

Agostino Pasquali Coluzzi
geologo

Marco Venturini
geologo

Mauro Valcarengi
geologo

STUDIO TRESIS

Geologia, Geotecnica, Ingegneria

3514 D_ARCHITETS REZZATO

COMUNE DI REZZATO

PROVINCIA DI BRESCIA

CAP 25086 - CC H256 - foglio 15 - mappale 94

Committente:

DEFENDINI ARCHITETS SRL

Progetto:

**NUOVO EDIFICIO RESIDENZIALE
COMPOSTO DA 24 APPARTAMENTI**

IN VIA TARTAGLIA, NELL'AMBITO DEL PIANO ATTUATIVO "ATDC 23"

RELAZIONE GEOLOGICA

CON CARATTERIZZAZIONE SISMICA E GEOTECNICA

ai sensi della DGR 2616/2011

e del D.M. 17 Gennaio 2018 (aggiornamento Norme Tecniche per le Costruzioni)

Data	Revisione	Gestore della commessa	Responsabilità professionale
22.12.2025	2	Dott. Marco Venturini	Dott. Marco Venturini

INDICE

1 - PREMESSA	3
2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	5
2.1 - Litologia	5
2.2 - morfologia.....	9
2.3 - idrogeologia	12
2.4 - componente sismica	13
2.5 - analisi dei vincoli sul territorio, fattibilità geologica	15
3 - MODELLO GEOTECNICO DELL'AREA.....	17
4 - RIASSUNTO DELLO STUDIO	22
 RELAZIONE TECNICA SULLA PROSPEZIONE SISMICA SITO-SPECIFICA.....	24
1 - ANALISI HVSR.....	25
1.1 - Cenni sulla metodologia HVSR.....	25
1.2 - Acquisizione dei dati	25
1.3 - Analisi ed elaborazione dei segnali acquisiti	25
1.4 - Descrizione dei risultati dell'analisi HVSR	26
2 - INDAGINE SISMICA MASW	27
2.1 - Cenni sulla metodologia MASW	27
2.2 - Acquisizione dei dati MASW	27
2.3 - Analisi ed elaborazione dei segnali acquisiti	27
3 - MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO	28
4 - PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE.....	29
5 - CONCLUSIONI	30

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

D.P.R. n° 328 del 5 giugno 2001

Eurocodice 7: Progettazione geotecnica - parte 1: Regole generali

Eurocodice 8: Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici

Norme Tecniche per le Costruzioni (Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018)

Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" (CSLLPP 2/2/2009, n. 617)

BIBLIOGRAFIA

Lancellotta R., "Geotecnica", Zanichelli, 2001

Bowles J.E., "Foundation – Analysis and design", McGraw-Hill, 1988

Cestari F., "Prove geotecniche in sito", Geo-graph, 1990

A.G.I., "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche", 1977

1 - PREMESSA

Su incarico dell'Architetto Matteo Defendini dello Studio DEFENDINI ARCHITETS SRL di Brescia è stato eseguito uno studio per ricostruire il modello geologico, geotecnico e sismico in corrispondenza di un'area del Comune di Rezzato (BS), situata in Via Tartaglia, interessata dal progetto di costruzione di un edificio residenziale composto da 24 appartamenti, nell'ambito del Piano Attuativo "ATDC 23".

La figura 1 mostra l'ubicazione dell'area e del fabbricato in progetto.

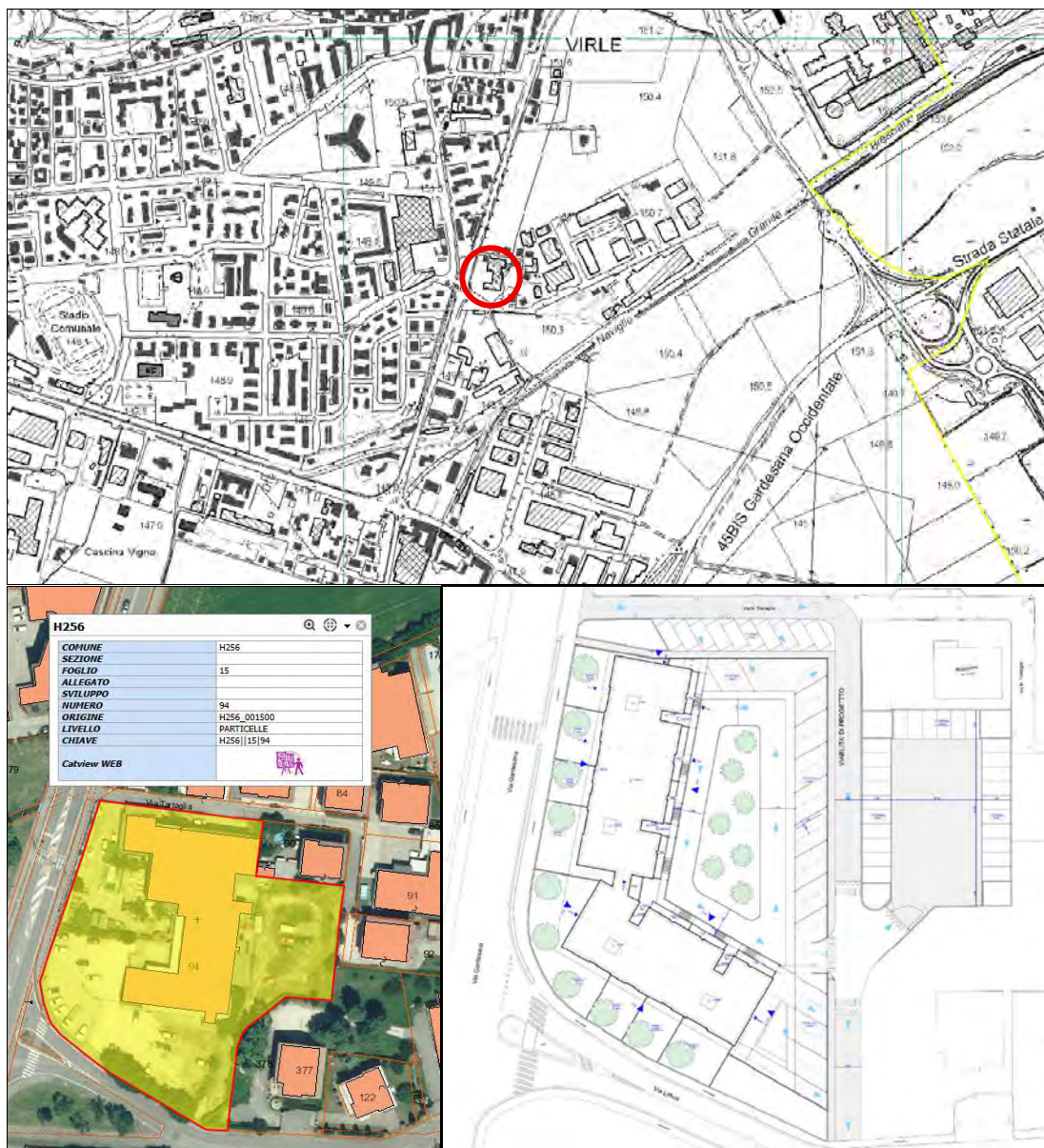


figura 1: ubicazione dell'area in esame e del fabbricato in progetto

Lo studio è stato condotto ai sensi delle seguenti norme:

- DGR 2616/2011: verifica della fattibilità dell'intervento in progetto, sulla base di indagini geologiche, geofisiche e geotecniche richieste dalle norme di attuazione dello Studio Geologico Comunale per la specifica classe di fattibilità geologica e per la specifica classe di pericolosità sismica

Norme Tecniche per le Costruzioni, paragrafo 6.1.2 “Prescrizioni Generali”:

- “Le scelte progettuali devono tener conto delle prestazioni attese delle opere, dei caratteri geologici del sito e delle condizioni ambientali”; deve essere eseguito uno “studio rivolto alla caratterizzazione e modellazione geologica” i cui risultati “devono essere esposti in una specifica relazione geologica”
- “Le analisi di progetto devono essere basate su modelli geotecnici dedotti da specifiche indagini e prove che il progettista deve definire in base alle scelte tipologiche dell’opera o dell’intervento e alle previste modalità esecutive. Le scelte progettuali, il programma e i risultati delle indagini, la caratterizzazione e la modellazione geotecnica unitamente ai calcoli per il dimensionamento geotecnico delle opere e alla descrizione delle fasi e modalità costruttive, devono essere illustrati in una specifica relazione geotecnica”

Sono state eseguite le attività di seguito elencate.

- Raccolta di documentazione geologica di base riguardante il sito interessato dal progetto:
 - foglio 47 “Brescia” della “Carta geologica d’Italia” alla scala 1:100.000 e relative note illustrative
 - relazione illustrativa dello Studio Geologico del Territorio Comunale redatto nel novembre 2003 dalle Dott.sse Laura Ziliani e Rosanna Lentini e dal Dott. Giorgio Crestana, secondo le disposizioni della L.R. 41 del 24/11/97 e delle “Direttive Regionali” approvate con D.G.R. n° 7/6645 del 29/10/01
 - relazioni illustrative degli “Aggiornamento della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio di Rezzato secondo i criteri ed indirizzi dell’art. 57 della L.R. 11 Marzo 2005 N°12”, datate a 25 febbraio 2011 e gennaio 2012, a firma delle Dott.sse Laura Ziliani e Rosanna Lentini
 - relazione illustrativa dell’“Aggiornamento della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio di Rezzato secondo i criteri ed indirizzi dell’art. 57 della L.R. 11 Marzo 2005 N°12 ai sensi della DGR 9/2616 del 30/11/2011”, datata agosto 2021, a firma delle Dott.sse Laura Ziliani e Rosanna Lentini e dei dott. Geologi G. Quassoli e D. Scalvini
 - relazione illustrativa - integrazione 2021 dell’“Aggiornamento della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio di Rezzato secondo i criteri ed indirizzi dell’art. 57 della L.R. 11 Marzo 2005 N°12 ai sensi della DGR 9/2616 del 30/11/2011”, datata agosto 2021, a firma del Dott. Geologo N. Crestana

Nota: per semplicità di esposizione, nel presente documento gli studi geologici sopra citati saranno di seguito indicati genericamente come “Studio Geologico Comunale”.

- esecuzione, in data 22/09/2025, delle seguenti indagini in sito:
 - caratterizzazione geologica-geotecnica:
 - n° 3 prove penetrometriche dinamiche SCPT (Standard Cone Penetration Test), di seguito denominate SCPT1, SCPT2 e SCPT3, che hanno raggiunto la profondità rispettivamente di 5.10, 6.30 e 8.40 metri, quote alle quali sono andate “a rifiuto” per la resistenza opposta dal terreno all’ulteriore approfondimento delle perforazioni
 - n° 1 scavo esplorativo profondo circa 3.30 metri realizzato per eseguire una prova di permeabilità, che ha consentito di osservare la natura dei terreni presenti nel primo sottosuolo fino a detta profondità
 - caratterizzazione sismica:
 - n° 1 profilo di sismica multicanale con acquisizione delle onde di superficie ed elaborazione dati mediante metodologia MASW, associata ad una indagine sismica passiva con metodo HVSR

2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

2.1 - Litologia

La figura 2, tratta dal Foglio 47 "Brescia" della Carta Geologica d'Italia dell'I.G.M. alla scala 1:100.000, illustra le caratteristiche geologiche-geomorfologiche generali del territorio comprendente il sito di progetto, la cui posizione è indicata dalla cerchiatura rossa.

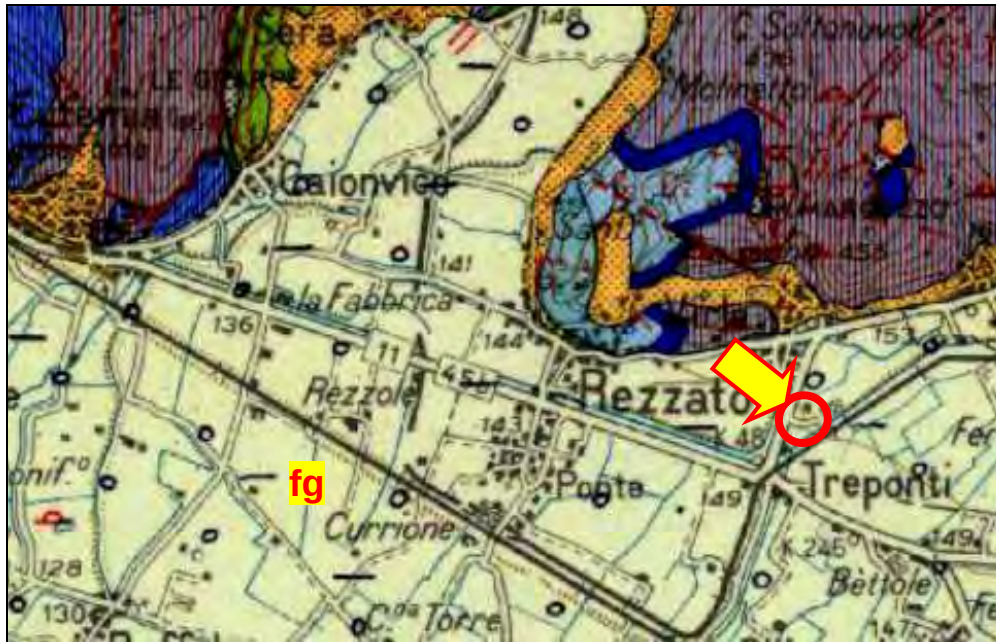
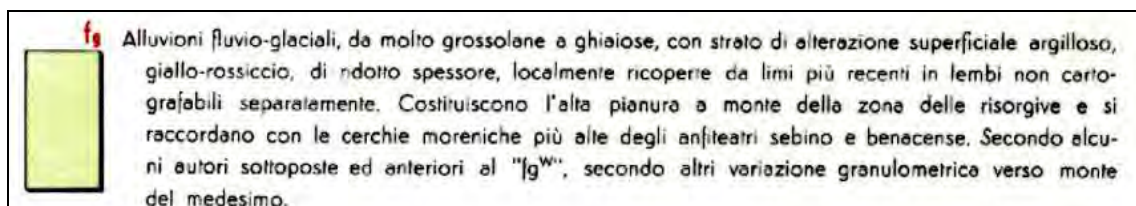


figura 2: estratto Carta Geologica d'Italia

Il sito si trova in un territorio caratterizzato dalla presenza delle *alluvioni fluvio-glaciali* che costituiscono l'*alta pianura bresciana*, indicate con la sigla **fg**, così descritte nella legenda del foglio 47:



I sedimenti delle alluvioni sono connessi agli scaricatori fluvio-glaciali quaternari del sistema morenico gardesano ed al Fiume Chiese.

