



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BRESCIA

SETTORE ACQUISIZIONI ED EDILIZIA  
U.O.C. Progettazione di Ateneo e Gestione Edifici

---

Oggetto

PROGETTO SPECIALE DEL PIANO DEI SERVIZI  
PSn2 "UNIVERSITÀ STATALE"

Fase

PIANO ATTUATIVO

Elaborato

INDAGINI GEOLOGICHE PRELIMINARI

---

IL RESPONSABILE DELLA UOC  
PROGETTAZIONE DI ATENEO E GESTIONE EDIFICI

IL PROGETTISTA

IL RETTORE

Ing. Francesco Bianchi  
*Università degli Studi di Brescia*

Ing. Manuel Regonini  
*Università degli Studi di Brescia*

Prof. Ing. Maurizio Tira  
*Università degli Studi di Brescia*

---

Data

Identificazione elaborato

Scala

16/07/2021

27 - PSn2 - INDAGINI GEOLOGICHE  
PRELIMINARI

-

---

**COMUNE DI BRESCIA**

**PROVINCIA DI BRESCIA**

Committente: **UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA**

***Piano Attuativo "Area Impianto Sportivo Via Branze"***

**VALUTAZIONE DI COMPATIBILITA' GEOLOGICA,  
GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA**



Verona, agosto 2020

**STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA ED AMBIENTALE**

Via Zampieri 1/d - 37127 VERONA - tel. fax : 045 / 830.10.96 e-mail: cristiano.tosi@yahoo.it

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
1.1	<i>INDAGINI ESEGUITE.....</i>	4
1.2	<i>CONDIZIONI PROGRAMMATICHE DI FRAGILITA' GEOLOGICA DELL'AREA .....</i>	5
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO, GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICA .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>MODELLO LITOLOGICO E GEOTECNICO .....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>ANALISI SISMICA DELL'AREA IN STUDIO.....</b>	<b>16</b>
6.1	<i>PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE.....</i>	16
6.2	<i>PROSPEZIONI SISMICHE.....</i>	18
6.2.1	<i>Indagine sismica di tipo attivo in array (M.A.S.W.) .....</i>	18
6.2.2	<i>Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.) .....</i>	20
6.2.3	<i>Risultati ottenuti dalle indagini sismiche effettuate .....</i>	21
6.3	<i>MICROZONAZIONE SISMICA COMUNALE.....</i>	24
6.4	<i>MODELLIZZAZIONE NUMERICA AVANZATA – TERZO LIVELLO .....</i>	24
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>27</b>

## 1 PREMESSA

Su incarico dell'Università degli Studi Di Brescia ( CIG Z742D4832A ) sono state eseguite indagini geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche sui terreni interessati dal Piano Attuativo "Area Impianti sportivi Via Branze" del Comune di Brescia - *si veda figura seguente «Carta Tecnica Regionale», tratta dall'elemento D5C5.*



Fig. 1: Stralcio dalla CTR D5C5 – il retino indica l'area del PA

L'area in esame si colloca ad una quota di circa 170 m s.l.m. nel territorio cittadino di Brescia, in zona pianeggiante, Attualmente occupata in parte da un Campo da Baseball, in parte da un parcheggio.



*Fig. 2: da Google Earth – la linea in sovrapposizione indica l'area del PA*

Il presente studio si propone di

- verificare la compatibilità geologica, geomorfologica ed idrogeologica del sito prescelto per il piano in questione;
- riconoscere le principali caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche dell'area;
- ricostruire la successione litostratigrafica del sottosuolo;
- analizzare la micro zonazione sismica dell'area.

### *1.1 INDAGINI ESEGUITE*

- n. 4 sondaggi a carotaggio continuo, spinti a profondità comprese tra i 5 e i 20 m dal p.c.;
- prove di penetrazione standardizzate (SCPT) a diverse profondità nei fori di sondaggio;
- caratterizzazione geofisica del sottosuolo mediante n. 1 prospezione MASW e n. 1 con tecnica dei rapporti spettrali (HVSr, Horizontal to Vertical Spectral Ratio).

