



COMUNE DI BRESCIA

PIANO ATTUATIVO COPAN PARK

11

RELAZIONE IDROGEOLOGICA GEOLOGICA E SISMICA

WHAT

FASE 1 - Realizzazione di:

locali tecnici

impianto fotovoltaico di copertura

spazi ricreativi

parcheggi uso pubblico

corridoio ecologico

ristrutturazione fabbricato industriale

riqualificazione asse stradale Via Francesco Perotti

FASE 2 - Completamento di:

impianto fotovoltaico di copertura

WHERE

Brescia | Zona industriale Girelli | Via Perotti - Via Castagna - Via Di Vittorio

WHY

Riorganizzazione logistica interna

Riqualificazione aree esterne

W(H)OW

Applicazione di **best practices** per la realizzazione di:

sistemi di drenaggio sostenibili - sustainable drainage systems

infrastrutture verdi - green infrastructures

WHO

COPAN ITALIA SpA | Via F. Perotti 10 | 25125 Brescia

P. IVA 01740560170

WHEN

APRILE 2019



Redatto da: Dott. Geologo Marco Venturini
Ordine dei geologi della Lombardia n. 1078

STUDIO TRESIS *Geologia, Geotecnica, Ingegneria*

Viale Venezia 20 | Brescia - Tel e Fax: 030.294976

www.studiotresis.it - e.mail: studiotresis@libero.it



MAPPA DEGLI ELABORATI

U1	U2	U3	U4	U5	ANALISI
U6	U7	P1	P2	P3	PROGETTO
P4	P5	P6	P7	P8	RENDER
P9	I1	I2	I3	I4	SPECIALISTICA
	I5	I6	I7	I8	AMBIENTALE

	<i>Elenco elaborati</i>	<i>id</i>	<i>tipo</i>	<i>n.</i>
<i>Inquadramento urbanistico</i>	Stralcio delle previsioni di PGT e inquadramento d'area vasta	U1	tavola	4
	Estratto aerofotogrammetrico	U2	tavola	1
	Estratto catastale e SLP esistenti	U3	tavola	3
	Dichiarazione proprietà e disponibilità delle aree	U4	documento	1
	Rilievo dell'area di intervento	U5	tavola	1
	Profili dello stato di fatto e sezioni progressive	U6	tavola	2
	Documentazione fotografica	U7	tavola	1
<i>Proposta progettuale</i>	Relazione generale	P1	fascicolo	1
	Documento Preliminare di VAS	P2	fascicolo	1
	Progetto planivolumetrico e di "Preverdissement"	P3	tavola	4
	Profili e sezioni	P4	tavola	1
	Progetto illuminazione pubblica	P5	tavola	1
	Superfici standard e parametri urbanistici	P6	tavola	1
	Computo Metrico Estimativo di massima	P7	fascicolo	1
	Rappresentazione rendering	P8	tavola	1
	Proposta di schema di convenzione	P9	fascicolo	1
<i>Indagini specialistiche</i>	Relazione geologica, idrogeologica e sismica	I1	fascicolo	1
	Relazione idraulica	I2	fascicolo	1
	Distanza elettrodotti	I3	fascicolo	1
	Valutazione previsionale del clima acustico	I4	fascicolo	1
	Fabbisogno parcheggi proposta di PSCL	I5	fascicolo	1
	Relazione agronomica e bilancio ecologico	I6	fascicolo	1
	Relazione naturalistica	I7	fascicolo	1
	Piano paesistico di contesto ed esame paesistico	I8	fascicolo	1



SOMMARIO

SINTESI

Premessa	4
Risultati d'indagine	6

MASTER PLAN

Mappa degli interventi	9
-------------------------------	---

MODELLO GEOLOGICO

Inquadramento geologico generale	10
Geomorfologia	10
Idrogeologia	12
Vincoli geologici	16
Sintesi delle criticità geologiche	17
Fattibilità geologica	17

INDAGINI IN SITO

Sondaggio geognostico	18
Prove SPT in foro	20
Prove di permeabilità	23

ASPETTI SISMICI

Classificazione del territorio	26
Analisi HVSR	27
Indagine sismica MASW	30
Sismostratigrafia	34
Risposta sismica locale	36
Pericolosità sismica di base	38
Liquefacibilità dei terreni	40



PREMESSA



Il presente studio geologico è stato redatto a seguito di quanto richiesto dal Comune di Brescia, Settore Urbanistica, nell'elenco denominato "Documentazione da allegare alla istanza di approvazione Piano Attuativo". Nel dettaglio:

- a. Indagini di fattibilità geologico-idraulica a supporto degli interventi previsti.
- b. Indagini idrauliche e geologiche a supporto degli interventi previsti che verifichino le condizioni dell'art. 36 del PAI (DPCM 06/05/05). Tale elaborato dovrà individuare gli interventi necessari per la messa in sicurezza delle aree da effettuare a supporto del Piano Attuativo ai sensi art. 5 comma b delle NTA ..."

È stato perciò programmato e attuato un piano d'indagine finalizzato a caratterizzare dal punto di vista litologico, geotecnico, idrogeologico e sismico il primo sottosuolo dell'area interessata dal progetto.

Preliminarmente all'esecuzione delle indagini in sito è stata consultata la documentazione di seguito elencata:

1. Relazione sull'indagine geotecnica e sismica, eseguita dallo scrivente per un precedente progetto in data 26/02/2016, nell'ambito di un progetto riguardante lo stabilimento Copan in adiacenza al quale si intende ora realizzare l'intervento in esame.
2. La documentazione allegata alle varianti del PGT vigente del comune di Brescia:
 - "Adeguamento della componente sismica alla DGR IX/2616 del 30-11-2011 con aggiornamento della carta della fattibilità geologica per le azioni di piano e delle relative norme - L.R. 12/2005 - DGR 30 Novembre 2011, n. 9/2616" a firma del Dott. Geol. Davide Gasparetti e del Dott. Geol. Gianantonio Quassoli (Variante 2 dello Studio Geologico Comunale);
 - "Adeguamento della componente geologica, idrogeologica e sismica

dello Studio Geologico Comunale al Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) (DGR 19 giugno 2017 n. 10/6738)", redatto dai Dott. Geologi D. Gasparetti e G. Quassoli e dall'Ing. G. Rossi, datato marzo 2018 (Variante 3 dello Studio Geologico Comunale);

3. "Carta idrogeologica e dei pozzi" dello Studio "Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio" redatta per il Comune di Castel Mella dal Dott. Geologo Massimo Marella.

Sono state successivamente eseguite le attività di seguito elencate:

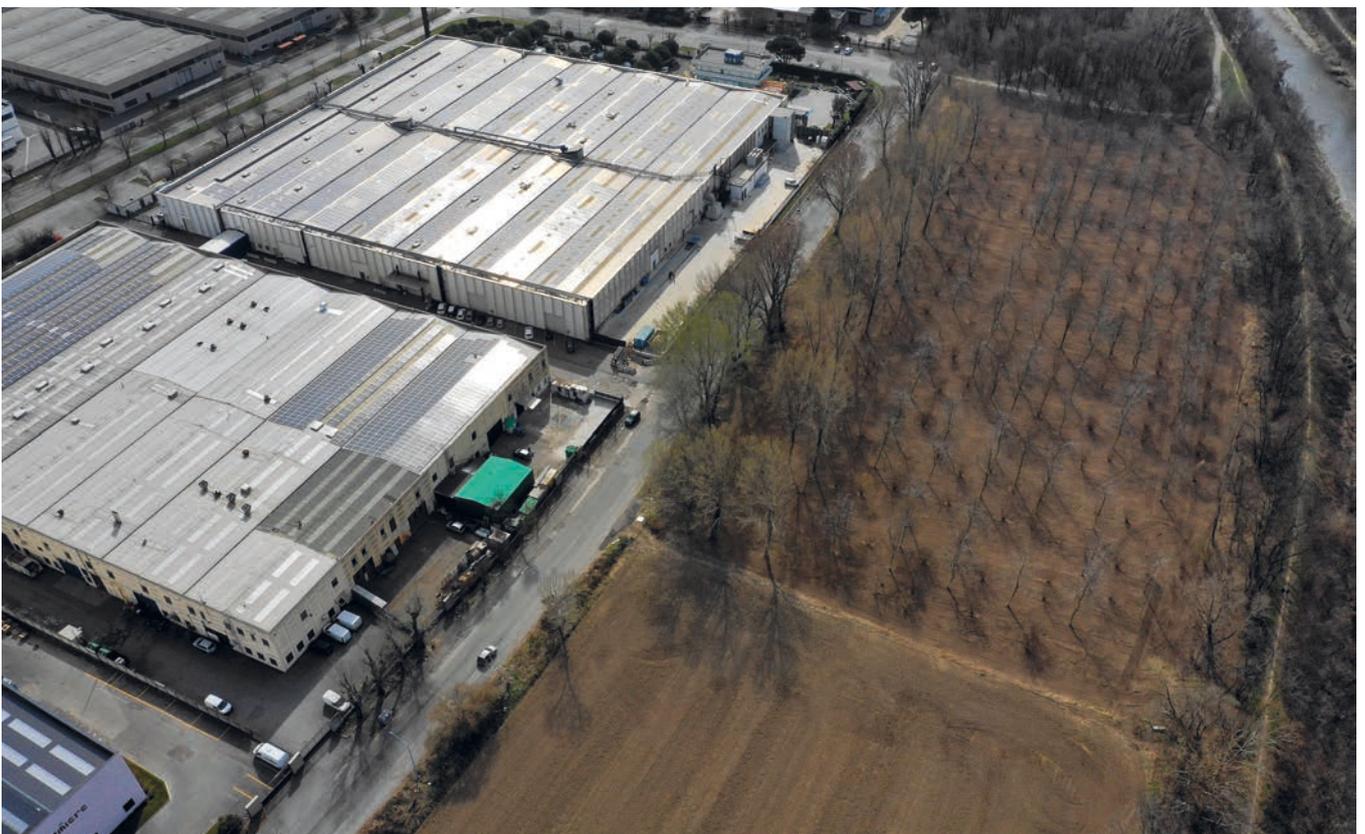
- Esecuzione di un sondaggio geognostico a carotaggio continuo spinto alla profondità di 10 metri;
- Esecuzione di prove SPT (*Standard Cone Penetration Test*) all'interno del foro di sondaggio;
- Installazione di un piezometro all'interno del foro di sondaggio;
- Esecuzione di prove di prove di permeabilità in pozzetto superficiale.

L'esecuzione del sondaggio con prove SPT in foro e l'installazione del piezometro ha consentito di:

- ricostruire la stratigrafia locale tramite carotaggio continuo dei terreni attraversati (prelievo di campioni);
- caratterizzare i terreni dal punto di vista geotecnico;
- rilevare la profondità della falda.

Sulla base degli esiti delle indagini si è proceduto alla definizione del modello geologico, geotecnico, idrogeologico e sismico del sottosuolo indagato.

La presente relazione si compone di 40 pagine.



RISULTATI **D'INDAGINE**

È stato eseguito uno studio per ricostruire il modello geologico, idrogeologico, sismico e geotecnico in corrispondenza dell'area interessata dal PIANO ATTUATIVO COPAN PARK.

Si riassumono di seguito i risultati dello studio.

Litologia e geotecnica

Nel primo sottosuolo del territorio comprendente l'area in esame sono presenti alluvioni post-glaciali del Fiume Mella, generalmente sabbioso-ghiaiose.

Il sondaggio geognostico e gli scavi esplorativi eseguiti nell'area hanno consentito di verificare la presenza, al di sotto di un suolo limoso, e fino alla profondità indagata (10 metri), di terreni prevalentemente sabbiosi aventi discrete proprietà geotecniche, con locali intercalazioni argillose con proprietà geotecniche localmente mediocri.

Geomorfologia

- Quota topografica: circa 116 m s.l.m.
- Morfologia: pianeggiante
- Categoria topografica: T1 - coefficiente di amplificazione topografica ST = 1
- Dinamica geomorfologica: area stabile

Idrogeologia e vulnerabilità della falda

- Soggiacenza media della falda: 3÷6 metri
- Profondità della falda rilevata all'interno del piezometro installato nel foro di sondaggio: circa 5 metri
- Grado di vulnerabilità della falda: elevato
- Permeabilità dei terreni al di sopra della falda: $K \approx 2 \times 10^{-3}$ cm/sec

Vincoli geologici

- Area potenzialmente interessata da alluvioni rare (fascia C del PAI)

Criticità geologiche

- Area potenzialmente interessata da alluvioni rare (fascia C del PAI)
- Area a bassa soggiacenza della falda
- Area che può presentare scadenti caratteristiche geotecniche

Classi di fattibilità geologica

2d2 – Settore sud-ovest

All'interno delle aree così classificate gli interventi di viabilità, nuova edificazione, ricostruzione, ampliamento e scavi, devono essere preceduti da indagini geologiche e geotecniche che valutino la compatibilità dell'intervento stesso con le caratteristiche geologiche, geotecniche e idrogeologiche del sito.

Classe 3b – Area a bassa soggiacenza della falda

In queste aree si sconsiglia la realizzazione di scantinati o locali seminterrati per evitare possibili dannose interferenze tra falda e costruzioni.

Sismica

- Zona sismica: 2
- Categoria di sottosuolo: C
- Liquefazione dei terreni: da escludere.

MASTER PLAN

ZONA PARCHEGGIO

Il parcheggio è letteralmente immerso nel bosco, di alberi di alto fusto, lasciato intatto dall'abbandono dell'impianto di arboricoltura.

RADURE

Sono ricreate delle zone di radura a prato stabile all'interno del corridoio ecologico con funzione di diversificazione degli ecosistemi.

CORRIDOIO ECOLOGICO

Buona parte dell'area libera sarà riqualficata come corridoio ecologico.