Si tratta di una potente sequenza di alluvioni sciolte per lo più medio-grossolane, a litologia ghiaioso-sabbiosa, con ciottoli, a scarsa matrice limoso-sabbiosa, con intersezioni lenticolari di livelli sabbiosi, limosi, argillosi e conglomeratici presenti, in generale, solo a profondità superiori a 25-30 metri; la presenza dei livelli a granulometria fine (limi ed argille) è dovuta alle variazioni negli apporti idrici proprie del meccanismo deposizionale delle alluvioni.

La presenza dei terreni alluvionali sopra descritti è confermata dallo Studio Geologico Comunale:

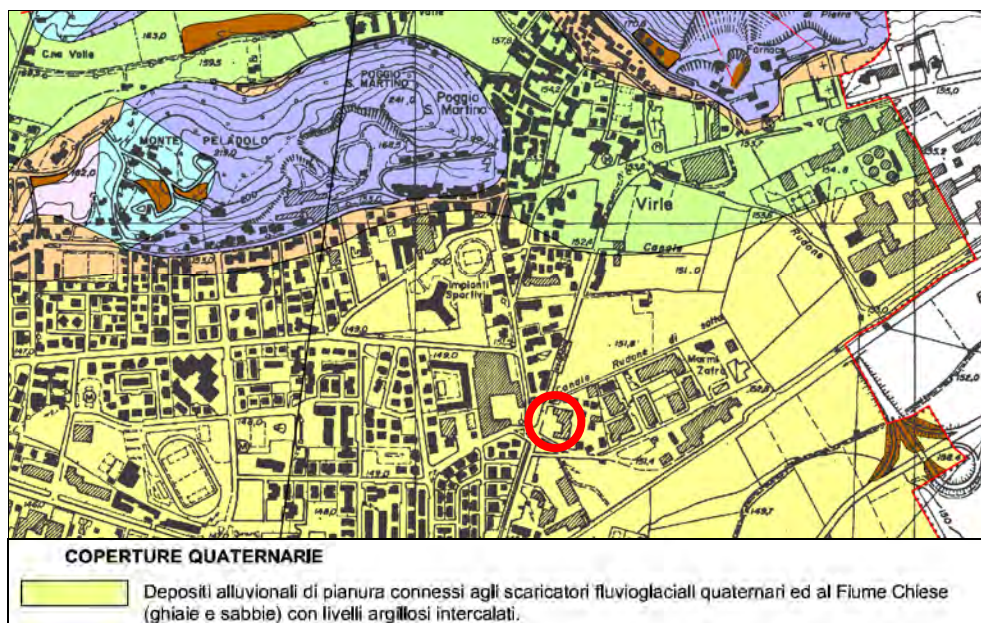
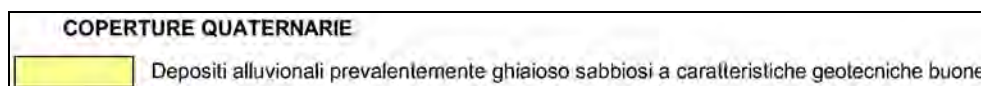


figura 3: estratto “Carta geolitologica con elementi strutturali” dello Studio geologico Comunale

Si riporta la descrizione dei suddetti depositi contenuta nello Studio Geologico Comunale:

“sono costituiti da potenti sequenze deposizionali essenzialmente grossolane a litologia ghiaioso-sabbiosa con ciottoli, connesse agli scaricatori fluvio-glaciali quaternari del sistema morenico gardesano ed al Fiume Chiese. Questi hanno prodotto un’ampia conoide debolmente bombata che si sviluppa da Gavardo fino a Brescia ... Questo quadro regionale può non essere confermato ovunque; a scala locale si possono infatti rilevare significative “anomalie”.

La “Carta geomorfologica e di prima caratterizzazione geotecnica dei terreni” dello Studio geologico Comunale riferisce che si tratta, in generale, di terreni buoni dal punto di vista geotecnico:



Come anticipato in Premessa, per ricostruire nel dettaglio la stratigrafia locale, in data 22/09/2025 è stata eseguita un’indagine geotecnica tramite n° 3 prove penetrometriche dinamiche SCPT (Standard Cone Penetration Test) che hanno raggiunto profondità comprese tra 5.10 e 8.40 metri, e che sono andate tutte “a rifiuto” per la resistenza opposta dal terreno all’ulteriore approfondimento delle perforazioni.

Si riportano nella pagina seguente:

- ubicazione e documentazione fotografica dello scavo esplorativo;
- ubicazione e documentazione fotografica delle prove penetrometriche;
- modello geologico di dettaglio: ricostruzione in corrispondenza di ciascuna prova penetrometrica;
- modello geologico generale dell’area: correlazione tra le prove penetrometriche.

scavo esplorativo

La figura 4 mostra la posizione nella quale è stato eseguito lo scavo:



figura 4: ubicazione dello scavo esplorativo

Le fotografie seguenti documentano l'esecuzione dello scavo e mostrano i terreni da esso estratti:



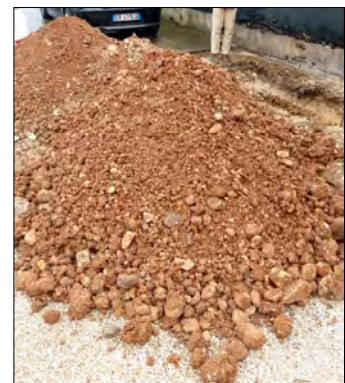
esecuzione dello scavo



in primo piano:
ghiaietto di pavimentazione del piazzale
in secondo piano: materiale di ricarica



in primo piano:
ghiaietto di pavimentazione del piazzale
in secondo piano: argilla



sabbia ghiaiosa-argillosa
con ciottoli e piccoli massi

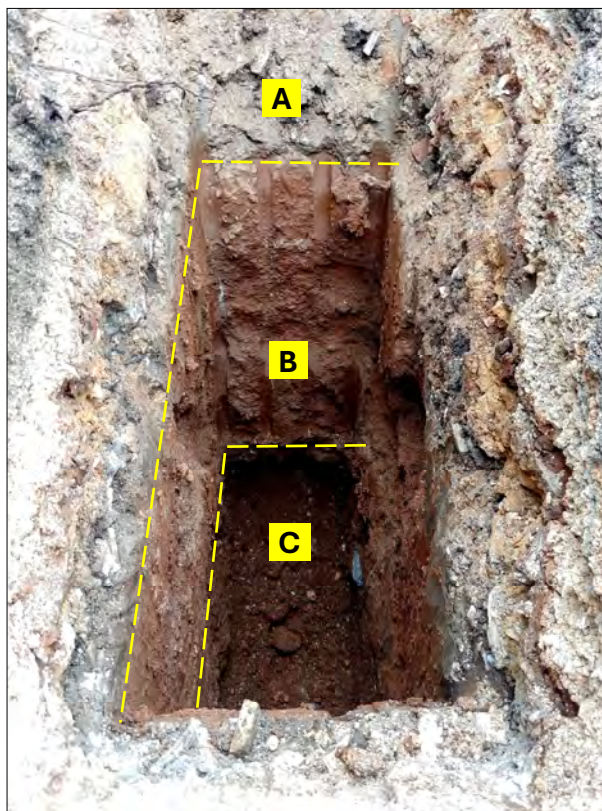
La stratigrafia rilevata è la seguente:

stratigrafia:

- **A** → da 0.00 a 0.80 metri di profondità:
materiale di ricarica costituito da frammenti litoidi angolosi (marmo e materiali simili) di dimensioni centimetriche, in matrice sabbiosa-argillosa;
immediatamente al di sotto di un livello superiore costituito in netta prevalenza dai clasti litoidi è presente, grossomodo tra 40 e 80 cm di profondità, un orizzonte nerastro costituito da argilla inglobante abbondanti clasti
- **B** → da 0.80 a 2.20 metri di profondità:
argilla limosa bruna-rossastra
- **C** → da 2.20 a 3.30 metri di profondità:
sabbia e ghiaia con ciottoli e piccoli massi arrotondati in matrice argillosa rossastra

All'interno dello scavo

non è stata rilevata la presenza di acqua



prove penetrometriche

La figura 5 mostra le posizioni nelle quali sono state eseguite le prove penetrometriche:

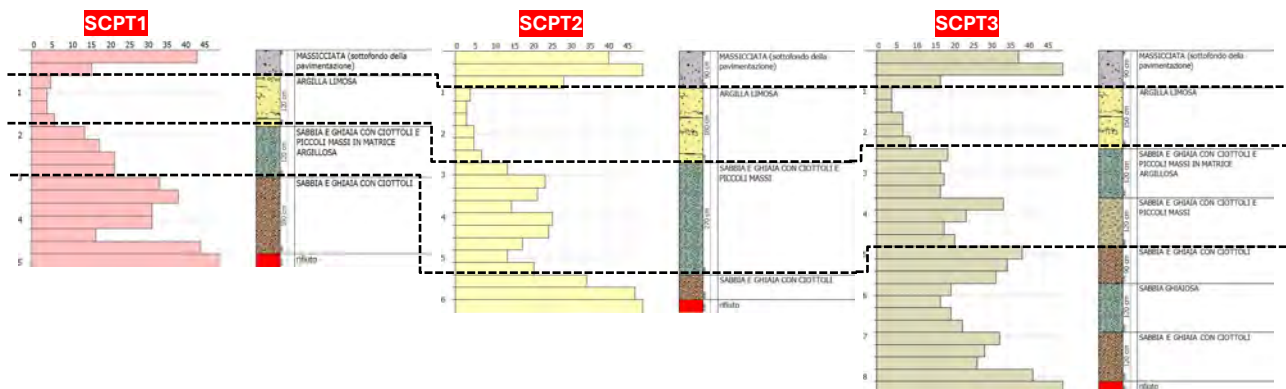


figura 5: ubicazione delle prove penetrometriche

L'immagine seguente visualizza il modello geologico dettagliato per ogni singola prova penetrometrica:

SCPT1					SCPT2					SCPT3				
prof.	n° colpi punta	n° colpi medio	litologia	falda	prof.	n° colpi punta	n° colpi medio	litologia	falda	prof.	n° colpi punta	n° colpi medio	litologia	falda
0,30	44	30	MASSICCATA	non	0,30	41		MASSICCATA	non	0,30	38		MASSICCATA	non
0,60	16		sottofondo pavimentazione	rilevata	0,60	69	46	sottofondo pavimentazione	rilevata	0,60	80	45	sottofondo pavimentazione	rilevata
0,90	5				0,90	29				0,90	17			
1,20	4	5	ARGILLA LIMOSA		1,20	4		ARGILLA LIMOSA		1,20	4		ARGILLA LIMOSA	
1,50	4				1,50	3				1,50	4			
1,80	6				1,80	3	4,5			1,80	7	6		
2,10	14		SABBIA E GHIAIA		2,10	5				2,10	7			
2,40	18	19	CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA		2,40	5				2,40	9			
2,70	22				2,70	7				2,70	19		SABBIA E GHIAIA	
3,00	22				3,00	14				3,00	17	18	CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	
3,30	34				3,30	24				3,30	18			
3,60	36				3,60	22				3,60	17			
3,90	32	33	SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI		3,90	15		SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI		3,90	34		SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	
4,20	32				4,20	26	20			4,20	24	24	SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	
4,50	17				4,50	25				4,50	18			
4,80	45				4,80	18				4,80	21			
5,10	rifiuto				5,10	14				5,10	39		SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	
					5,40	21				5,40	35	35	SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	
					5,70	35		SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI		5,70	32			
					6,00	48	35			6,00	20		SABBIA GHIAIOSA CON CIOTTOLI	
					6,30	rifiuto				6,30	17	20	SABBIA GHIAIOSA CON CIOTTOLI	
										6,60	20			
										6,90	23			
										7,20	33			
										7,50	29			
										7,80	27	30	SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	
										8,10	42			
										8,40	rifiuto			

L'immagine seguente visualizza il modello geologico generale dell'area indagata (correlazione tra le prove penetrometriche):



2.2 - morfologia

Il sito in esame si trova in un settore di territorio pianeggiante, intensamente urbanizzato, alla quota di circa 150 m s.l.m.:



figura 6: immagine aerea del territorio nell'intorno dell'area interessata dal progetto

La categoria topografica secondo NTC è dunque T1 (area pianeggiante).