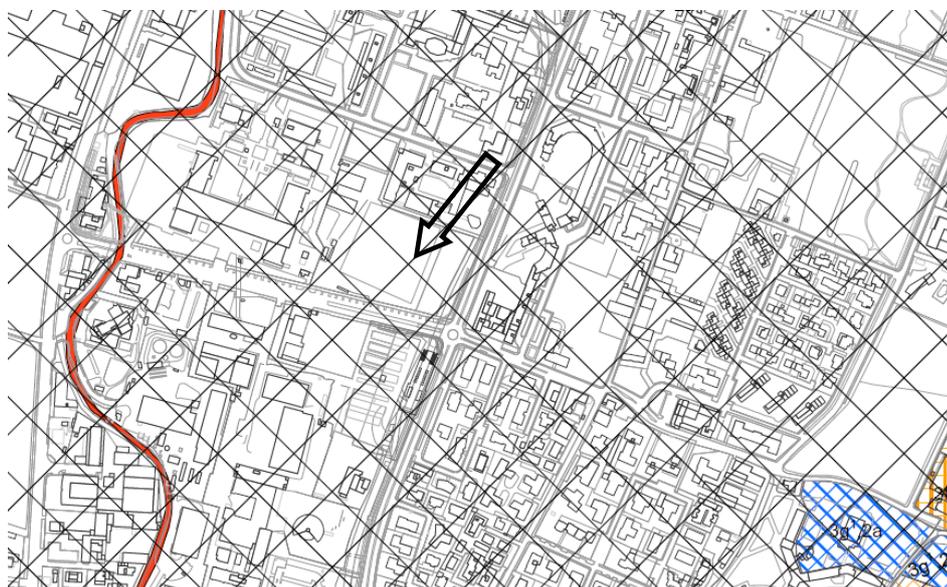
## 1.2 CONDIZIONI PROGRAMMATICHE DI FRAGILITA' GEOLOGICA DELL'AREA

L'Ordinanza del P.C.d.M. n°3274, del 20.03.2003, inserisce il Comune di Brescia tra i territori sismici in Zona 3.

Con la Delibera della Giunta Regionale della Lombardia dell'11 luglio 2014 n.2129 "Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia (l.r. 1/2000, art. 3, c. 108, lett. d)" lo stesso comune è stato classificato in Zona sismica 2.

Il PGT del Comune di Brescia, «Carta della fattibilità geologica», inserisce l'area di progetto nella Classe di fattibilità 2 "con modeste limitazioni".

In merito alla microzonazione sismica l'area rientra in zona Z4a con fattore di amplificazione  $F_a$  maggiore del valore di soglia comunale.



### Classe di fattibilità 2 con modeste limitazioni

-  **Classe 2a**  
Area stabile, coincidente con zone di pianura e talora con la fascia marginale delle superfici di raccordo tra pianura e rilievi, caratterizzata da un substrato in genere contraddistinto da buone caratteristiche geotecniche.

**Scenari per i quali risulta un  $F_a$  maggiore del valore di soglia comunale per la categoria di sottosuolo individuata** e al cui interno, in fase di progettazione per tipologie edilizie con periodo proprio compreso tra 0.1 e 0.5 s, è prevista l'applicazione diretta del terzo livello di approfondimento per la quantificazione degli effetti di amplificazione litologica (D.G.R. 30 novembre 2011 n. 9/2616 - All. 5, § 2.3.3) o l'utilizzo dello spettro di norma caratteristico della categoria di sottosuolo superiore (D.G.R. 30 novembre 2011 n. 9/2616 - All. 5, § 2.2.2).

Z4a - Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi:

-  **Z4a - Categoria di sottosuolo identificata B:** in fase di progettazione per tipologie edilizie con periodo proprio compreso tra 0.1 e 0.5 s, è prevista l'applicazione diretta del terzo livello di approfondimento per la quantificazione degli effetti di amplificazione litologica (D.G.R. 30 novembre 2011 n. 9/2616 - All. 5, § 2.3.3) o l'utilizzo dello spettro di norma caratteristico della categoria di sottosuolo C (D.G.R. 30 novembre 2011 n. 9/2616 - All. 5, § 2.2.2).

Fig. 3: Stralcio dal PGT di Brescia (Carta della fattibilità geologica per le azioni di Piano – marzo 2018)

## 2 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO, GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

L'area in esame si colloca ad una quota di circa 170 m s.l.m. nel territorio cittadino di Brescia, in zona pianeggiante in corrispondenza dello sbocco nell'alta pianura lombarda della valle del Fiume Mella (Val Trompia).

Questo tratto di pianura è delimitato a settentrione da ambiti montani e coincidenti con lo sviluppo della parte apicale del vasto conoide alluvionale del Fiume Mella. Questo conoide alluvionale deve la sua genesi alla locale intensa attività deposizionale operata dal Mella durante il Quaternario in corrispondenza del suo sbocco in pianura, in diretta connessione con i rilevanti fenomeni erosivi che interessavano i retrostanti rilievi montuosi.

Esso risulta costituito da depositi prevalentemente grossolani che sono stati distinti in due unità: Alluvioni antiche ed Alluvioni fluvio-glaciali e fluviali.



### Depositi quaternari

fg

#### **Alluvioni fluvio-glaciali e fluviali (Olocene inf.-Pleistocene sup.)**

*Depositi ghiaiosi, sabbiosi e limosi con strato di alterazione superficiale argilloso da brunastro a giallo-rossiccio di ridotto spessore, localmente ricoperti da una più o meno esigua coltre limosa.*

aa

#### **Alluvioni attuali o recenti (Olocene)**

*Depositi sabbioso-ghiaiosi postglaciali.*

Fig. 4: Stralcio dalla Carta di Inquadramento Geologico Strutturale del PGT del Comune di Brescia.

Le prime, di età olocenica (post-glaciali), sono rappresentate da materiali sabbioso-ghiaiosi; le seconde, più antiche, di età pleistocenica, sono costituite da depositi ghiaiosi, sabbiosi e limosi che presentano generalmente uno strato di alterazione superficiale argilloso da brunastro a giallo rossiccio di ridotto spessore e risultano localmente ricoperte da una più o meno esigua coltre limosa.

Le Alluvioni antiche e le Alluvioni fluvio-glaciali e fluviali costituiscono una superficie più o meno uniformemente degradante verso Sud.

