



CITTÀ DI LEGNAGO

COMUNE DI LEGNAGO -VR

SETTORE 3° LL.PP. ED URBANISTICA
Via XX Settembre, 29 – 37045 Legnago (Verona)
tel. 0442 634900-634925

Responsabile del procedimento e
Direttore di esecuzione del contratto

Ing. Giacomo Masiero



**M4 C1 I3.3 - CO-FINANZIATO
DALL'UNIONE EUROPEA NEXT
GENERATION EU**

INTERVENTO PER LA RIGENERAZIONE ED IL
POTENZIAMENTO DEL COMPLESSO SCOLASTICO DI VIA
RAGAZZI DEL '99 NEL QUARTIERE DI PORTO DI LEGNAGO

**1^ FASE. DEMOLIZIONE E RICOSTRUZIONE SCUOLA
SECONDARIA DI 1° GRADO "G.B.CAVALCASELLE"**

capogruppo RTP / responsabile della progettazione integrata e coordinata

**Atelier(s) Alfonso Femia s.r.l.**

via cadolini 32/48, 20137 milano tel. 02.54019701 fax 010.54115512
via interiano 3/11, 16124 genova tel. 010.540095 fax 010.5702094
55 rue des petites écuries, 75010 paris tel +331.42462894
milano@atelierfemia.com www.atelierfemia.com

Mandante RTP / progettazione strutturale e impiantistica - prevenzione incendi

**Sertec engineering consulting s.r.l.**

strada provinciale 222, n.31, 10010 Loranze, Torino
tel 0125 1970499
info@sertec-engineering.com

Mandante RTP / progettazione paesaggistica

arch. Michelangelo Pugliese

via Vito Inferiore 39/A, 89122 Reggio Calabria
tel. 389 9687867
arch.michelangelopugliese@gmail.com

Progetto esecutivo



codice documento

STReTrel003c

scala

-

oggetto

Relazione geologica

tipo elaborato

Strutture

data di consegna

09 giugno 2023

percorso

Server_Atelier/01_2 INCARICHI ATELIER/01_IN CORSO/00_1 5+1AA SRL
INCARICHI_MI/LSF (Legnago Scuola Fattibilità)/08 LSF Ae ESECUTIVO

commessa

rev.	data	redatto	verificato	approvato	oggetto revisione
a	15/12/2021	A.C.	P.C.	D.G.	prima consegna
b	06.06.23	A.C.	P.C.	DG	seconda revisione
c	22.06.23	A.C.	P.C.	DG	terza revisione



SOMMARIO

SOMMARIO.....	2
1.0 PREMESSA	3
2.0 NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
3.0 INTERVENTO IN PROGETTO: INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO, VINCOLI GEOMORFOLOGICI	8
3.1 INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO.	9
3.2 VINCOLI GEOMORFOLOGICI.....	11
4.0 CARATTERISTICHE: GEOLOGICHE, GEOMORFOLOGICHE E GEOTECNICHE	
15	
4.1 CARATTERISTICHE GEOLOGICHE.	16
4.2 CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE.	20
4.3 CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE.	21
4.4 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE.	21
4.5 Verifica alla liquefazione	27
5.0 DATI DELLA STRUTTURA, ZONIZZAZIONE SISMICA, VITA NOMINALE, CLASSE D'USO	33
6.0 CONCLUSIONI	37

1.0 PREMESSA



Il comune di Legnago ha affidato allo studio Sertec, in collaborazione con AF517 Alfonso Femia atelier(s), e l'arch. Michelangelo Pugliese l'incarico della progettazione degli interventi di "demolizione e ricostruzione della scuola secondaria di primo grado G.B. Cavalcaselle".

Il progetto consiste nella rigenerazione e potenziamento della scuola ubicata in Via Sicilia 11, nel quartiere Porto della città di Legnago (VR).

Nel presente elaborato si riporta un inquadramento topografico dell'area di intervento, le sue caratteristiche geologiche e geomorfologiche, nonché gli aspetti vincolistici a cui è legato il territorio in cui si realizza l'opera.

Nello specifico nella presente sarà integrato quanto richiesto dai validatori con nota del 20/06/2023 n° 4

a) Si chiede di inserire in relazione la caratterizzazione geotecnica comprensiva delle risultanze e della descrizioni delle indagini svolte per la redazione del modello geotecnico utilizzato nei calcoli

La caratterizzazione geotecnica dei terreni è presentata nel paragrafo 4.4

b) La classe d'uso dell'edificio è 4 (credo sia un refuso); modificare il documento

Si corregge il refuso con la classe corretta

c) Manca la verifica alla liquefazione obbligatoria secondo quanto previsto dalle NTC

La verifica è presentata al paragrafo 4.5 della presente



2.0 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Pericolosità sismica e Criteri per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n.36 del 27.07.2007;
- D.M. 11 Marzo 1988 “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 fondazioni”.
- Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24 Settembre 1988 “Istruzioni relative alla 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 fondazioni”;
- Legge n° 64 del 02/02/1974 – *“Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”*;
- D.M. del 24/01/1986 – *“Norme tecniche relative alle costruzioni sismiche”*;
- D.M. del 16/01/1996 – *“Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”*;
- Circolare n° 65 del 10/04/1997 – *“Istruzioni per l’applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. del 16/01/1996”*;
- R.D.L. del 30/12/1923, n. 3267 – *“Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani”*;
- L.R. del 13/09/1978 n. 52 – *“Legge forestale regionale”*;
- D.M. del 17/01/2018 – *“Norme tecniche per le costruzioni”*;
- Circolare 21 gennaio 2019 n.7 “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”.



3.0 INTERVENTO IN PROGETTO: INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO, VINCOLI GEOMORFOLOGICI

L'intervento, come anticipato, consiste nella demolizione e ricostruzione della scuola secondaria di 1° grado G.B. Cavalcaselle. L'intervento, che prevede la costruzione di due edifici adiacenti ma distaccati, sarà realizzato in due fasi temporali distinte in modo da consentire la continuità dell'attività scolastica durante tutto il periodo di realizzazione sia della prima che della seconda struttura.

3.1 INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO.

Il presente elaborato è redatto con riferimento al progetto di demolizione e ricostruzione della scuola secondaria di primo grado sita in via Sicilia n. 11 nel comune di Legnago (VR) ed ha il seguente riscontro cartografico su Carta Tecnica Regionale CTR: 145160.

Le coordinate baricentriche, geografiche e chilometriche UTM WGS 84, del luogo in cui sono previste le opere in progetto sono le seguenti:

Geografiche	
Latitudine	45.199282° N
Longitudine	11.320083° E

Chilometriche	
Nord	5007707.00 m N
Est	682222.80 m E

La quota di intervento è di circa 16 m s.l.m..

Si riportano a seguire degli estratti cartografici con ubicazione dell'intervento.

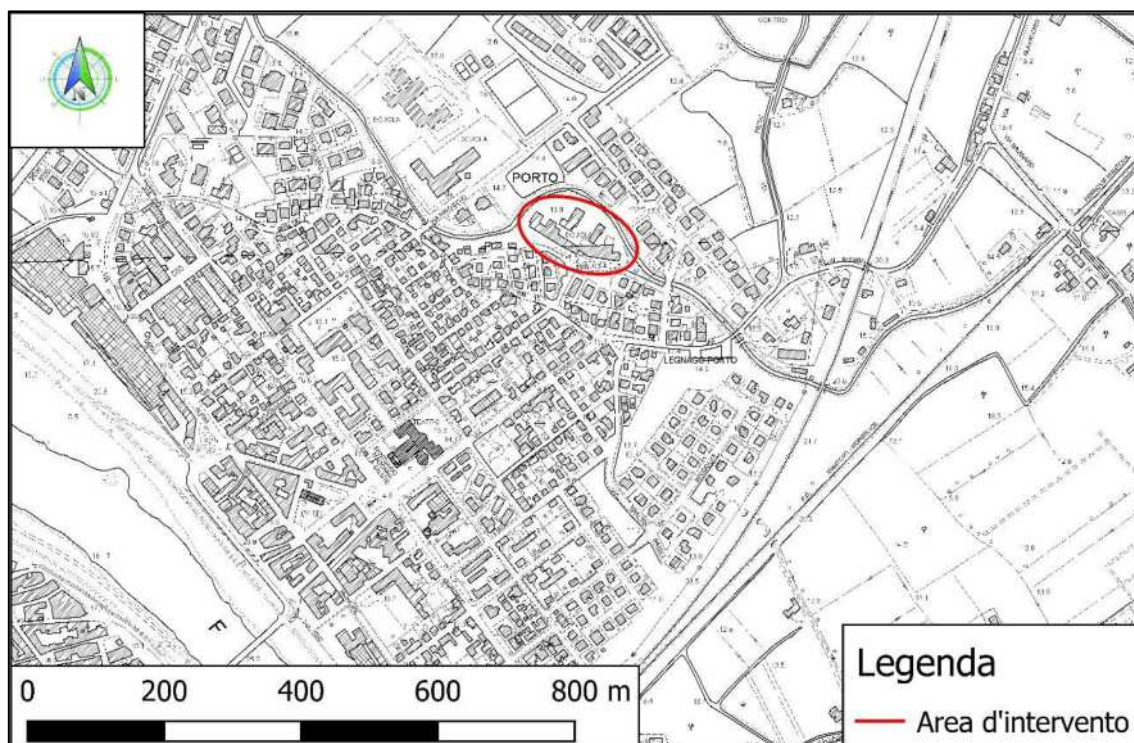


Figura 1 – Ubicazione dell'intervento su CTR estratta dal geoportale della regione Veneto e rielaborata in ambiente GIS