FOSSATO INONDABILE

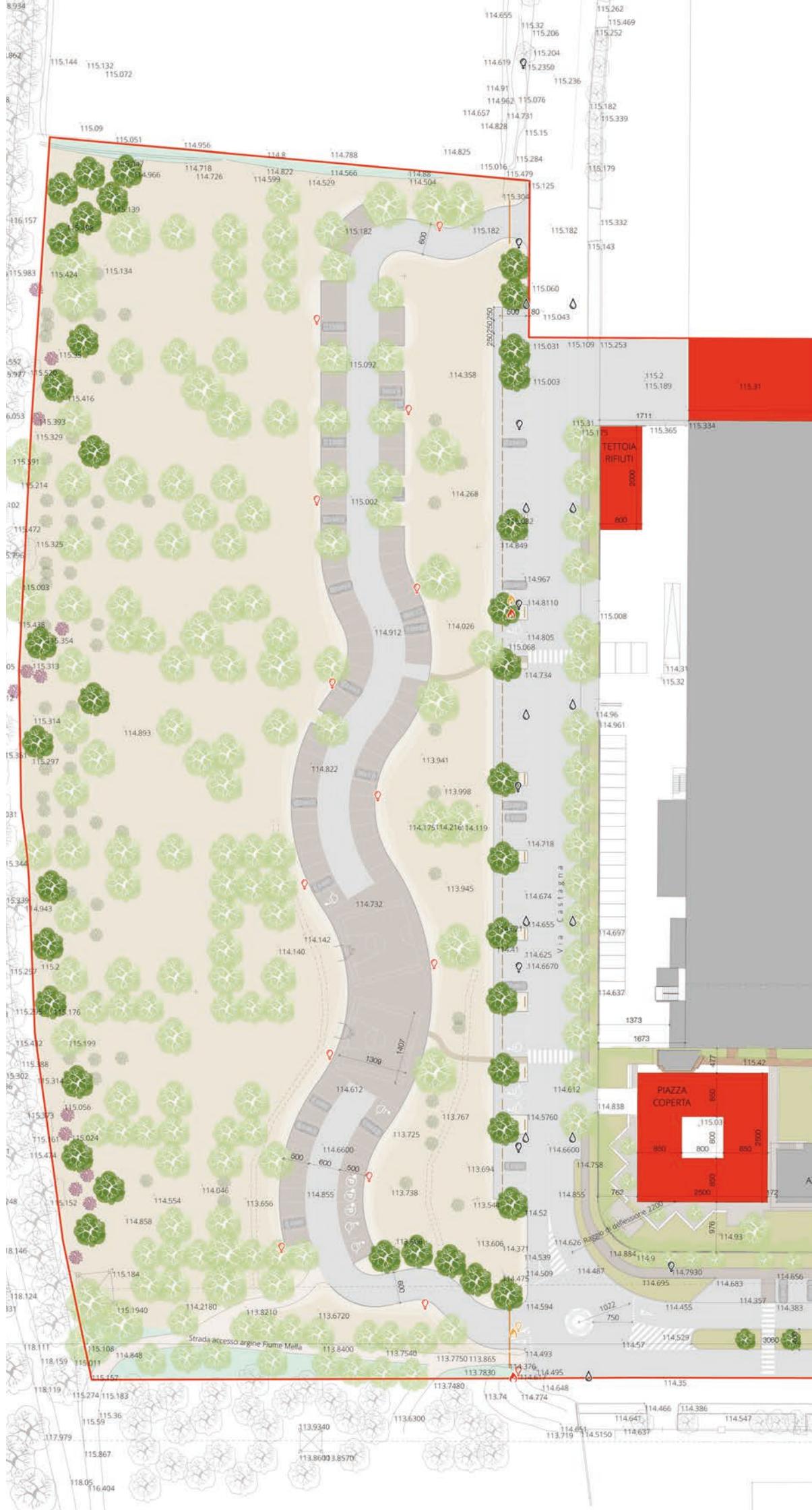
Un leggero avvallamento già presente nella conformazione dell'area è stato progettato per raccogliere le acque in eccesso in caso di eventi eccezionali.

CHARGING POINT

Alcuni stalli del parcheggio pubblico saranno dotati di colonnine di ricarica per veicoli elettrici (auto, moto, e biciclette).

ARENA

Il progetto prevede la copertura con tettoia di un'area destinata a uso ricreativo interno.



MAPPA DEGLI INTERVENTI



TETTO PV

La copertura del corsello fra i due edifici industriali consente l'installazione, senza consumo di suolo, di un impianto fotovoltaico.

RISTRUTTURAZIONE

Due campate dell'edificio saranno oggetto di completa ristrutturazione. Si prevede la demolizione delle strutture con rialzo per la riorganizzazione logistica del magazzino.

SPAZI TECNICI

È prevista la realizzazione di due coperture lungo i lati est e ovest a protezione di locali tecnici e deposito rifiuti assimilabili agli urbani.

ACCESSI

È previsto lo spostamento dell'attuale ingresso carrabile e la realizzazione di una banchina "stop and go" per TAXI.

VIA PEROTTI

È prevista la realizzazione di due rotatorie e aiuola centrale alberata, lungo via Perotti.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

Elaborato di riferimento: U1 Tavola 3

La Fig.1 è tratta dalla “Carta di inquadramento geologico-geostrutturale” dello Studio Geologico Comunale.

La tavola segnala la presenza di depositi alluvionali post-glaciali sabbioso-ghiaiosi del Fiume Mella, il quale delimita ad ovest l'area in esame.

GEOMORFOLOGIA

Elaborato di riferimento: U1 Tavola 3

L'area in esame si trova in un territorio sub-pianeggiante con leggera pendenza da nord verso sud, privo di significativi elementi morfologici. La quota topografica media dell'area è circa 116 metri s.l.m.

Trattandosi di superficie pianeggiante, in base al D.M. 17/01/18 la categoria topografica definita è **T1**.

Dal punto di vista della dinamica geomorfologica l'area è stabile, come confermato dalla “Carta Geomorfologica” dello Studio geologico comunale Fig.2.

L'area è tuttavia interessata da altre criticità che saranno descritte nei prossimi paragrafi.

Fig.1 : “Carta di inquadramento geologico-geostrutturale” dello Studio Geologico Comunale.

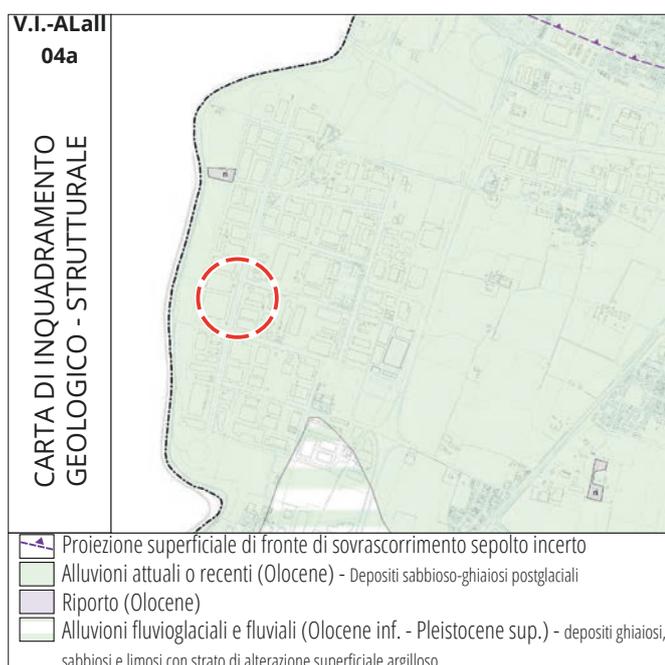


Fig.2 : “Carta Geomorfologica” dello Studio Geologico Comunale.

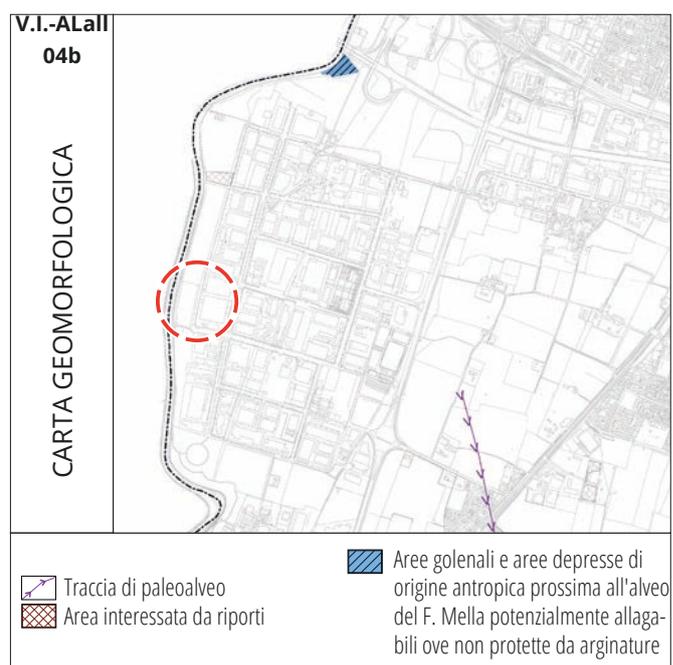


Immagine 1 : Dalla ripresa aerea è visibile la morfologia sub-pianeggiante dell'area, l'elevato grado di antropizzazione del territorio, la zona industriale Girelli e l'alveo del Fiume Mella, che scorre immediatamente ad ovest. (Fonte: elaborazione di immagini aeree Google Earth®)



IDROGEOLOGIA

Elaborato di riferimento: U1 Tavola 3

La **Fig.3** è tratta dalla “Carta Idrogeologica” dello Studio Geologico Comunale.

La carta segnala che l’area in esame si trova in un territorio caratterizzato da bassa soggiacenza della falda, e riporta seguenti dati:

- isofreatiche relative al mese di gennaio 1994 (linee azzurre), momento di massimo piezometrico (massima altezza della falda) per il periodo 1985-1996;
- isofreatiche relative al mese di maggio 1990 (linee verdi), momento di minimo piezometrico (minima altezza della falda) per il periodo 1985-1996.

In corrispondenza dell’area in esame le quote sul livello del mare della superficie di falda nelle due date sopra indicate erano le seguenti:

- circa 113 metri s.l.m.
- circa 108,5 metri s.l.m.

corrispondenti grossomodo alle seguenti soggiacenze (profondità rispetto alla superficie topografica):

- 3 metri nel gennaio ‘94, soggiacenza minima;
- 7,5 metri nel maggio ‘90, soggiacenza massima.

La “Carta idrogeologica e dei pozzi” dello studio “Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio” del Comune di Castel Mella (**Fig.4**) conferma le misure di minimo piezometrico indicate dalla carta idrogeologica dello Studio geologico comunale di Brescia, fornendo un dato di soggiacenza di 7-8 metri dal piano campagna.

Lo Studio geologico comunale di Castel Mella fornisce inoltre le stratigrafie di alcuni pozzi presenti nel territorio comunale; il pozzo indicato con la sigla “**Csm30**”, molto vicino all’area in esame, riporta una profondità di falda pari a circa 5 metri dal piano campagna, schematizzato nella **Fig.5**.

La “Carta della vulnerabilità geologica delle zone di pianura” dello Studio geologico comunale di Brescia (**Fig.6**) evidenzia che la falda locale è caratterizzata da elevato grado di vulnerabilità, determinato dalla sua bassa soggiacenza e dal fatto che essa non è protetta da strati impermeabili rispetto alla possibile infiltrazione di inquinanti provenienti dalla superficie.

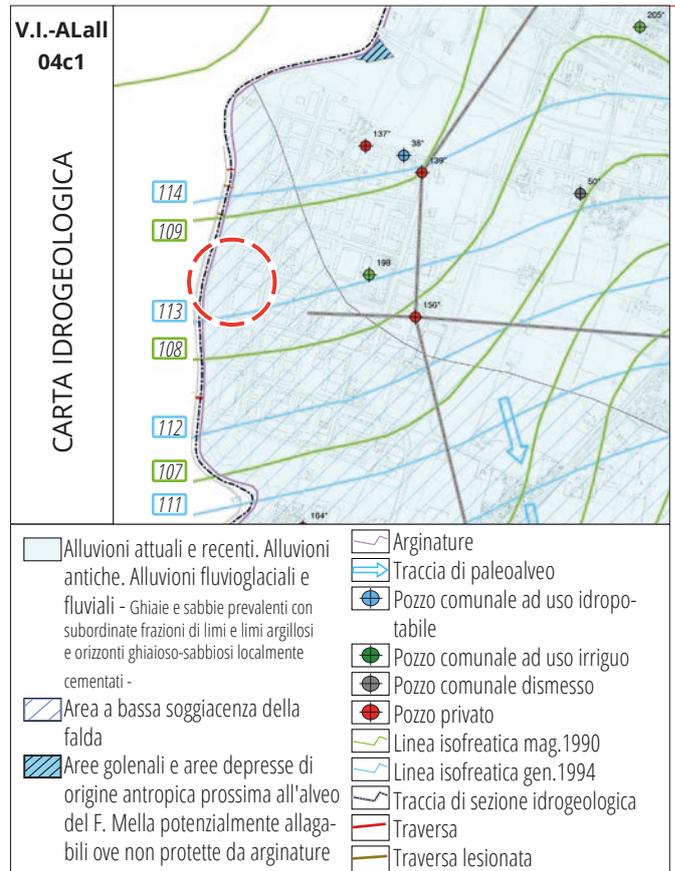


Fig.3: "Carta Idrogeologica" dello Studio Geologico Comunale.

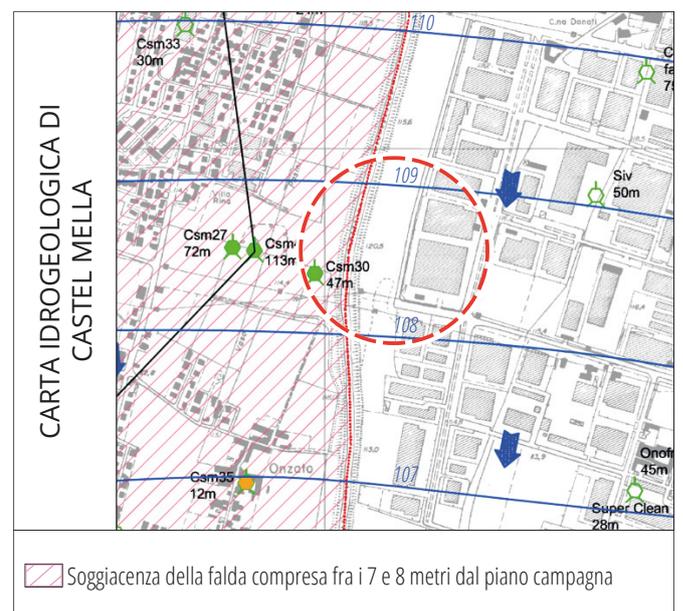


Fig.4: "Carta Idrogeologica" dello Studio Geologico Comunale di Castel Mella.



Infine, nell'anno 2014 ARPA ha effettuato misure piezometriche nel pozzo Copan di Via Perotti (**Tab.1**); le misure indicano una soggiacenza della falda pari a 5÷6 m.

Riassumendo, la "Carta Idrogeologica" dello Studio geologico comunale di Brescia riporta una soggiacenza minima della falda pari a 3 metri; tutte le altre fonti sopra citate inducono a ritenere che la profondità media della falda locale sia di almeno 5 metri dal piano campagna.

Le misure eseguite all'interno del piezometro installato nel foro di sondaggio sono in accordo con il dato rilevato da ARPA (**Tab.2**).

È importante ricordare che la soggiacenza di una falda freatica varia ciclicamente; una falda libera subisce infatti oscillazioni (innalzamenti o abbassamenti) di breve e lungo periodo, principalmente in funzione dei cicli stagionali e di irrigazione.

Tab.1 : Rilievi freaticometrici - ARPA 2014.