Questi depositi alluvionali presentano assetto e caratteri strutturali sostanzialmente simili con giaciture orizzontali o suborizzontali o localmente inclinate in relazione ad episodi deposizionali specifici (*foresets* laterali di meandro, fronte di barre longitudinali o trasversali in zona *braided*) o per appoggio su superfici inclinate modellate in roccia; i rapporti tra i vari litotipi presentano caratteri di estrema variabilità con frequenti variazioni verticali e laterali che si ricollegano ai meccanismi erosivo - deposizionali (con rapporti laterali per intersezione di origine erosiva e verticali per sovrapposizione in sequenze sia negative che positive) che caratterizzano gli ambienti alluvionali; i litotipi prevalenti sono quelli grossolani (sabbie e ghiaie).

L'assetto idrogeologico dell'area è caratterizzato dalla presenza di due acquiferi principali, sovrapposti e separati da livelli a bassa permeabilità che permettono interscambi ridotti e localizzati. L'acquifero superficiale, dotato di maggior permeabilità e trasmissività è formato da depositi ghiaioso - sabbiosi olocenici e da depositi ghiaiosi del Pleistocene medio e superiore.

Il secondo acquifero è contenuto nei depositi del Pleistocene inferiore, caratterizzati da presenza di spessi e continui diaframmi argillosi, poco inclinati. E' quindi caratterizzato da permeabilità medio bassa, modesta produttività e vulnerabilità ridotta.

Nell'area in studio, da dati bibliografici la falda più superficiale si colloca ad una quota media intorno ai 120 m s.l.m. quindi a circa 50 metri dal p.c.

La direzione di deflusso sotterraneo è da nord verso Sud, con locali variazioni dovute ad assi e punti di drenaggio.

### 3 CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICA

Per la ricostruzione generale della successione stratigrafica dei primi metri di sottosuolo e per la definizione del modello litologico sono stati eseguiti 4 sondaggi a carotaggio continuo, spinti a profondità variabile tra i 5 e i 20 m dal p.c, la cui ubicazione è riportata nella seguente planimetria.

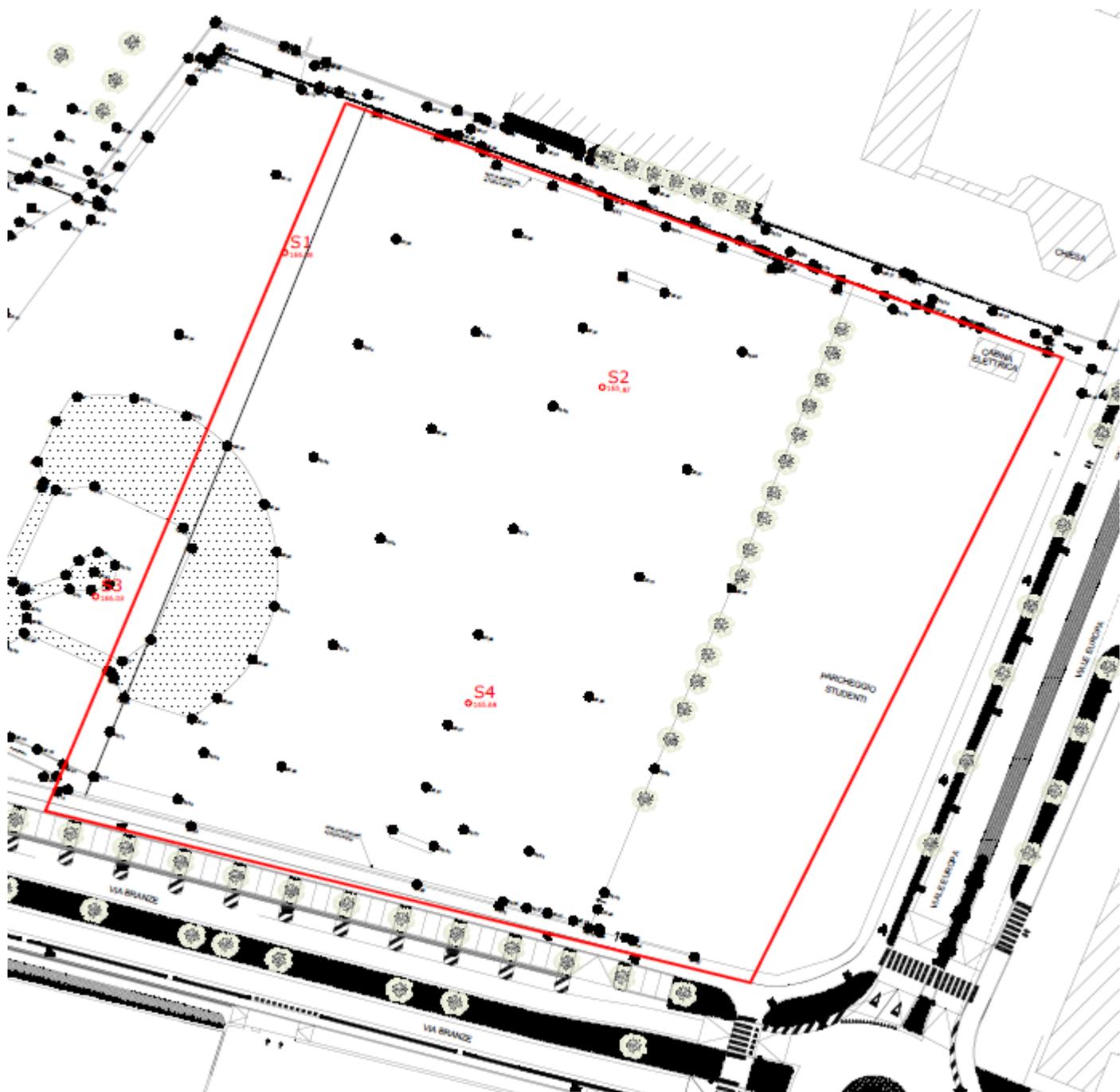
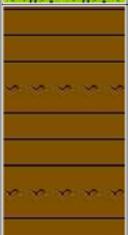