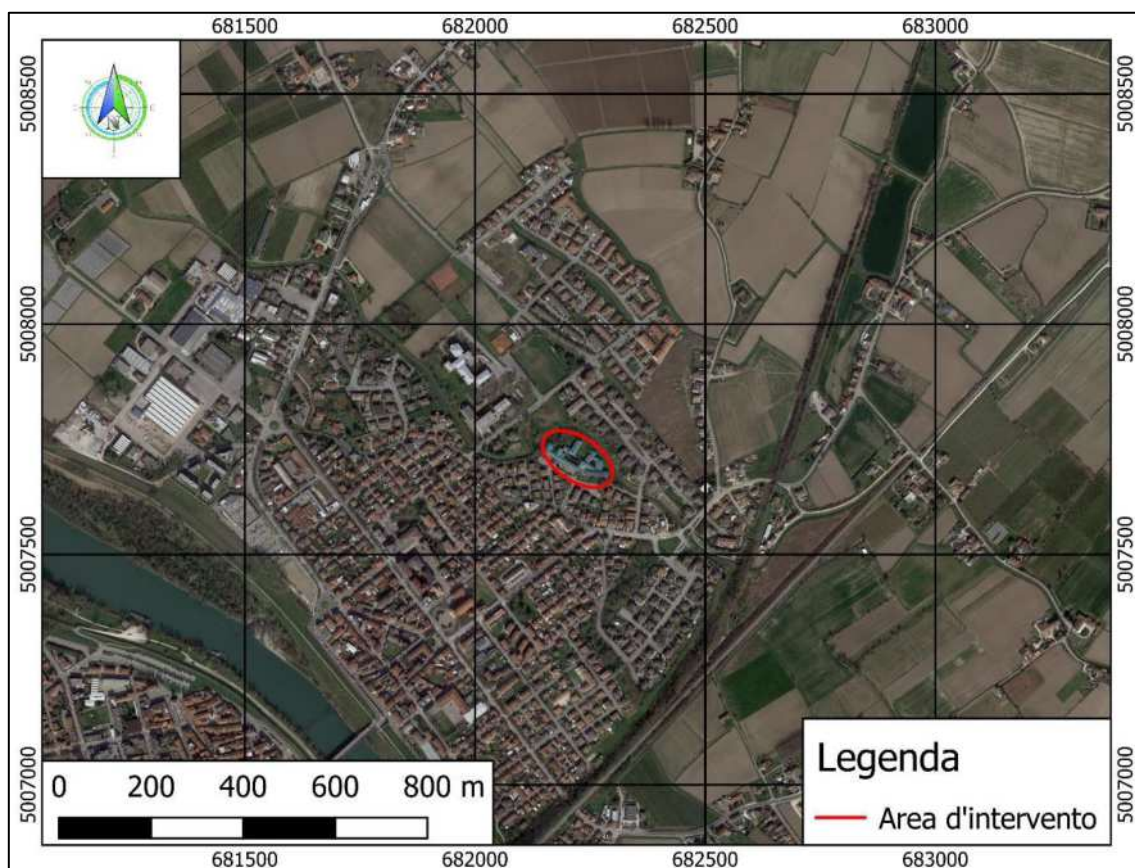


Figura 2 – Ubicazione dell'intervento su ortofoto

3.2 VINCOLI GEOMORFOLOGICI.

Consultando il database del Geoportale della Regione Veneto è stato possibile reperire la cartografia relativa ai processi geomorfologici che hanno interessato l'area oggetto di analisi.

Il settore indagato **non ricade** tra le aree perimetrate di Vincolo Idrogeologico ai sensi del R.D.L. n. 3627 del 30/12/1923 e della L.R. n. 52 del 13/09/1978.

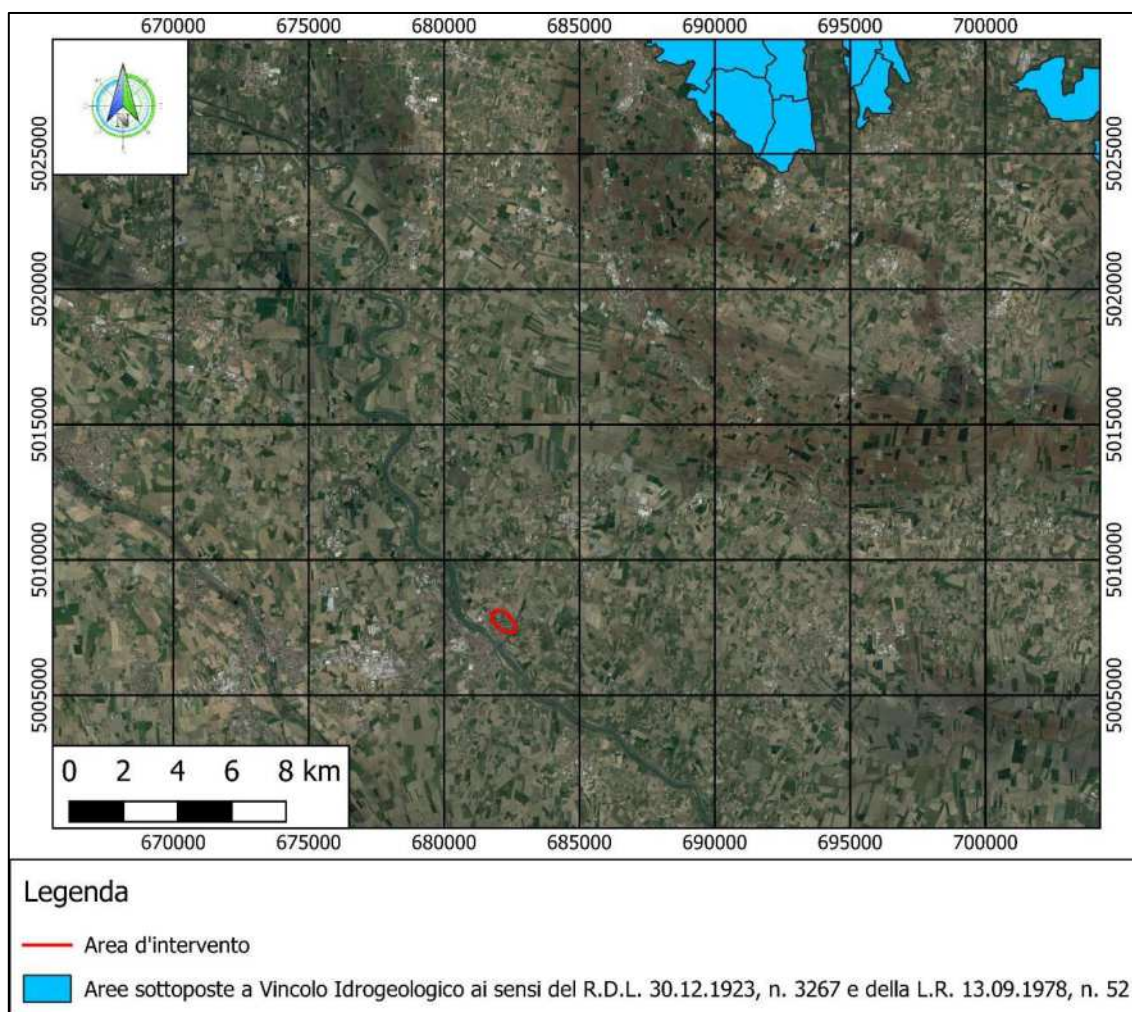


Figura 3 – Ubicazione dell'intervento con le aree sottoposte a Vincolo Idrogeologico ai sensi del R.D.L. 30/12/1923 n.3267 e della L.R. 13/09/1978 n.52

Il settore indagato **non ricade** tra le aree perimetrate di Tutela Paesaggistica ai sensi delle L. 1497/39 e L. 431/85 presente nella tavola 2 del PTRC approvato nel 1992.