Per quanto riguarda la dinamica morfologica, la “Carta dei vincoli esistenti” dello Studio Geologico Comunale (figura 7) segnala che l’area in esame si trova in un settore di territorio “a rischio elevato R3”, che implica una probabilità significativa di danni a persone, edifici, infrastrutture e all’ambiente:

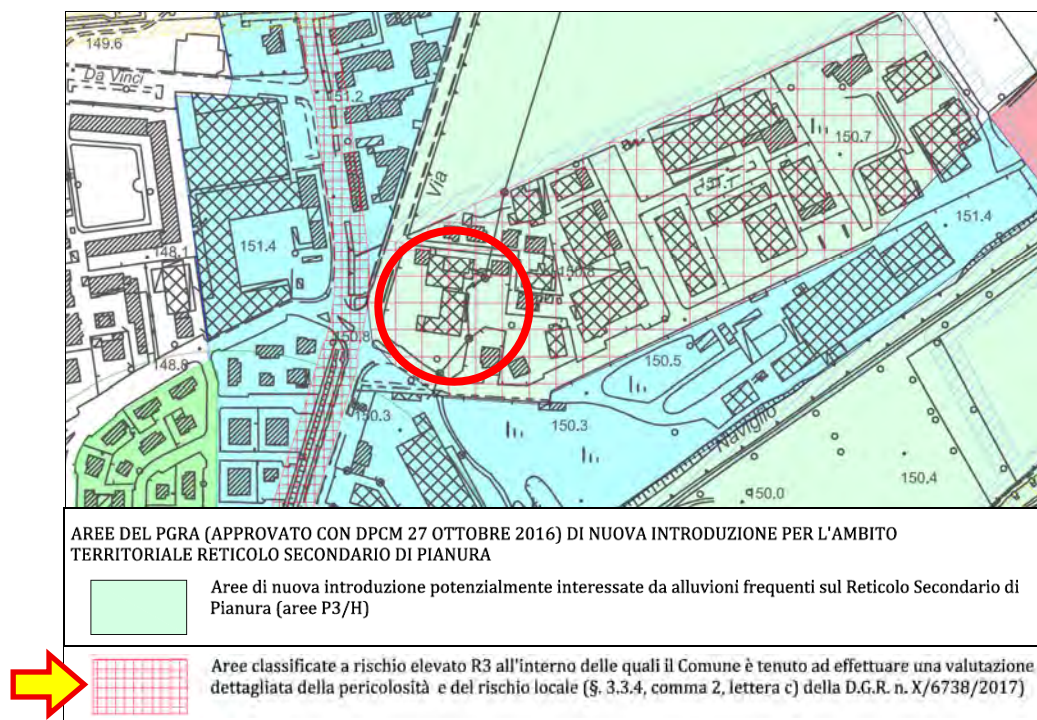


figura 7: “Carta dei vincoli esistenti” dello Studio Geologico Comunale

La “Carta geomorfologica” e la “Carta PAI-PGRA” dello Studio Geologico Comunale visualizzano che si tratta di un rischio elevato per potenziali frequenti inondazioni:

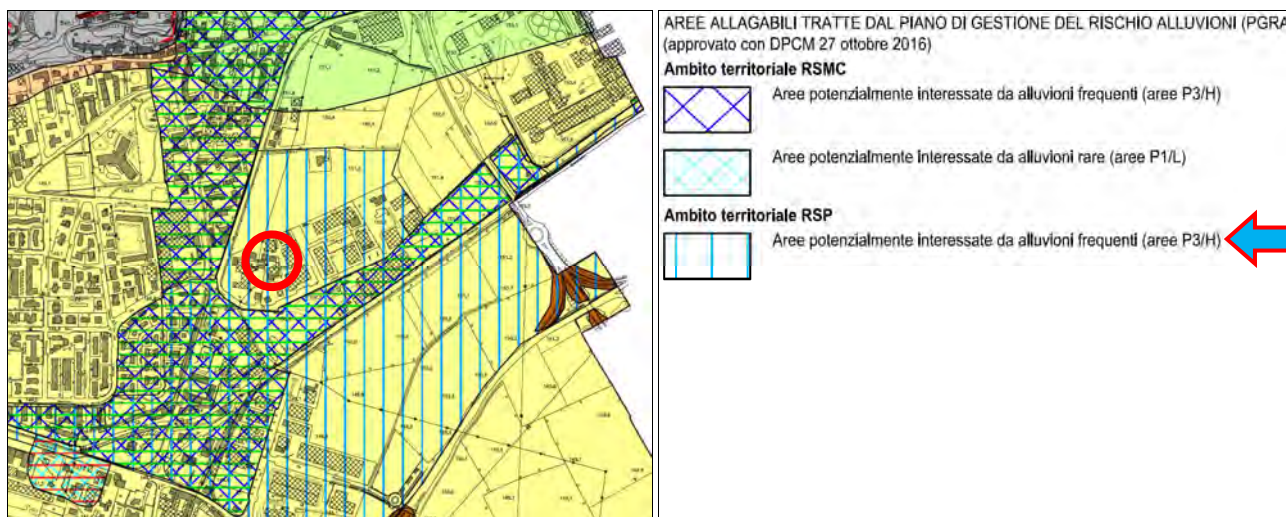


figura 8: estratto “Carta geomorfologica” dello Studio geologico Comunale

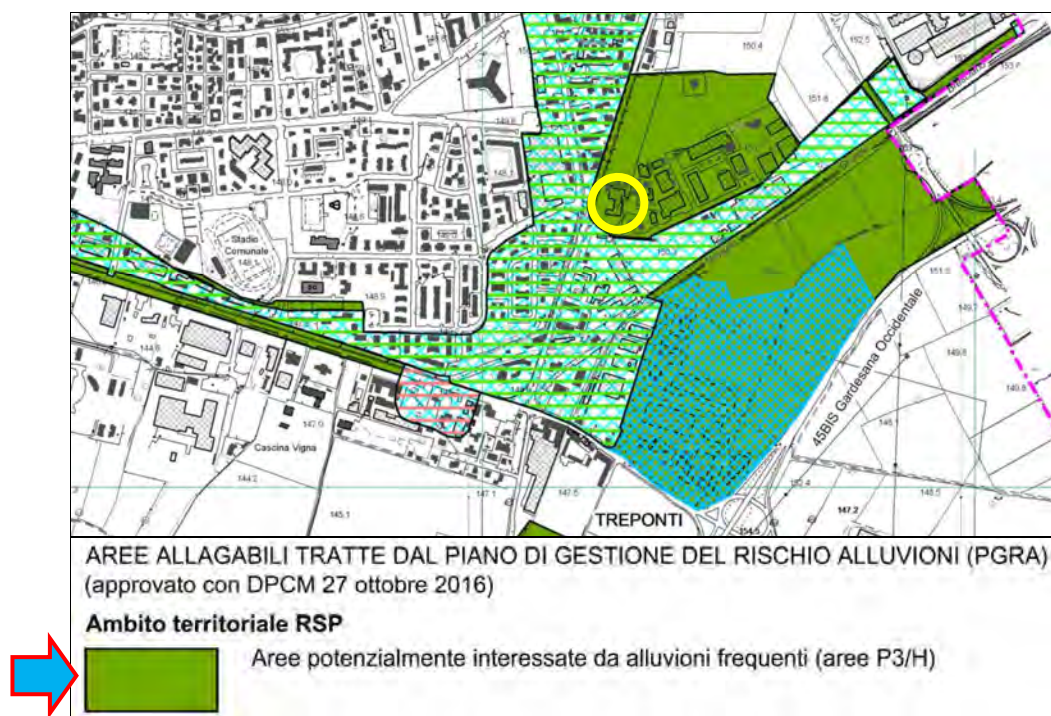


figura 9: estratto "Carta PAI-PGRA" dello Studio geologico Comunale

Le suddette condizioni di pericolosità e rischio sono state confermate nell'aggiornamento 2022 della cartografia PGRA: nell'estratto cartografico riportato in figura 10 la colorazione blu scuro visualizza uno scenario di pericolosità "H", ovvero frequente:



figura 10: cartografia PGRA, aggiornamento 2022

2.3 - idrogeologia

Lo Studio Geologico Comunale riferisce che l'assetto idrogeologico locale "è quello di un acquifero di tipo multistrato in cui i diversi orizzonti acquiferi sono su larga scala tra loro in connessione idrogeologica ed in equilibrio".

Con riferimento alla profondità della falda freatica, la figura 11 della pagina seguente, tratta dalla "Carta idrogeologica e del sistema idrografico con indicazioni sulla vulnerabilità degli acquiferi" dello Studio Geologico Comunale, segnala che il sito in esame si trova grossomodo in corrispondenza della isopieza con quota 119 m s.l.m. riferite a febbraio dell'anno 2000:

Poiché l'area si trova alla quota di circa 150 m s.l.m., la locale soggiacenza della falda nel 2000 era pari a circa 31 m; anche in considerazione delle oscillazioni metriche stagionali e anche di più lungo periodo alle quali può essere soggetto il livello di falda, la sua profondità è tale per cui è possibile affermare che la falda freatica (prima falda) non potrà interferire con le opere in progetto.

Il barrato obliquo blu tratteggiato in figura 11 indica che, nonostante la profondità della superficie piezometrica, la vulnerabilità della falda locale è mediamente alta, a causa dell'elevata permeabilità per porosità dei terreni presenti tra la superficie topografica e quella di falda.

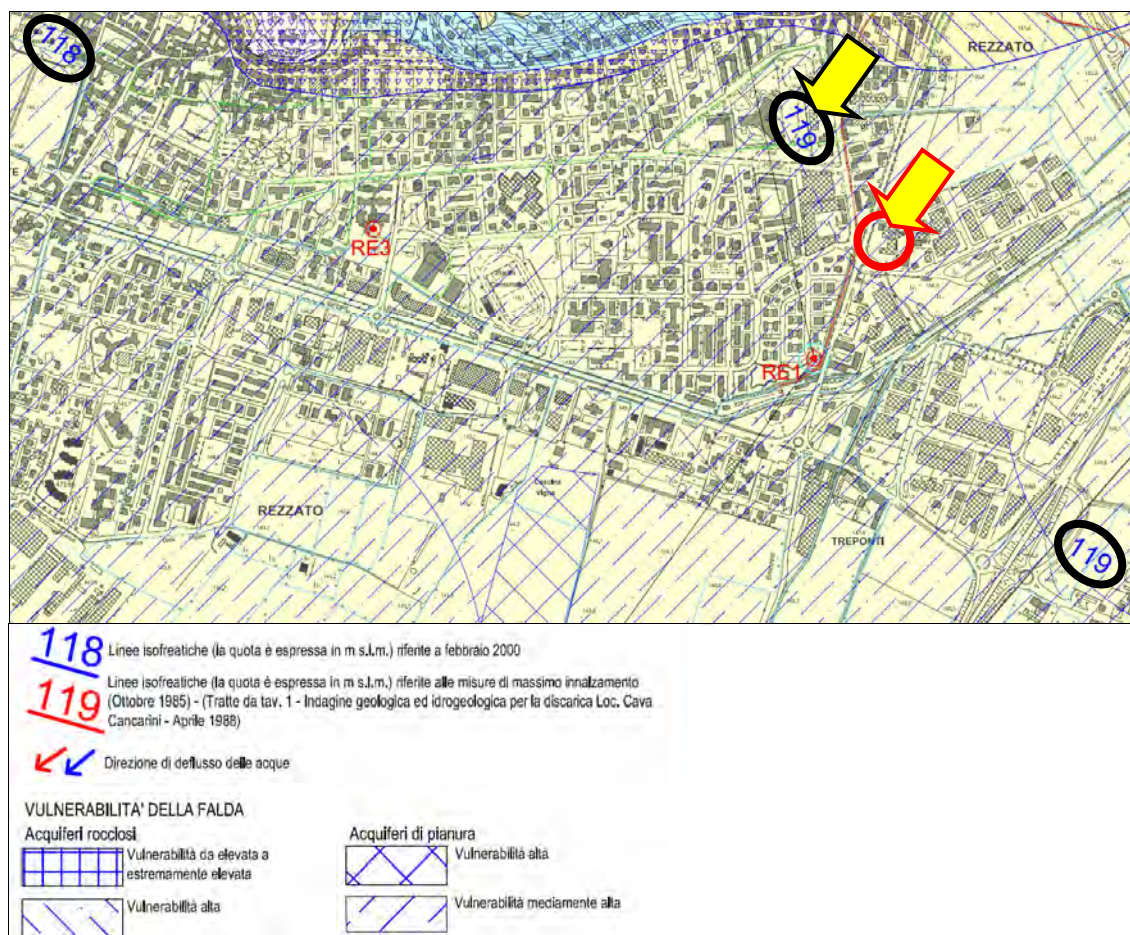


figura 11: estratto "Carta idrogeologica e del sistema idrografico con indicazioni sulla vulnerabilità degli acquiferi" dello Studio Geologico Comunale

2.4 - componente sismica

classificazione

Il Comune di Rezzato è classificato in zona sismica 2 (D.G.R. 11 luglio 2014 - n. X/2129):

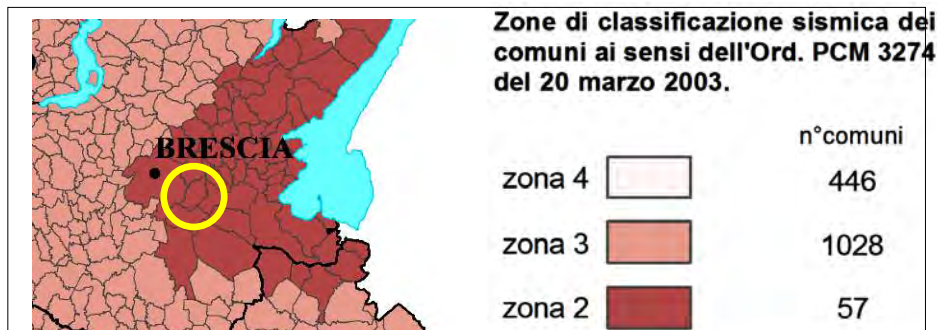


figura 12: classificazione sismica

scenario di pericolosità sismica locale PSL

La figura 13 tratta dalla “Carta della Pericolosità Sismica Locale” dello Studio Geologico Comunale, mostra che il sito in esame appartiene allo scenario sismico Z4a: zona di fondovalle o di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi:

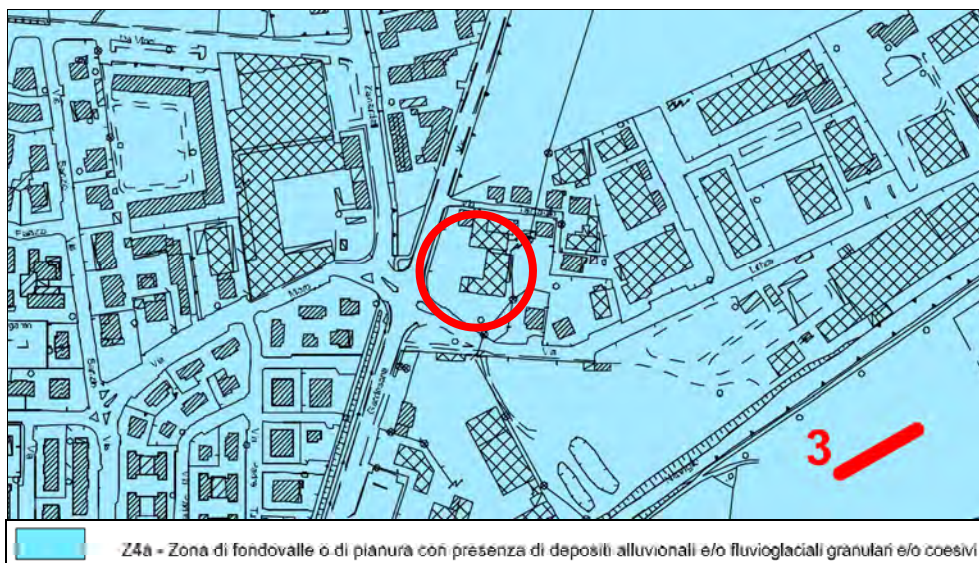


figura 13: estratto della “Carta di Pericolosità Sismica Locale” dello Studio Geologico Comunale

Agli scenari qualitativi suscettibili di amplificazioni sismiche litologiche (zone Z4) deve essere applicato il 2° Livello di approfondimento. Lo Studio Geologico Comunale riferisce che “per l'intero territorio comunale di Rezzato è stata eseguita la valutazione del rischio sismico correlato alle condizioni geologiche e geomorfologiche. È stata quindi valutata l'amplificazione sismica locale secondo la metodologia e le procedure indicate nell'All. 5 della D.G.R. n° 8/7374 del 28/05/2008”.