Fig. 5: Planimetria con ubicazione sondaggi a carotaggio continuo

Per l'esecuzione dei sondaggi si è utilizzata una sonda con carotiere semplice diametro 101 mm e rivestimento 127 mm.

Tutti i carotaggi sono stati eseguiti a secco. E' stato eseguito il recupero delle carote in apposite cassette catalogatrici per i rilievi litologici e geotecnici speditivi.

Nelle pagine seguenti si riporta la scheda della descrizione stratigrafica delle carote estratte nei 4 sondaggi.

m		Litologia	Descrizione	Quota	S.P.T.	Camp.	Falda	Doc. fotografica
				0.00		0.00		
0.5			terreno vegetale argillo limoso debolmente ghiaioso	0.50		R		
1.0			argilla limosa debolmente ghiaiosa			R		
1.5								
2.0								
2.5				2.50				
3.0			ghiaia sabbiosa con ciottoli		10-9-9			
3.5					3.00 PC			
4.0								
4.5								
5.0								
5.5								
6.0					22-16-14			
6.5				6.50	6.00 PC			
7.0								
7.5								
8.0								
8.5								
9.0								
9.5								

Committente <b>UNIVERSITA' STUDI DI BRESCIA</b>	Sondaggio <b>S2</b>	Profondità raggiunta <b>5.0 m</b>	Quota m.s.l.m. <b>165.87</b>	Tipo Sonda <b>FRASTE</b>			
Cantiere <b>Impianto Sportivo Via Branze</b>	Tipo Carotaggio <b>CONTINUO</b>	data <b>23/06/2020</b>	Coordinate WGS84 <b>5046377/596354.485</b>				
m	Litologia	Descrizione	Quota	S.P.T.	Camp.	Falda	Doc. fotografica



Committente <b>UNIVERSITA' STUDI DI BRESCIA</b>	Sondaggio <b>S3</b>	Profondità raggiunta <b>10.0 m</b>	Quota m.sl.m. <b>166.03</b>	Tipo Sonda <b>FRASTE</b>
Cantiere <b>Impianto Sportivo Via Branze</b>	Tipo Carotaggio <b>CONTINUO</b>	data <b>22/06/2020</b>	Coordinate WGS84 <b>5046341/596271</b>	

m	Litologia	Descrizione	Quota	S.P.T.	Camp.	Falda	Doc. fotografica
			0.00		0.00		
0.5		terreno vegetale argillo limoso debolmente ghiaioso	0.50		R		
1.0		argilla e argilla limosa debolmente ghiaiosa	1.50		R		
1.5		ghiaia e sabbia limoso argillosa	2.00				
2.0		ghiaia sabbiosa con ciottoli	2.60				
2.5		argilla limosa debolmente ghiaiosa	2.80				
3.0		ghiaia e sabbia con ciottoli		15-20-9			
3.5				3.00 PC			
4.0							
4.5							
5.0							
5.5							
6.0				Rif			
6.5				6.00 PC			
7.0							
7.5							
8.0							
8.5							
9.0							
9.5							
10.0			10.00				

Committente <b>UNIVERSITA' STUDI DI BRESCIA</b>	Sondaggio <b>S4 0-10 m</b>	Profondità raggiunta <b>20.0 m</b>	Quota m.sl.m. <b>165.68</b>	Tipo Sonda <b>FRASTE</b>
Cantiere <b>Impianto Sportivo Via Branze</b>	Tipo Carotaggio <b>CONTINUO</b>	data <b>23/06/2020</b>	Coordinate WGS84 <b>5046324/596333</b>	

m	Litologia	Descrizione	Quota	S.P.T.	Camp.	Falda	Doc. fotografica
0.00			0.00		0.00		
0.5		terreno vegetale argillo limoso debolmente ghiaioso	0.50		R		
1.0		argilla e argilla limosa debolmente ghiaiosa			R		
2.0			2.30				
2.5		ghiaia e sabbia limoso argillosa		7-21-19			
3.0			3.60	3.00 PC			
4.0		ghiaia sabbiosa con ciottoli		22-17-11			
6.0				6.00 PC			
9.0				33-25-17			
9.0				9.00 PC			
10.0			10.00				

Committente  
**UNIVERSITA' STUDI DI BRESCIA**  
 Cantiere  
**Impianto Sportivo Via Branze**