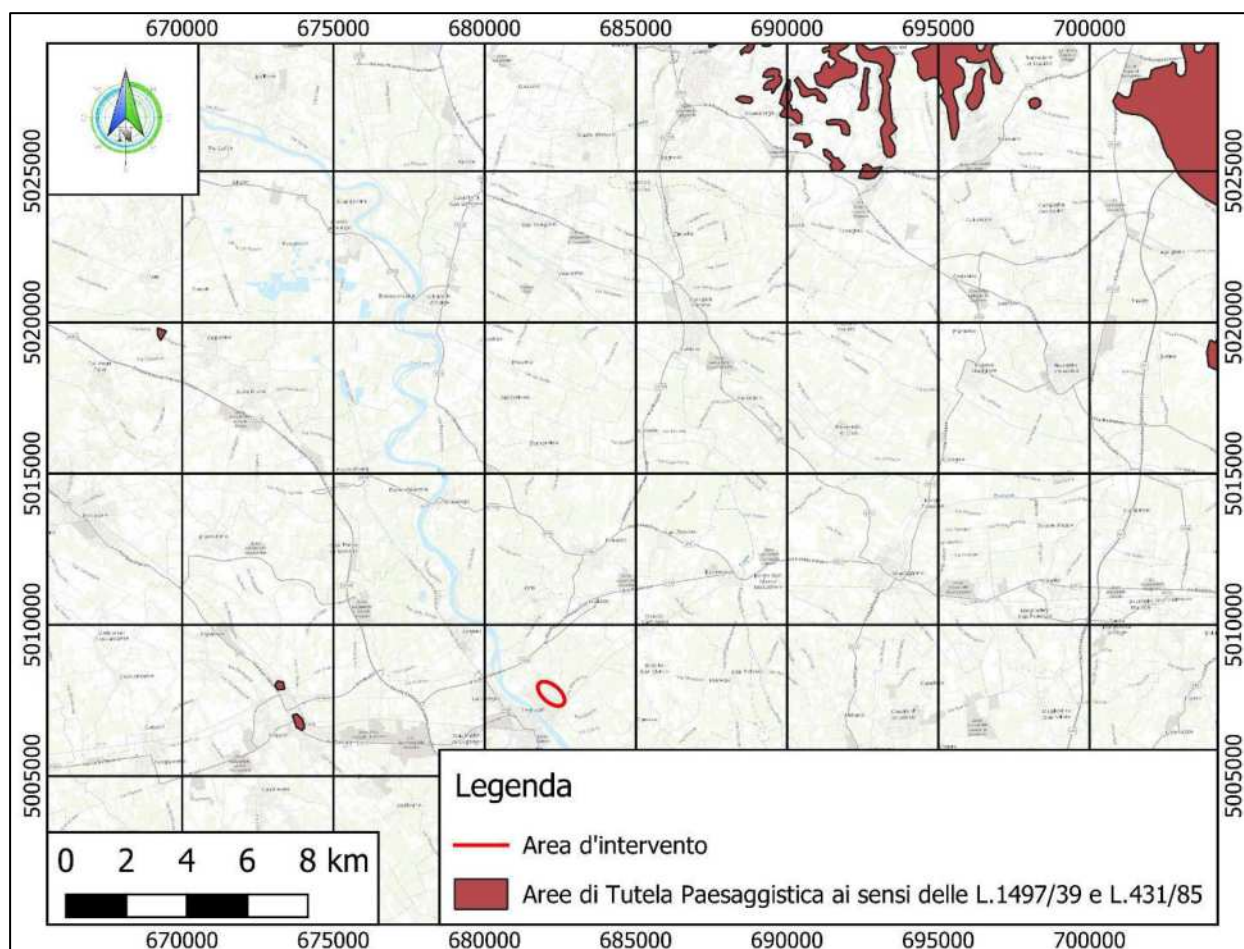


Figura 4 – Aree di Tutela Paesaggistica ai sensi delle L. 1497/39 e L. 431/85 presente nella tavola 2 del PTRC approvato nel 1992

Il settore indagato **ricade** tra le aree perimetrate con **compatibilità geologica idonea** nella Carta delle Fragilità messa a disposizione dal Comune di Legnago.

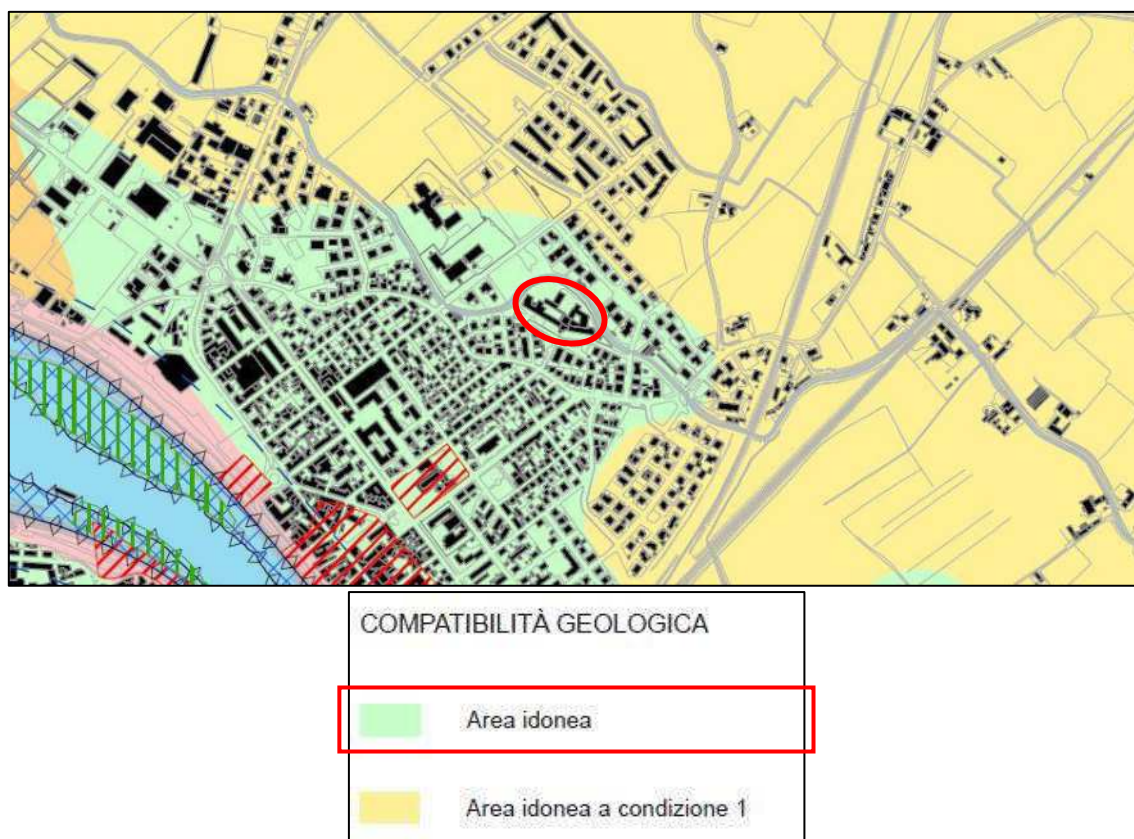


Figura 5 – Carta delle Fragilità del comune di Legnago – Area d'intervento cerchiata in rosso

Definizione di Aree Idonee: sono quelle aree che si prestano all'espansione urbanistica senza presentare particolari problemi tecnico-ambientali; per queste aree, comunque, stante la notevole eterogeneità e variabilità laterale dei terreni affioranti, va comunque effettuata la verifica puntuale delle condizioni geologiche, geotecniche, idrogeologiche ed idrauliche in relazione ad ogni singolo intervento sia esso edilizio o comunque impattante in qualche modo sulla superficie delle aree stesse. In queste aree non si presentano limiti di natura geologica e geotecnica all'edificazione a qualunque livello trovandosi le stesse in condizioni di buono/ottimo drenaggio, con falda sufficientemente profonda e caratteristiche di resistenza dei terreni adatte all'adozione di opere fondali di tipo superficiale; queste aree sono inoltre prive di situazioni di dissesto in atto o potenziale e sono inoltre da considerare sicure sotto l'aspetto idraulico.¹

¹ Dott. Geol. Cagalli A., 2014. «Relazione Geologica». In Piano di Assetto del Territorio, comune di Legnago (VR).

Il settore indagato **ricade** tra le aree perimetrate come tessuto urbano consolidato/residenza e servizi per la residenza nella carta delle azioni di piano, degli habitat presenti nel SIC e delle aree di valutazione messa a disposizione dal Comune di Legnago.



Figura 6 – Carta delle azioni di piano, degli habitat presenti nel SIC e delle aree di valutazione del comune di Legnago – Area d'intervento cerchiata in rosso

4.0 CARATTERISTICHE: GEOLOGICHE, GEOMORFOLOGICHE E GEOTECNICHE

4.1 CARATTERISTICHE GEOLOGICHE.

A scala generale, l'area oggetto di studio, ricade all'interno del periodo geologico Olocene.

Consultando la Carta Geologica delle Tre Venezie a scala 1:100'000 ricade all'interno della formazione a^2 – *alluvioni recenti dei bassipiani*.



Figura 7 - Carta Geologica delle Tre Venezie – Foglio 63

Si riporta di seguito un estratto della relazione geologica del piano regolatore.

Il territorio comunale di Legnago si sviluppa in direzione N-S, è pianeggiante, leggermente degradante verso Sud con quote topografiche variabili da + 20 m ca. a + t m ca. sul l.m.m.;

L'aspetto morfologico della pianura veronese è legato principalmente all'alternarsi delle varie fasi di sedimentazione e di erosione operate prevalentemente dal Fiume Adige e dagli altri corsi d'acqua secondari che si sono succedute durante il periodo Quaternario. I sedimenti prodotti dagli episodi appena descritti, con particolare riferimento al territorio legnaghese, comprendono litologie mediamente sciolte e variamente addensate e compattate, rappresentate da limi, argille e sabbie con presenza di depositi di terreni organici (torbe s.l.) soprattutto in corrispondenza delle area di paleoalveo.

