della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio S ($V_{s,eq}$) dei terreni costituenti l'area sita presso l'Ex Cartiera di Lama di Reno.



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

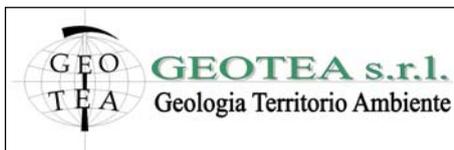


Committente: **COMUNE DI MARZABOTTO**

Dott. Geol. Stefano Maggi

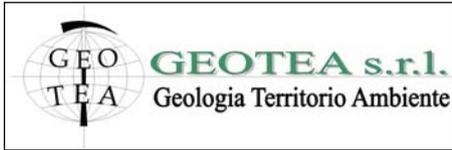
Data indagine 16/08/2022

Commessa 22.466



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

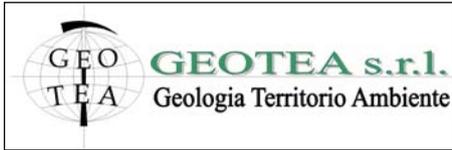
SOMMARIO.....		
2	IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO _____	3
3	PREMESSE _____	4
4	DESCRIZIONE DELLE INDAGINI _____	5
4.1	Introduzione generale _____	5
4.2	Tecnica MASW _____	6
4.3	Tecnica Re.Mi. _____	6
4.4	Misura a stazione singola H/V: procedura e strumentazione utilizzata _____	7
5	Risultati indagine _____	8
5.1	TECNICA IN ARRAY _____	8
5.2	TECNICA HVSR _____	9
6	MODELLO DI SOTTOSUOLO PROPOSTO PER IL SITO _____	11
7	CONCLUSIONI _____	12



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

2 IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO

- Il presente documento viene identificato con il numero 22.466 rev. n° 0;
- Le indagini e il lavoro svolto sono stati coordinati dal Dott. Geol. Stefano Maggi;
- Il presente documento è stato redatto dal Dott. Geol. Stefano Maggi in data 01/09/2022;
- Il documento si compone di n° 12 fogli



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

3 PREMESSE

Nell'area sita presso l'ex cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO), in data 16/08/2022 è stata effettuata un'indagine geofisica mediante prova in array con tecnica *MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)*, Re.Mi. (*Refraction Microtremor*) e misura a stazione singola con tecnica *HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)* al fine di ottenere la classificazione del tipo di suolo presente nel sito, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S (V_s ,eq), in ottemperanza a quanto riportato nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 17 gennaio 2018.

La presente indagine geofisica è consistita in:

- N. 1 profilo sismico in array con tecnica MASW-ReMi.
- N. 1 misura a stazione singola con tecnica HVSR (HVSR1)

Per quanto riguarda la prova in array l'acquisizione è stata effettuata mediante sismografo digitale modello ECHO 24 canali 24 bit. La misura a stazione singola è stata eseguita con tromografo digitale modello Tromino® Engy.

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è "Geopsy".

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

4 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI

4.1 Introduzione generale

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

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

- ❑ La percentuale di energia convertita in onde R è nettamente predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione di onde P (7%) e onde S (26%);
- ❑ il metodo d'analisi basato sulle onde R non è limitato, al contrario del metodo basato sulla rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità;
- ❑ buona risoluzione, a differenza della tecnica a riflessione;
- ❑ la propagazione delle onde di *Rayleigh*, anche se influenzata dalla V_p (velocità delle onde di compressione P) e dalla densità del mezzo, è funzione innanzitutto della V_s che rappresenta appunto il parametro fondamentale per la caratterizzazione geotecnica di un sito;
- ❑ la tecnica in questione è inoltre particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti ed ambienti rumorosi.