La figura 14 della pagina seguente, composta da estratti dalla “Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica” e dalla “Carta dei fattori di amplificazione” dello Studio Geologico Comunale, fornisce le seguenti indicazioni:

- il sito si trova in una zona suscettibile di amplificazione locale caratterizzata dalla presenza di terreni ghiaioso-sabbiosi e/o sabbioso-ghiaiosi;
- Il valore di F_a , fattore di amplificazione (riferito agli intervalli di periodo tra 0.1-0.5 s e 0.5 e 1.5 s, in riferimento al periodo proprio delle tipologie edilizie più rappresentate sul territorio regionale, rispettivamente strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide e strutture alte e flessibili) è risultato compreso tra 1.3 e 1.6 s.

Sulla base di risultati forniti dalle indagini sismiche eseguite nel territorio di Rezzato, lo Studio Geologico Comunale riporta le seguenti conclusioni:

- Per periodo degli edifici pari 0,5 s-1,5 s sono stati stimati valori di F_a di sito sempre inferiori a quelli di soglia. L'utilizzo dei parametri sismici della normativa vigente è quindi sufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica.
- Per periodi degli edifici pari a 0,1 s-0,5 s ... nel contesto fluvio-glaciale/alluvionale (scenari di PSL Z4a) sono stati stimati valori di F_a di sito inferiori a quelli di soglia; la normativa sismica è in questi casi sufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica.

Pertanto, secondo lo Studio Geologico Comunale il valore di F_a è inferiore al valore di soglia corrispondente e la normativa sismica vigente è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica del sito; quindi, in fase di progettazione, si potrà applicare lo spettro previsto dalla normativa per la categoria di sottosuolo rilevata.

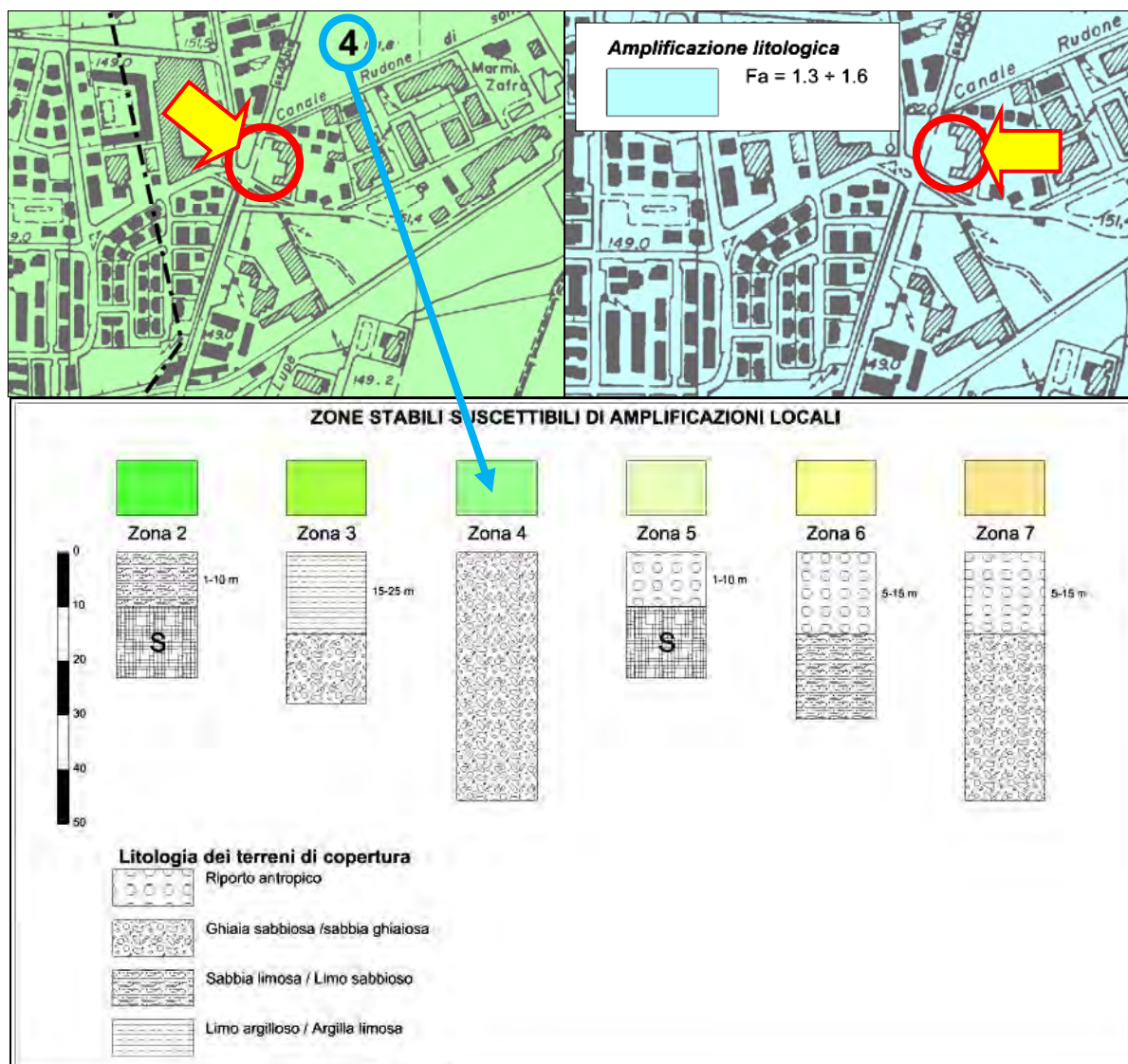


figura 14: estratti dalla "Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica" e dalla "Carta dei fattori di amplificazione" dello Studio Geologico Comunale

categoria di sottosuolo

Lo Studio Geologico Comunale riferisce che "i terreni possono essere classificati, sulla base dei dati geotecnici e sismostratigrafici e secondo le tabelle allegate al D.M. 14/01/08 ... prevalentemente entro le categoria di suolo B (linee 1-2-3-4-5) e subordinatamente nella categoria di sottosuolo C (linea 6)".

Il termine “linea” indica le linee sismiche, ovvero le specifiche indagini eseguite nel territorio comunale; la linea 6, l’unica che ha fornito l’indicazione “categoria C”, è stata eseguita nel settore nord del territorio comunale, ad ovest dei rilievi montuosi della zona, dunque lontano dal sito in esame, per il quale, secondo lo Studio Geologico Comunale, vale dunque l’indicazione “categoria B”.

Come anticipato in Premessa, per verificare nel sito in esame la suddetta conclusione dello Studio Geologico Comunale è stata eseguita una prospezione sismica sito-sopecifica consistita in una indagine sismica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) + HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio).

Le conclusioni dell’indagine sismica sito-specifica sono le seguenti:

- categoria di sottosuolo definita per il sito d’interesse: B
- stima del Fattore di Amplificazione di sito:
 - per edifici con periodo T compreso tra 0,5 e 1,5 s → Fa di sito inferiore al valore Fa di soglia comunale (FAC < FAS)
 - per edifici con periodo T compreso tra 0,1 e 0,5 s → Fa di sito superiore al valore di Fa di soglia comunale (FAC > FAS)

Pertanto:

- per edifici con periodo T compreso tra 0,5 e 1,5 s →
 - è possibile assumere in progetto la Categoria di Sottosuolo “B” e i relativi parametri sismici
- per edifici con periodo T compreso tra 0,1 e 0,5 s →
 - è necessario assumere in progetto la Categoria di Sottosuolo “C” e i relativi parametri sismici

liquefazione

Il fenomeno della liquefazione, causato dalla progressiva riduzione delle tensioni efficaci nel corso di un terremoto, può verificarsi in terreni prevalentemente sabbiosi sotto-falda, limitatamente ai primi 15 m dalla superficie; in particolare sono potenzialmente liquefacibili i depositi superficiali, sciolti e saturi, che presentano granulometria delle sabbie fini e medie con contenuto in limo variabile generalmente dallo 0 al 20% e grado di addensamento medio-basso.

I terreni presenti nel sottosuolo dell’area in esame non sono dunque liquefacibili perché non sono in falda.

2.5 - analisi dei vincoli sul territorio, fattibilità geologica

La “Carta della fattibilità per l’applicazione delle norme geologiche di piano” dello Studio Geologico Comunale, dalla quale è tratta la figura 15, mostra che l’area in esame ricade in due classi di fattibilità geologica: “classe 1” e “classe 3b”.

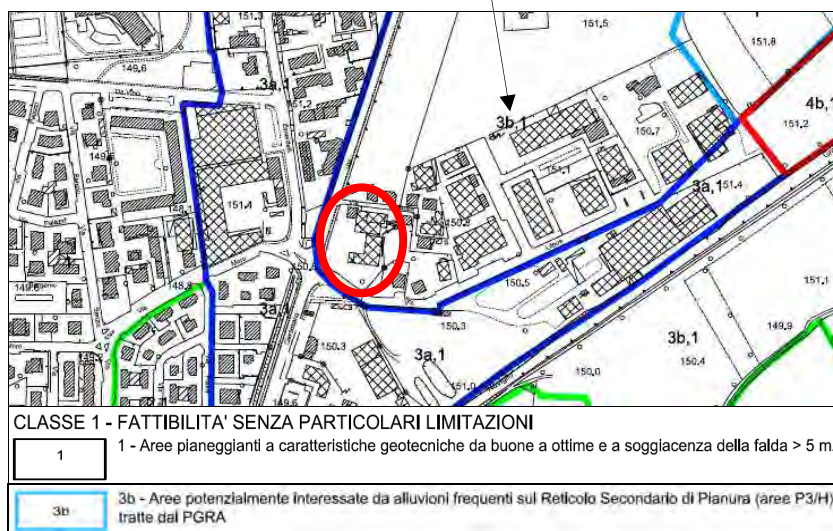


figura 15: estratto “Carta della fattibilità per l’applicazione delle norme geologiche di piano” dello Studio Geologico Comunale

Si riportano la descrizione della “classe 1” e della “classe 3b” e le relative prescrizioni:

1 - Area di pianura.

In questa classe ricadono le aree per le quali non esistono controindicazioni di carattere geomorfologico (aree pianeggianti, stabili), idrogeologico (assenza di acquiferi ad elevata vulnerabilità in funzione soprattutto della sua elevata soggiacenza e della presenza di intercalazioni di livelli fini all'interno della sequenza alluvionale), o geotecnico (terreni di fondazione con buone caratteristiche geotecniche) per l'urbanizzazione o la modifica della destinazione d'uso.

Si raccomanda che anche in questa classe, così come su tutto il territorio comunale, che gli interventi siano corredati da una relazione geologica eseguita ai sensi del D.M.LL.PP. 14/01/08 e basata su adeguate indagini geognostiche di dettaglio mediante prove in situ (sondaggi, prove penetrometriche, indagini sismostratigrafiche, ecc.) e/o in laboratorio su campioni di terreno.

Lo studio geologico dovrà valutare la compatibilità dell'intervento con le caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche dell'area. Si dovrà sempre verificare la presenza in superficie di eventuali unità geotecniche scadenti o materiali di riporto e dovranno eventualmente essere attuati idonei approcci progettuali.

3b - Aree potenzialmente interessate da alluvioni frequenti lungo il Reticolo Secondario di Pianura (aree P3/H) trattate dal PGRA.

In queste aree:

- *Eventuali interventi edilizi sono subordinati alla realizzazione di uno studio di compatibilità idraulica che l'Amministrazione comunale è tenuta ad acquisire in sede del rilascio del titolo edilizio. Tale studio è finalizzato a definire i limiti e gli accorgimenti da assumere per rendere l'intervento compatibile con le criticità rilevate, in base al tipo di pericolosità e al livello di esposizione locali. Detto studio può essere omesso per gli interventi edilizi che non modificano il regime idraulico dell'area allagabile, accompagnando il progetto da opportuna asseverazione del progettista (es. recupero di sottotetti, interventi edilizi a quote di sicurezza);*
- *è vietata la realizzazione di nuovi corpi interrati o seminterrati;*
- *va garantita l'applicazione di misure volte al rispetto dell'invarianza idraulica, finalizzate a salvaguardare e non peggiorare la capacità ricettiva del sistema idrico e a contribuire alla salvaguardia del territorio;*
- *le eventuali trasformazioni devono essere progettate e realizzate con modalità compatibili, senza danni significativi, con la sommersione periodica;*
- *gli eventuali interventi devono essere progettati in modo da favorire il deflusso/infiltrazione delle acque di esondazione, evitando interventi che ne comportino l'accumulo, ovvero che comportino l'aggravio delle condizioni di pericolosità/rischio per le aree circostanti.*

3 - MODELLO GEOTECNICO DELL'AREA

Le norme per l'esecuzione delle prove penetrometriche sono incluse nelle Raccomandazioni per le Indagini Geotecniche (1977) dell'Associazione Geotecnica Italiana (A.G.I.). L'esecuzione di questo tipo di indagine in sito consente la caratterizzazione geotecnica del terreno di fondazione per mezzo di correlazioni tra i dati forniti dalle prove e la composizione e le proprietà geotecniche dei terreni indagati. La prova penetrometrica dinamica SCPT consiste nell'infiggere la punta conica nel terreno contando il numero N_{SCPT} di colpi di maglio necessario per ogni penetrazione standard, pari ad un avanzamento di 30 cm; la resistenza del terreno è direttamente proporzionale al numero N_{SCPT} di colpi.