A scala locale, la consultazione della Carta Litologica del comune di Legnago, di cui si riporta un estratto, evidenzia la presenza di una copertura detritica di alluvionale e fluvioglaciale a tessitura prevalentemente sabbioso-limosa.

Da un punto di vista dell'evoluzione geologica, l'area padana rappresenta il retropaese africano di periodo ceno-mesozoico, formatasi dalla collisione fra la zolla africana e quella europea che diventa, nel Paleogene-Neogene, avampaese appenninico della parte meridionale della catena alpina. La Pianura Padana è stata caratterizzata nel tempo da una lenta ma incessante subsidenza; in tale contesto la pianura veronese rientra in un settore caratterizzato da una generale debole immersione del substrato mesozoico verso sud con l'asse di basculamento localizzato lungo la fascia pedemontana dei monti Lessini che sta, probabilmente, all'origine del sistema di fratture distensive (faglie dirette) aventi direzione NO-SE con abbassamento verso SE che caratterizza questa parte del territorio. La perdurante subsidenza dell'area padana appare più evidente procedendo da ovest verso est ovvero verso la costa adriatica come si deduce dall'andamento degli spessori quaternari. Sebbene le cause di questa subsidenza non siano ancora chiare, appare improbabile che la stessa sia dovuta al peso dei sedimenti anche se questo può aver contribuito al fenomeno; alcuni studi relativi all'argomento hanno evidenziato che nel periodo compreso fra il 1897 ed il 1957, conseguentemente al costipamento dei sedimenti ed alle attività antropiche (prime fra tutte l'estrazione di acqua e di idrocarburi dal sottosuolo) hanno portato ad abbassamenti variabili da 1,5 mm/anno nell'alta pianura veronese a 7 mm/anno nel delta del Po; in sintesi è possibile affermare che l'area padana è rimasta sostanzialmente indeformata a decorrere dal tardo Cenozoico, ma presenta in generale una significativa instabilità verticale. Nel Comune di Legnago si rilevano coperture quaternarie di notevole spessore che ricoprono il basamento carbonatico. Nel territorio comunale di Legnago lo spessore della copertura alluvionale accumulatasi dal Miocene ad oggi che ricopre il sub-strato carbonatico ha una potenza complessiva di quasi 1.500 m come ben si deduce dall'osservazione della stratigrafia di un pozzo terebrato nel territorio di Bovolone dall'Agip nel contesto di indagini petrolifere.

Dal punto di vista dei depositi più superficiali, nel territorio legnaghese sono del tutto assenti i depositi grossolani (ghiaie e ghiaie con ciottoli) mentre sono consueti i depositi di sedimenti fini con granulometrie appartenenti alle classi dalle argille alle sabbie; la giacitura è tipicamente lenticolare con rapporti stratigrafici laterali sovente interdigitati e variabili in litologia e potenza degli strati anche in ambiti areali limitati; in profondità si riscontra spesso una regolare alternanza di strati di

sabbia ed argilla e più raramente di torba.²

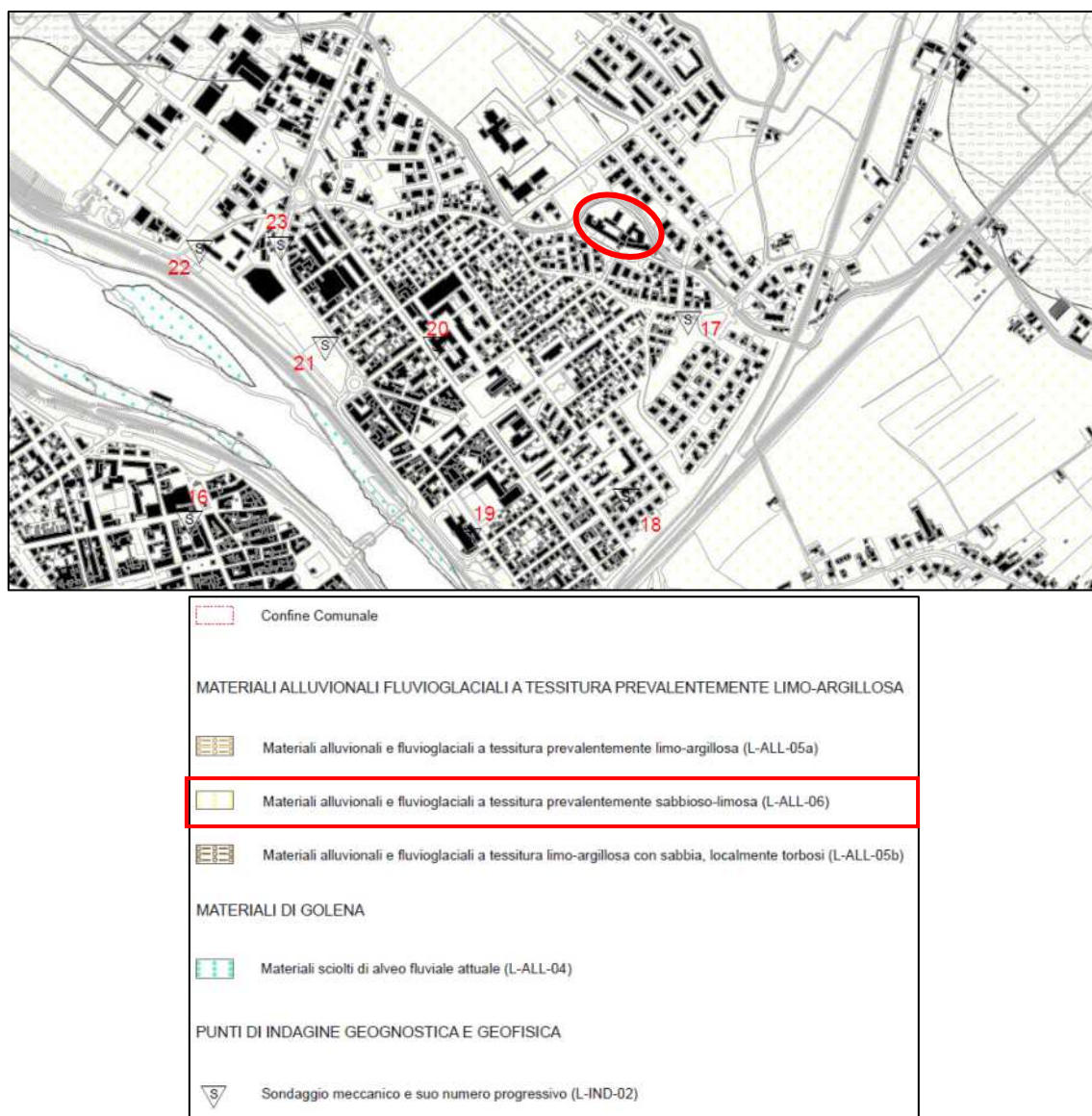


Figura 8 – Carta Litologica del Comune di Legnago – area d'intervento cerchiata in rosso

La zona indagata ricade dunque in una zona caratterizzata da materiali alluvionali fini, costituiti prevalentemente da depositi di origine fluviale, lenticolari, interdigerati, costituiti prevalentemente limi sabbiosi debolmente argillosi.

² Dott. Geol. Cagalli A., 2014. «Relazione Geologica». In Piano di Assetto del Territorio, comune di Legnago (VR).

La consultazione della carta idrogeologica del PRG del comune di Legnago consente di definire compiutamente l'assetto idrogeologico locale e nella fattispecie l'andamento della superficie freatica.

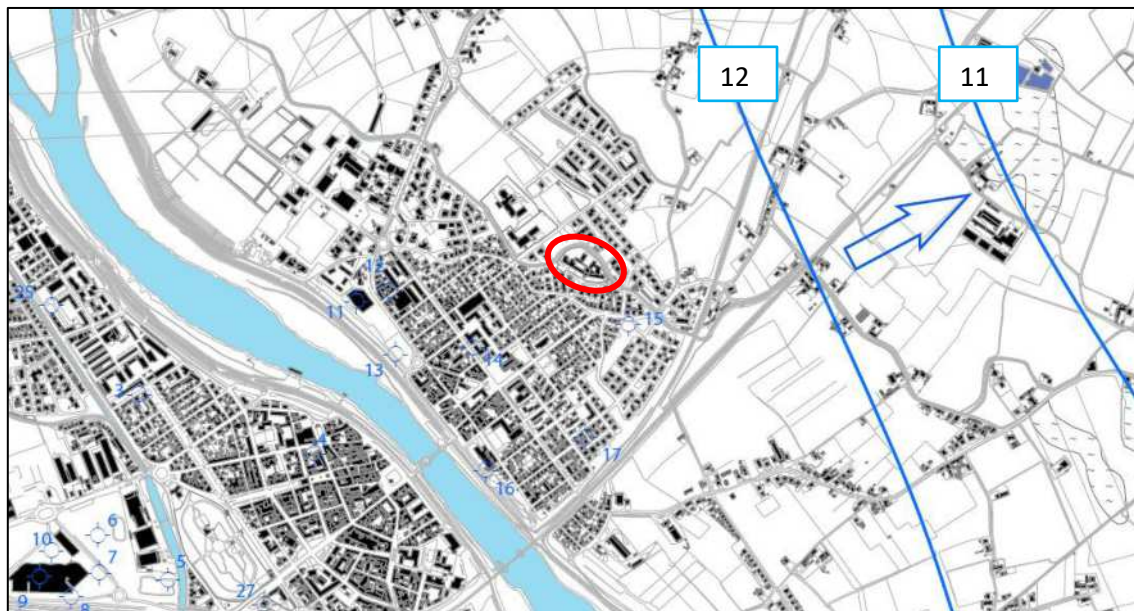


Figura 9 – Carta Idrogeologica del comune di Legnago

L'area oggetto d'intervento si trova a ridosso della linea isofreatica dei 12 m s.l.m. e, dato che la quota topografica della zona si trova a circa 16 m s.l.m., a favore di sicurezza si può considerare una soggiacenza della falda a circa 2.50 m rispetto al piano campagna tenendo conto delle possibili oscillazioni freatiche di ordine decimetrico/metrico in funzione del regime delle precipitazioni e dalle variazioni idrometriche del F. Adige.³

3 Dott. Geol. Cagalli A., 2019. «*Relazione Sismica con Inquadramento Geologico dell'area*». Committente: Amministrazione C.le della Città di Legnago, in comune di Legnago (VR).