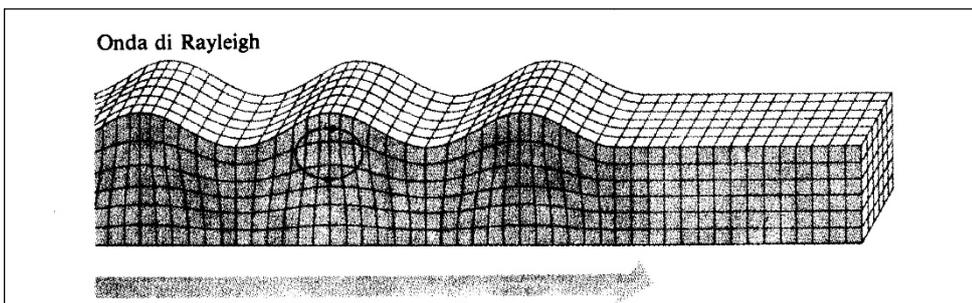


Figura 1 - Modalità di propagazione delle onde R

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

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

componente di frequenza dell'onda superficiale si propaga con una differente velocità (velocità di fase), e quindi con una diversa lunghezza d'onda; questa proprietà si chiama appunto dispersione.

La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda λ (e quindi per una certa frequenza ν) è influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di $\lambda/2$ (anche se recenti studi hanno posto questo limite a $\lambda/2.5$). Inoltre, la velocità delle onde R (V_r) è pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio (V_s). Secondo quanto detto appare chiaro come la costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio V_s , ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di *Rayleigh*, sia una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

4.2 Tecnica MASW

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

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

La prima fase viene effettuata direttamente in campagna generando un treno di onde superficiali mediante l'utilizzo di una sorgente sismica attiva, quale generalmente una mazza battente, e uno stendimento lineare di geofoni ricevitori (vedi Fig. 2). L'indagine svolta nel presente lavoro è stata condotta utilizzando la strumentazione DOLANG JEA 24 descritta nelle premesse.

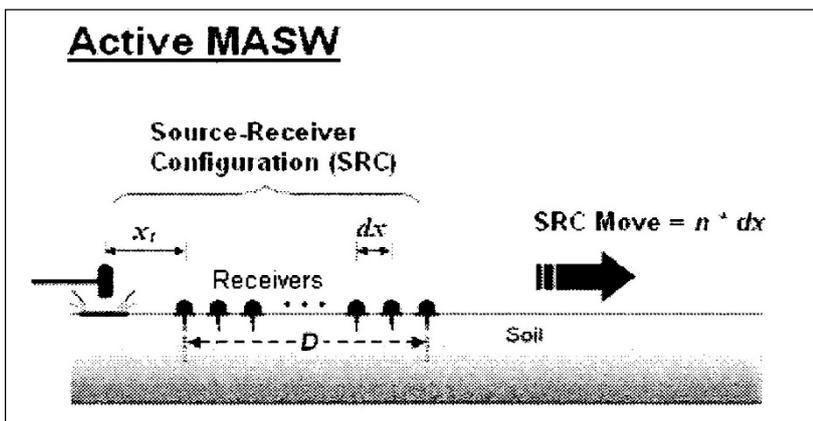


Figura 2 - MASW : stendimento lineare e sorgente attiva

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

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

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

4.3 Tecnica Re.Mi.

A differenza del convenzionale metodo MASW, il quale prevede l'utilizzo di una sorgente sismica attiva (es:

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

mazza battente), la tecnica Re.Mi. utilizza onde di superficie generate passivamente dall'ambiente circostante. L'origine di questo cosiddetto "rumore di fondo" è sia di tipo naturale (onde oceaniche di marea, perturbazioni atmosferiche) sia di tipo antropico (traffico veicolare, industrie, ferrovie, etc...).