Le caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata sono le seguenti:

- tipo di penetrometro: PAGANI TG 63-200kN
- massa del maglio: 73 kg
- caduta del maglio: 0.75 m
- lunghezza delle aste: 1 m
- tipo di punta: meccanica
- diametro massimo della punta: 51 mm
- angolo di apertura della punta: 60°

Secondo l'Eurocodice 7 e le NTC, i valori caratteristici X_k consistono in una stima cautelativa del valore che influenza l'insorgere dello stato limite. Il § C6.2.2.4 della Circolare illustra come tali valori debbano essere scelti:

“Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire ad una scelta corretta dei valori caratteristici, appare giustificato il riferimento a valori prossimi ai valori medi quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti. Al contrario, valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno, con concentrazione delle deformazioni fino alla formazione di superfici di rottura nelle porzioni di terreno meno resistenti del volume significativo, o nel caso in cui la struttura a contatto con il terreno non sia in grado di trasferire forze dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti a causa della sua insufficiente rigidità”.

Nel caso in esame, come valori caratteristici sono stati considerati i valori medi dei parametri geotecnici elaborati statisticamente secondo il metodo cautelativo della “media minima”.

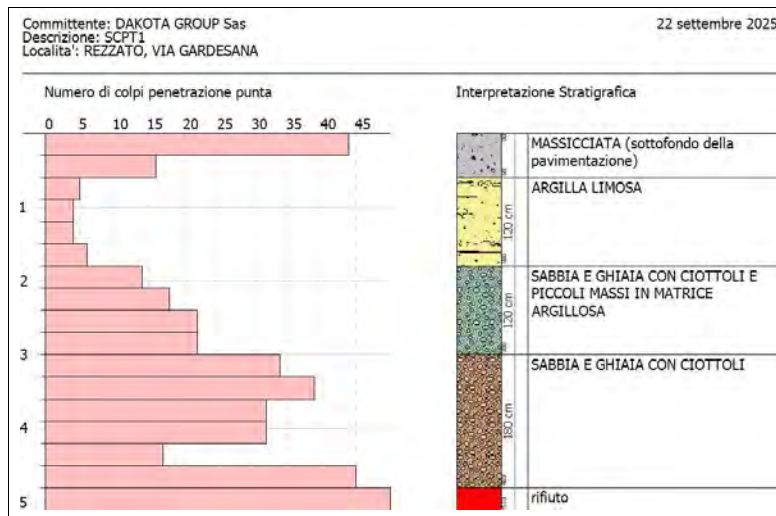
Poiché le correlazioni empiriche esistenti in letteratura tra i risultati di una prova penetrometrica dinamica ed i principali parametri geotecnici del terreno fanno riferimento essenzialmente alle prove SPT (Standard Penetration Test) che si eseguono all'interno dei fori di sondaggio, occorre applicare una correzione ai risultati delle prove SCPT per tenere conto della loro diversa modalità esecutiva rispetto alle SPT. La correzione viene applicata sulla base delle litologie: si è dimostrato, nelle correlazioni SPT-SCPT, che generalmente il rapporto fra il numero dei colpi misurato con i due strumenti (N_{SPT}/N_{SCPT}) tende a 1 per granulometrie grossolane, mentre tende a crescere per granulometrie più fini.

Sono state considerate le seguenti correlazioni empiriche proposte in letteratura:

correlazione					litologia
N _{SPT}	=	1	X	N _{SCPT}	ghiaie e ghiaie sabbiose
N _{SPT}	=	1,25	X	N _{SCPT}	sabbie e ghiaie con fine plastico
N _{SPT}	=	1,5	X	N _{SCPT}	sabbie con molto fine
N _{SPT}	=	2	X	N _{SCPT}	limi
N _{SPT}	=	2,5	X	N _{SCPT}	argille limose/sabbiose
N _{SPT}	=	3	X	N _{SCPT}	argille

Si riportano i grafici delle tre prove penetrometriche ed i tabulati con i parametri geotecnici caratteristici dei terreni indagati.

SCPT1



STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA SCPT1

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m³)
strato (1) MASSICCIA	23	0,00-0,60	Meyerhof (1951)	2,0
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	8	0,60-1,80		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	16	1,80-3,00		1,9
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	25	3,00-5,10		2,0

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Densità relativa (%)
strato (1) MASSICCIA	23	0,00-0,60	Schultze & Menzenbach (1961)	80
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	8	0,60-1,80		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	16	1,80-3,00		75
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	25	3,00-5,10		85

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
strato (1) MASSICCIA	23	0,00-0,60	Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof (1956)	34
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	8	0,60-1,80		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	16	1,80-3,00		32
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	25	3,00-5,10		34

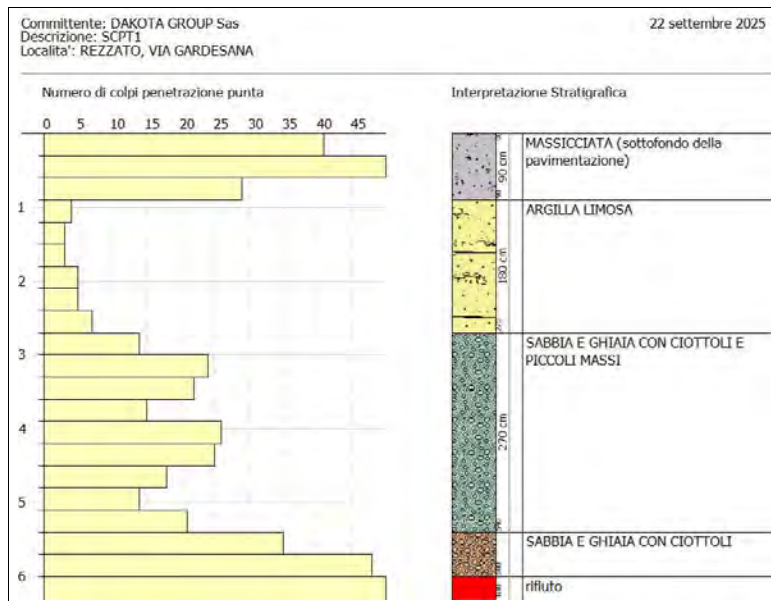
Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm²)
strato (1) MASSICCIA	23	0,00-0,60	Schultze & Menzenbach	270
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	8	0,60-1,80		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	16	1,80-3,00		190
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	25	3,00-5,10		295

*parametri geotecnici dello strato 2

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Peso Unità di Volume (t/m³)	Coesione non drenata (kg/cm²)	Modulo edometrico (kg/cm²)
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	8	0,60-1,80	1,9	1,0	85

correlazioni: *Peso unità di volume* → Meyerhoff
Coesione non drenata → De Beer
Modulo edometrico → Trofimov, Mitchell e Gardner

SCPT2



STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA SCPT2

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m ³)
strato (1) MASSICCIA	37	0,00-0,90	Meyerhof (1951)	2,1
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	7	0,90-2,70		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	16	2,70-5,40		1,9
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	38	5,40-6,30		2,1

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Densità relativa (%)
strato (1) MASSICCIA	37	0,00-0,90	Schultze & Menzenbach (1961)	90
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	7	0,90-2,70		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	16	2,70-5,40		75
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	38	5,40-6,30		90

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
strato (1) MASSICCIA	37	0,00-0,90	Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof (1956)	37
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	7	0,90-2,70		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	16	2,70-5,40		32
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	38	5,40-6,30		37

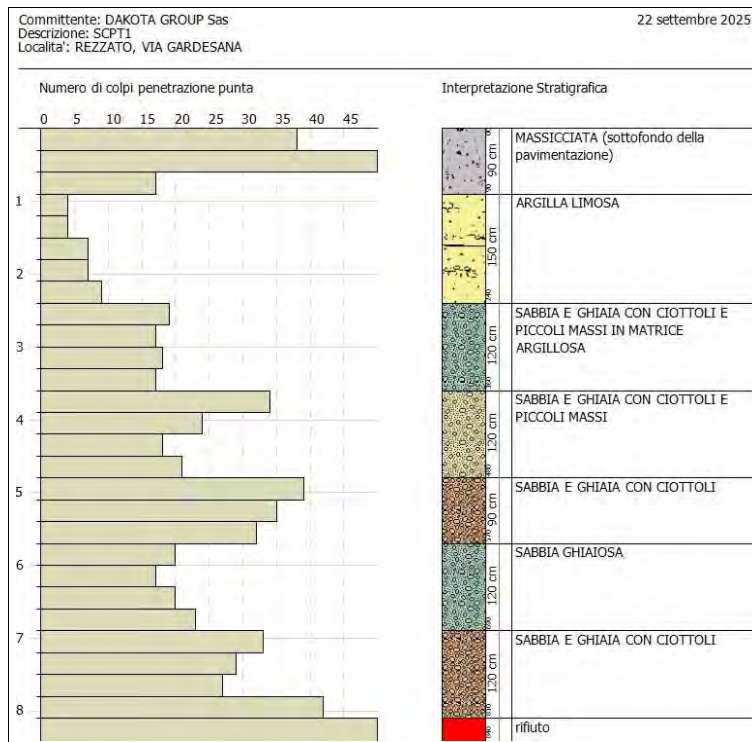
Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
strato (1) MASSICCIA	37	0,00-0,90	Schultze & Menzenbach	430
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	7	0,90-2,70		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	16	2,70-5,40		190
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	38	5,40-6,30		430

*parametri geotecnici dello strato 2

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Peso Unità di Volume (t/m ³)	Coesione non drenata (kg/cm ²)	Modulo edometrico (kg/cm ²)
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	7	0,90-2,70	1,85	0,9	75

correlazioni: Peso unità di volume → Meyerhoff
Coesione non drenata → De Beer
Modulo edometrico → Trofimenkov, Mitchell e Gardner

SCPT 3



STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA SCPT3

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m³)
strato (1) MASSICCIATA	31	0,00-0,90	Meyerhof (1951)	2,0
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	10	0,90-2,40		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	17	2,40-3,60		1,9
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	21	3,60-4,80		1,95
strato (5) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	33	4,80-5,70		2,0
strato (6) SABBIA GHIAIOSA	18	5,70-6,90		1,9
strato (7) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	29	6,90-8,40		1,95

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Densità relativa (%)
strato (1) MASSICCIATA	31	0,00-0,90	Schultze & Menzenbach (1961)	85
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	10	0,90-2,40		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	17	2,40-3,60		75
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	21	3,60-4,80		80
strato (5) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	33	4,80-5,70		85
strato (6) SABBIA GHIAIOSA	18	5,70-6,90		75
strato (7) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	29	6,90-8,40		85

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
strato (1) MASSICCIATA	31	0,00-0,90	Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof (1956)	36
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	10	0,90-2,40		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	17	2,40-3,60		32
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	21	3,60-4,80		33
strato (5) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	33	4,80-5,70		36,5
strato (6) SABBIA GHIAIOSA	18	5,70-6,90		32
strato (7) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	29	6,90-8,40		35,5

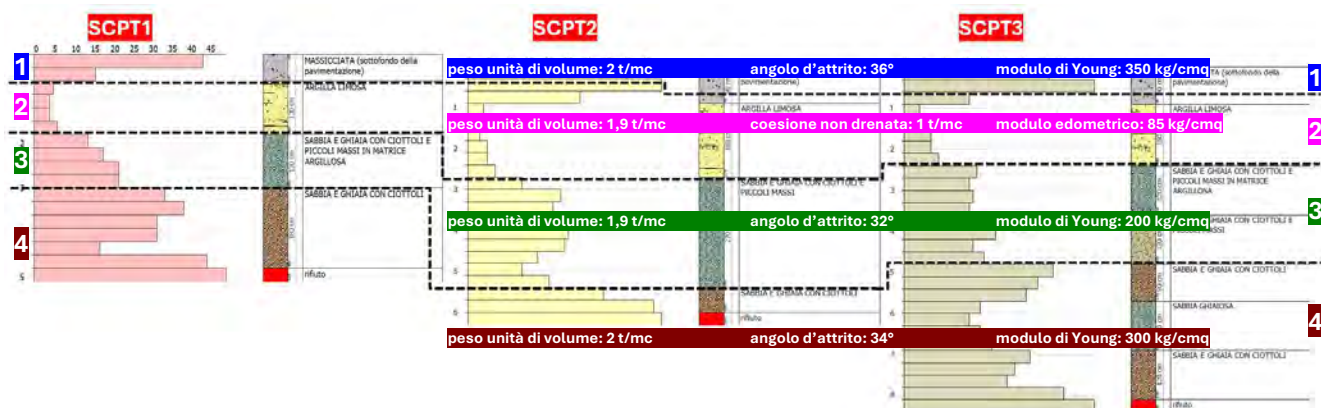
Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
strato (1) MASSICCIA	31	0,00-0,90	Schultze & Menzenbach	360
strato (2) ARGILLA LIMOSA*	10	0,90-2,40		
strato (3) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI IN MATRICE ARGILLOSA	17	2,40-3,60		200
strato (4) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI E PICCOLI MASSI	21	3,60-4,80		250
strato (5) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	33	4,80-5,70		390
strato (6) SABBIA GHIAIOSA	18	5,70-6,90		215
strato (7) SABBIA E GHIAIA CON CIOTTOLI	29	6,90-8,40		340

*parametri geotecnici dello strato 2

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (da m a m)	Peso Unità di Volume (t/m ³)	Coesione non drenata (kg/cm ²)	Modulo edometrico (kg/cm ²)
strato (2) ARGILLA LIMOSA	10	0,90-2,40	1,95	1,25	105

correlazioni: *Peso unità di volume* → Meyerhoff
Coesione non drenata → De Beer
Modulo edometrico → Trofimenzov, Mitchell e Gardner

Il modello geologico-geotecnico medio dell'area è così schematizzabile:



La criticità dell'area è rappresentata dalla presenza (al di sotto di una massicciata superficiale avente spessore di 60-90 cm), dello strato argilloso (unità 2) avente scadenti proprietà geotecniche;

nei quattro punti indagati tale strato è esteso fino a:

- 1,8 metri dal piano piazzale, in corrispondenza di SCPT1
- 2,7 metri dal piano piazzale, in corrispondenza di SCPT2
- 2,4 metri dal piano piazzale, in corrispondenza di SCPT3
- 2,2 metri dal piano piazzale, in corrispondenza dello scavo esplorativo

Al di sotto dello strato scadente sono presenti terreni sabbiosi-ghiaiosi aventi buone/ottime proprietà geotecniche.