4.3 CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE.

Il progetto riguarda un intervento di carattere lineare, in una zona di pianura alluvionale. Le quote topografiche dell'area variano tra i 15 e i 17 m s.l.m.. La zona non evidenzia pendenze rilevanti, appare stabile e non presenta dissesti.

4.4 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE.

Per valutare le caratteristiche geotecniche del suolo si è fatto riferimento ad analisi geognostiche e geofisiche messe a disposizione dal comune di Legnago.

L'analisi geognostica disponibile è una prova penetrometrica statica i cui risultati sono stati reperiti nella relazione Indagine geotecnica presso la scuola media G.B. Cavalcaselle in loc. Porto di Legnago del Dott. Geol. Fulvio Baraldi.

Si avevano inoltre a disposizione n. 2 prove geofisiche:

- HVSr – Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio
- MASW – Multichannel Analysis of Surface Waves

La cui trattazione e risultati si trovano nella Relazione Sismica con Inquadramento Geologico dell'area del Dott. Geol. Ampelio Cagalli commissionata dall'Amministrazione C.le della Città di Legnago.

A seguire si riporta l'ubicazione delle prove geofisiche e i risultati delle prove a disposizione.

Le coordinate geografiche del centro dello stendimento MASW e HVSr sono le seguenti:

Latitudine: 45,200331

Longitudine: 11,321252



Figura 10 - Ubicazione dei sondaggi sismici su ortofoto

1. Dott.Geol.Cagalli A., 2019. "Relazione Sismica con Inquadramento Geologico dell'area". Committente: Amministrazione C.le della Città di Legnago, in comune di Legnago (VR)

PROVA PENETROMETRICA STANDARD.

I tabulati ed i grafici estratti dalla *Indagine geotecnica presso la scuola media G.B. Cavalcaselle in loc. Porto di Legnago del Dott. Geol. Fulvio Baraldi* sono riportati negli allegati in calce alla relazione. Dall'analisi dei risultati è stata ricostruita la stratigrafia che segue, di cui è stato possibile ricavare i valori di C_u – Coesione non drenata e ϕ – angolo d'attrito interno.

Strato	Litologia	C_u (kg/cmq)	ϕ (°)
0.00 – 0.40	Terreno vegetale	-	-
0.40 – 2.00	Limo argilloso e sabbioso	0.7	27
2.00 – 2.60	Limo sabbioso	0.7	27
2.60 – 3.40	Argilla	0.4	0
3.40 – 5.40	Argilla limosa e sabbiosa	0.6	26
5.40 – 11.60	Argilla e limo	0.3	0
11.60 – 15.00	Sabbia limosa e sabbia	0	32

Tabella 1 - Parametri geotecnici ricavati dalla prova penetrometrica standard

HVSR - HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO.

Come riportato nella *Relazione Sismica con Inquadramento Geologico dell'area di Dott. Geol. Ampelio Cagalli*, l'HVSR è un'analisi sismica di tipo passivo. La tecnica a sismica passiva H.V.S.R., Horizontal to Vertical Spectral Ratio, è molto rapida, non invasiva e richiede pochissimo spazio a disposizione. Attraverso la misura del rapporto spettrale H/V determinato da microtremiti (oscillazioni del suolo indotte da fattori naturali o antropici) è possibile valutare le frequenze proprie di vibrazione del sottosuolo. Attraverso l'elaborazione dello spettro H/V, oltre alle frequenze di risonanza del terreno, è possibile ottenere dettagli stratigrafici e velocità delle onde di taglio Vs. Per l'acquisizione dei dati viene usato un geofono triassiale a 2 Hz della ditta MAE srl. In questo tipo di analisi, si pone l'attenzione sul fenomeno della doppia risonanza cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico trasmesso in superficie e quelle degli edifici in progetto, oppure esistenti.

In caso di evento sismico infatti ci potrebbe essere una notevole trasmissione di energia dal suolo all'edificio con importanti sollecitazioni strutturali.

La frequenza di risonanza di un edificio può essere stimata con la formula semplificata:

$$f_e = 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

Oppure può essere valutata con formule semplificate, quale quella indicata nel D.M. 17.01.2018, valida per edifici con Z non superiore ai 40 metri e massa distribuita, approssimativamente, in maniera uniforme lungo l'altezza

$$f_s = \frac{1}{C_1 Z^{\frac{3}{4}}}$$

Tipologia	C_1
Costruzioni con struttura a telaio in acciaio	0,085
Costruzioni con struttura a telaio in calcestruzzo armato	0,075
Costruzioni con qualsiasi altro tipo di struttura	0,050

L'interpretazione dei dati viene eseguita utilizzando i software GEOPSY, Grilla della MOHO e fogli elettronici autoprodotti.

Risultati dell'indagine HVSr

Instrument: EXT-MAE A6000S

Data format: 16 byte

Full scale [mV]: n.a.

Start recording: 16/04/19 00:00:00 End recording: 16/04/19 00:10:00

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h10'00". Analyzed 57% trace (manual window selection)