Sondaggio  
**S4 10-20 m**  
 Tipo Carotaggio  
**CONTINUO**

Profondità raggiunta  
**20.0 m**  
 data  
**23/06/2020**

Quota m.s.l.m.  
**165.68**  
 Coordinate WGS84  
**5046324/596333**

Tipo Sonda  
**FRASTE**

m	Litologia	Descrizione	Quota	S.P.T.	Camp.	Falda	Doc. fotografica
			10.03				
10.5		sabbia ghiaiosa e limosa	10.60				
11.0		ghiaia e sabbia	11.50				
11.5		sabbia limosa con ghiaia	14.00	40-28-26			
12.0				12.00	PC		
12.5							
13.0							
13.5							
14.0		sabbia limosa e argillosa	15.50	8-11-13			
14.5				15.00	PC		
15.0							
15.5		argilla limoso sabbiosa	16.00				
16.0		sabbia limosa e argillosa	17.60				
16.5							
17.0							
17.5							
18.0		ghiaia e sabbia	18.20				
18.5		sabbia limo-argillosa con ghiaia	20.00				
19.0							
19.5							
20.0							

#### 4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La caratterizzazione geotecnica del sottosuolo dell'area in studio è stata eseguita mediante l'esecuzione di prove di penetrazione dinamica all'interno dei fori dei sondaggi (prove SCPT).

La prova consiste nel rilevare il numero di colpi (rispettivamente  $N_1$ ,  $N_2$  ed  $N_3$ ) necessari per infiggere la punta per tre tratti successivi di 15 cm ciascuno. La resistenza alla penetrazione è caratterizzata dal numero di colpi richiesti per l'attraversamento degli ultimi due tratti, per complessivi 30 cm ( $N_{spt} = N_2 + N_3$ ).

È da rilevare che la prova penetrometrica dinamica viene interrotta in presenza di una delle seguenti condizioni (rifiuto):  $N_1 > 50$  colpi;  $N_2 + N_3 > 100$  colpi

Il numero di colpi ottenuto per infiggere il campionatore permette di valutare lo stato di addensamento e/o la consistenza dei depositi attraversati dal sondaggio e quindi, mediante le opportune correlazioni esistenti, di caratterizzare geotecnicamente gli stessi. La valutazione dei parametri geotecnici può essere affinata attraverso la normalizzazione dei risultati della prova con l'introduzione di fattori correttivi che tengono conto della pressione efficace del terreno sovrastante, del dispositivo utilizzato per la prova, della lunghezza del dispositivo di prova e delle caratteristiche del foro e del campionatore.

Dai valori ottenuti dalle prove, mediante correlazioni sperimentali, è possibile determinare i principale parametri geotecnici che caratterizzano il sottosuolo in esame.

prova	Nstp	litologia	Densità relativa (%) <sup>(1)</sup>		Angolo d'attrito (°) <sup>(2)</sup>		Modulo di Young (Mpa) <sup>(3)</sup>		Peso Unità di Volume (KN/m <sup>3</sup> )	
S1 3.00-3.45	18	ghiaia sabbiosa con ciottoli	87	90	31	35	14	25	19	0
S3 3.00-3.45	29		100		35		22		20	
S4 3.00-3.45	40		100		40		31		21	
S1 6.00-6.45	30		88		36		23		20	
S3 6.00-6.45	Rif		100		40		40		22	
S4 6.00-6.45	28		83		35		22		20	
S4 9.00-9.45	42		87		40		32		21	
S4 12.00-12.45	54	sabbia limosa con ghiaia	87	60	40	35	40	20	22	1
S4 15.00-15.45	24		53		34		18		20	

1 - Meyerhof 1957; 2 - Shioi-Fukuni 1982 (ROAD BRIDGE SPECIFICATION); 3- Schmertmann (1978)

## **5 MODELLO LITOLOGICO E GEOTECNICO**

Le indagini hanno permesso di individuare per l'intera area indagata un assetto stratigrafico del primo sottosuolo alquanto omogeneo. Si è rilevata infatti la presenza di un livello superficiale di spessore compreso tra i 2 e i 2.5 m, costituito da argille limose di color marrone.

Oltre tali profondità sono presenti alluvioni prevalentemente ghiaiose in matrice sabbiosa, talora debolmente limosa, con ciottoli.

Le ghiaie si spingono con continuità fino alla profondità di 10-11 m. Oltre tali profondità iniziano a intercettarsi livelli e strati a prevalente composizione sabbiosa con frazioni limose e argillose variabili.

Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico locale, le indagini eseguite hanno evidenziato che il sottosuolo è completamente insaturo fino a oltre 20 m dal p.c., coerentemente con quanto desunto dai dati bibliografici che per l'area in studio indicano la presenza della falda più superficiale a circa 50 m dal p.c.