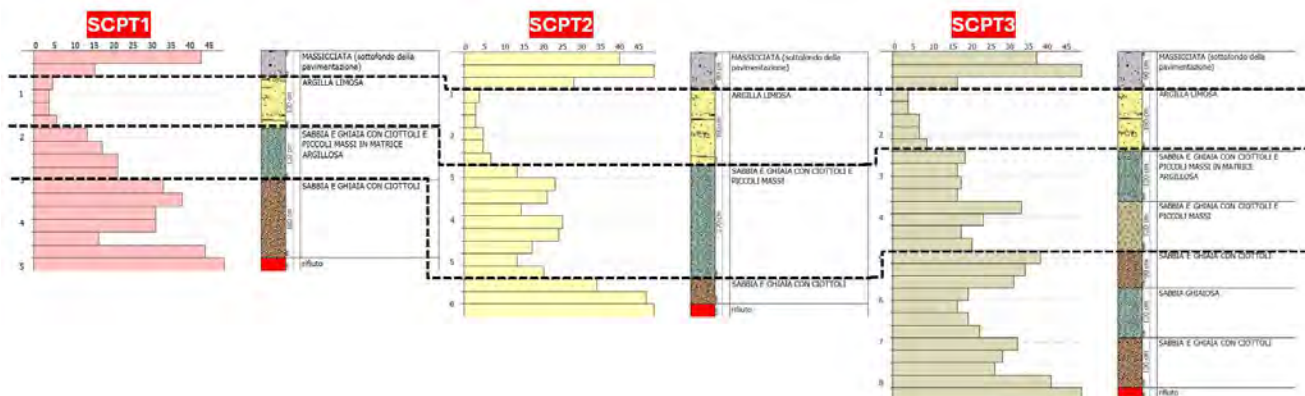
4 – RIASSUNTO DELLO STUDIO

È stato eseguito uno studio per ricostruire il modello geologico, geotecnico e sismico in corrispondenza di un'area in comune di Rezzato (BS) interessata dal progetto di costruzione di un nuovo edificio residenziale composto da 24 appartamenti, in Via Tartaglia, nell'ambito del Piano Attuativo "ATDC 23".

Litologia

Il sito si trova in un territorio caratterizzato dalla presenza di alluvioni fluvio-glaciali prevalentemente ghiaioso-sabbiose, con ciottoli, a scarsa matrice limoso-sabbiosa, con intersezioni lenticolari di livelli sabbiosi, limosi, argillosi e conglomeratici.

La stratigrafia locale, ricostruita tramite indagine geotecnica in sito, è la seguente:



Morfologia

- superficie: pianeggiante
- categoria topografica secondo NTC: T1
- pericolosità e rischio idrogeologico: area alluvionabile
- scenario di pericolosità per alluvionamento: "H", frequente

Idrogeologia

- soggiacenza della falda: circa 31 m (anno 2000)
- interferenza della falda freatica con le opere in progetto: da escludere

Componente sismica

- classificazione: zona sismica 2
- scenario di pericolosità sismica locale PSL: Z4a, in quanto zona di pianura con presenza di depositi alluvionali
- categoria di sottosuolo da utilizzare in fase di progettazione:
 - per edifici con periodo T compreso tra 0,5 e 1,5 s → B
 - per edifici con periodo T compreso tra 0,1 e 0,5 s → C
- liquefazione dei terreni per eventi sismici: da escludere, in quanto i terreni non sono in falda

Fattibilità geologica

L'area in esame ricade in due classi di fattibilità geologica: "classe 1" e "classe 3b".

Classe di fattibilità geologica 1 → aree di pianura: senza particolari limitazioni

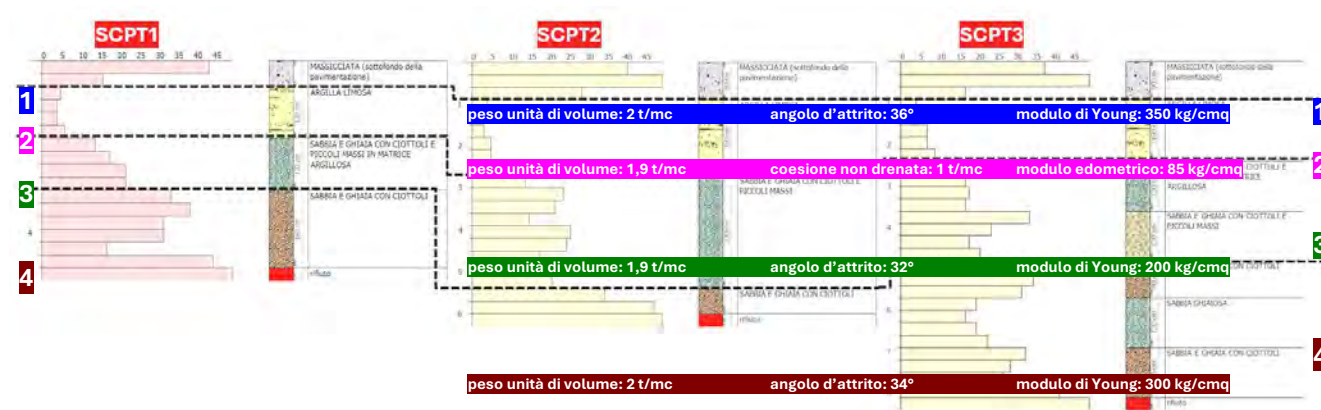
In questa classe ricadono le aree per le quali non esistono controindicazioni di carattere geomorfologico (aree pianeggianti, stabili), idrogeologico (assenza di acquiferi ad elevata vulnerabilità in funzione soprattutto della sua elevata soggiacenza e della presenza di intercalazioni di livelli fini all'interno della sequenza alluvionale), o geotecnico (terreni di fondazione con buone caratteristiche geotecniche) per l'urbanizzazione o la modifica della destinazione d'uso.

Classe di fattibilità geologica 3b: Aree potenzialmente interessate da alluvioni frequenti lungo il Reticolo Secondario di Pianura (aree P3/H) tratte dal PGRA.

In queste aree:

- Eventuali interventi edilizi sono subordinati alla realizzazione di uno studio di compatibilità idraulica che l'Amministrazione comunale è tenuta ad acquisire in sede del rilascio del titolo edilizio. Tale studio è finalizzato a definire i limiti e gli accorgimenti da assumere per rendere l'intervento compatibile con le criticità rilevate, in base al tipo di pericolosità e al livello di esposizione locali. Detto studio può essere omesso per gli interventi edilizi che non modificano il regime idraulico dell'area allagabile, accompagnando il progetto da opportuna asseverazione del progettista (es. recupero di sottotetti, interventi edilizi a quote di sicurezza);
- è vietata la realizzazione di nuovi corpi interrati o seminterrati;
- va garantita l'applicazione di misure volte al rispetto dell'invarianza idraulica, finalizzate a salvaguardare e non peggiorare la capacità ricettiva del sistema idrico e a contribuire alla salvaguardia del territorio;
- le eventuali trasformazioni devono essere progettate e realizzate con modalità compatibili, senza danni significativi, con la sommersione periodica;
- gli eventuali interventi devono essere progettati in modo da favorire il deflusso/infiltrazione delle acque di esondazione, evitando interventi che ne comportino l'accumulo, ovvero che comportino l'aggravio delle condizioni di pericolosità/rischio per le aree circostanti.

Modello geologico-geotecnico generale dell'area



Sulla base di quanto esaminato è possibile dichiarare che l'intervento in progetto è compatibile con il modello geologico e sismico del luogo, fatto salvo il rispetto della normativa vigente e delle NTA dello Studio Geologico Comunale.

Si raccomanda, una volta eseguito lo scavo per raggiungere la quota di posa delle fondazioni, di verificare:

- la natura dei terreni di fondazione alla quota del piano di imposta, in particolare che non vi siano sostanziali differenze litologiche rispetto ai modelli geologico e geotecnico considerati nel presente elaborato;
- l'eventuale presenza di acqua.

Nel caso in cui si riscontrassero rilevanti differenze rispetto a quanto previsto nella presente relazione la DDLL dovrà darne comunicazione allo scrivente.

Brescia, 22 dicembre 2025

Dott. Geologo Marco Venturini

Dr. Geologo
MARCO
VENTURINI
n. 1078
ORDINE DEI GEOLOGI della LOMBARDIA

IN ALLEGATO: relazione tecnica sulla prospezione sismica sito-specifica

RELAZIONE TECNICA SULLA PROSPEZIONE SISMICA SITO-SPECIFICA

Per caratterizzare i terreni dal punto di vista sismico è stata eseguita una prospezione in sito consistita in:

- n° 1 profilo di sismica multicanale con acquisizione delle onde di superficie ed elaborazione dati mediante metodologia MASW, in onde di Rayleigh e in onde di Love;
- n° 1 indagine sismica passiva con metodo HVSR.

È stato così possibile ricostruire l'andamento medio delle onde Vs in profondità ed eseguire la valutazione del parametro Vs,eq di sito, al fine di classificare il terreno di fondazione secondo il D.M. 17/01/2018, misurando eventualmente il periodo proprio di vibrazione di sito. Le immagini seguenti mostrano la posizione dello stendimento sismico e le fasi di acquisizione.



stendimento sismico MASW



acquisizione del microtremore sismico ambientale mediante tecnica HVSR



acquisizione dei segnali sismici mediante sismografo Geometrics Mod. Geode 3-1000



shot sismico verticale per la generazione delle onde di Rayleigh

1 - ANALISI HVSR

1.1 - Cenni sulla metodologia HVSR

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è basata sulla misura dei rapporti medi fra le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali e verticale del rumore sismico ambientale.

La prova a stazione singola consiste nella valutazione sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie del terreno misurati in un punto con un apposito sismometro a tre componenti. Il risultato di questa prova è una curva sperimentale, che rappresenta il valore del rapporto fra le ampiezze spettrali medie delle vibrazioni in funzione della frequenza di vibrazione. Le frequenze alla quali la curva H/V mostra dei massimi, sono legate alle frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura. L'ampiezza di questi massimi è proporzionale (anche se non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica esistente alla base della copertura.

In particolare, in presenza di forti variazioni nel profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo (legate per esempio alla transizione fra sedimenti soffici e basamento rigido), la funzione H/V mostra dei massimi marcati in corrispondenza della frequenza di risonanza F_r relativa alla configurazione stratigrafica del sito (con F_r circa uguale al rapporto fra la velocità media delle onde S fino alla profondità del salto di velocità e il quadruplo di questa profondità). Pertanto, questa prova ha lo scopo principale di mettere in luce la presenza di fenomeni di risonanza sismica e consentire una stima delle frequenze alle quali il moto del terreno può risultare amplificato a causa di questi fenomeni.

1.2 - Acquisizione dei dati

Nell'area d'indagine è stata eseguita, mediante stazione singola o tromometro, una misura di rumore sismico ambientale per un tempo di registrazione massimo di 15 minuti.

La strumentazione utilizzata si compone nello specifico di:

- un sistema di ricezione costituito da un tromometro CGE a 3 componenti geofoniche con frequenza propria di 2 Hz per acquisizioni del microtremore lungo la direzione verticale e le due direzioni orizzontali ortogonali.
- un sistema di acquisizione e memorizzazione costituito da un sismografo modulare in grado di registrare in modo digitale le forme d'onda generate (Geode Geometrics Mod. 3-1000); il sismografo A/D è in grado di campionare segnali tra 0.025 ms e 16 ms (campionamento eseguito a 4 ms). Il sistema di acquisizione è completato da un computer per l'analisi e la memorizzazione del segnale e appositi cavi di collegamento.

1.3 - Analisi ed elaborazione dei segnali acquisiti

La determinazione della curva HVSR ha previsto in sintesi i passaggi di seguito elencati.

- 1) Eliminazione manuale da parte dell'utente delle parti di segnale costituite dal disturbo arrecato da eventi non conformi al rumore ambientale (transienti); questa operazione produce una diminuzione della lunghezza del segnale analizzato.
- 2) Definizione della lunghezza degli intervalli entro cui calcolare le curve HVSR (20 ms).
- 3) Calcolo delle trasformate di Fourier delle tre componenti x, y, z del moto.
- 4) Operazione di smoothing degli spettri di Fourier.
- 5) Somma delle due componenti orizzontali x e y.
- 6) Calcolo delle curve HVSR come rapporto spettrale tra la componente orizzontale H e la componente verticale V negli N intervalli temporali stazionari.
- 7) Calcolo della curva HVSR media tra le n curve HVSR.

I risultati delle analisi presentati in questo lavoro sono stati ottenuti con il software winMASW versione Acd 7.2, che permette di determinare i rapporti medi fra le componenti spettrali del rumore, misurate sul piano orizzontale e verticale. A questo scopo, l'acquisizione del rumore ambientale è stata suddivisa in una serie di finestre temporali di uguale durata (finestre di 20 ms), per ciascuna delle quali è stato determinato lo spettro del moto.