Sampling rate: 125 Hz

Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 21%

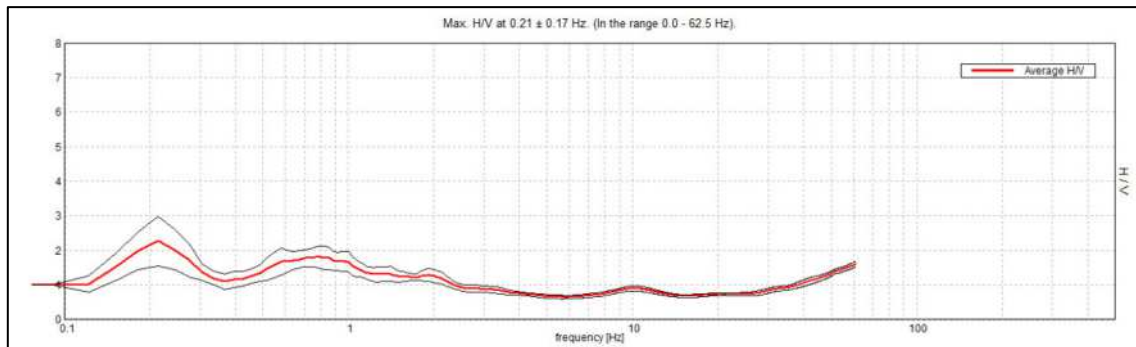


Figura 11 – Horizontal to vertical spectral ratio

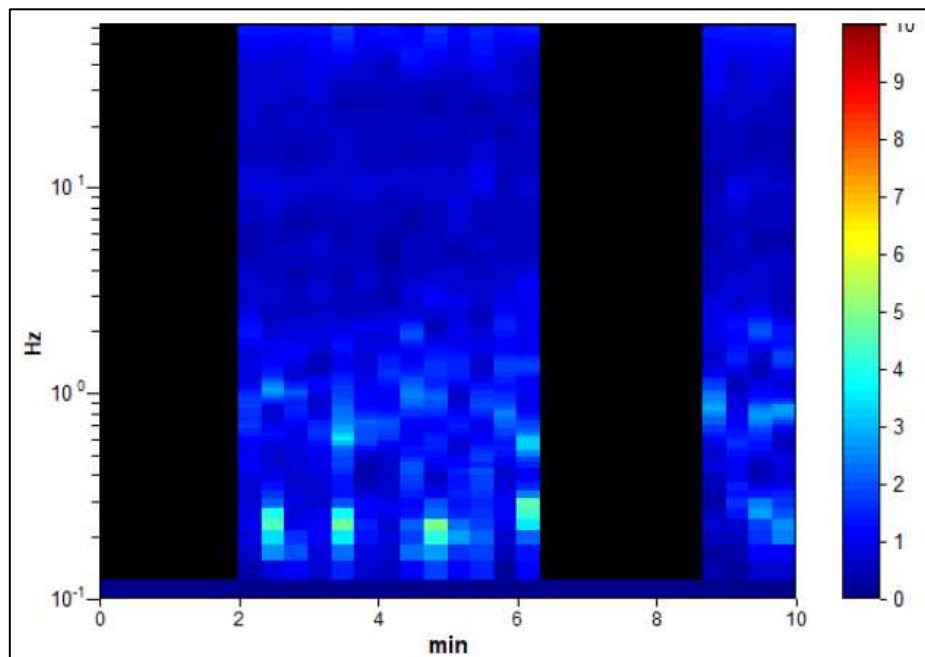


Figura 12 - H/V time history

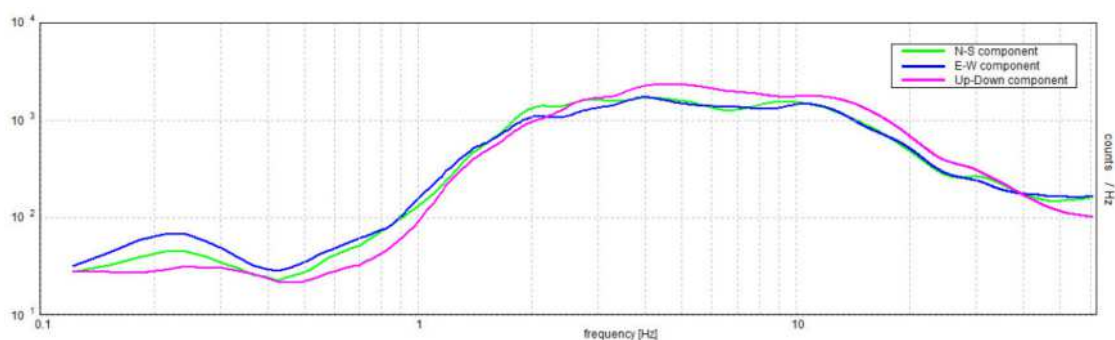


Figura 13 – Single component spectra

Considerazioni

La frequenza caratteristica di risonanza del sito, generata dalla discontinuità sismica a più elevato rapporto spettrale ($H/V=2.27$), è di circa 0.21 Hz. Da tenere in considerazione anche tutto l'intervallo di frequenze tra 0.6-1 Hz.

MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves.

Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga (dispersione).

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro.

Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali corrispondenti alle singole armoniche.

L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

E' possibile simulare, 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 e lunghezza d'onda secondo la relazione:

$$v = \lambda \cdot \nu$$

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.

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. I modi per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.

Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

L'obiettivo dell'indagine consiste nella ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo finalizzata all'assegnazione della categoria del sottosuolo di fondazione ($V_{s,eq}$) come richiesto dalla normativa vigente (Norme Tecniche sulle Costruzioni – D.M. 17/01/2018).

L'interpretazione dei dati viene eseguita utilizzando il software Easy Masw della Geostru e Grilla Software della Moho srl.

Risultati dell'indagine MASW

Start recording: 16/04/19 00:00:00 End recording: 16/04/19 00:00:02

Trace length: 0h00'02".

Sampling rate: 1000 Hz 20

Channel labels: CH01 ; CH02 ; CH03 ; CH04 ; CH05 ; CH06 ; CH07 ; CH08 ; CH09 ; CH10 ; CH11 ; CH12

Array geometry (x): 0.0 3.0 6.0 9.0 12.0 15.0 18.0 21.0 24.0 27.0 30.0 33.0 m.

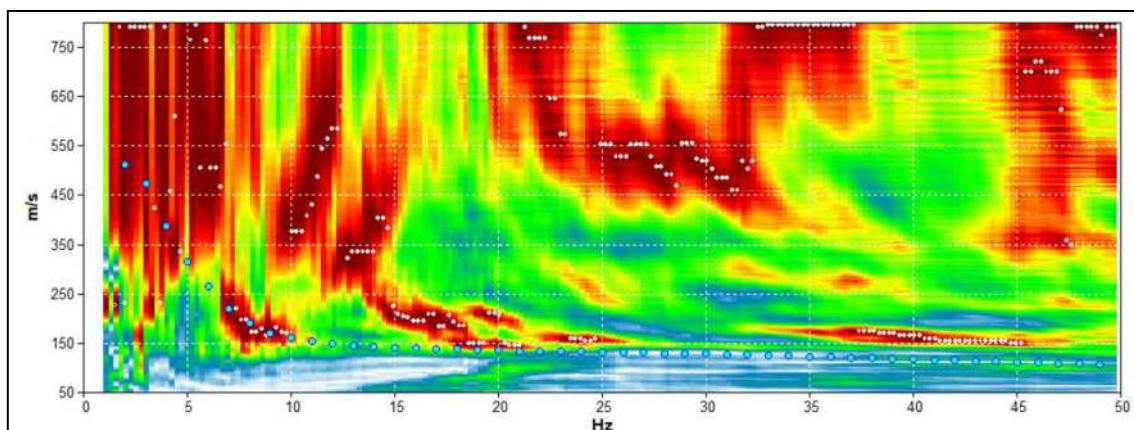


Figura 14 – Modelled Rayleigh wave phase velocity dispersion curve

<i>Profondità alla base dello strato [m]</i>	<i>Spessore strato [m]</i>	<i>Vs [m/s]</i>	<i>Poisson ratio</i>
1.00	1.00	100	0.42
5.00	4.00	150	0.42
9.00	4.00	170	0.49
14.00	5.00	240	0.49
31.00	17.00	330	0.47
51.00	20.00	450	0.44
inf.	inf.	600	0.39

$$V_{seq}(1.0 - 31.0) = 245/s$$

Categoria del suolo di fondazione

Per l'identificazione della categoria di sottosuolo la normativa raccomanda vivamente la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio Vs tramite metodi diretti, ed eventualmente desumerla dall'esecuzione di prove in situ tipo SPT/CPT.⁴

3 Dott. Geol. Cagalli A., 2019. «Relazione Sismica con Inquadramento Geologico dell'area». Committente: Amministrazione C.le della Città di Legnago, in comune di Legnago (VR).

4.5 VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

Da un punto di vista granulometrico, seppur ricavate indirettamente dalle prove penetrometriche, le litologie presenti, tutte di carattere francamente limoso argilloso, comporterebbero sulla base del criterio granulometrico l'esclusione a priori della verifica alla liquefazione.

Sulla base di quanto previsto dall'art. 7.11.3.4.2 delle NTC del D.M. 17 Gennaio 2018, la verifica a liquefazione non risulterebbe necessaria se, con riferimento al punto 1 dell'articolo sopra citato - l'accelerazione massima attesa al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) risultasse minore di $0,1 g = 9.81 \text{ m/sec}^2 \cdot 0.1 = 0.981 \text{ m/sec}^2$.

Nello specifico, con riferimento al sito prescelto il Modello di pericolosità sismica MPS04-S1⁵, prevede un'intensità sismica sempre inferiore a 0.1 g;

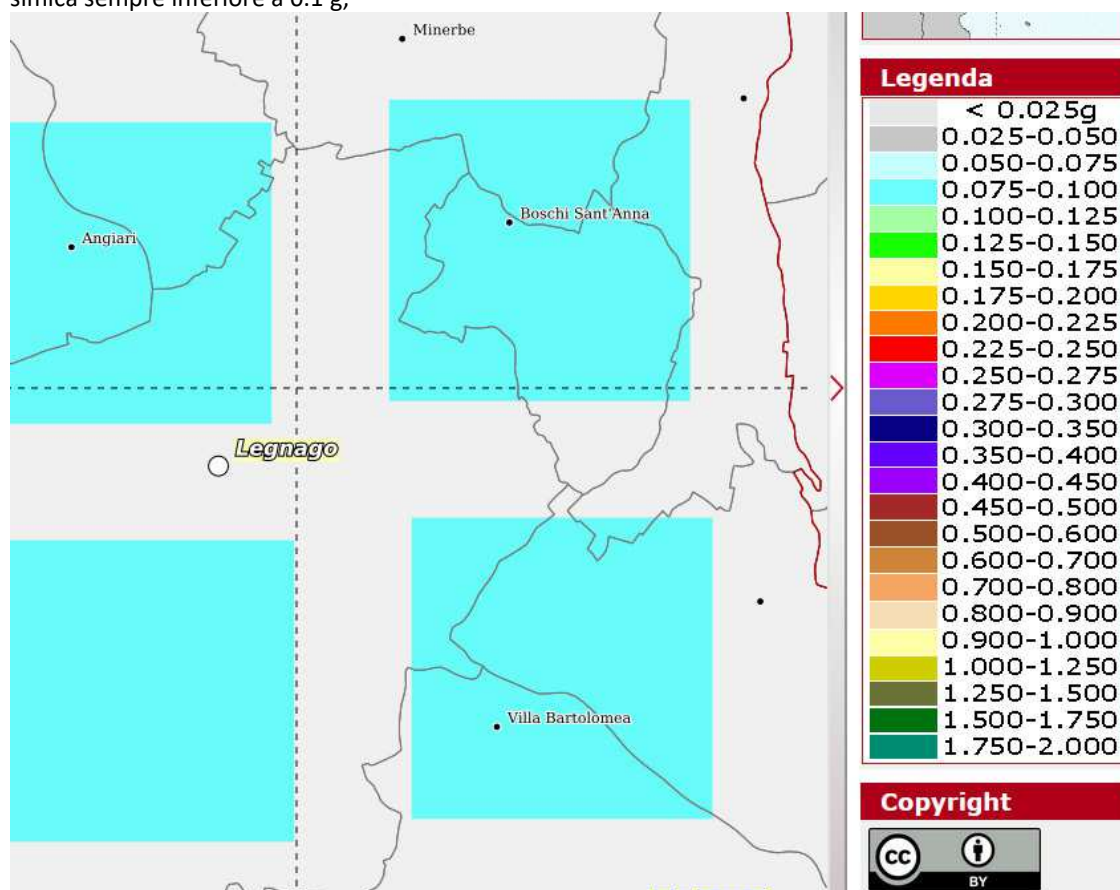


Figura 15: Estratto Modello di pericolosità sismica MPS04-S1⁵

⁵ <https://esse1-gis.mi.ingv.it/>

Poiché Adrus e Stoko e altri autori, hanno dimostrato che, laddove la velocità V_{s1} è maggiore di 210 m/sec il fenomeno della liquefazione è escludibile a priori, si è proceduto con il calcolo di suddetta grandezza.