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

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

4.4 Misura a stazione singola H/V: procedura e strumentazione utilizzata

Il metodo *HVSR* (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) proposto da Nogoshi e Igarashi (1970) e successivamente modificato da Nakamura (1989), si basa sull'analisi del rapporto spettrale tra le componenti orizzontale (H) e verticale (V) del rumore sismico registrato in un sito. Il rumore sismico è presente ovunque ed è generato sia da fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) che dall'attività antropica. Il rumore sismico è indicato spesso come microtremore poiché è caratterizzato da oscillazioni molto deboli (dell'ordine dei $\mu\text{m/s}$). I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma soprattutto da onde superficiali, la cui velocità è comunque prossima a quella delle onde S (Mulargia et al., 2007). La tecnica di misura del rumore sismico richiede tempi di registrazione pari a 14-30 minuti e necessita di sensori tridirezionali da sismologia con messa in bolla, digitalizzatore 24 bit con elevata dinamica, elevato guadagno ed elevata frequenza di campionamento nativo, con minimizzazione del rumore elettro/meccanico.

L'acquisizione è stata eseguita utilizzando un tromografo digitale, "TROMINO ENGY" (*Micromed S.p.A.*) dotato di 3 canali velocimetrici (N-S, E-W, Up-Down) ad alto guadagno per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale (fino a ~ 1.5 mm/s); il sistema opera nell'intervallo di frequenze 0.1–1024 Hz. L'elaborazione dei dati di rumore sismico acquisiti è avvenuta mediante software *Grilla*.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

5 RISULTATI INDAGINE

5.1 TECNICA IN ARRAY

Strumentazione utilizzata.....Sismografo digitale 24 canali – 24 bit modello Dolang
 Numero di geofoni verticali (frq. Propria 4.5 Hz).....12
 Spaziatura tra i geofoni.....3.00 m
 Frequenza di campionamento.....2.000 Hz (MASW) – 250 Hz (Re.Mi.)
 Lunghezza traccia acquisita.....1 sec (MASW) – 64 sec (Re.Mi.)
 Sorgente.....caduta grave e rumore ambientale