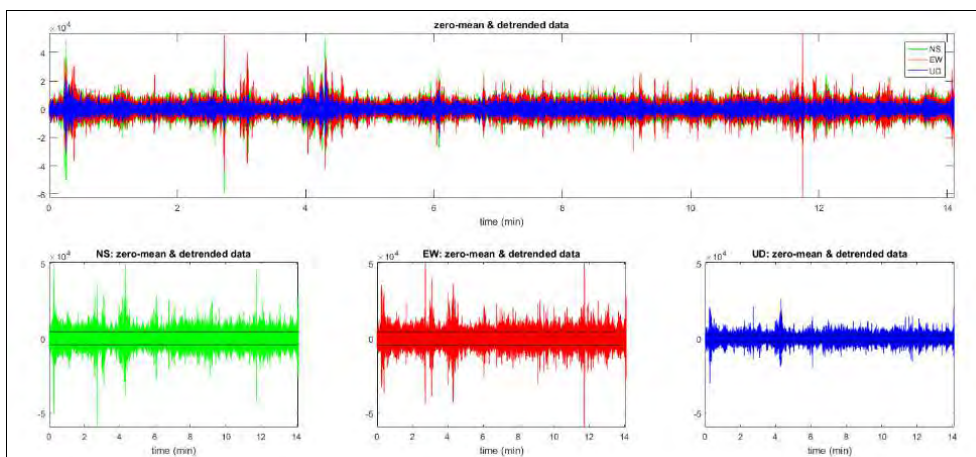


figura 1 - visualizzazione dei dati prima della rimozione di eventi transienti.

I risultati parziali ottenuti, durante le fasi di elaborazione delle curve H/V, sono stati iterativamente controllati andando a valutare la direttività e la stabilità nel tempo della curva HVSR.

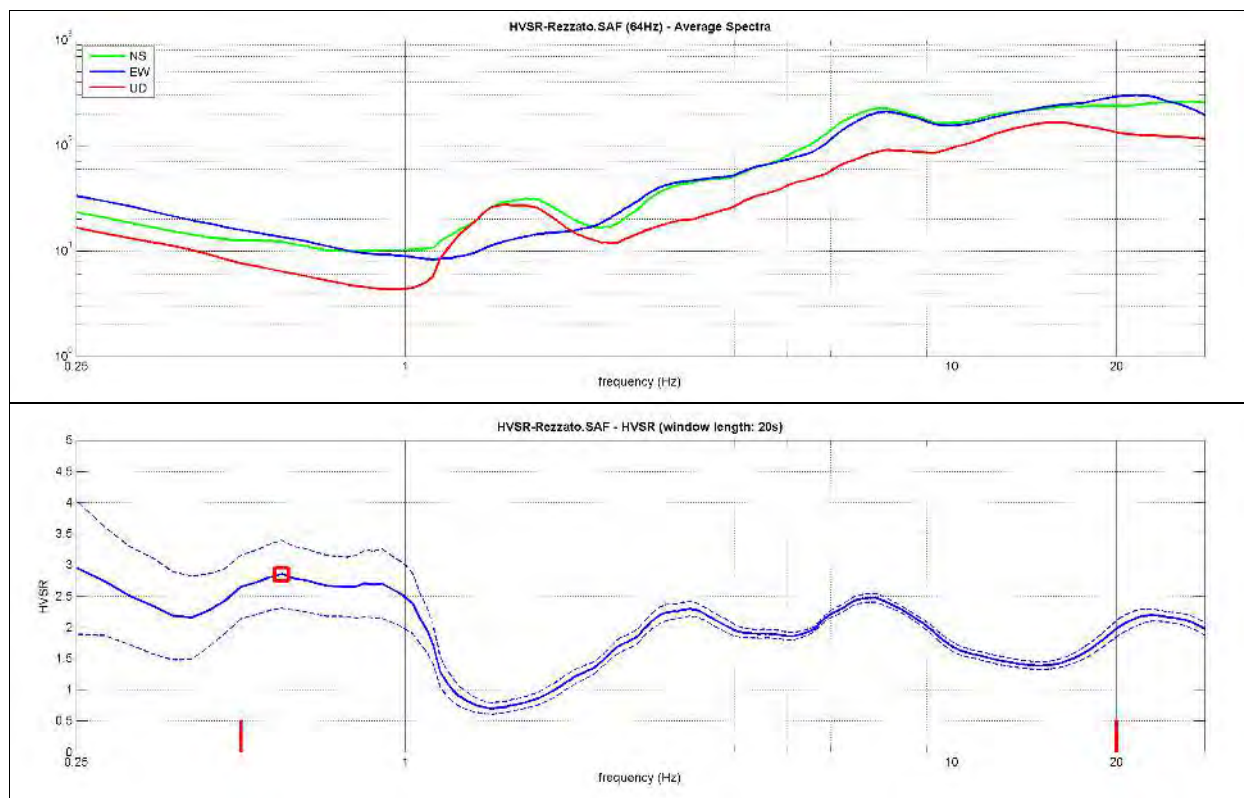


figura 2 - Visualizzazione HVSR e spettro medio di ampiezza del sito indagato.

La curva HVSR presenta un picco principale a circa 0,6 Hz; la sua validità viene verificata, mediante software *winMASW*, secondo i criteri di ammissibilità del progetto *SESAME* (che definiscono la robustezza statistica della curva HVSR e degli eventuali picchi presenti).

Criteria for a reliable H/V curve (Criteri per una curva affidabile)

- #1. $[f_0 > 10/Lw]$: $0.594 > 0.5$ (OK)
- #2. $[nc > 200]$: $95 < 200$ (NO)
- #3. $[f_0 > 0.5\text{Hz}; \sigma_A(f) < 2 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0]$ (OK)

Criteria for a clear H/V peak (Criteri per un picco H/V chiaro)

- #1. $[\text{exists } f^- \text{ in the range } [f_0/4, f_0] \mid AH/V(f^-) < A_0/2]$: (NO)
- #2. $[\text{exists } f^+ \text{ in the range } [f_0, 4f_0] \mid AH/V(f^+) < A_0/2]$: yes, at frequency 1.2Hz (OK)
- #3. $[A_0 > 2]$: $2.9 > 2$ (OK)
- #4. $[f_{\text{peak}}[Ah/v(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%]$: (NO)
- #5. $[\sigma_A(f) < \epsilon(f_0)]$: $2.762 > 0.089$ (NO)
- #6. $[\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)]$: $0.545 < 2$ (OK)

1.4 - Descrizione dei risultati dell'analisi HVSR

Il picco a 0,6 Hz con ampiezza pari a 2,9 rispetta tutti i criteri *SESAME* per una curva affidabile; tuttavia, non è rispettata la condizione che prevede la verifica di un minimo di 5 criteri su 6 per un picco chiaro, nonostante siano stati modificati, in diverso modo, i parametri di elaborazione affinché essi fossero tutti verificati.

Dall'analisi della curva HVSR, eseguita tra 0,5 Hz e 20,0 Hz (frequenze di interesse ingegneristico) è quindi risultata una possibile frequenza principale di risonanza attorno a 0,6 Hz. Questa non può essere definita come certamente significativa ai fini dell'individuazione di una possibile frequenza di risonanza di sito.

Considerato l'andamento delle tre componenti che costituiscono il segnale sismico registrato si specifica che, il picco di risonanza del sito indagato, risulta essere stato marcatamente obliterato da uno o più eventi transienti che ne hanno distorto il segnale.

Alla luce dei risultati ottenuti si è pertanto opportunamente scelto di non modellare la curva HVSR per trarre informazioni di tipo sismostratigrafico, quest'ultime desunte invece dall'analisi MASW di seguito riportata.

2 - INDAGINE SISMICA MASW

2.1 - Cenni sulla metodologia MASW

Con una prospezione sismica MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*) si analizza il fenomeno della dispersione che le onde di superficie subiscono in un mezzo stratificato. La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda (λ), quindi frequenza è, infatti, influenzata dalle proprietà che il sottosuolo attraversato possiede ed è detta *velocità di fase*.

Le MASW attive sono realizzate tramite analisi delle onde di Rayleigh o di Love oppure, congiuntamente Rayleigh + Love. Queste rappresentano le onde di superficie prodotte dall'iterazione delle onde di corpo (P e S) con una superficie di discontinuità fisica. Le onde di Rayleigh, e più precisamente le loro componenti verticali, vengono registrate tramite i comuni geofoni verticali a bassa frequenza e generate da una sorgente ad impatto verticale, la classica martellata. Le onde di Love invece vengono acquisite mediante geofoni a componente orizzontale e generate applicando una sorgente di taglio al terreno, questo perché le loro componenti si muovono solamente sul piano orizzontale, con oscillazione perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione dell'onda. Durante l'indagine in oggetto lungo lo stendimento sismico sono state registrate per motivi operativi solo le componenti verticali delle onde di Rayleigh.

Il principio della tecnica MASW prevede che, poiché la dispersione delle onde di superficie dipende dalle caratteristiche del sottosuolo e dalle sue variazioni verticali, dalla determinazione delle curve di dispersione del segnale è possibile ricavare le caratteristiche fondamentali del mezzo quali ad esempio la velocità delle onde di taglio Vs e lo spessore degli strati. La velocità delle onde di Rayleigh (V_R) infatti è correlabile alla Vs, essendo pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio. L'analisi del fenomeno della dispersione, che avviene attraverso la *curva di dispersione*, permette quindi di determinare le caratteristiche del sottosuolo. La curva di dispersione del dataset è ottenuta mediante il passaggio dal dominio *spazio-tempo* (sismogramma) al dominio *velocità di fase/frequenza* (spettro di velocità) effettuato mediante specifica operazione con software dedicato.

Tenuto conto di quanto richiesto per l'applicazione della normativa relativa alla progettazione geotecnica, si ritiene che la metodologia di analisi MASW, risulti idonea alla definizione dei dati richiesti.

2.2 - Acquisizione dei dati MASW

L'ubicazione e la lunghezza dello stendimento sono state scelte in funzione della logistica dei luoghi e dell'ingombro delle strutture di progetto. L'allineamento sismico per l'acquisizione delle onde di Rayleigh ha previsto una distanza tra i geofoni pari a 1,0 m ed una serie di scoppi esterni e coniugati rispetto all'ultimo geofono con offset variabili (4-6-8-10-12 m) a diversa intensità di energizzazione.

L'acquisizione della componente verticale delle onde di Rayleigh è avvenuta mediante registrazione della propagazione del segnale sismico generato da una sorgente ad impatto verticale (martellata), tramite uno stendimento sismico di 24 geofoni a componente verticale.

La strumentazione utilizzata si compone nello specifico di:

- una sorgente meccanica in grado di generare onde elastiche direzionali e ricche di energia realizzata mediante la battuta verticale e orizzontale di una mazza battente di 10 kg su piastra;
- un sistema di ricezione costituito da uno stendimento di 24 geofoni a movimento verticale (Geospace GS11D) a frequenza di 4,5 Hz e tripodi in alluminio, collegati mediante un cavo multielettrodo;
- un sistema di acquisizione e memorizzazione costituito da un sismografo modulare in grado di registrare in modo digitale le forme d'onda generate (*Geode Geometrics Mod. 3-1000*); il sismografo A/D è in grado di campionare segnali tra 0.025 ms e 16 ms. Il sistema di acquisizione è completato da dispositivo di *trigger*, computer per l'analisi e la memorizzazione del segnale e appositi cavi di collegamento.

2.3 - Analisi ed elaborazione dei segnali acquisiti

Determinazione degli spettri di velocità ed individuazione delle curve di dispersione

La stima dell'andamento in profondità delle velocità Vs, mediante acquisizione sismica multicanale è ottenuta tramite l'analisi del segnale nel dominio frequenza/velocità di fase.

Viene utilizzato lo spettro di velocità in quanto è il dominio dove è chiaramente più immediato e naturale comprendere le proprietà dispersive del mezzo attraversato, determinando con precisione la velocità di ciascuna componente del segnale registrato.

Dopo aver scelto quindi il sismogramma più idoneo, quello solitamente con il miglior rapporto *segnale/rumore*, si esegue una trasformata dal dominio *spazio-tempo* al dominio *frequenza/velocità* (**Fig. 3**).

Particolare attenzione nell'interpretazione delle curve di dispersione è posta in considerazione del fatto che le vibrazioni indotte dalle onde di superficie sono correlabili a diversi *modi*, che possono sovrapporsi all'interno degli spettri di velocità.

Se tale sovrapposizione avviene, può generarsi una curva di dispersione apparente, che può risultare fuorviante in fase di interpretazione. Al fine di individuare i modi correlabili alla reale successione stratigrafica è stato scelto di eseguire ed analizzare più scoppi sismici ad Offset minimi variabili. Tutte le curve di dispersione sono state quindi visionate prima di procedere al processing del dataset prescelto. L'interpretazione dello spettro è consistita quindi nel confrontare le distribuzioni di energia tra i vari modi. I modi superiori, se correttamente riconosciuti, concorrono ad elaborare un modello maggiormente vincolato e preciso.

Procedure di modellazione diretta e analisi delle onde di Rayleigh

Analizzato il sismogramma e il rispettivo spettro di velocità si è proceduto alla ricostruzione della distribuzione verticale delle Vs. Partendo dalla curva di dispersione delle onde di Rayleigh è stato ricostruito il modello che è responsabile di quella curva, effettuando quindi un'inversione, vale a dire che si è ricavato il modello di sottosuolo che ha determinato il dato di campagna. Lo spettro di velocità di fase è stato interpretato identificando le curve modali, mediante modellazione diretta, studiando l'andamento dei vari modi in funzione del modello atteso (**Fig. 3**). Questo è stato iterativamente modificato fino ad ottenere una buona sovrapposizione degli andamenti delle curve di dispersione sui vari modi riconosciuti.