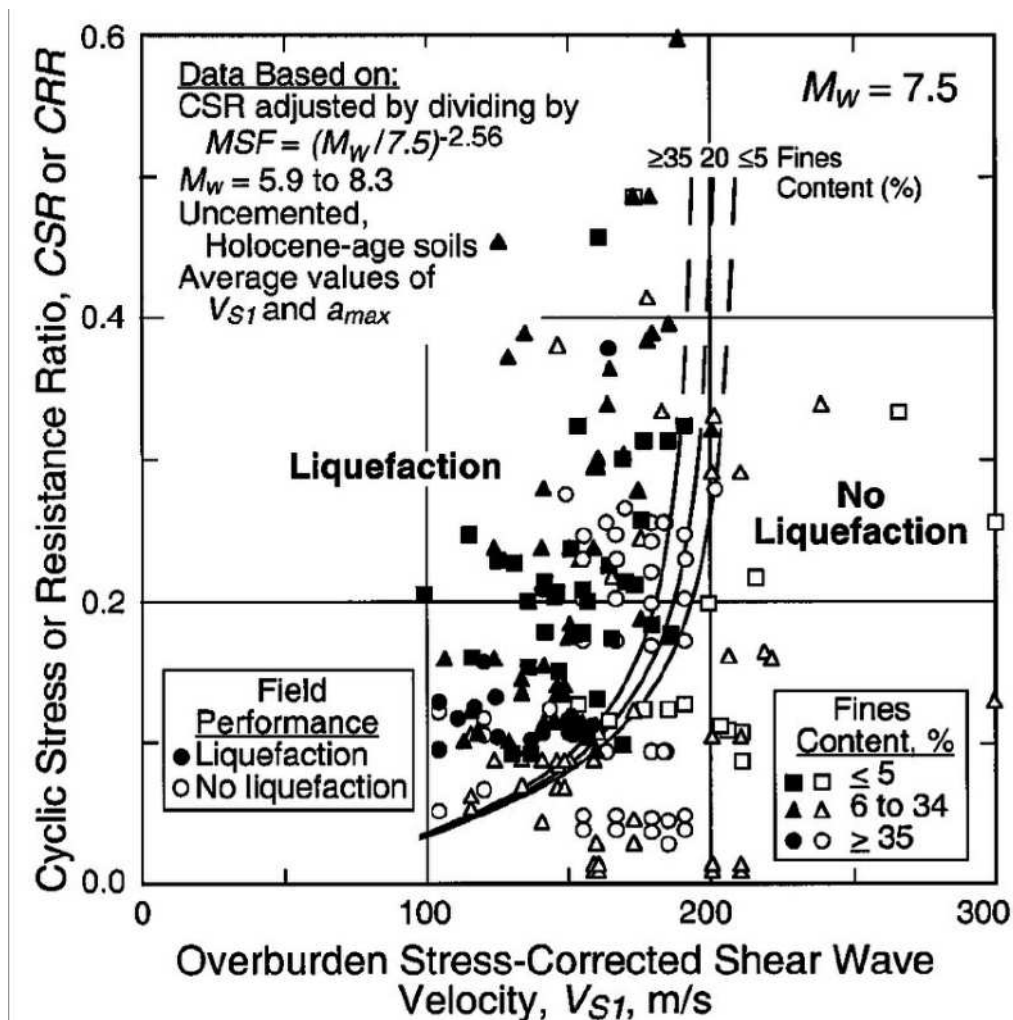


Figura 16. Curve di resistenza alla liquefazione per terremoti di magnitudo 7.5 e terreni non cementati (Adrus e Stoko, 2000)

Al fine di valutare la suscettibilità alla liquefazione nei terreni sotto falda in condizioni dinamica è stata definita la velocità normalizzata efficace V_{s1} con la correlazione proposta da Kayen et al (1992), Robertson et al (1992) per i terreni sub pianeggianti e normalconsolidati, che tiene conto del rapporto tra la pressione atmosferica P_a e la tensione efficace σ'_{v0} .

$$V_{s1} = V_s \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25}$$

Dove

V_s : Velocità delle onde di taglio dello strato suscettibile a liquefazione[m/s]

P_a : pressione atmosferica [kPa]

σ'_{v0} : tensione efficace[kPa]

È stato considerato un valore della velocità delle onde di taglio (V_s) pari a 245 m/s

Per il calcolo delle tensioni effettive nella formula del calcolo della V_{s1} sono stati utilizzati i valori di peso dell'unità di volume indicati in calce nella seguente relazione.

Considerando una profondità della falda pari a 2.5 m dal piano di campagna, uno spessore di 20 m dello strato suscettibile a liquefazione il calcolo è presentato nella seguente pagina.

La Figura 17, presenta il calcolo della velocità normalizzata efficace

Figura 17. Calcolo velocità normalizzata efficace Vs1

Come indicato nella letteratura i valori massimi delle velocità di taglio normalizzata $(V_{s1})_{CS}$ **per i quali è escludibile il fenomeno della liquefazione**, a seconda del contenuto di materiale fine (FC) sono riportati di seguito:

$\gamma_2 := 16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$ peso per unità di volume argille limose $H_2 := 2 \text{ m}$ spessore dello strato argille limose sopra falda
 $\gamma_{2sat} := 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$ peso per unità di volume saturo argille limose $H_3 := 18 \text{ m}$ spessore dello strato sotto falda
 $falda := 2.5 \text{ m}$
 $\sigma_{v0} := (\gamma \cdot H) + (\gamma_2 \cdot H_2) + (\gamma_{2sat} \cdot H_3) - \left(H_3 \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right)$
 $\sigma_{v0} = 176 \text{ kPa}$
 $V_s := 245 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$
 $V_{s1} := V_s \cdot \left(1 \cdot \frac{\text{atm}}{\sigma_{v0}} \right)^{0.25}$
 $V_{s1} = 213.41 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Come indicato nella letteratura i valori massimi delle velocità di taglio normalizzata $(V_{s1})_{CS}$ **per i quali è escludibile il fenomeno della liquefazione**, a seconda del contenuto di materiale fine (FC) sono riportati di seguito:

Poiché la percentuale di *fini* è sicuramente superiore al 15% è escludibile la liquefazione.

- NCERR,(1997)
 - $(V_{s1})_{CS}=220 \text{ m/s}$ Per $FC<5\%$
 - $(V_{s1})_{CS}=210 \text{ m/s}$ Per $5\% \leq FC < 35\%$
 - $(V_{s1})_{CS}=200 \text{ m/s}$ Per $FC>35\%$
- Andrus e Stokoe (2000)