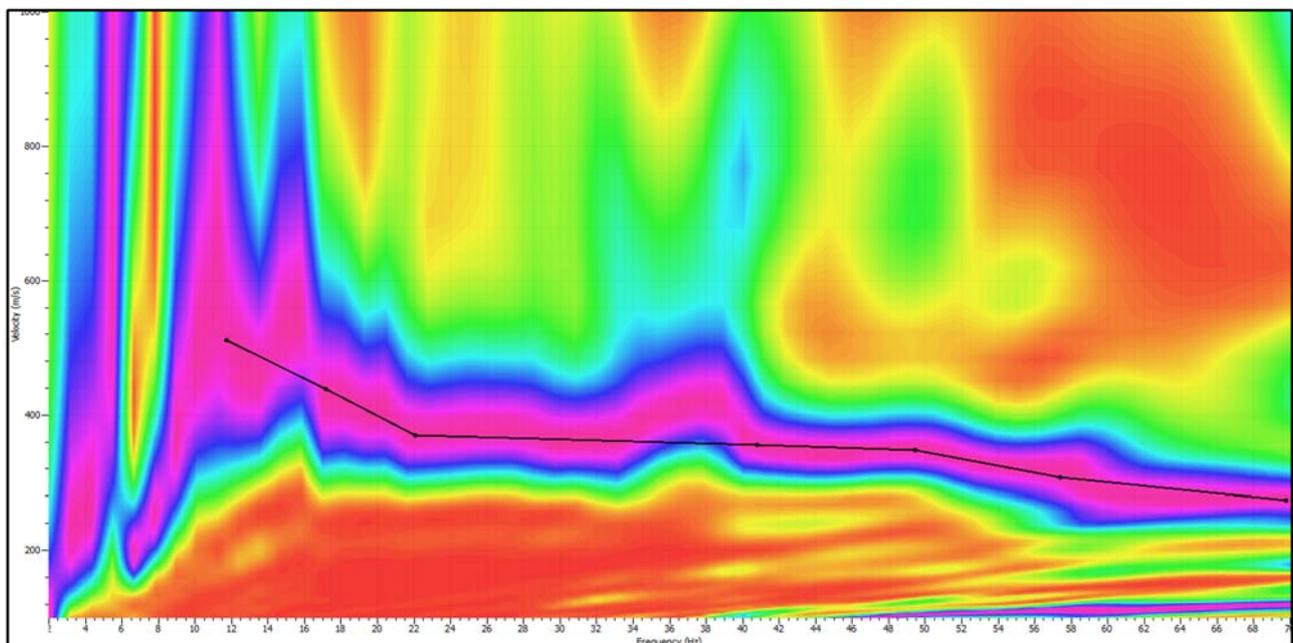


Figura 3 - Spettro di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per il profilo sismico eseguito in array con tecnica MASW-Re.Mi. mediante sismografo digitale Dolang. In blu il modo fondamentale della curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