DENOMINAZIONE	QUOTA	FALDA M.S.L.M.	DATA
POZZO COPAN Via Perotti, 22	114 m s.l.m.	110,685	apr-14
		110,345	giu-14
		110,855	set-14

Tab.2 : Rilievi nel piezometro installato nel foro di sondaggio

DATA	PROFONDITÀ DELLA FALDA DAL PIANO CAMPAGNA
27 febbraio 2019	5,35 metri
8 marzo 2019	5,10 metri
13 marzo 2019	5,05 metri

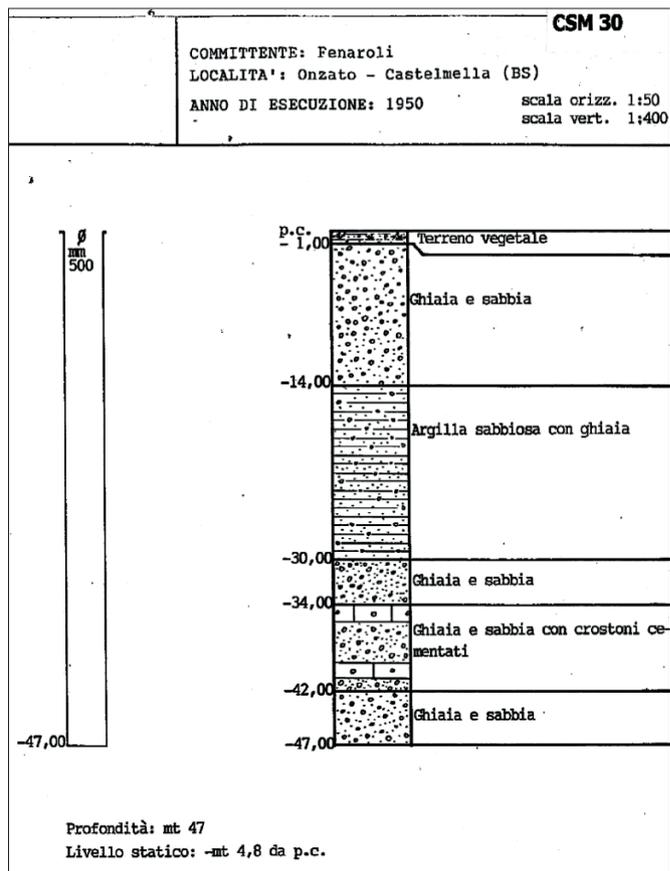


Fig.5: Stratigrafia del pozzo Fenaroli.

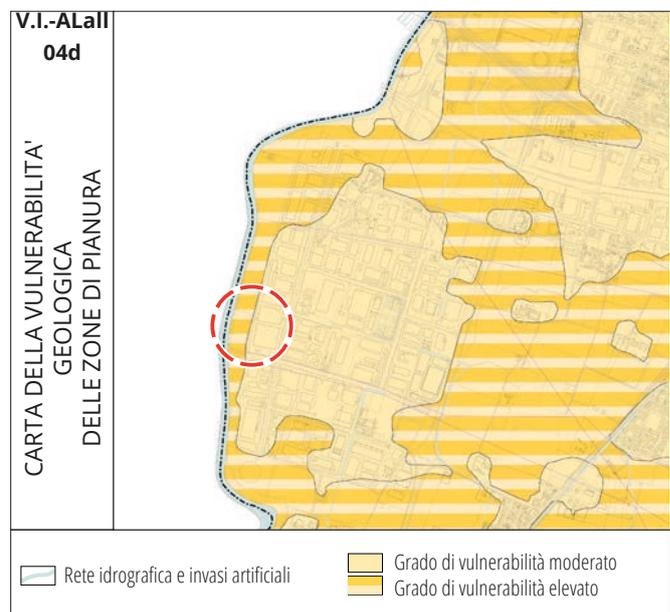


Fig.6: "Carta della vulnerabilità geologica delle zone di pianura" dello Studio Geologico Comunale.

VINCOLI GEOLOGICI

Elaborato di riferimento: U1 Tavola 3

La "Carta dei vincoli" dello Studio geologico comunale di Brescia, dalla quale è tratta la Fig.7, evidenzia:

- l'appartenenza dell'area al sito inquinato "Brescia-Caffaro", in particolare al Sito d'Interesse Nazionale "falda",
- il rischio di potenziali fenomeni di allagamento e alluvionamento in caso di esondazione del Fiume Mella.

La "Carta PAI-PGRA" dello Studio geologico comunale di Brescia, dalla quale è tratta la Fig.8, evidenzia che l'area d'interesse si trova in Fascia C del PAI, la cui estensione è visualizzata dalla campitura azzurra; l'area azzurra coincide pertanto anche con l'area a rischio idrogeologico per alluvioni rare.

Si rileva che gli estensori dello Studio geologico comunale di Brescia hanno inserito l'area Copan in classi di fattibilità alle quali corrispondono criticità diverse da quella rappresentata dalla potenziale inondabilità, rispetto alla quale non sono stati imposti particolari limiti e divieti.

“

Definizione di "fascia C" del PAI

Area di inondazione per piena catastrofica (Fascia C), costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente (Fascia B), che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento.

... Si assume come portata di riferimento la massima piena storicamente registrata, se corrispondente a un TR superiore a 200 anni, o in assenza di essa, la piena con TR di 500 anni.

“

Art. 31. Area di inondazione per piena catastrofica (Fascia C)

Uno Studio Geologico Comunale deve recepire la seguente indicazione delle NTA del PAI:

4. Compete agli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica, regolamentare le attività consentite, i limiti e i divieti per i territori ricadenti in fascia C.
5. Nei territori della Fascia C (...) i Comuni competenti, in sede di adeguamento degli strumenti Urbanistici (...) sono tenuti a valutare le condizioni di rischio.

Fig.7: "Carta dei vincoli" dello Studio Geologico Comunale.

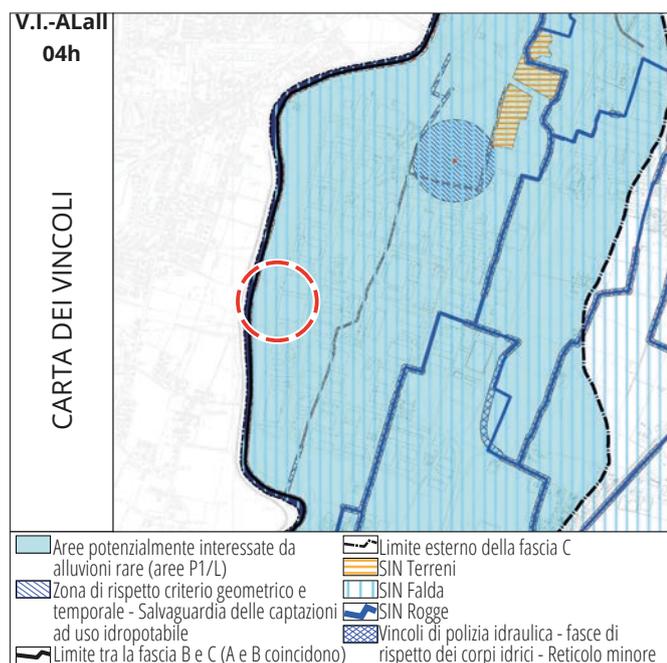
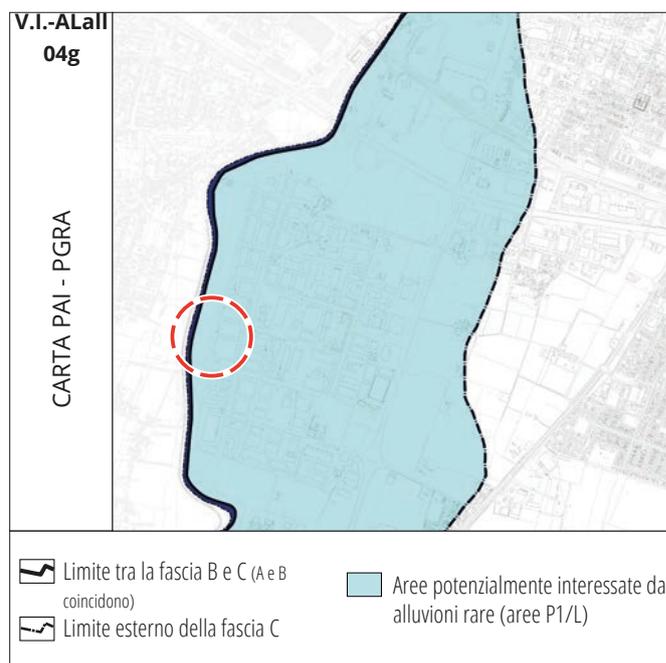


Fig.8: "Carta PAI-PGRA" dello Studio Geologico Comunale.



SINTESI DELLE CRITICITÀ GEOLOGICHE

Elaborato di riferimento: U1 Tavola 3

Quanto esposto nei paragrafi precedenti è riassunto dalla "Carta di sintesi" dello Studio geologico comunale di Brescia, rappresentato nella Fig.9.

Fig.9: "Carta di sintesi" dello Studio Geologico Comunale.

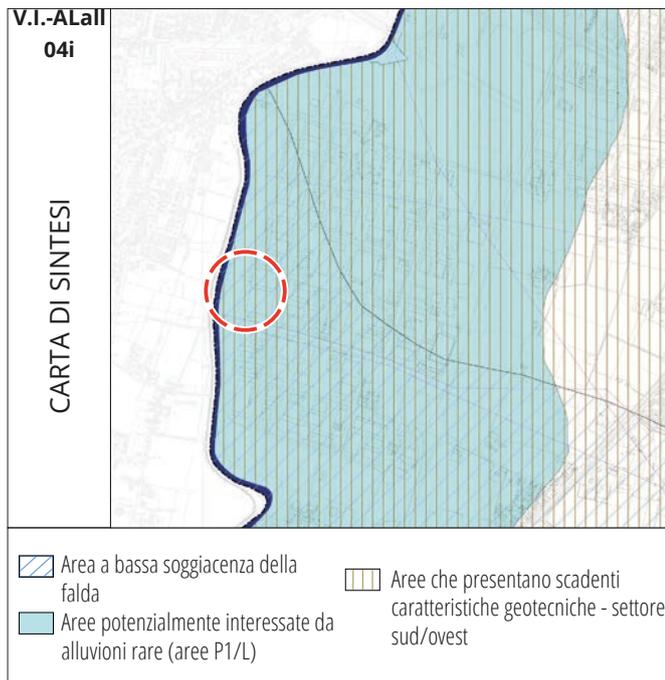
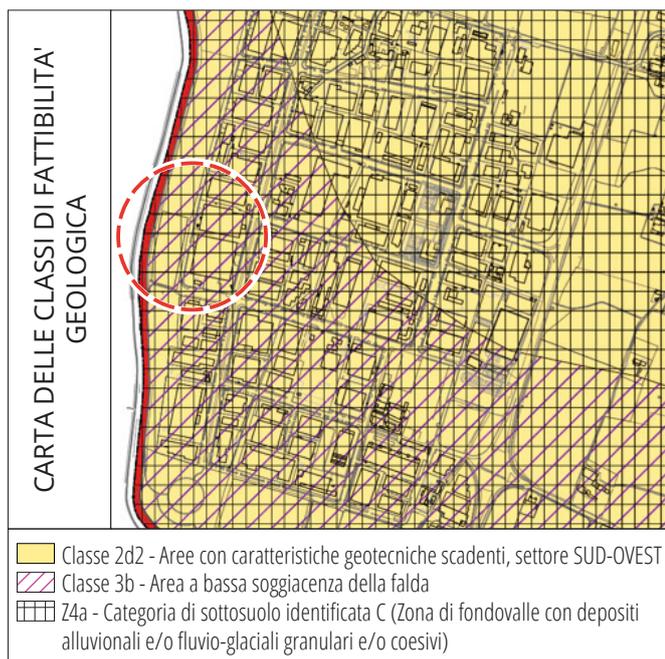


Fig.10: "Carta classi di fattibilità geologica" dello Studio Geologico Comunale.



FATTIBILITÀ GEOLOGICA

Elaborato di riferimento: U1 Tavola 3

La carta di sintesi in Fig.9 richiama le principali criticità dell'area in esame. Tali condizioni di carattere idraulico e idrogeologico (rischio da alluvioni, bassa soggiacenza, elevata vulnerabilità della falda), vanno interpretate alla luce della presenza, nei primi metri di profondità, di terreni che generalmente possiedono scadenti caratteristiche geotecniche.

Con riferimento a tali criticità, lo Studio geologico comunale di Brescia inserisce il settore di territorio, nel quale si trova l'area in esame, in due classi di fattibilità geologica (vedi Fig.10):

- Classe 2d2
- Classe 3b

Le due classi di fattibilità ribadiscono le seguenti criticità dell'area:

- presenza in superficie di terreni fini con caratteristiche geotecniche localmente scadenti;
- bassa soggiacenza della falda freatica;
- forti escursioni della falda acquifera.

Qui di seguito il dettaglio descrittivo delle due classi e le condizioni di fattibilità.

Classe 2d2 - Settore sud-ovest

Presenza in superficie di terreni fini limoso-sabbiosi con caratteristiche geotecniche da discrete a scadenti a causa della loro eterogeneità.

Si segnala la presenza di forti escursioni della falda acquifera potenzialmente in grado di interferire con piani interrati, fondazioni di edifici e sottopassi stradali o pedonali.

All'interno delle aree così classificate (2d1 e 2d2) gli interventi di viabilità, nuova edificazione, ricostruzione, ampliamento e scavi, devono essere preceduti da indagini geologiche e geotecniche che valutino la compatibilità dell'intervento stesso con le caratteristiche geologiche, geotecniche e idrogeologiche del sito.

Classe 3b - Area a bassa soggiacenza della falda

Area stabile, coincidente con zone di pianura caratterizzate da bassa soggiacenza della falda freatica (profondità della falda inferiore ai 5 m dal piano campagna).

Le indagini geologiche a supporto dei progetti edilizi devono essere accompagnate da studi idrogeologici sulle oscillazioni del livello di falda freatica.

Si sconsiglia la realizzazione di scantinati o locali seminterrati per evitare possibili dannose interferenze tra falda e costruzioni.

SONDAGGIO **GEOGNOSTICO**

In data 27 febbraio 2019 è stato eseguito il sondaggio a carotaggio continuo, con uso di colonna di rivestimento del foro e con circolazione diretta di acqua; le caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata sono le seguenti:

- tipo di sonda: perforatrice idraulica "Beretta T44"
- lunghezza del carotiere: 1,5 m
- diametro del carotiere: 101 mm
- lunghezza dei tubi di rivestimento: 1,5 m
- diametro dei tubi di rivestimento: 127 mm

La posizione degli scavi di prova e il carotaggio sono riportati nella **Fig.11**, la documentazione fotografica del sondaggio è riassunta nelle immagini.

Va evidenziato che i numerosi ciotoli visibili nelle cassette sono in realtà grumi sabbiosi generati dalla coesione apparente conferita alla sabbia dall'umidità.

Fig.11: Posizione del sondaggio.