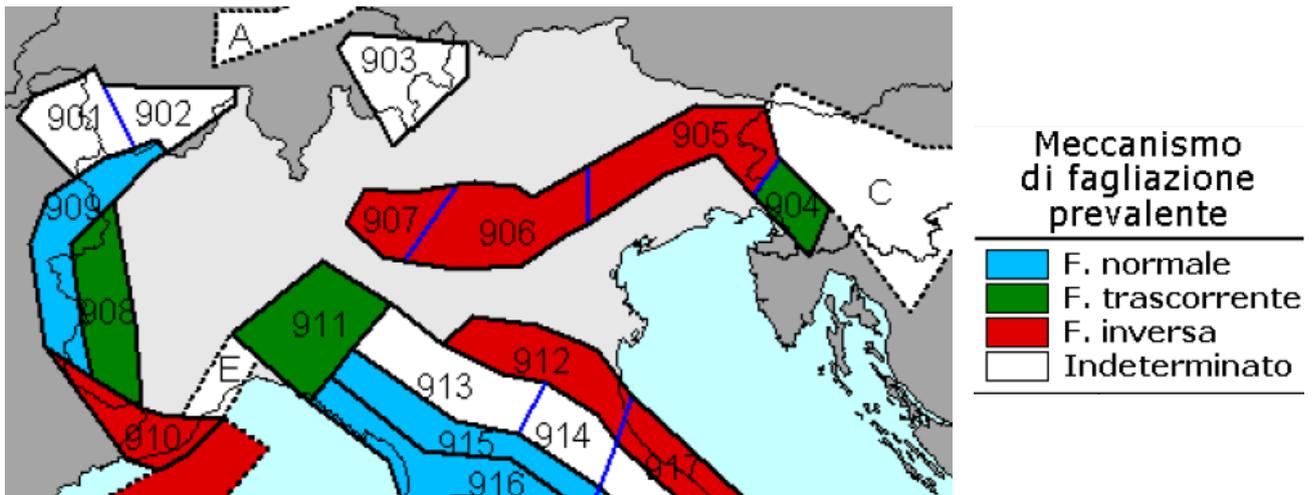
Per quanto riguarda le caratteristiche geotecniche, i livelli argillo limosi più superficiali presentano comportamento coesivo.

Le ghiaie e sabbie sottostanti hanno comportamento incoerente, caratterizzato da angoli di attrito mediamente compresi tra 32-35°

## 6 ANALISI SISMICA DELL'AREA IN STUDIO

### 6.1 PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE

Dal sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ([www.ingv.it](http://www.ingv.it)) è stata ricavata la zonazione in vigore, indicata con la sigla ZS9, dalla quale risulta che il territorio in esame ricade entro la zona sismogenetica 907, che comprende la fascia più bassa delle province di Bergamo e Brescia.



*Suddivisione delle zone sismogenetiche ZS9 (particolare) e meccanismo di fagliazione prevalente atteso per le diverse zone.*

Con riferimento alla classificazione sismica su base comunale di cui all'OPCM 3274 del 20.03.2003, il comune di Brescia appartiene alle zona di sismicità 3.

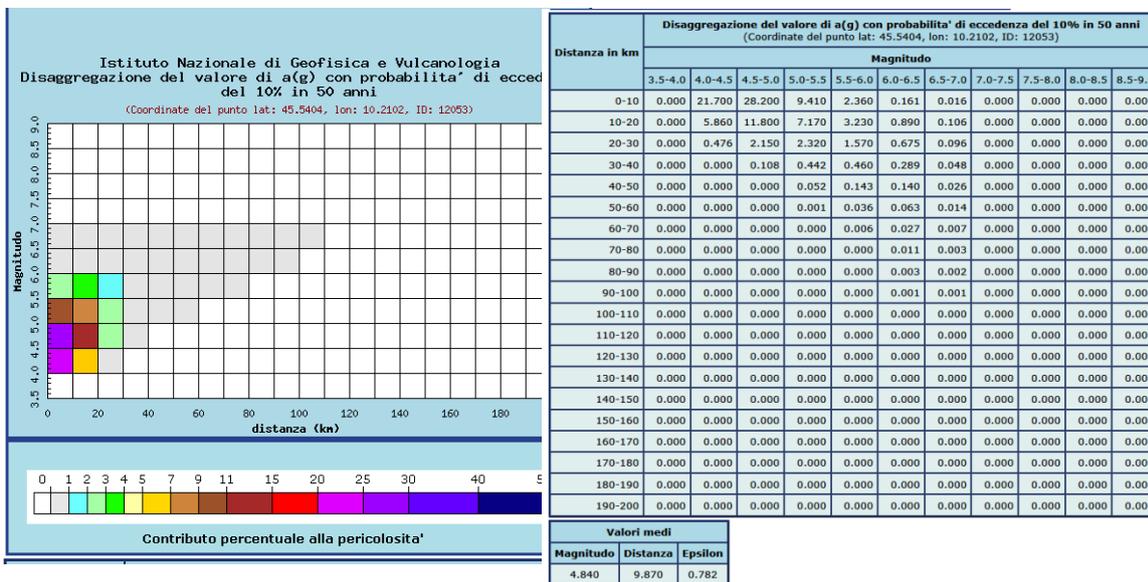
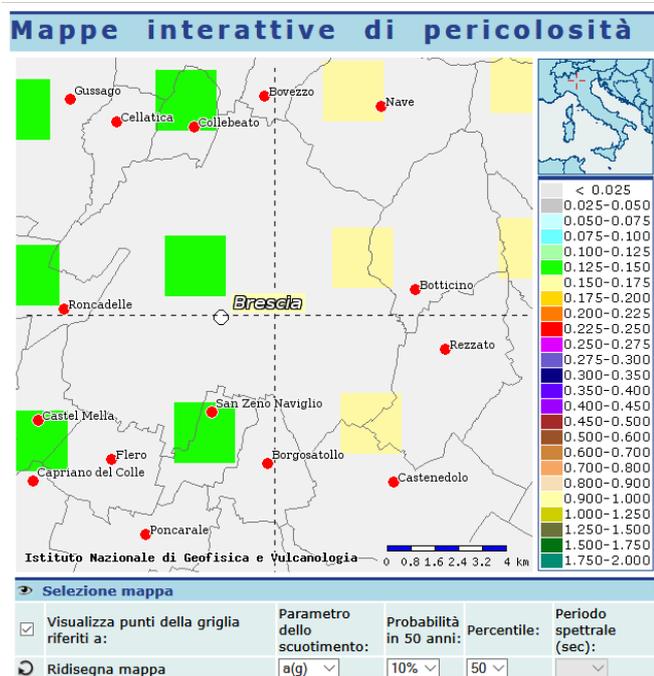
Con la Delibera della Giunta Regionale della Lombardia dell'11 luglio 2014 n.2129 "Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia (l.r. 1/2000, art. 3, c. 108, lett. d)" lo stesso comune è stato classificato in Zona sismica 2.