5.2 TECNICA HVSR

Strumento: TROMINO MODELLO ENGY

Data registrazione: 16/08/2022

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Freq. campionamento: 512 Hz

Lunghezza finestre: 30 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

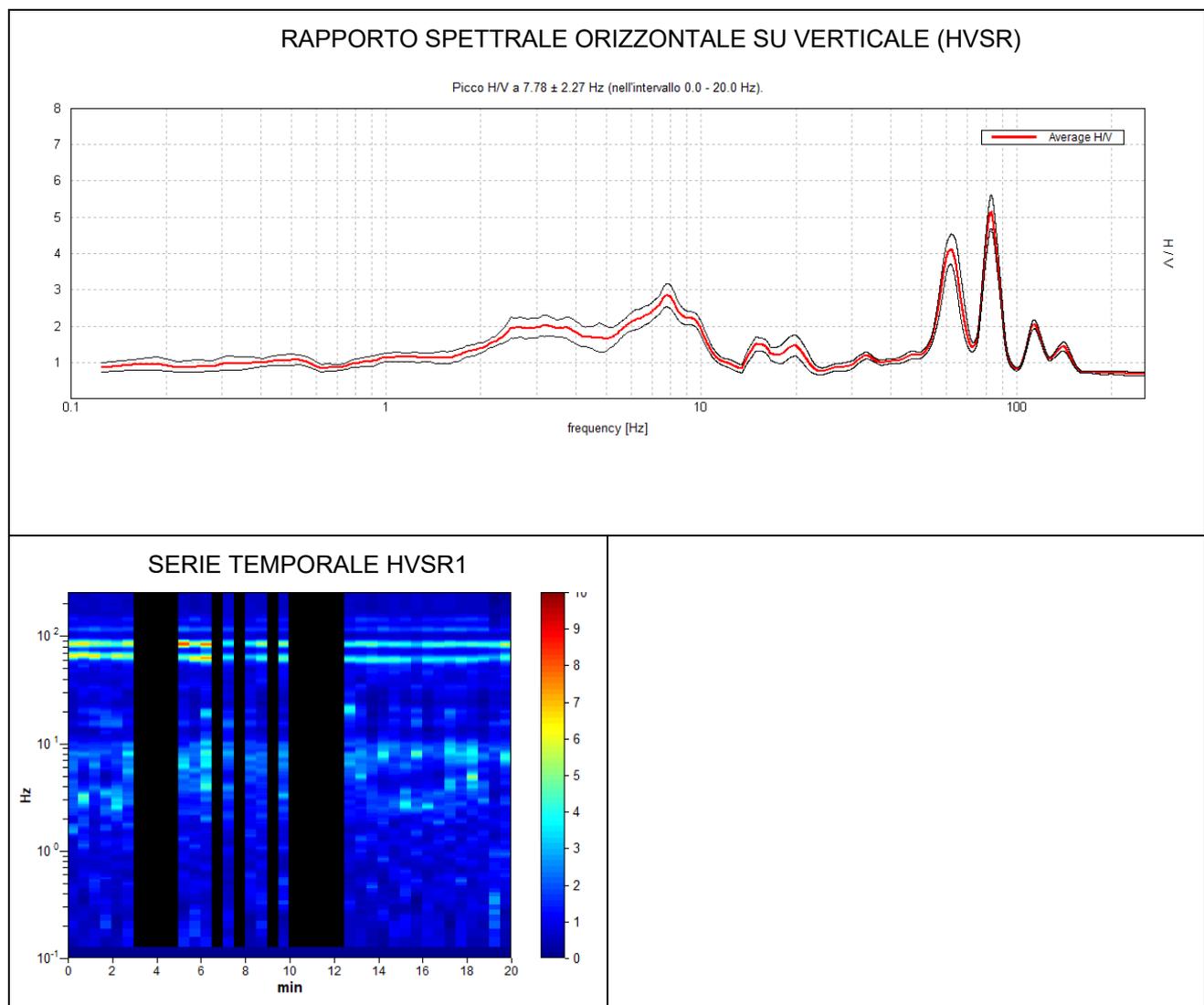


Figura 4 - Curva H/V (HVSR) registrata nel sito in esame e serie temporale considerata nell'analisi.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI HVSR1