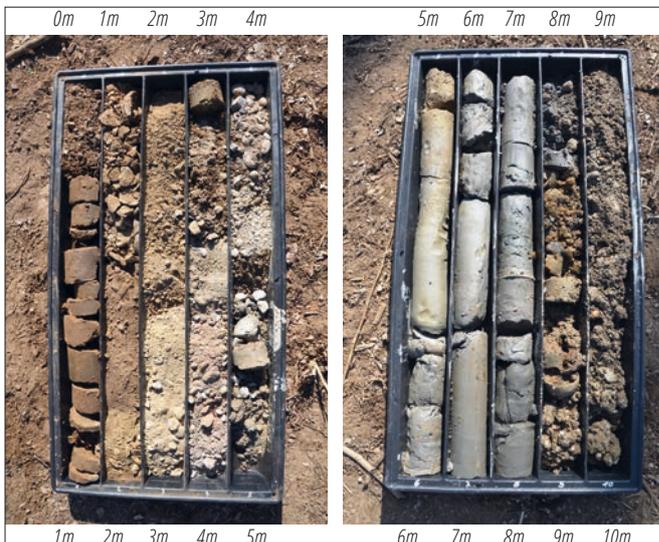
Immagine 2: Sonda sulla verticale d'indagine.



Immagine 3: Testata del tubo piezometrico installato nel foro di sondaggio.

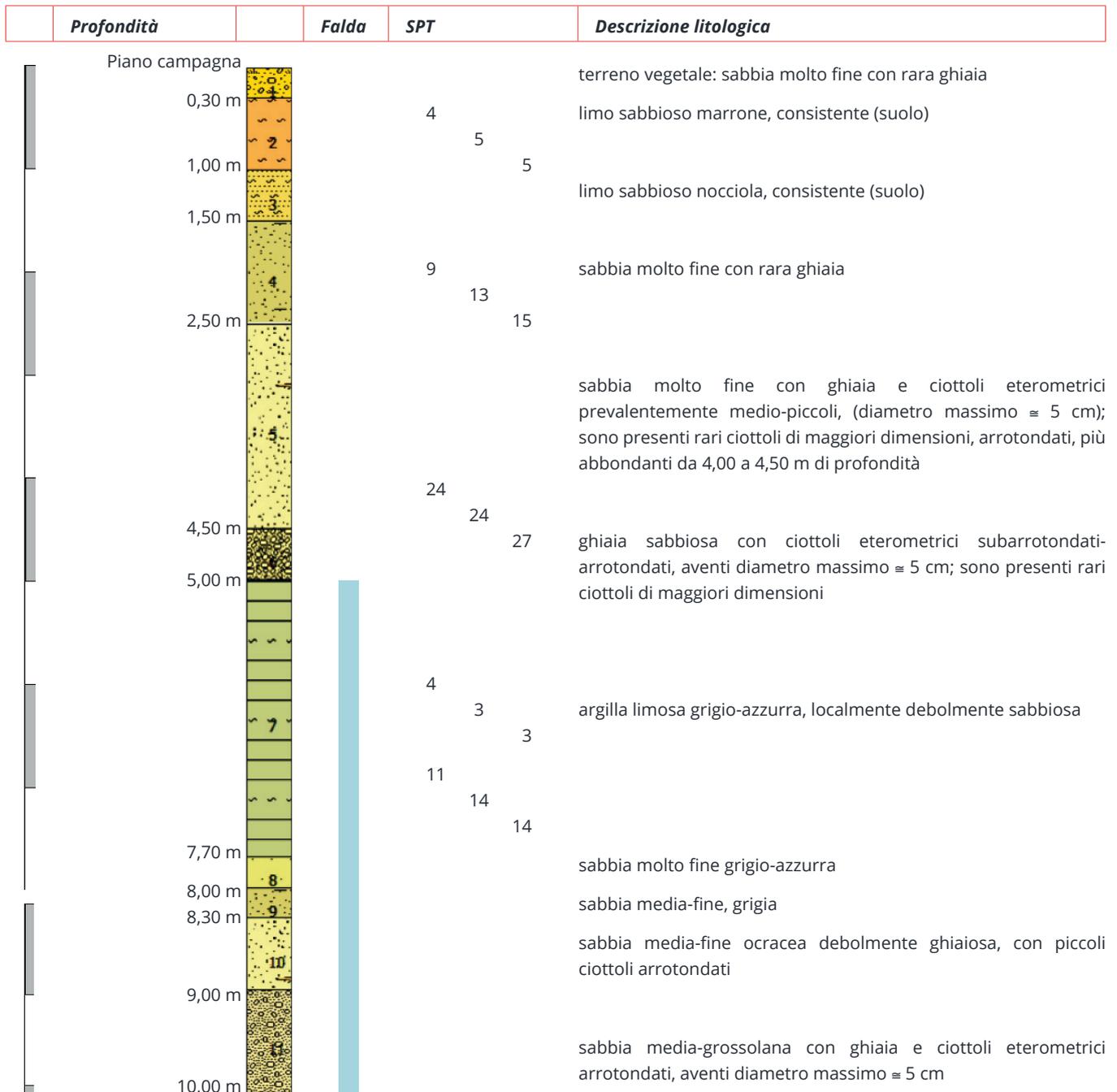


Immagine 4: Cassette portacampioni.



Schema 1 :

Stratigrafia del sondaggio geognostico.



PROVE **SPT** IN FORO

La prova SPT (*Standard Cone Penetration Test*), prevista dalle "Raccomandazioni per le Indagini Geotecniche" (1977) dell'Associazione Geotecnica Italiana, consiste nel fare cadere un maglio su una testa di battuta fissata alla sommità di una batteria d'aste, alla cui estremità inferiore (fondo foro) è avvitato un campionatore di dimensioni standardizzate. La caratterizzazione geotecnica del terreno indagato avviene mediante la valutazione della resistenza offerta dal terreno stesso alla penetrazione dinamica del campionatore.

Come indice della resistenza alla penetrazione si considera il numero N_{SPT} di colpi necessario per una penetrazione della punta pari a 30 cm. Si inizia a conteggiare il numero di colpi dopo un'infissione per 15 cm dal fondo foro, necessaria per il posizionamento della punta in corrispondenza del terreno indisturbato.

In corrispondenza degli strati argillosi e limosi la prova è stata eseguita con campionatore standard Raymond (tubo carotiere con diametro esterno di 51 mm, spessore 16 mm).

In corrispondenza degli strati sabbiosi addensati e ciottolosi, la prova è stata eseguita con punta conica di diametro 51 mm, angolo 60°, alternativa alla quale si può ricorrere in presenza di terreni compatti e/o ghiaioso-ciottolosi.

I valori delle prove eseguite all'interno del foro di sondaggio sono riportati sulla stratigrafia del sondaggio.

Il valore di N_{SPT} è stato corretto secondo i seguenti criteri:

- in presenza della falda: applicando la formula $N_{SPT} \text{ corretto} = 15 + 0.5 (N_{SPT} - 15)$;
- per efficienza: ipotizzando che l'energia trasferita alle aste sia il 60% di quella teorica;
- per profondità: applicando la formula $N'_{60} = c_n N_{60}$, nella quale c_n è un fattore di correzione per la tensione litostatica.

Tab.3: Caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata.

massa del maglio di battuta	63,5 kg
volata del maglio	76 cm
lunghezza delle aste della batteria d'infissione	1,5 m
penetrazione standard	30 cm

Infine, in corrispondenza degli spezzoni argillosi di carota, sono state eseguite, previo taglio longitudinale delle carote stesse, misure speditive della coesione non drenata tramite *pocket penetrometer*, penetrometro tascabile con punta di 6.4 mm di diametro che consente di effettuare la misura di resistenza non drenata (resistenza alla compressione).

Si riportano i valori rilevati alle varie profondità (Tab.4).

La media dei valori è pari a:

0,7 - 0,8 kg/cm².

Tab.4: Valori rilevati per profondità della prova.

PROFONDITÀ	VALORE
5,20 m	1,50 kg/cm ²
5,30 m	0,70 kg/cm ²
5,50 m	0,70 kg/cm ²
5,70 m	0,50 kg/cm ²
5,90 m	0,70 kg/cm ²
6,40 m	1,00 kg/cm ²
6,75 m	0,80 kg/cm ²
7,05 m	0,30 kg/cm ²
7,20 m	0,50 kg/cm ²
7,40 m	1,00 kg/cm ²
7,50 m	1,00 kg/cm ²

PARAMETRI GEOTECNICI

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.

Nel caso in esame, come valori caratteristici sono stati considerati i valori medi dei parametri geotecnici elaborati statisticamente. Sono state utilizzate le correlazioni indicate in **Tab. 5**.

I parametri geotecnici ricavati dalle prove SPT sono riassunti nella tabella **Tab. 6**.

Tab.5: Tabella delle correlazioni.

Densità relativa	Gibbs & Holtz (1957)
Angolo di resistenza al taglio	Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof (1956)
Modulo di Young	Schultze-Menzenbach
Peso unità di volume	Meyerhof ed altri
Coesione non drenata	U.S.D.M.S.M.
Modulo Edometrico	Stroud e Butler (1975)

Tab.6: Modello geotecnico.

SPT1 0.50 - 0.95 N_{SPT} = 10			
Peso Unità di Volume [t/m ³]	Densità relativa [%]	Angolo d'attrito [°]	Modulo di Young [Kg/cm ²]
1,75	40	30	80

SPT4 6.00-6.45 N_{SPT} = 6		
Peso Unità di Volume [t/m ³]	Coesione non drenata CU [Kg/cm ²]	Modulo Edometrico Eed [Kg/cm ²]
1,8	0,45	35

SPT2 2.00 - 2.45 N_{SPT} = 28			
Peso Unità di Volume [t/m ³]	Densità relativa [%]	Angolo d'attrito [°]	Modulo di Young [Kg/cm ²]
2,1	60	35	160

SPT4 6.90-7.35 N_{SPT} = 28		
Peso Unità di Volume [t/m ³]	Coesione non drenata CU [Kg/cm ²]	Modulo Edometrico Eed [Kg/cm ²]
2,1	1,05	130

SPT3 4.00 - 4.45 N_{SPT} = 51			
Peso Unità di Volume [t/m ³]	Densità relativa [%]	Angolo d'attrito [°]	Modulo di Young [Kg/cm ²]
2,22	70	41	240



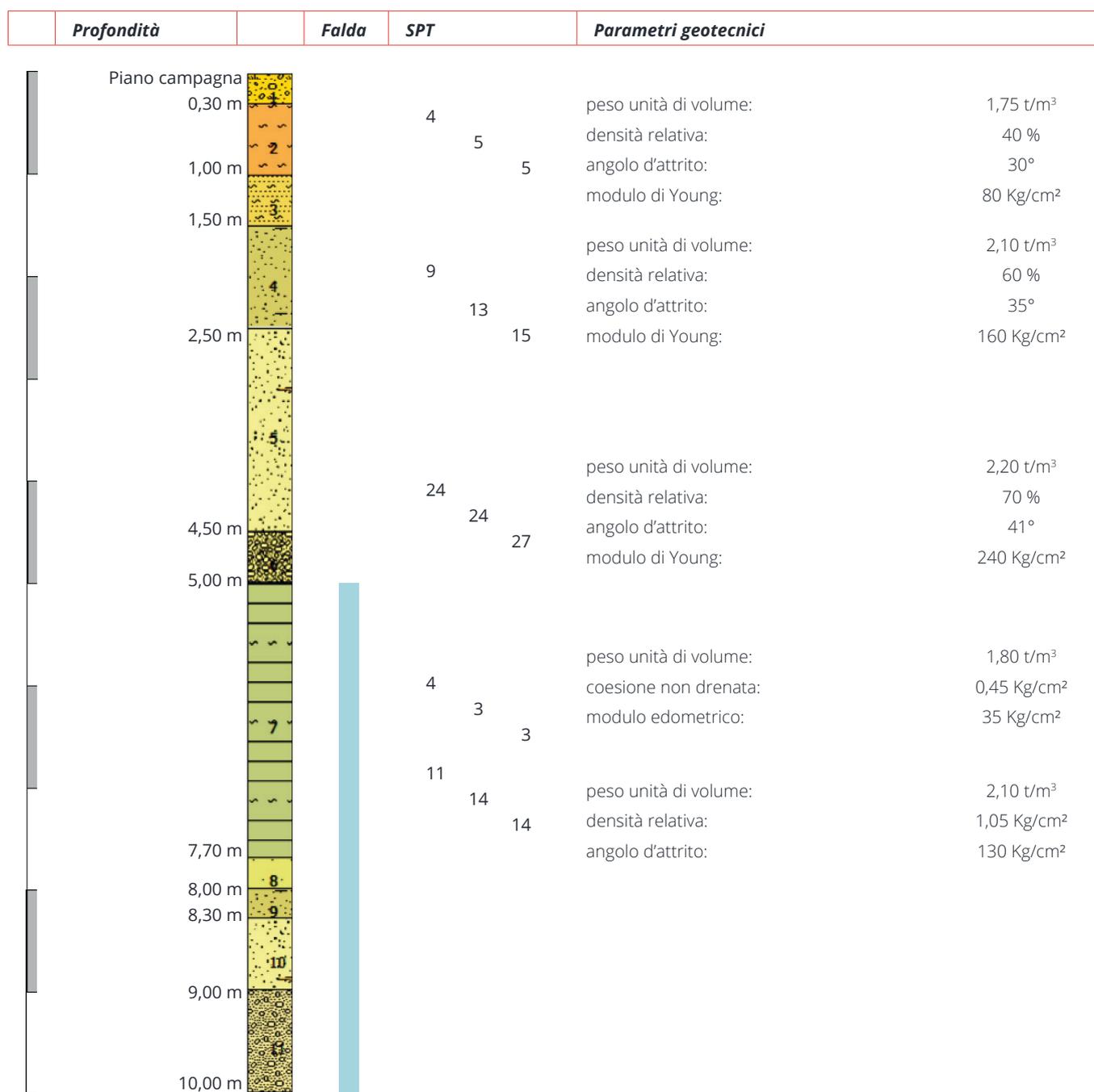
Circolare n° 7 del 21 gennaio 2019

“Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni - C.S.LL.PP”

Punto 6.2.2.4

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.

*Schema 2 :
Il modello geotecnico in corrispondenza del sondaggio.*



PROVE DI PERMEABILITÀ

In data 13 marzo 2019 sono state eseguite le prove in pozzetto, le quali consentono di determinare la permeabilità di un terreno superficiale al di sopra del livello della falda freatica.

Sono stati realizzati due pozzetti aventi la geometria indicata nella tabella seguente.

Tab.7 : Geometria pozzetti di prova.

pozzetto	larghezza	lunghezza	profondità
K1	70 cm	180 cm	220 cm
K2	70 cm	150 cm	260 cm

Nella **Immagine 5**, prove di permeabilità, si nota in primo piano il pozzetto K1, sullo sfondo, nella posizione in cui si trova l'escavatore il pozzetto K2 e in posizione intermedia tra i due pozzetti, a circa 20 metri di distanza da entrambi gli scavi, si trova la testata del tubo piezometrico installato nel foro del sondaggio geognostico.

Immagine 5 : Posizione dei pozzetti realizzati per eseguire le prove di permeabilità.