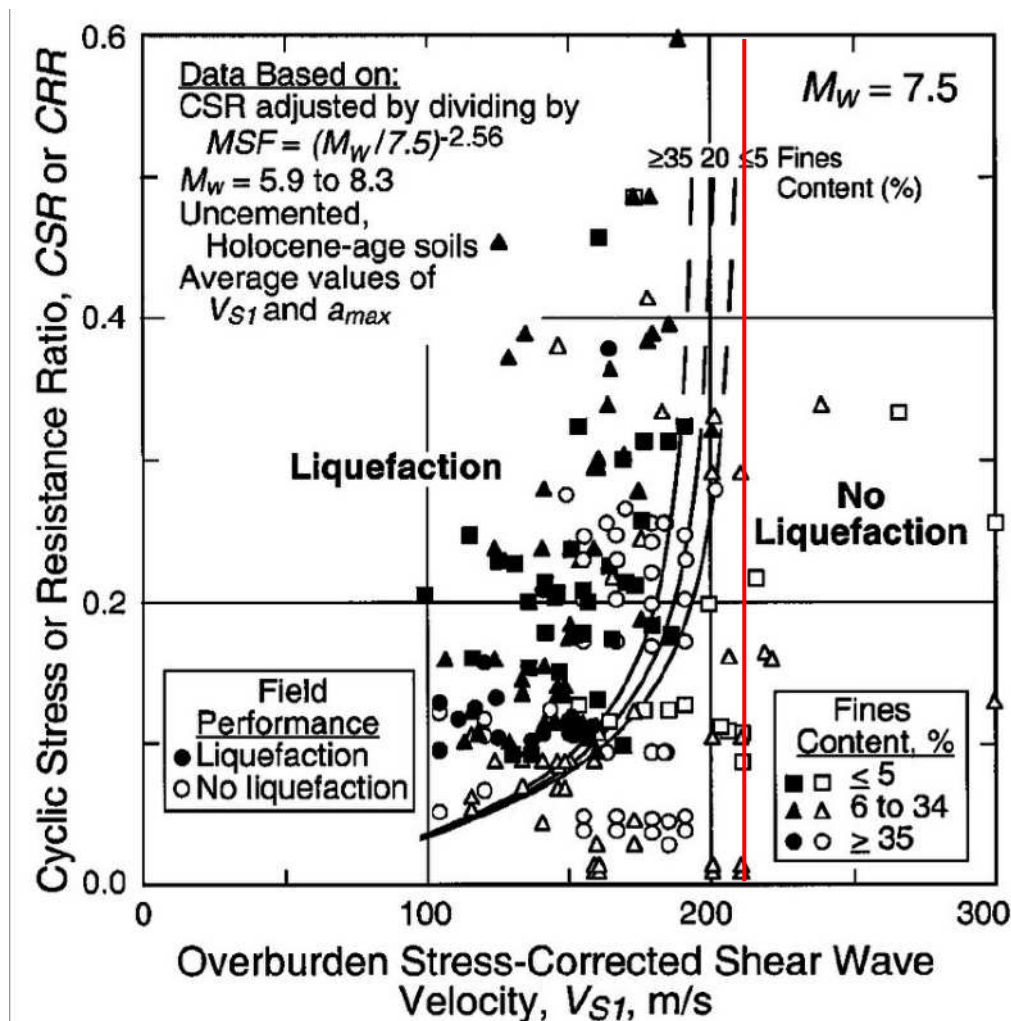


Figura 18. Curve di resistenza alla liquefazione per terremoti di magnitudo 7.5 e terreni non cementati (Adrus e Stoko,2000) in rosso $V_{s1} = 244$ m/s per i lavori in oggetto

Da ciò i vari autori si ipotizzano che al di sopra $(V_{s1})_{CS} = 210$ m/s è escludibile che si verifichi il fenomeno della liquefazione.

Essendo $V_{s1} = 213$ m/s $> (V_{s1})_{CS} = 210$ m/s I terreni presenti nel sito oggetto di studio non sono suscettibili a liquefazione.



5.0 DATI DELLA STRUTTURA, ZONIZZAZIONE SISMICA, VITA NOMINALE, CLASSE D'USO



La classificazione sismica del territorio nazionale ha introdotto normative tecniche specifiche per le costruzioni di edifici, ponti ed altre opere in aree geografiche caratterizzate dal medesimo rischio sismico.

La zona sismica per il territorio di Legnago, indicata nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003, aggiornata con la Deliberazione del Consiglio Regionale Veneto n. 67 del 3.12.2003 ed in seguito modificate con la D.G.R. n.244 del 9 marzo 2021.

Regione		VENETO
Provincia		VERONA
Comune		Legnago
Coordinate Geografiche del cantiere	Latitudine	45.199282° N
	Longitudine	11.320083° E
Altitudine		16 m s.l.m.
Zona sismica		ZONA 3
Tipo di opera	TAB. 2.4.I D.M. 17/01/2018	ORDINARIA
Vita nominale V_N	P.to 2.4.1 D.M. 17/01/2018	50 ANNI
Classe d'uso	P.to 2.4.2 D.M. 17/01/2018	IV
Coefficiente d'uso C_u	P.to 2.4.3 D.M. 17/01/2018	2
Periodo di riferimento per azione sismica V_R	P.to 2.4.3 D.M. 17/01/2018	100 ANNI

Le Norme Tecniche per le Costruzioni individuano le azioni sismiche di progetto a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione. Essa costituisce l’elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche. Le NTC2018 definiscono al par. 3.2 la pericolosità sismica in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR. 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:

- a_g : accelerazione orizzontale massima al sito
- F_0 : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T_c : valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Categorie del sottosuolo

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. 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 della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.	
Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
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.

Tabella 2 – Categorie di sottosuolo da tabella 3.2.II – D.M. 17/01/2018

Nella fattispecie l'attribuzione alla categoria "C" di sottosuolo è stata eseguita sulla base dell'analisi morfologica dell'area, delle condizioni stratigrafiche e del valore della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, calcolata a partire dalla velocità delle onde di taglio ottenute dalle indagini MASW e HVSr congiunte, come riportato nella *Relazione Sismica con Inquadramento Geologico dell'area del Dott. Geol. Ampelio Cagalli, commissionata dall'Amministrazione C.le della Città di Legnago*.

$$v_{s,eq} = 245 \frac{m}{s}$$

La velocità equivalente ottenuta ricade all'interno della categoria di sottosuolo C, a cui corrisponde un coefficiente stratigrafico S_s di 1.50.

6 Dott. Geol. Cagalli A., 2019. «*Relazione Sismica con Inquadramento Geologico dell'area*». Committente: Amministrazione C.le della Città di Legnago, in comune di Legnago (VR).



Categoria sottosuolo	S_s
A	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$

Tabella 3 – Espressioni di S_s – Tabella 3.2.IV – D.M. 17/01/2018

Condizioni topografiche

Per tenere conto delle condizioni topografiche è necessario individuare il valore del coefficiente topografico S_T , dipendente dalle categorie topografiche illustrate nella seguente tabella:

Tab. 3.2.III – Categorie topografiche

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

Tabella 4 – Categorie topografiche – Tabella 3.2.III – D.M. 17/01/2018

Il caso in studio appartiene alla categoria topografica T1, si trova infatti una superficie topografica pianeggiante, alla quale corrisponde un coefficiente di amplificazione topografica S_T pari a 1.0 (tabella 3.2.V D.M. 17/01/2018).

6.0 CONCLUSIONI

Nel presente elaborato è stato fornito un inquadramento topografico, geologico, geomorfologico e vincolistico dell'area interessata dalle opere relative al progetto di "demolizione e ricostruzione della scuola secondaria di primo grado G.B. Cavalcaselle".

In base a quanto esposto nella relazione si può affermare che il settore indagato:

- **ricade** tra le aree perimetrate con **compatibilità geologica idonea** nella Carta delle Fragilità
- **ricade** tra le aree perimetrate come tessuto urbano consolidato/residenza e servizi per la residenza nella carta delle azioni di piano, degli habitat presenti nel SIC e delle aree di valutazione
- **non ricade** tra le aree perimetrate di Vincolo Idrogeologico ai sensi del R.D.L. n. 3627 del 30/12/1923 e della L.R. n. 52 del 13/09/1978
- **non ricade** tra le aree perimetrate di Tutela Paesaggistica ai sensi delle L. 1497/39 e L. 431/85 presente nella tavola 2 del PTRC approvato nel 1992

In base a quanto riportato nella carta idrogeologica del comune di Legnago si è potuto valutare la soggiacenza della falda a circa 2.50 m rispetto al piano campagna.

L'area di intervento, rientra nei **materiali alluvionali e fluvioglaciali** a tessitura prevalentemente sabbioso-limosa.

Si può dunque affermare che il sito risulta **valido** per le opere in progetto, non avendo rilevato problematiche dal punto di vista della stabilità e vincolistico.

Dall'osservazione dei risultati ottenuti dalle indagini riportate nella presente relazione è stato possibile elaborare un profilo stratigrafico dell'area interessata dall'opera:

- la prova penetrometrica standard ha restituito la stratigrafia con ipotesi dei relativi parametri geotecnici (coesione non drenata e angolo d'attrito)
- le indagini sismiche hanno calcolato la velocità delle onde di taglio individuando la profondità alla quale cambia la stratigrafia del terreno.

Vista l'estensione considerevole dell'edificio, vista la disponibilità di un unico sondaggio puntuale e visti i risultati delle velocità di propagazione delle onde di taglio, si è optato per accorpare i primi 12.00 m di profondità in un solo strato. Di fatto non si può garantire il dettaglio della stratigrafia ottenuta dalla prova penetrometrica standard per tutta l'area d'intervento ed, inoltre, le onde di taglio hanno restituito valori di velocità di propagazione delle onde s simili fino a 14 m di profondità.

Condizioni drenate				
Strato [m]	Litologia	γ [kN/m ³]	C [kg/cm ²]	ϕ [°]
0 – 12.00	Argilla limosa e sabbiosa	16.00	0	26
12.00 – 15.00	Sabbia limosa e sabbia	17.00	0	32

Tabella 5 - Parametri geotecnici in condizioni drenate

Condizioni non drenate				
Strato [m]	Litologia	γ [kN/m ³]	Cu [kg/cm ²]	ϕ [°]
0 – 12.00	Argilla limosa e sabbiosa	16.00	0.5	0

Tabella 6 - Parametri geotecnici in condizioni non drenate

Per le condizioni non drenate non si riportano le caratteristiche del secondo strato in quanto la sabbia presenta $Cu = 0 \frac{kg}{cm^2}$.

I pesi di volume sono stati ipotizzati a partire da dati di bibliografia di terreni con caratteristiche simili, non avendo a disposizione le risultanze di prove di laboratorio.