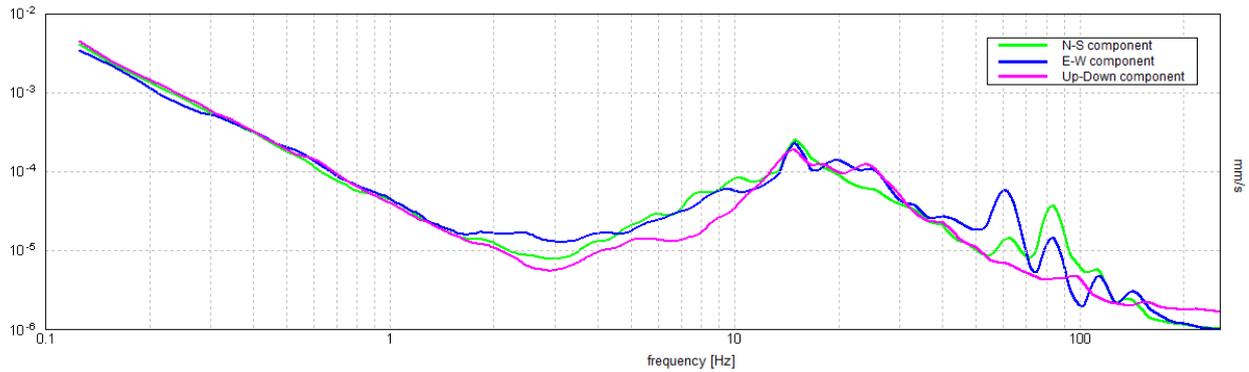


Figura 5 - spettri delle 3 componenti del moto in velocità registrate nel sito

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

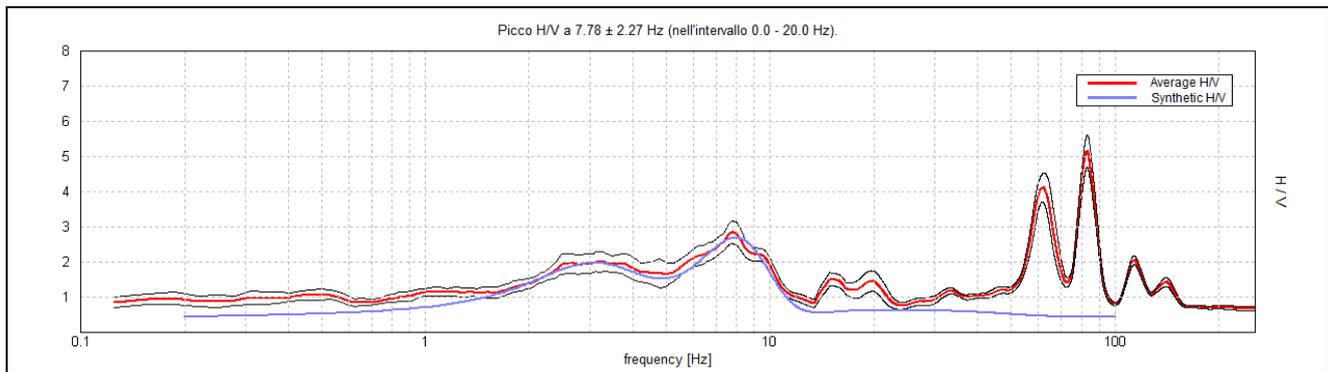


Figura 6 - confronto tra curva HVSR1 sperimentale registrata nel sito (scelta per il fit congiunto con prova MASW-Re.Mi.) e curva teorica (blu) relativa al modello di sottosuolo proposto per il sito.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSr per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

6 MODELLO DI SOTTOSUOLO PROPOSTO PER IL SITO

Sulla base dei risultati ottenuti e dell'interpretazione dei dati acquisiti il modello di sottosuolo proposto per il sito in studio, in termini di profilo verticale di Vs, è il seguente (il modello è stato ottenuto mediante fit congiunto tra prova **MASW-Re.Mi.** e misura **HVSr1**):

Profondità base strato (m)	Spessore (m)	Vs (m/s)
1.30	1.30	270
1.80	0.50	300
2.40	0.60	345
3.00	0.60	350
5.70	2.70	370
8.70	3.00	430
16.70	8.00	500
66.70	50.00	780
inf.	inf.	1100

Tabella 1 – Modello di sottosuolo proposto per il sito

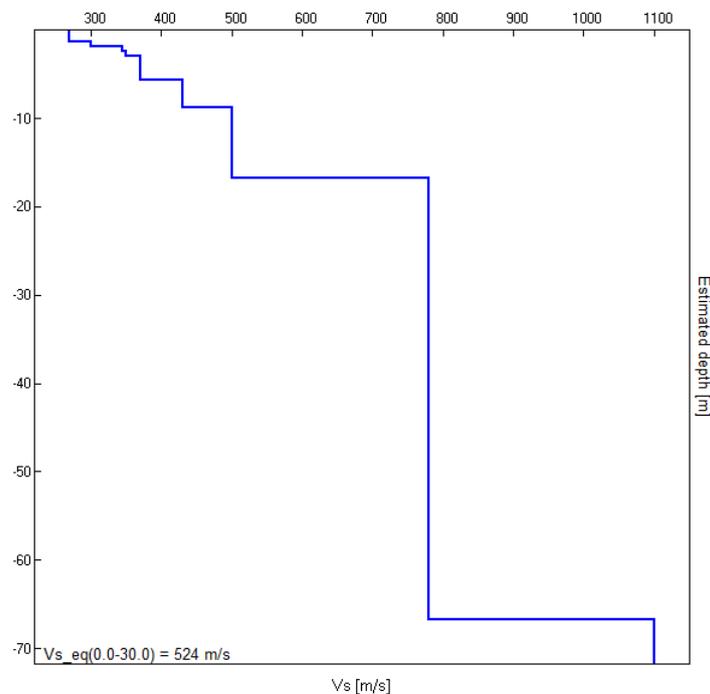


Figura 7 - Modello di velocità delle onde di taglio S (modello medio sotto il profilo effettuato)

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW-Re.Mi. e HVSR per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita presso l'ex Cartiera di Lama di Reno nel comune di Marzabotto (BO).

7 CONCLUSIONI

L'analisi congiunta MASW-Re.Mi.-HVSR ha permesso sia di ricostruire il profilo verticale di velocità delle onde S nel sito in esame, sia di individuare la presenza di contrasti d'impedenza-rigidezza nel sottosuolo medesimo.

Vs,eq=Vs30 [m/s] da quota piano campagna su cui è stata eseguita l'indagine geofisica.....524

La curva HVSR indica la presenza di amplificazione locale del moto del suolo per risonanza stratigrafica a medio contrasto d'impedenza nell'intervallo 6-10 Hz circa con massimo del rapporto H/V a circa 8 Hz.

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

San Lazzaro di Savena, 01/09/2022