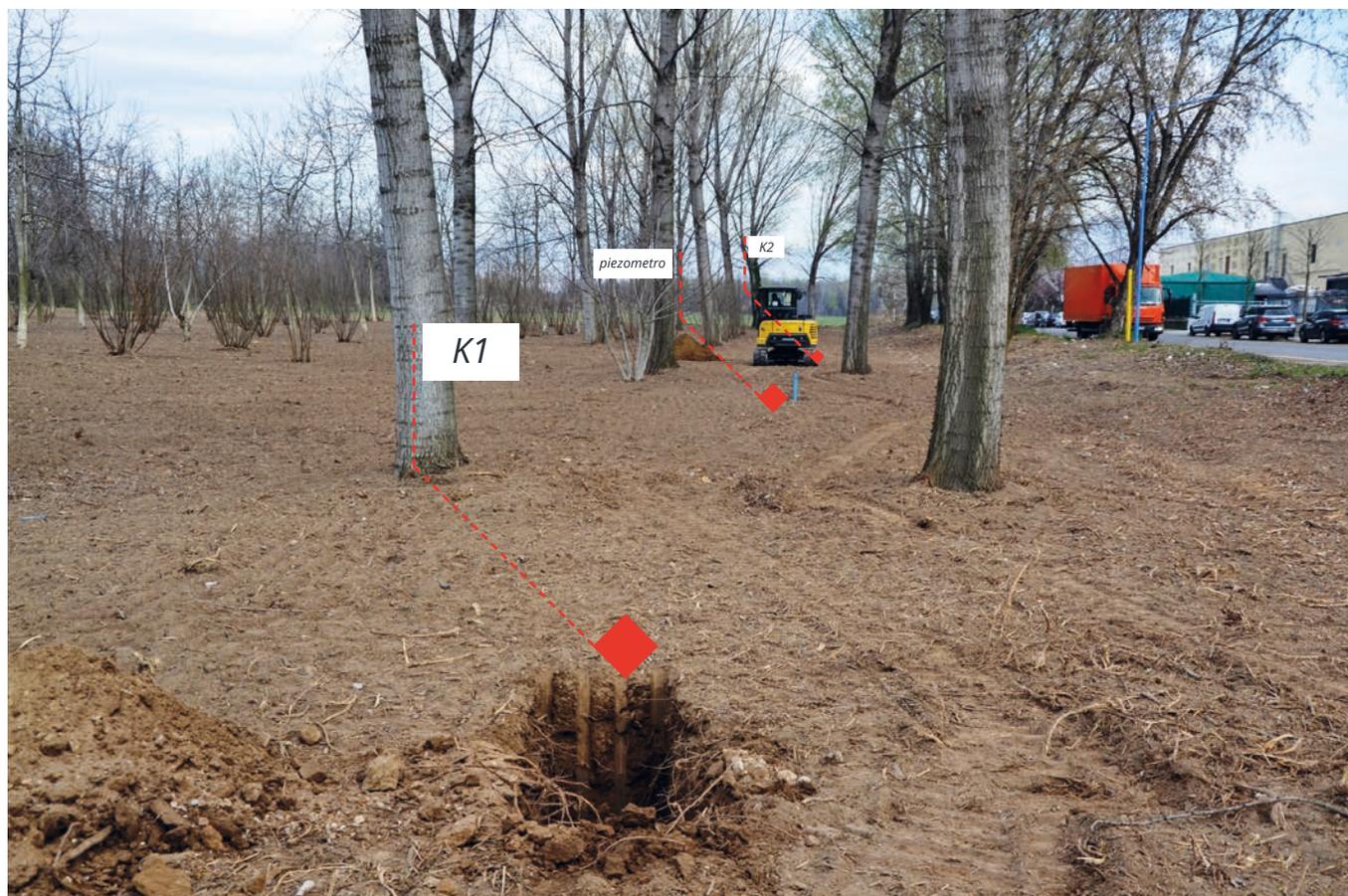


Fig.12 : Posizione dei pozzetti di prova.

Immagine 6: Terreno prevalentemente sabbioso estratto dallo scavo K1.



Immagine 7: Riempimento dello scavo K1 con acqua.



Immagine 8: Terreno prevalentemente sabbioso estratto dallo scavo K2.



Immagine 9: Riempimento dello scavo K2 con acqua.



Tab.8: Stratigrafia dei pozzetti di prova.

Spessore	Descrizione terreno
da piano campagna a circa 1 metro di profondità	sabbia molto fine e limo (suolo)
da circa 1 metro di profondità a fondo scavo (2,20-2,60 metri)	sabbia molto fine, di colore nocciola, debolmente limosa, che diviene via via leggermente più grossolana con alcuni piccoli ciottoli arrotondati e rarissimi ciottoli di maggiori dimensioni

La stratigrafia rilevata in corrispondenza dei due pozzetti è descritta nella **Tab.8**.

Si sottolinea che molti di quelli che in fotografia appaiono come dei grossi ciottoli sono in realtà grumi sabbiosi generati dall'umidità presente nella sabbia.

Prima dell'esecuzione delle prove è stata immessa a lungo acqua nei pozzetti al fine di saturare il terreno nell'intorno. Successivamente, i pozzetti sono stati riempiti di acqua e si è misurato il suo abbassamento in funzione del tempo (prove a carico variabile).

Il **coefficiente di permeabilità** è stato calcolato secondo la formula raccomandata dall'Associazione Geotecnica Italiana.¹

¹ "Raccomandazione sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" dell'Associazione Geotecnica Italiana (AGI - 1977), Paragrafo 6.2 "Prove in pozzetto superficiale"

“

Formula per calcolo Coefficiente di permeabilità

$$K = \frac{(h_1 - h_2)}{(t_2 - t_1)} * \frac{(1 + (2h_m/b))}{((27 * h_m/b) + 3)}$$

nella quale:

- **b** = lato del pozzetto
- **h_m** = altezza media dell'acqua nel pozzetto durante la prova a carico variabile
- **t₂ - t₁** = intervallo di tempo
- **h₁ - h₂** = variazione di livello dell'acqua nell'intervallo di tempo t₂ - t₁

Per la stima della permeabilità sono stati trascurati i dati non allineati sulla "retta interpolatrice" lungo la quale si dispongono solitamente i valori rilevati in regime di flusso permanente, che si verifica quando il terreno è ben saturato; si rileva tuttavia che, nel caso specifico, anche i valori iniziali sono quasi allineati lungo la retta, a prova del fatto che la saturazione del terreno nell'intorno degli scavi eseguita prima dell'esecuzione delle prove di permeabilità è stata efficace.

Le prove hanno fornito i risultati in termini di abbassamento della lama d'acqua in funzione del tempo, riassunti nelle **Tab.9 e 10** nella pagina seguente.

Tab.9 : Prova K1.

Tempo	Abbassamento
0	0
30"	2 cm
1'	4 cm
2'	6 cm
3'	10 cm
5'	15 cm
8'	22 cm
11'	29 cm
15'	36 cm
20'	43 cm
25'	-
30'	57 cm
35'	-
40'	66 cm
45'	-
50'	72 cm
60'	78 cm

Tab.10 : Prova K2.

Tempo	Abbassamento
0	0
30"	2 cm
1'	5 cm
2'	9 cm
3'	14 cm
5'	23 cm
8'	33 cm
11'	43 cm
15'	56 cm
20'	70 cm
25'	82 cm
30'	-
35'	103 cm
40'	-
45'	113 cm
50'	-
60'	123 m

Tab.11 : Coefficiente di permeabilità.

	K1	K2
b (lato della base del pozzetto)	70 cm	70 cm
h_m (altezza media tra h ₁ e h ₂)	144 cm	144 cm
t₂ - t₁ (tempo trascorso per il raggiungimento di h ₂)	58'	58'
h₁ (altezza iniziale del livello dell'acqua)	180 cm	246 cm
h₂ (altezza finale del livello dell'acqua)	108 cm	125 cm
K (coefficiente di permeabilità)	≅ 0,0018 cm/s ≅ 1,8 x 10⁻³ cm/s	≅ 0,002 cm/s ≅ 2,2 x 10⁻³ cm/s

Applicando la formula per il calcolo del coefficiente di permeabilità si ottiene, per ciascun pozzetto, un coefficiente di permeabilità pari a quanto riportato nella **Tab.11**:

In media il coefficiente di permeabilità rilevato in situ è pertanto:

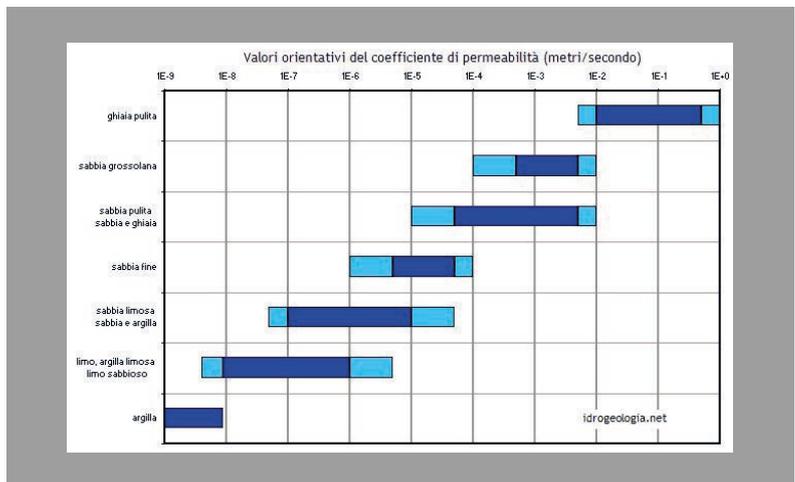
$$K \approx 2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

Corrispondente ad un valore di permeabilità discreto-basso, come mostrano le **Tab.12 e 13**.

Tab.12 : Classi di permeabilità (Casadio & Elmi, 1995).

k (cm/s)	10 ²	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
k (m/s)	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Classi di permeabilità	EE	Elevata	Buona	Discreta	Bassa	BB	Impermeabile					
Tipi di terreno	Ghiaie pulite	Sabbie grossolane pulite e miscele di sabbie e ghiaie			Sabbie fini	Miscele di sabbie e limi	Limi argillosi e argille limose, fanghi argillosi	Argille omogenee e compatte				

Tab.13 : Valori orientativi del coefficiente di permeabilità orizzontale in metri/sec per terreni a granulometria decrescente dalle ghiaie alle argille.



CLASSIFICAZIONE DEL TERRITORIO

Elaborato di riferimento: U1 Tavola 3

Il comune di Brescia è classificato in zona sismica 2, Fig.14, i dati sulla numerosità dei comuni per classe di riferimento alla regione Lombardia.

La Fig.15, tratta dalla carta "Rischio sismico - Il livello" dello Studio geologico comunale di Brescia, riassume i risultati dell'analisi di I e II livello e evidenzia che l'area in esame ricade in una porzione di territorio appartenente alla Classe Z4a - Categoria di sottosuolo identificata C.

Secondo lo Studio l'area ricade dunque in una porzione di territorio per la quale, nel caso di opere con periodo proprio compreso tra 0.1 e 0.5 secondi, la normativa nazionale risulta insufficiente a salvaguardare le strutture dagli effetti di amplificazione sismica locale.

Per verificare questa affermazione e per definire la locale categoria di sottosuolo, lo scrivente, in data 26/02/2016, nell'ambito del progetto, citato in premessa, riguardante il vicino capannone Copan, ha eseguito una specifica analisi consistita in:

- indagine sismica passiva con metodo *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr);
- ricostruzione del profilo di sismico multicanale con acquisizione delle onde di superficie ed elaborazione dati mediante metodologia *Multi-channel Analysis of Surface Waves* (MASW).



Fig.13: Ubicazione dell'indagine sismica.

L'indagine ha consentito di ricostruire l'andamento medio delle onde Vs in profondità ed eseguire la valutazione del parametro Vs_eq (Vs equivalente) di sito, al fine di classificare il terreno di fondazione (tabelle allegate al D.M. 17/01/18) e misurare il periodo proprio di vibrazione di sito.

I risultati di due prove penetrometriche (P1 e P2 in Fig.13), eseguite nel 2016 contestualmente all'indagine sismica e nella medesima area, sono stati tenuti in considerazione durante l'elaborazione dei dati sismici.

Fig.14: Classificazione sismica della Lombardia, evidenza sulla provincia di Brescia.

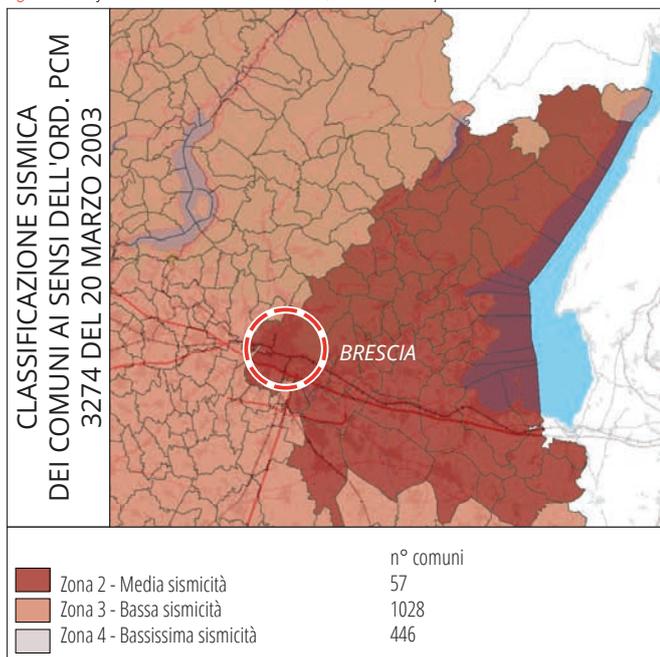
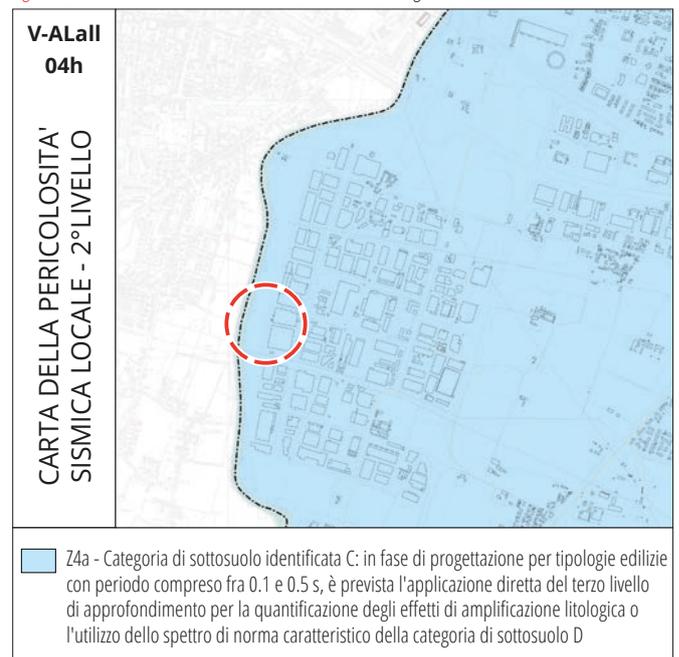


Fig.15: Carta "Rischio sismico - Il livello" dello Studio Geologico Comunale.