Con l'entrata in vigore del D.M. 14 gennaio 2008 la stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido ( $V_{s30} > 800$  m/s) viene definita mediante un approccio "sito dipendente" e non più tramite un criterio "zona dipendente".

Pertanto la stima dei parametri spettrali necessari per la definizione dell'azione sismica di progetto viene effettuata calcolandoli direttamente per il sito in esame, utilizzando come riferimento le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento, riportato nella tabella 1 dell'allegato B del D.M. 14 gennaio 2008.

I dati riportati nell'All. B del D.M. 14/01/2008 coincidono per lo più con quelli riportati nell'Ord. 3519/2006, e sono in ogni caso determinabili mediante le coordinate geografiche e l'utilizzo di programmi applicativi.

Si forniscono in proposito i dati di pericolosità sismica riportati sul link <http://zonesismiche.mi.ingv.it> relative al sito d'interesse:



## 6.2 PROSPEZIONI SISMICHE

### 6.2.1 Indagine sismica di tipo attivo in *array* (M.A.S.W.)

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più un'unica velocità ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità. Questo comportamento viene definito dispersione in frequenza ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario, le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico – matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati con caratteristiche elastiche lineari.

La procedura M.A.S.W. viene presentata nel 1999 in seguito agli studi effettuati dal Kansas Geological Survey (Park et al., 1999). L'acquisizione simultanea di molti canali, che aumentano la ridondanza statistica, insieme alla semplicità delle operazioni, permettono al M.A.S.W. di superare pienamente le limitazioni incontrate con precedenti metodi. La strumentazione necessaria è composta da uno stendimento sismico di 12 o più geofoni verticali e dal sismografo. L'energizzazione viene effettuata ad hoc a varie distanze e con varie ripetizioni (tecnica *stacking*) per sommare algebricamente i segnali ottenuti rendendo in tal modo la potenza del segnale superiore a quella del rumore di fondo.

Una particolare analisi spettrale permette di distinguere il modo fondamentale da quelli superiori per ricavare la curva di dispersione ed il profilo delle Vs per successiva inversione 1-D. La teoria sviluppata suggerisce di caratterizzare tale fenomeno mediante una funzione detta curva di dispersione, che associa ad ogni frequenza la velocità di propagazione dell'onda. Tale curva è estraibile dallo spettro del segnale poiché essa approssimativamente posa sui massimi del valore assoluto dello spettro.

A questo punto la curva di dispersione sperimentale deve essere confrontata con quella relativa ad un modello sintetico che verrà successivamente alterato in base alle differenze riscontrate tra le due curve, fino ad ottenere un modello sintetico a cui è associata una curva di dispersione teorica approssimativamente coincidente con la curva sperimentale. Questa delicata fase di interpretazione è comunemente detta fase di inversione e può avvenire in maniera automatica e/o manuale.

Il *sampling rate* utilizzato è stato di 512 Hz in modo da ottenere un elevato dettaglio del segnale. La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato è stato di circa 6 minuti. Il software utilizzato per l'analisi spettrale è Grilla v.7.0 *release* 2018.

Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 10 Hz), sono stati utilizzati n°16 geofoni verticali a 4,5 Hz uniti in un *array* lineare totalmente digitale (SoilSpy Rosina). Ogni geofono è munito di un digitalizzatore che converte il segnale e lo trasmette al sismografo tramite un'interfaccia USB. Tale sistema permette di avere elevati rapporti di rumore, un perfetto sincronismo e una estrema leggerezza. La spaziatura utilizzata tra i geofoni è stata di 3 m quindi la lunghezza complessiva del profilo è risultata essere di 45 m. Non sono presenti sostanziali variazioni di quota e quindi il sito può essere considerato orizzontale.

Per una corretta ricostruzione sismica del sottosuolo e una buona stima delle onde Vs è necessario adottare una modellizzazione numerica che può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$\hat{v}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad [2.1]$$

- Vs = valore di velocità delle onde di taglio [m/s];
- H = profondità alla quale si desidera stimare Vs [m] (30 m in caso di Vs30);
- hi = spessore dello strato i - esimo [m];
- vi = velocità delle onde Vs all'interno dello strato i - esimo [m/s].