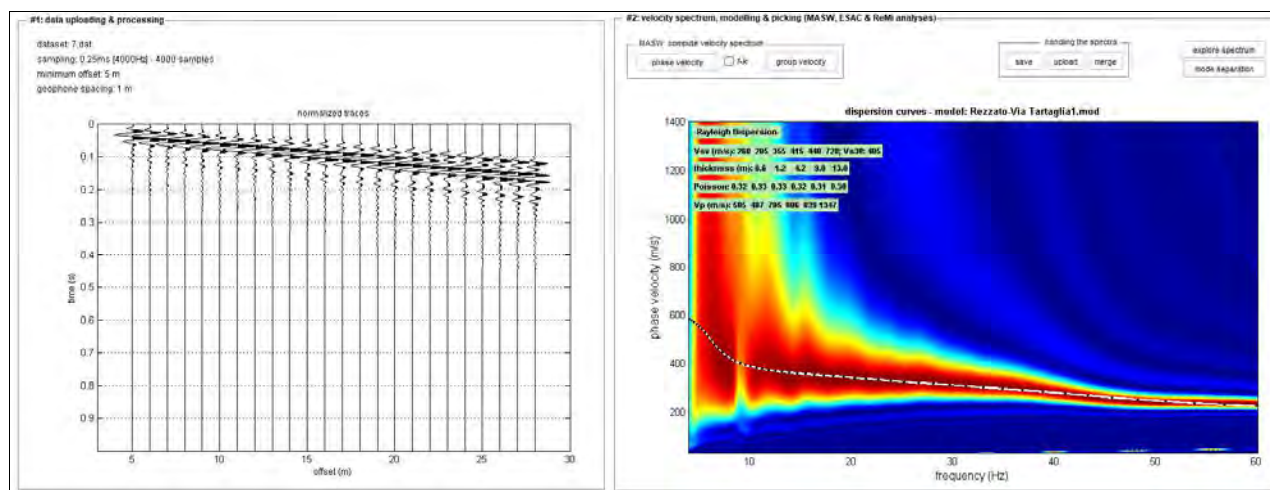


figura 3 - Visualizzazione del sismogramma acquisito (sx) e modellazione diretta mediante individuazione del modo fondamentale, che compone lo spettro di velocità delle onde di Rayleigh.

3 - MODELLO SIMOSTRATIGRAFICO

Per l'elaborazione e l'interpretazione dei dati si è tenuto conto delle evidenze del segnale acquisito, delle prove penetrometriche eseguite nel medesimo lotto di progetto, delle stratigrafie di alcuni pozzi terebrati in aree limitrofe e dei dati litostratigrafici reperiti entro il territorio in cui ricade l'area in esame.

Nella seguente tabella sono riportati i valori delle velocità medie e gli spessori di ciascun sismostrato, in modo da definire un **modello geofisico medio**, ottenuto mediante analisi delle onde di superficie con metodologia MASW in onde di Rayleigh.

Si riportano anche, in maniera indicativa, le stime dei valori della densità e del modulo di Poisson eseguite contestualmente all'elaborazione e mediante correlazioni di letteratura. Poiché la dispersione delle onde di superficie dipende essenzialmente dalla Vs e degli spessori degli strati, tali valori devono essere considerati solamente come stime largamente approssimative. Viene riportato, inoltre, il valore del modulo di taglio che tra i moduli elastici è l'unico che non dipende da Vp, ma solamente da Vs e densità e quindi la sua stima risulta più attendibile.

MODELLO GEOFISICO MEDIO – Via Tartaglia - Rezzato (BS)						
Sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)	Stima densità (g/cm ³)	Modulo di Poisson	Modulo di Taglio (MPa)
1	260	0,6	-0,6	1,89	0,32	128
2	205	1,2	-1,8	1,84	0,33	77
3	355	4,2	-6,0	1,97	0,33	248
4	415	9,0	-15,0	2,00	0,32	345
5	440	13,0	-28,0	2,01	0,31	389
6	720	7,0	-35,0	2,13	0,30	1102

Il valore del modulo dinamico di taglio, dipendente da Vs e densità si riferisce a condizioni di bassa deformazione. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori dovranno essere idoneamente corretti e utilizzati solo nei modi e nei casi appropriati.

D.M. 17/01/2018	Profondità del bedrock sismico	Vs,eq (m/s)	Categoria di sottosuolo	Valore di Vs,eq calcolato mediante l'espressione 3.2.1 del D.M. 17/01/2018
Calcolo a partire dal ripiano di esecuzione MASW (p.c.)	Oltre -30,0 m dal p.c.	405	B	$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$ Categoria di sottosuolo assegnata in base a quanto indicato nella Tabella 3.2 II

Si sottolinea come la Categoria di Sottosuolo di Progetto, stimata in base a quanto previsto dal D.M. 17/01/2018, deve essere definita dal Geologo o dal progettista anche in funzione dei dati progettuali.

Si riporta inoltre il profilo sismostratigrafico del modello medio fino a -35,0 m dal p.c., ottenuto mediante analisi congiunta MASW, utilizzata per il calcolo del parametro $V_{s,eq}$ (Fig. 4).

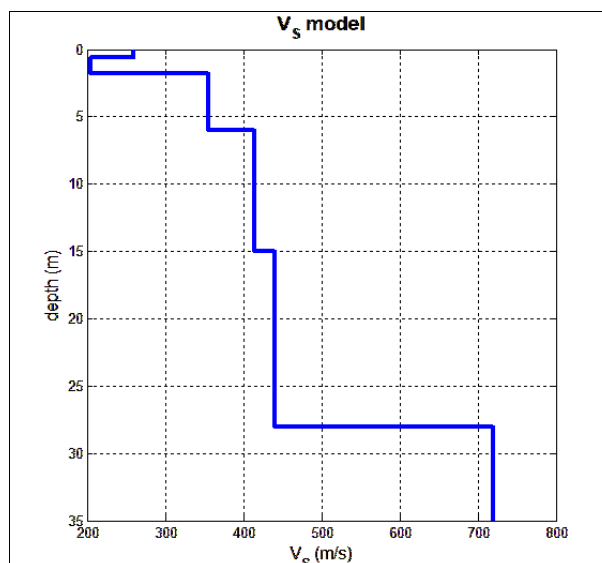


figura 4 - profilo sismostratigrafico.

In base ai dati sismostratigrafici ottenuti si rileva:

- fino ad una profondità di circa -1,8 m dal p.c., un primo orizzonte superficiale moderatamente addensato, con valori di velocità di propagazione delle onde di taglio (*onde S*) compresi tra 205 e 260 m/s.
- Da -1,8 m a circa -28,0 m di profondità dal p.c. si riscontrano valori di velocità delle onde S in generale e graduale aumento con la profondità e compresi tra 355 e 440 m/s, propri di depositi da moderatamente addensati ad addensati, afferenti alla sequenza deposizionale di origine fluvio-glaciale, che caratterizza il sottosuolo del territorio in cui ricade l'area in esame.
- Oltre -28,0 m dal p.c., si rileva un valore di V_s pari a 720 m/s, per cui si ipotizza la presenza di depositi molto addensati afferenti alla medesima sequenza alluvionale/fluvio-glaciale indagata e/o di natura conglomeratica.

4 - PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE

Secondo il D.M.17/01/2018, tenuto conto dei risultati delle prospezioni sismiche realizzate, e considerando un piano di interesse posto in corrispondenza del p.c. sul quale sono state eseguite le prospezioni sismiche, è stato calcolato un valore di $V_{s,eq}$ pari a 405 m/s, con bedrock sismico posto oltre 30,0 m dal p.c.; queste condizioni consentono di assegnare al terreno una **categoria di sottosuolo "B"**.

Dal punto di vista della Pericolosità Sismica Locale l'area è stata classificata, nella "Carta della pericolosità sismica locale" (TAV. T06 – Marzo 2011) allegata alla Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica del P.G.T. del Comune di Rezzato, entro lo scenario di **pericolosità sismica Z4a** "Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi".

Per tale scenario è stata eseguita, nello Studio Geologico Comunale, un'analisi sito-specifica per la Stima degli effetti litologici e del Fattore di Amplificazione di sito (2° Livello di approfondimento – All. 5 della D.G.R. 8/7374 del 2008). Si ritiene che la D.G.R. IX/2616 del 2011, di aggiornamento alla D.G.R. 8/7374 del 2008 non comporti modifiche alle procedure sopradescritte e che pertanto i relativi risultati possano essere considerati validi.

Secondo l'approfondimento di II livello citato, il lotto di progetto ricadrebbe in un'area in cui sono segnalati valori di F_a di sito inferiori ai valori di F_a di soglia ($FAC \leq FAS$) previsti per la categoria di sottosuolo considerata.

Tuttavia, dato lo scenario di pericolosità sismica previsto, e avendo a disposizione i risultati della prospezione sismica eseguita nel sito d'indagine, **è stato scelto di eseguire comunque un'analisi sito-specifica per la Stima degli effetti litologici e del Fattore di Amplificazione di sito (2° Livello di approfondimento – All. 5 della D.G.R. IX/2616 del 2011)**, utilizzando il profilo sismico riportato nel presente studio.

In accordo con la procedura, la successione sismostratigrafica definita nel modello geofisico medio, viene riportata nella specifica "Scheda di Stima degli Effetti Litologici".

Rispettando soprattutto i campi di validità e le caratteristiche granulometriche dei terreni presenti in sito è stata eseguita una verifica dei valori dei Fattori di amplificazione di sito (F_a) rispetto a quelli di "soglia comunale", utilizzando la scheda relativa alla "litologia limoso-sabbiosa tipo 2 - curva caratteristica 3", di cui si riporta l'esplicazione grafica ed analitica (figura 5).

Si specifica che, per i limiti intrinseci della metodologia d'indagine sismica utilizzata e della tipologia della successione stratigrafica del sito in esame, non è stato possibile raggiungere il bedrock sismico ($V_s \geq 800$ m/s), utile per il calcolo del periodo di vibrazione del sito (T). Pertanto, la ricostruzione dell'andamento dei valori di V_s fino al valore di 800 m/s è stata stimata sulla base del gradiente di V_s nei primi 35 m indagati e considerando il carico litostatico agente oltre tali profondità.

Per queste motivazioni, e tenendo conto dell'andamento della curva di validità della scheda *limoso-sabbiosa tipo 2*, ritenuta idonea ad eseguire l'analisi di II livello secondo le norme regionali, il bedrock sismico è stato assegnato ad una profondità plausibile di -45,0 m dal piano campagna generale.

I risultati ottenuti per il calcolo del fattore di amplificazione F_a , indicano che:

- per edifici con periodo T compreso tra 0,5 e 1,5 s si ottiene un valore di F_a di sito inferiore al valore di F_a di soglia previsto per la categoria di sottosuolo "B" (definita per il sito d'interesse).
- Al contrario per edifici con periodo T compreso tra 0,1 e 0,5 s, si ottiene un valore di F_a di sito superiore al valore di F_a di soglia comunale ($F_{AC} > F_{AS}$).

Sarà quindi necessario assumere in progetto la **Categoria di Sottosuolo "C"** e i relativi parametri sismici.

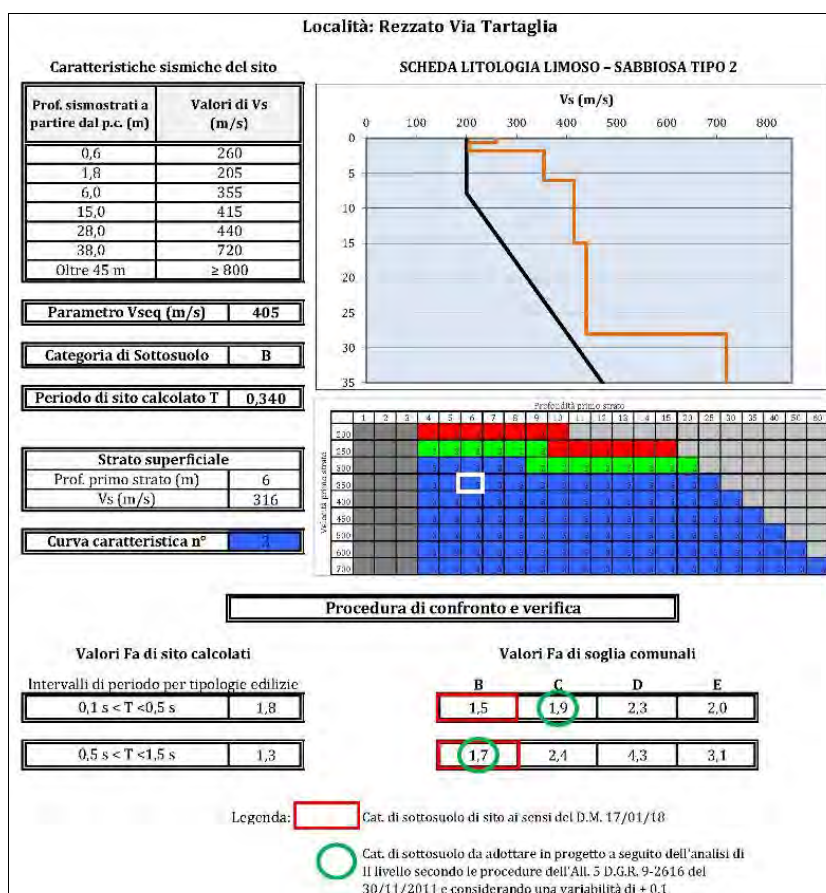


figura 5 - Stima degli effetti litologici - Analisi di 2° livello secondo le procedure previste dall'All. 5 - D.G.R. 9-2616 del 30/11/2011

5 - CONCLUSIONI

Le prospezioni geofisiche eseguite hanno permesso di ricostruire in maniera dettagliata le caratteristiche sismiche dei depositi che caratterizzano l'area oggetto di studio, ubicata in Via Tartaglia, nel Comune di Rezzato (BS).

Nello specifico sono stati eseguiti n° 1 profilo di sismica multicanale con acquisizione delle onde di superficie ed elaborazione dati mediante metodologia MASW, e n° 1 indagine sismica passiva con metodo HVSr.

Il profilo sismostratigrafico ottenuto risulta correlabile con il quadro geologico dell'area oggetto di interesse e i valori di velocità delle onde S nei primi metri risultano compatibili con l'andamento delle prove penetrometriche eseguite nella medesima area di indagine.

Per l'area in esame è stato calcolato un valore di $V_{s,eq}$, pari a **405 m/s**, con bedrock sismico posto oltre -30,0 m da p.c..

I risultati dell'analisi sito-specifica (I Grado di approfondimento – APP 5 secondo quanto indicato nella DGR 5001/2016) per la Stima del Fattore di Amplificazione di sito, indicano per edifici con periodo T compreso tra 0,1 e 0,5 s, si ottiene un valore di F_a di sito superiore al valore di F_a di soglia comunale. Sarà quindi necessario assumere in progetto la **Categoria di Sottosuolo "C"** e i relativi parametri sismici ($F_{AC} > F_{AS}$).