ANALISI HVSR

Allo scopo di migliorare la definizione del profilo verticale V_s nelle porzioni più profonde e di calcolare la possibile frequenza di risonanza di sito, è stata eseguita una misurazione dei microtremori sismici ambientali per la definizione e l'analisi del rapporto spettrale H/V.

ACQUISIZIONE DEI DATI

È stata eseguita, mediante stazione singola o tromometro, una misura di rumore sismico ambientale per un tempo di registrazione di 15 minuti.

La strumentazione utilizzata si compone 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.

ANALISI ED ELABORAZIONE DEI SEGNALI ACQUISITI

I risultati delle analisi sono stati ottenuti con il software winMASW versione Acd 7.0, 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.

La determinazione della curva HVSR ha previsto in sintesi le seguenti fasi:

- 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 (vedi figura precedente);
- definizione della lunghezza degli intervalli entro cui calcolare le curve HVSR (20 ms);
- calcolo delle trasformate di Fourier delle tre componenti x, y, z del moto;
- operazione di *smoothing* degli spettri di Fourier;
- somma delle due componenti orizzontali x e y;
- calcolo delle curve HVSR come rapporto spettrale tra la



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.

componente orizzontale H e la componente verticale V negli N intervalli temporali stazionari;

- calcolo della curva HVSR media tra le n curve HVSR.

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

L'insieme di un buon valore di direttività, cioè un'uniformità spaziale del segnale, ed una sua buona persistenza nel tempo, è indice della validità stratigrafica del segnale sismico elaborato.

La curva HVSR calcolata, indica un picco principale a circa 2,5 Hz;

la sua validità è stata 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).

DESCRIZIONE DEI RISULTATI

Il picco a 2,5 Hz, di ampiezza pari 1.3, 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 Hz (frequenze di interesse ingegneristico), è quindi risultata una possibile frequenza principale di risonanza attorno a 2,5 Hz. Questa non può essere definita come certamente significativa ai fini dell'individuazione di una possibile frequenza di risonanza di sito.

Al picco principale individuato, può essere attribuito comunque un significato stratigrafico, riconducendo la sua frequenza ad un possibile contrasto di impedenza sismica all'interno della sequenza fluviale/fluvioglaciale, a profondità di -24/-25 m da p.c., in corrispondenza di strati ghiaioso-sabbiosi da addensati a molto addensati.

Il picco di frequenza considerato e il relativo tratto di curva, sono

stati comunque utilizzati, tramite modellazione diretta, per l'analisi congiunta MASW+HVSR, per trarre informazioni utili a profondità a cui la sola indagine MASW non può evidentemente arrivare.



Criteria for a reliable H/V curve

(Criteri per una curva affidabile)

- a. $[f_0 > 10/Lw]$: $2.471 > 0.5$ (OK)
- b. $[nc > 200]$: $3806 > 200$ (OK)
- c. $[f_0 > 0.5\text{Hz}; \sigma_A(f) < 2 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0]$ (OK)

Criteria for a clear H/V peak

(Criteri per un picco H/V chiaro)

- a. $[\text{exists } f^- \text{ in the range } [f_0/4, f_0] \mid AH/V(f^-) < A_0/2]$: yes, at frequency 1.5Hz (OK)
- b. $[\text{exists } f^+ \text{ in the range } [f_0, 4f_0] \mid AH/V(f^+) < A_0/2]$: yes, at frequency 5.3Hz (OK)
- c. $[A_0 > 2]$: $1.3 < 2$ (NO)
- d. $[f_{\text{peak}}[AH/V(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%]$: (NO)
- e. $[\sigma_A(f) < \epsilon(f_0)]$: $3.027 > 0.124$ (NO)
- f. $[\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)]$: $0.219 < 1.58$ (OK)

Fig.16: Visualizzazione dei dati prima della rimozione di eventi transienti.

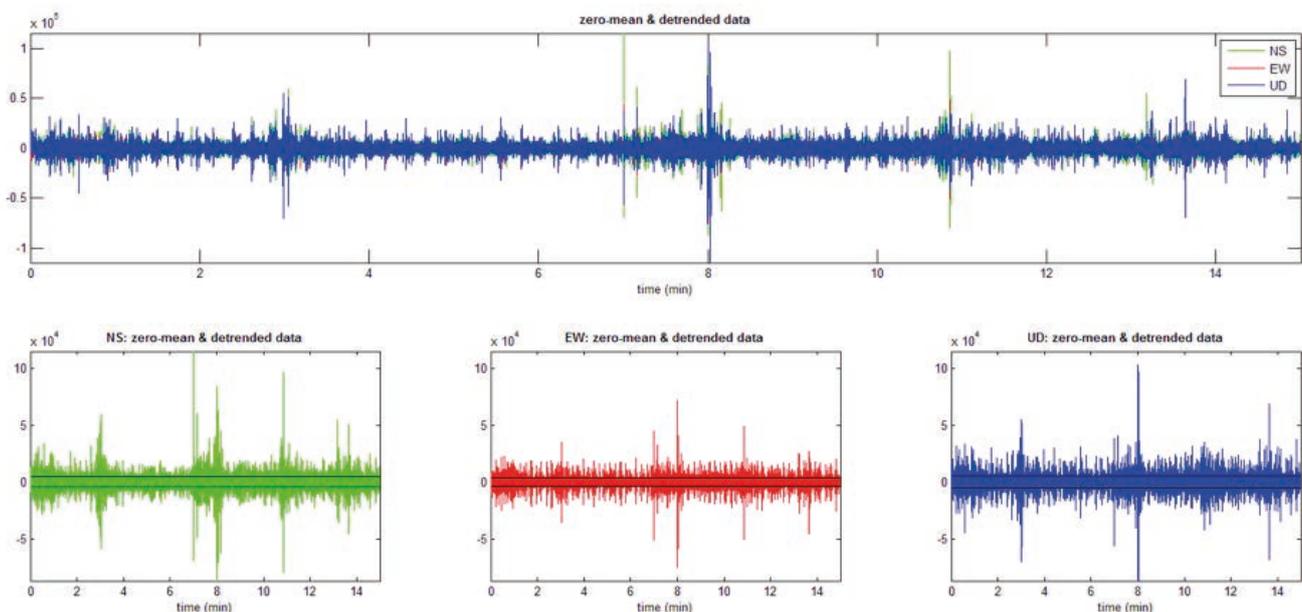


Fig.17 : Visualizzazione HVSr del sito indagato.

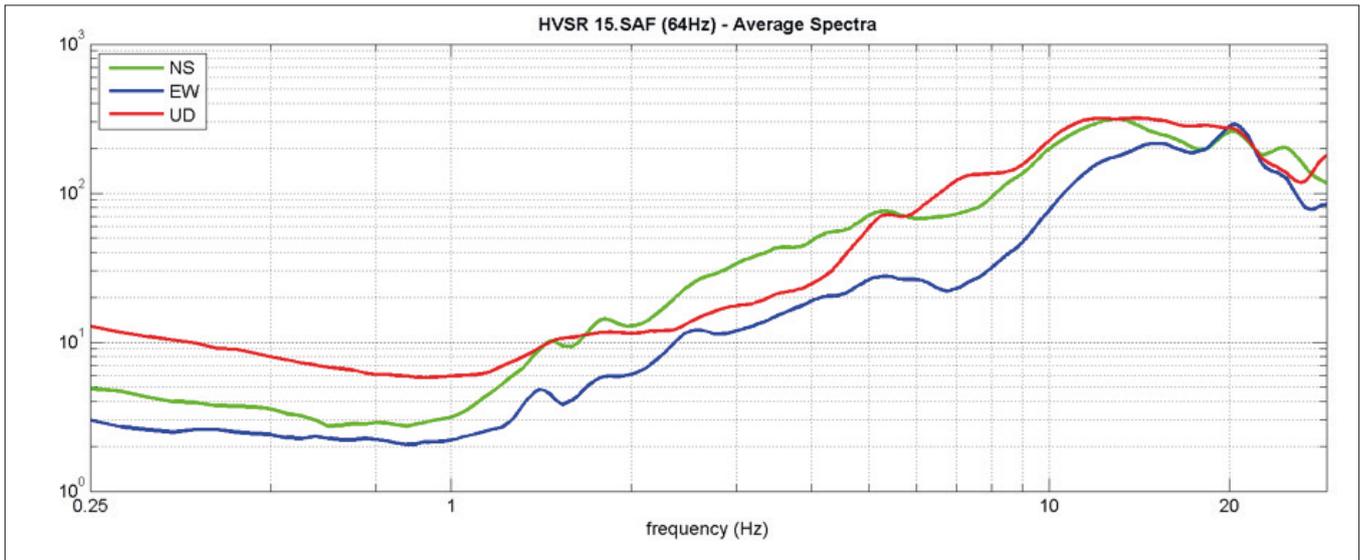
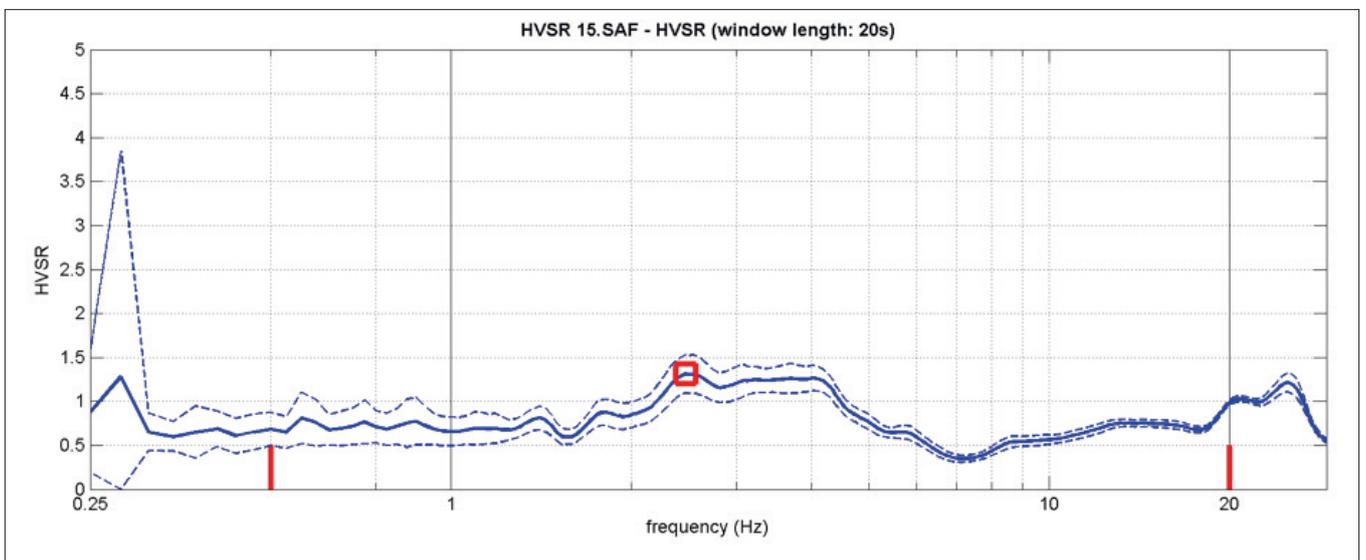


Fig.18 : Spettro medio di ampiezza del sito indagato.



INDAGINE SISMICA **MASW**

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. Tale scelta risulta avvalorata dalle seguenti considerazioni:

- la percentuale di energia convertita in onde Rayleigh o di Love è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde P (7%) ed S (26%);
- la propagazione e dispersione delle onde di Rayleigh o di Love si verifica senza problemi anche in caso di inversioni di velocità; rispetto alla sismica a rifrazione, infatti, il metodo MASW non presenta problemi legati alla presenza di strati soffici compresi tra strati più rigidi;
- la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_p e dalla densità, è funzione innanzitutto della V_s , parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito (categoria di suolo in base al Testo Unico).

ACQUISIZIONE DEI DATI

L'ubicazione e la lunghezza degli stendimenti sono state scelte in funzione della logistica dei luoghi, dell'ingombro dell'edificio esistente e della porzione di ampliamento 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 all'ultimo geofono con offset variabili (1-3-5-7-10 m) a diversa intensità di energizzazione.

Per l'acquisizione delle onde di Love lo stendimento sismico ha previsto invece una distanza intergeofonica pari a 2,0 m ed una serie di scoppi esterni con offset di 3 m dall'ultimo geofono.

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.

L'acquisizione delle onde di Love è avvenuta mediante uno stendimento sismico di 12 geofoni a componente orizzontale posti trasversalmente all'allungamento dello stendimento, generando un'onda sismica di taglio mediante martellata orizzontale su piastra posta verticalmente nel terreno.

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;



Cenni sulla metodologia MASW

La prospezione sismica MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*) 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 sono state registrate sia le componenti verticali delle onde di Rayleigh, sia le onde di Love. 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 V_s e lo spessore degli strati. La velocità delle onde di Rayleigh (VR) infatti è correlabile alla V_s , 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.

- un sistema di ricezione costituito alternativamente da uno stendimento di 24 geofoni (onde di Rayleigh) a movimento verticale (Geospace GS11D) e da uno stendimento di 12 geofoni (onde di Love) a movimento orizzontale (Sensehe con livello a bolla), entrambi a frequenza di 4,5 Hz e puntale da 3", 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.



ANALISI ED ELABORAZIONE CONGIUNTA DEI SEGNALI ACQUISITI - DETERMINAZIONE DEGLI SPETTRI DI VELOCITÀ ED INDIVIDUAZIONE DELLE CURVE DI DISPERSIONE

La stima dell'andamento in profondità delle velocità V_s , 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.

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 dello spettro di velocità. Se tale sovrapposizione avviene, può generarsi una curva di dispersione apparente, che può fuorviare in fase di interpretazione. Per individuare i modi corretti e correlabili alla reale successione stratigrafica è stato scelto di eseguire un'analisi congiunta delle onde di Rayleigh e delle onde Love.

L'interpretazione dello spettro è consistita quindi nel confrontare le distribuzioni di energia tra i vari modi. Dato che la distribuzione dell'energia nelle due componenti Love e Rayleigh è risultata a tratti differente, l'analisi congiunta è risultata indispensabile al riconoscimento del reale andamento dei modi e portando all'elaborazione di un modello maggiormente vincolato e preciso.

Nello specifico, la componente di Love è risultata utile per il giusto riconoscimento del "Modo Fondamentale" per frequenze superiori a 13 Hz, mentre quella di Rayleigh per la corretta individuazione del "Modo Fondamentale" a frequenze inferiori a 25 Hz. Si riassumono nella **Tab.13** i dati relativi ai parametri di acquisizione utilizzati per i dataset prescelti per l'elaborazione.

Fig.19: Sismogrammi acquisiti e relativi spettri di dispersione della componente verticale delle onde di Rayleigh (in alto) e delle onde di Love (in basso).

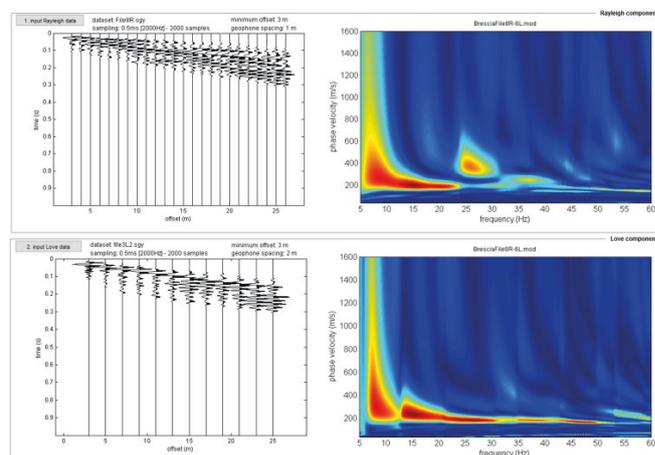
PROCEDURE DI MODELLAZIONE DIRETTA E ANALISI CONGIUNTA

Analizzati i sismogrammi e i rispettivi spettri di velocità si è proceduto alla ricostruzione della distribuzione verticale delle V_s . Partendo dalle curve di dispersione delle onde di Rayleigh e di Love è stato ricostruito il modello che è responsabile di quelle curve, effettuando quindi un'inversione, vale a dire che si è ricavato il modello di sottosuolo che ha determinato il dato di campagna (sismogramma).

Gli spettri di velocità di fase sono stati interpretati identificando le curve modali, mediante modellazione diretta, studiando l'andamento dei vari modi in funzione del modello atteso.

Questo è stato iterativamente modificato fino ad ottenere una buona sovrapposizione degli andamenti delle curve di dispersione sui vari modi riconosciuti, contemporaneamente in entrambi gli spettri (Rayleigh+Love, **Fig.20** nella pagina seguente), al fine di ottenere un solo modello di velocità.

Durante l'elaborazione dei dati MASW, oltre al classico metodo legato all'identificazione delle curve modali, per l'interpretazione dello spettro di velocità nella sua parte a più bassa frequenza (<10 Hz), e quindi nelle porzioni più profonde del modello geofisico, è stata considerata anche la curva HVSR, ottenuta per la medesima area d'indagine, **Fig.21** pagina seguente. Considerando il relativo picco HV di vibrazione individuato attorno ad una frequenza pari a 1,6 Hz, è stata eseguita un'analisi congiunta tra gli spettri di dispersione dell'indagine MASW 1 e la curva H/V modellata, al fine di ottenere un solo modello vincolato di velocità.



Tab.13 : Parametri di acquisizione.

	ONDE DI RAYLEIGH*	ONDE DI LOVE**
Offset del dataset utilizzato:	3 m	3 m
Distanza intergeofonica:	1,0 m	2,0 m
Intervallo di campionamento:	1.00 ms	1.00 ms
Tempo di acquisizione:	1 s	1 s

*Dati relativi allo shot 4 – file8R.sgy

** Dati relativi allo shot 1 – file3L2.sgy

Fig.20a : Modellazione diretta mediante individuazione del modo fondamentale e dei modi superiori che compongono lo spettro di velocità delle onde di Rayleigh.

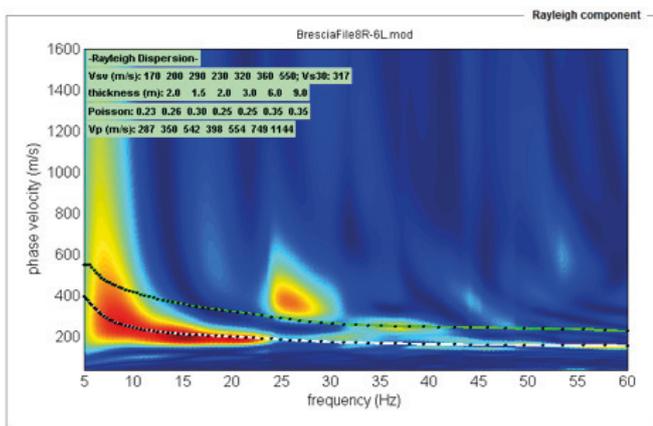


Fig.20b : Modellazione diretta mediante individuazione del modo fondamentale e dei modi superiori che compongono lo spettro di velocità delle onde di Love.

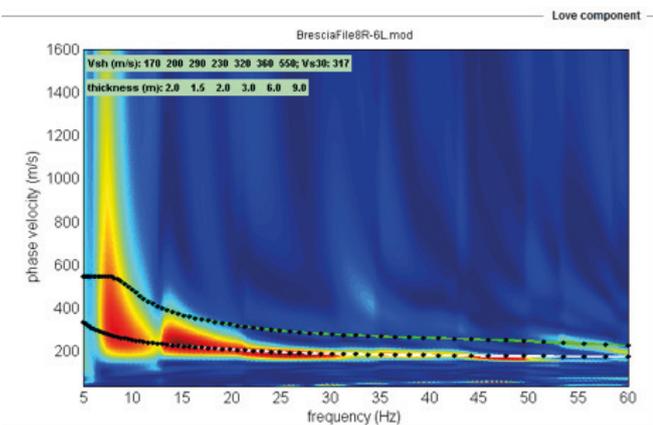
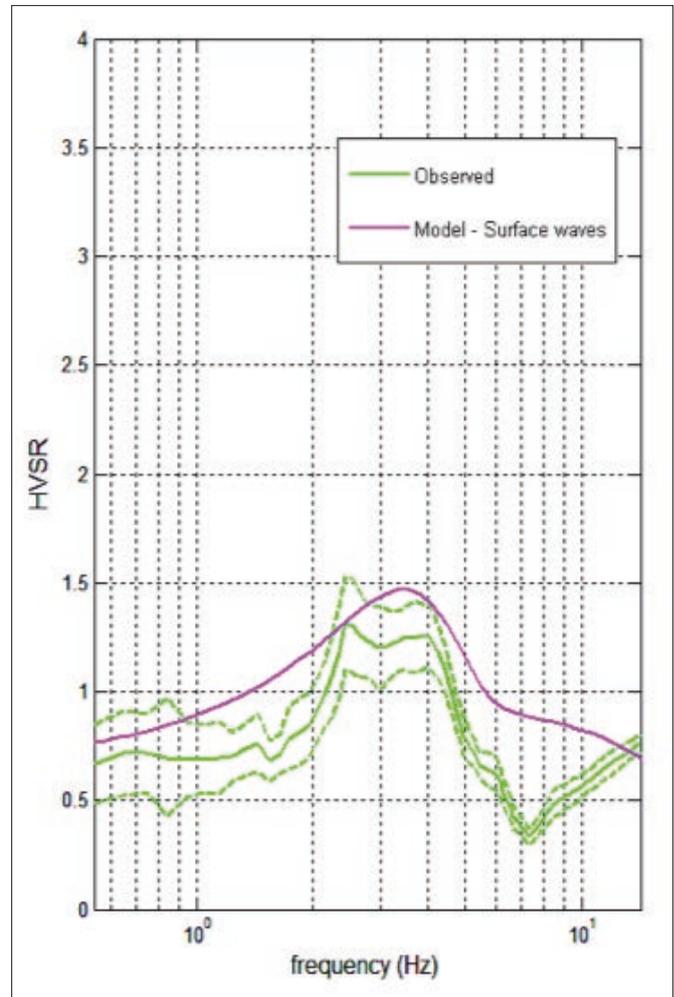


Fig.21 : Confronto tra la curva HVSr sperimentale (verde) e teorica (viola), ottenuta per lo stesso modello di velocità considerato durante l'analisi spettrale MASW.



SISMOSTRATIGRAFIA

Per l'elaborazione ed interpretazione dei dati si è tenuto conto delle evidenze del segnale acquisito, delle conoscenze stratigrafiche, e delle prove penetrometriche eseguite nel sito di indagine. Nella **Tab.14** sono riportati i valori delle velocità medie e gli spessori di ciascun sismostrato, in modo da definire un modello geofisico medio, ottenuto con metodologia MASW con analisi congiunta Rayleigh+Love+HVSr. Si riportano anche, in maniera indicativa, le stime dei valori di V_p , densità e modulo di Poisson eseguite dal software di elaborazione.

Poiché la dispersione delle onde di Rayleigh dipende essenzialmente dalla V_s e degli spessori degli strati (cioè dalla geometria), tali valori di densità e V_p 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 V_p , ma solamente da V_s e densità e quindi rappresenta una miglior stima.

I valori riportati nella **Tab.14** sono riferiti a moduli dinamici e quindi a condizioni di bassa deformazione, essendo stimati sulla base delle deformazioni indotte nel terreno. Questo comporta alti valori dei moduli dinamici calcolati. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori dovranno essere idoneamente corretti. Il Progettista dovrà quindi utilizzarli solo nei modi e nei casi appropriati.

In base ai dati sismostratigrafici ottenuti, si rileva un primo spessore di terreno superficiale di spessore complessivo pari a 3,5 m con velocità di propagazione delle onde di taglio (onde S) basse pari a 170-200 m/s.

Seguono, fino ad almeno -24,0 m circa dal p.c., depositi fluviali/fluvioglaciali, da scarsamente a moderatamente addensati caratterizzati da valori di velocità delle onde S comprese tra 290 e 360 m/s. Si riscontra da -5,5 a -8,5 m dal p.c. la presenza di lenti o strati scarsamente addensati che determinano un'inversione delle velocità delle onde S ($V_s = 230$ m/s). Oltre, in accordo con la modellazione della curva HVSr sperimentale ottenuta, si segnala la presenza di depositi molto addensati con velocità di propagazione delle onde S pari a 550 m/s.

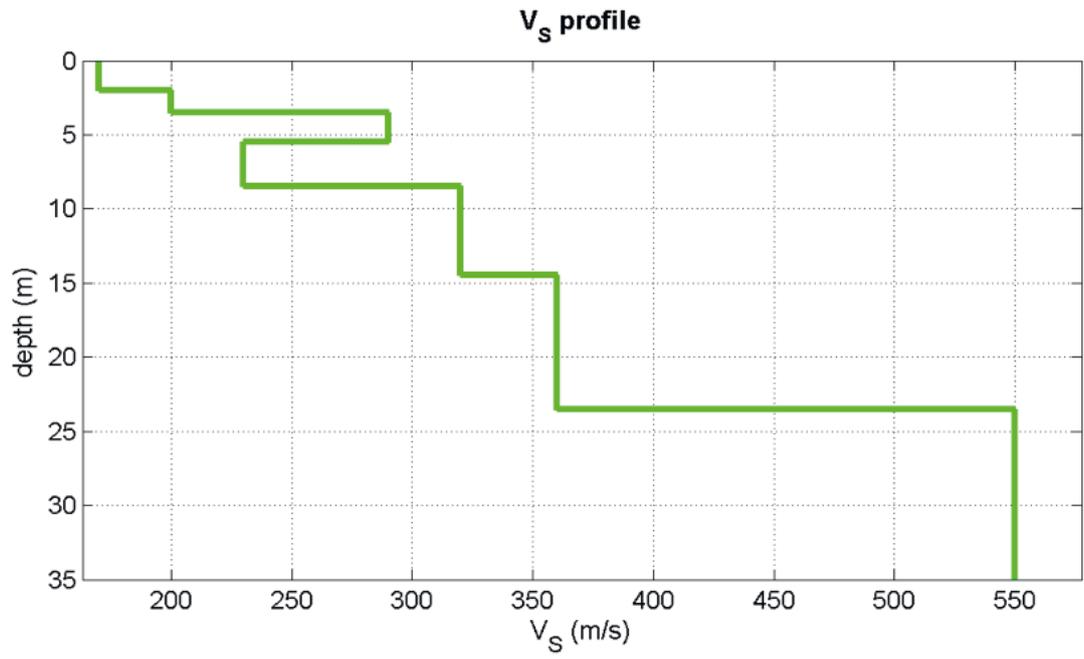
Il profilo sismostratigrafico ottenuto risulta correlabile con il quadro geologico dell'area e i valori di velocità delle onde S risultano compatibili con l'andamento delle prove SCPT eseguite nel sito di progetto.

In **Fig.22** si riporta la stratigrafia schematica del modello medio fino a -35 m dal p.c., utilizzata per il calcolo del parametro $V_{s,eq}$.

Tab.14 : Modello geofisico medio.

MODELLO GEOFISICO MEDIO – Via Castagna, Brescia (BS)								
Sismostrato	V_s (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)	Stima della V_p (m/s)	V_p/V_s	Stima densità (g/cm ³)	Modulo di Poisson	Modulo di Taglio (MPa)
1	170	2,0	- 2,0	280	1.64	1.75	0.23	51
2	200	1,5	- 3,5	350	1.75	1.80	0.26	72
3	290	2,0	- 5,5	542	1.87	1.91	0.30	160
4	230	3,0	- 8,5	398	1.73	1.83	0.25	97
5	320	6,0	- 14,5	554	1.73	1.91	0.25	196
6	360	9,0	- 23,5	749	2.08	1.98	0.35	257
7	550	11,5	- 35,0	1144	2.08	2.09	0.35	631

Fig.22 : Profilo sismico.



RISPOSTA **SISMICA LOCALE**

Secondo il D.M.17/01/18, tenuto conto dei risultati delle prospezioni sismiche utilizzate, e considerando un piano di posa delle fondazioni corrispondente a quello su cui è stata eseguita l'indagine, è stato stimato (Tab.16) un valore di $V_{s,eq}$ pari a 317 m/s e quindi il sito di progetto ricade in una categoria di sottosuolo "C".

Dal punto di vista della pericolosità sismica locale lo Studio geologico comunale di Brescia classifica l'area in esame entro lo scenario di pericolosità sismica Z4a "Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi", suscettibile di amplificazione litologica.

Per tale scenario, lo Studio segnala valori di Fattori di amplificazione di sito (F_a) superiori a quelli di soglia comunale per le categorie di sottosuolo B, C e D.

Per verificare in sito questa affermazione è stata eseguita 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. 9/2616/2011).

La Fig.23 riporta l'esplicazione grafica dell'analisi.

In accordo con la procedura, la successione stratigrafica di riferimento, cioè lo spessore e la velocità di ciascuno strato, come definiti nel modello geofisico medio, sono stati riportati nelle

"Schede di Stima degli Effetti Litologici". Rispettando i campi di validità e le caratteristiche granulometriche dei terreni presenti in sito, è stata eseguita una verifica dei valori dei F_a di sito rispetto a quelli di "soglia comunale", utilizzando la scheda relativa alla litologia "limoso-sabbiosa di tipo 2" e facendo riferimento alla curva 2.

Per i limiti intrinseci delle metodologie d'indagine utilizzate e della tipologia della successione stratigrafica del sito in esame, non è stato possibile raggiungere il bedrock sismico ($V_s=800$ m/s). Per questo motivo, 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 e considerando le colonne stratigrafiche di alcuni pozzi terebrati in vicinanza e in contesti omologhi a quello dell'area oggetto di studio.

I risultati ottenuti, hanno verificato che, sia per edifici con periodo T compreso tra 0,1 e 0,5 s (F_a sito = 1,9 - F_a soglia = 1,8) che per edifici con periodo compreso tra 0,5 s e 1,5 (F_a sito = 1,5 - F_a soglia = 2,4), si ottengono valori di F_a di sito compatibile con i valori di F_a di soglia comunale previsti, tenuto conto delle tolleranze ammesse nell'All. 5 (+0,1) e per la categoria di sottosuolo "C" (definita per il sito d'interesse).

Tab.15: Stima valore V_s .

	$V_{s,eq}$	Categoria di sottosuolo: C
Modello medio	317 m/s	<p>Valore di $V_{s,eq}$ calcolato mediante l'espressione 3.2.1 del D.M. 17/01/2018</p> $V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$ <p>Categoria di sottosuolo assegnata in base a quanto indicato nella Tabella 3.2 II</p>

Tab.16: Prospezione sismica.

Risultati applicazione D.M. 14/01/2008			
	$V_{s,eq}$ (m/s)	Categoria di sottosuolo	
a partire dal p.c.	317	C	
Risultati applicazione All. 5 della D.G.R. 9/2616/2011 $T=0,651$			
	F_a di sito calcolato	F_a di soglia per cat. C	Categoria di sottosuolo
SCHEDA SABBIOSA edifici 0,1 s < T < 0,5 s	1,9	1,8	C
SCHEDA SABBIOSA edifici 0,5 s < T < 1,5 s	1,5	2,4	C

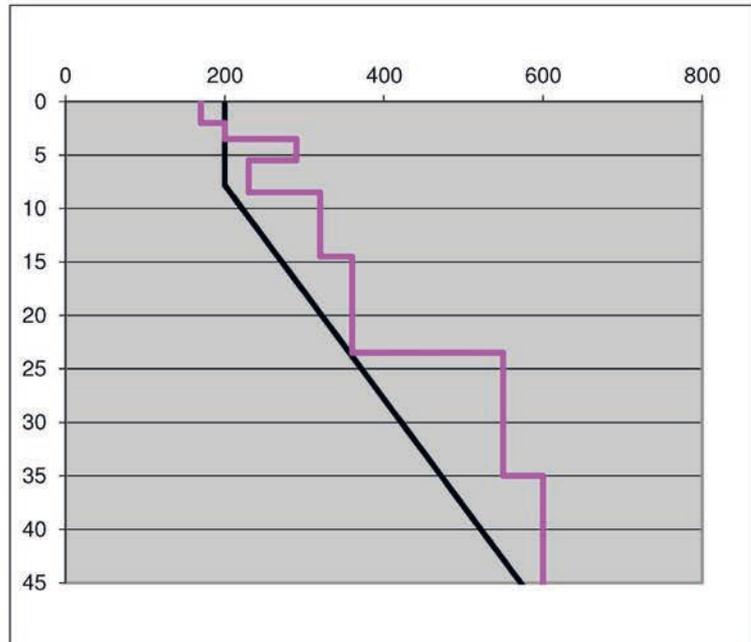
Fig.23: Stima degli effetti litologici - Analisi di 2° livello secondo le procedure previste dall'All. 5 - D.g.r. 9-2616 del 30/11/2011.

Prof. sismostrati (m)	Valori di Vs (m/s)
2,0	170
3,5	200
5,5	290
8,5	230
14,5	320
23,5	360
35,0	550
75,0	600
85,0	700
Oltre 85 m	> 800

317	Parametro Vs,eq (m/s)
------------	------------------------------

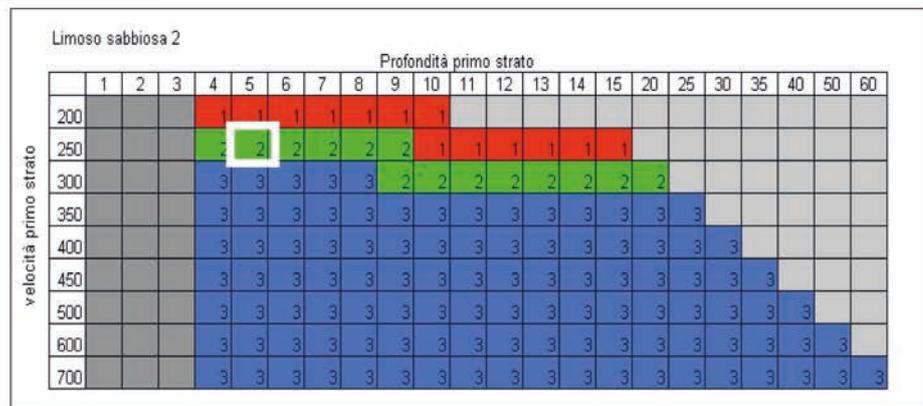
C	Categoria di sottosuolo
----------	--------------------------------

T	0,651	Periodo di sito
----------	--------------	------------------------



Strato superficiale	
Prof. base (m)	5,5
Vs (m/s)	222

Curva caratteristica	
n°	2



Procedura di confronto e verifica

Valori di Fa di sito calcolati

Intervalli di periodo per tipologie edilizie	
0,1 s < T < 0,5 s	1,9

0,5 s < T < 1,5 s	1,5
-------------------	-----

Valori di Fa di soglia comunali

B	C	D	E
1,4	1,8	2,2	2

1,7	2,4	4,2	3,1
-----	-----	-----	-----

Legenda:



Categoria di sottosuolo ai sensi del D.M. 17/01/2018



Cat. di sottosuolo da adottare in progetto a seguito dell'analisi di II livello secondo le procedure dell'All. 5 D.g.r. 9-2616 del 30/11/2011 e considerando una variabilità di + 0.1

PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

La pericolosità sismica di base del sito è stata dettagliata secondo i principi contenuti nell'allegato A "Pericolosità Sismica" delle NTC, per i quali l'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale di categoria A.

Si è fatto riferimento alle tabelle riportate nell'allegato B delle NTC: "parametri che definiscono l'azione sismica" in funzione della latitudine e longitudine del sito di progetto.

L'azione sismica di base così individuata è stata successivamente variata per definire la risposta sismica locale nei modi precisati dalle NTC, tenendo conto delle locali condizioni stratigrafiche e dalla morfologia della superficie.

Sono statati utilizzati i seguenti dati di input:

COEFFICIENTI SISMICI

- Categoria di sottosuolo: C, come indicato dalla specifica indagine sismica in sito;
- Categoria topografica: T1, in quanto si tratta di superficie pianeggiante (D.M. 17/01/18).

STATI LIMITE

- Classe d'uso della struttura: II. Affollamento normale
- Vita nominale V_N (Tab.2.4.I delle NTC) della struttura: 50 anni
- Coefficiente d'uso, C_U (Tab. 2.4.II delle NTC): 1
- Periodo di riferimento, V_R ($V_R = V_N * C_U$): 50 anni

Le **Fig.24 e 25** riportano i parametri e i coefficienti sismici relativi al sito in esame.

Tra i valori ottenuti si sottolineano i seguenti:

- Accelerazione orizzontale massima attesa al sito (SLV):

$$A_{\max} = 2,139 \text{ m/s}^2$$

- Accelerazione orizzontale massima attesa sul *bedrock* (SLV):

$$a_g = 0.146 \text{ g}$$

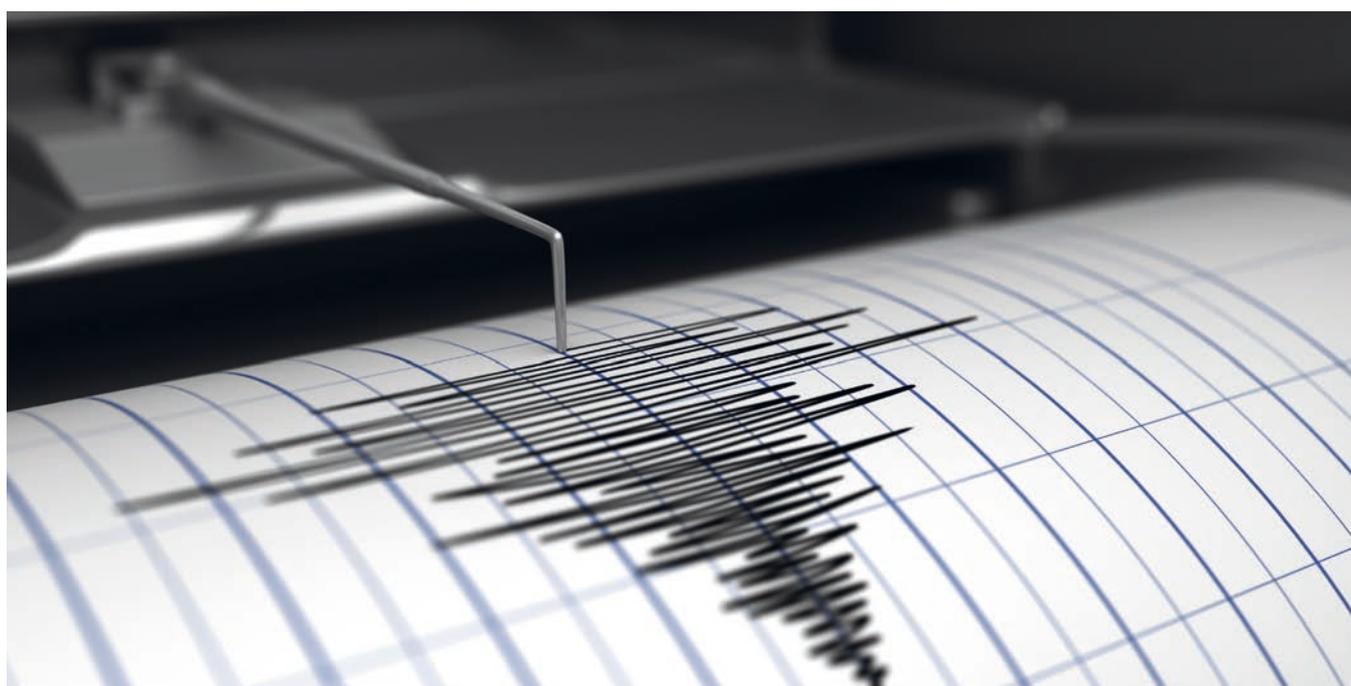


Fig.24 : Stati limite - classe edificio in esame.

Coefficienti sismici

Tipo: Stabilità dei pendii e fondazioni

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

H (m): 1 us (m): 0.1

Cat. Sottosuolo: C

Cat. Topografica: T1

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,50	1,50	1,49	1,42
CC Coeff. funz categoria	1,75	1,70	1,60	1,59
ST Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00	1,00

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

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.012	0.016	0.052	0.064
kv	0.006	0.008	0.026	0.032
Amax [m/s²]	0.589	0.790	2.139	2.624
Beta	0.200	0.200	0.240	0.240

Fig.25 : Coefficienti sismici - stabilità.

Stati limite

Classe Edificio: II. Affollamento normale. Assenza di funz. pubbliche e sociali...

Vita Nominale: 50

Interpolazione: Media ponderata

CU = 1

Stato Limite	Tr [anni]	a _g [g]	Fo	Tc* [s]
Operatività (SLO)	30	0.040	2.467	0.213
Danno (SLD)	50	0.054	2.427	0.233
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.146	2.419	0.277
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.188	2.450	0.285

Periodo di riferimento per l'azione sismica: 50

INPUT

OUTPUT significativi

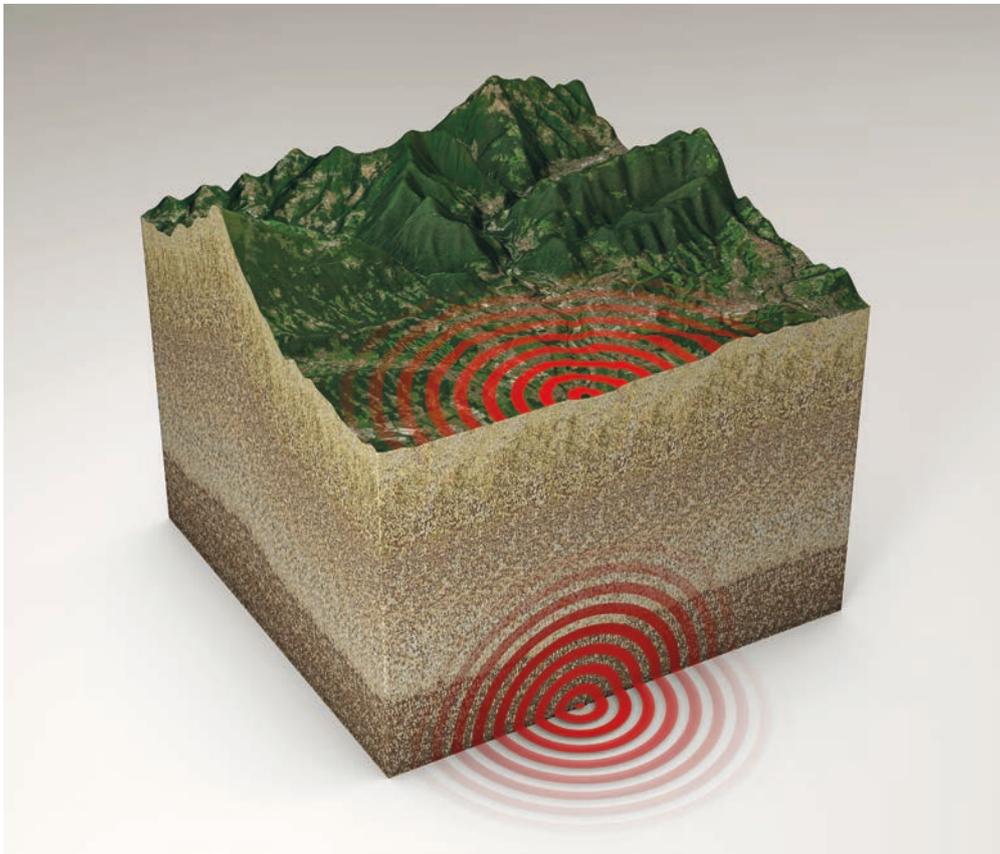
LIQUEFACIBILITÀ DEI TERRENI

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 10 - 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.

La Relazione Geologica allegata alla variante di PGT riporta che nel territorio di Brescia **non sono presenti terreni** dotati di caratteristiche granulometriche tali da essere **soggetti a fenomeni di liquefazione** in occasione di eventi sismici.¹

¹ Pag. 17 della relazione Geologica del febbraio 2016, relativa alla Variante 2 al PGT vigente.





GRUPPO DI LAVORO

arch	Francesco APOLLONIO
dott	Alessandro BUGATTI
ing	Ruggero FRUSCA
arch	Davide MUTTI
arch	Anna GOZZI
arch	Marco ROSINI
ing	Diego CARAFFINI
nat	Marco TORRETTA
ing	Cesare TREBESCHI
geol	Marco VENTURINI
ing	Paolo ZANOLI
agr	Gabriele ZOLA

11



Palazzo delle Professioni
Via G. Oberdan 1/a
25128 | Brescia | Italy

web site: www.smartfloor.it
email: info@smartfloor.it
phone: + 39 030 6463 606