In via puramente indicativa, al fine di correlare le velocità delle onde di taglio ad un tipo di suolo, si riportano i valori tabulati da Borchardt (1992; 1994) assieme a quelli ottenuti sperimentalmente in diversi ambienti sedimentari da altri autori (Budny, 1984; Ibs von Seht e Wohlenberg, 1999; Delgado et al., 2000 a, b; Parolai et al., 2002; Scherbaum et al., 2003; D'Amico et al., 2004, 2006; Hinzen et al., 2004).

TIPO DI SUOLO	Vs min [m/s]	Vs media [m/s]	Vs max [m/s]
ROCCE MOLTO DURE (es. rocce metamorfiche molto - poco fratturate)	1400	1620	-
ROCCE DURE (es. graniti, rocce ignee, conglomerati, arenarie e argilliti, da mediamente a poco fratturate)	700	1050	1400
SUOLI GHIAIOSI e ROCCE DA TENERE A DURE (es. rocce sedimentarie ignee tenere, arenarie, argilliti, ghiaie e suoli con > 20% di ghiaia)	375	540	700
ARGILLE COMPATTE e SUOLI SABBIOSI - GHIAIOSI (es. ghiaie e suoli con < 20% di ghiaia, sabbie da sciolte a molto compatte, limi e argille sabbiose, argille da medie a compatte e argille limose)	200	290	375
TERRENI TENERI (es. terreni di riempimento sotto falda, argille da tenere a molto tenere)	100	150	200

## 6.2.2 Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)

La tecnica sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza caratteristica di risonanza del sito** che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la **frequenza fondamentale di risonanza di un edificio**, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito (*free field*) e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la **velocità media delle onde di taglio Vs** calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. Sarà quindi possibile calcolare la Vs,eq e la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle *Norme Tecniche per le Costruzioni del 17 gennaio 2018*;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un *range* di indagine compreso tra 0,5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostante per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremori. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

- dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s;
- dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
- dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

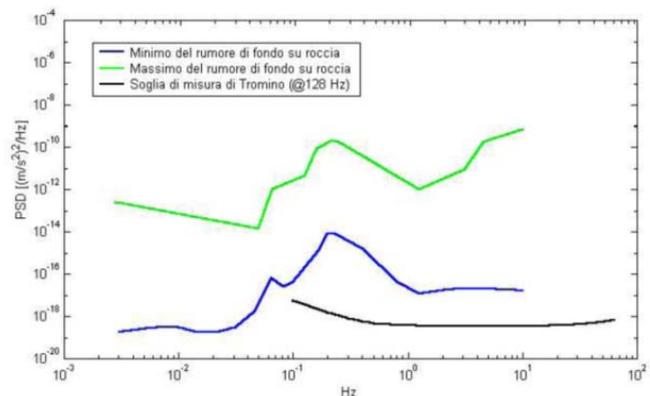
$$\text{segnale registrazione al sito } x = \text{sorgente} * \text{effetti di percorso} * \text{funzione trasferimento strumento}$$

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi poiché il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore)

subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta Moho S.r.l. modello

"Tromino ENGY-PLUS" che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra - leggeri e ultra - compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno una terna velocimetrica con i sensori ortogonali tra loro e con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. Nella figura a fianco si riporta la curva di rumore di "Tromino" a confronto con i modelli standard



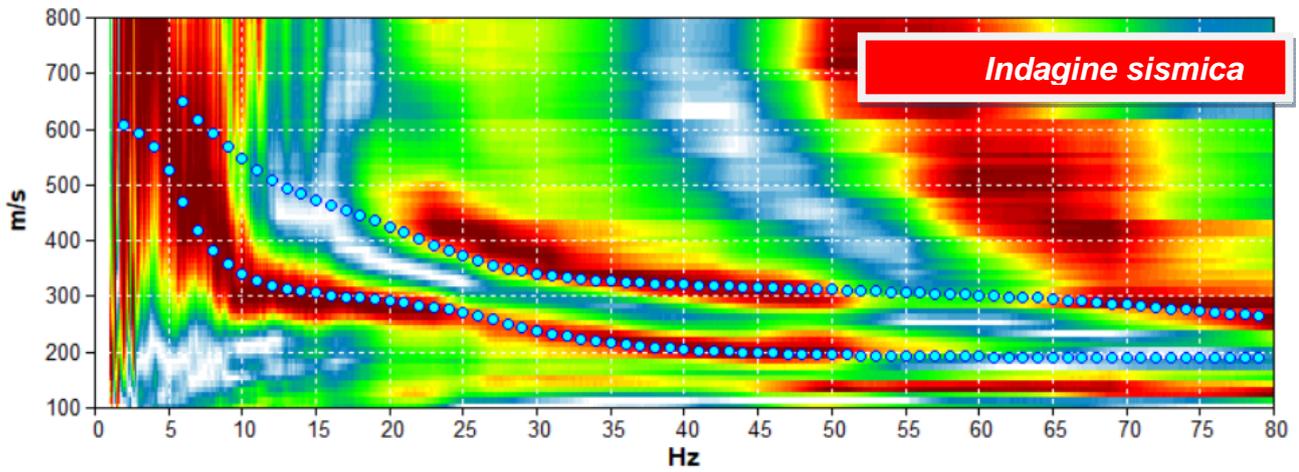
di rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra. Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.

### 6.2.3 Risultati ottenuti dalle indagini sismiche effettuate

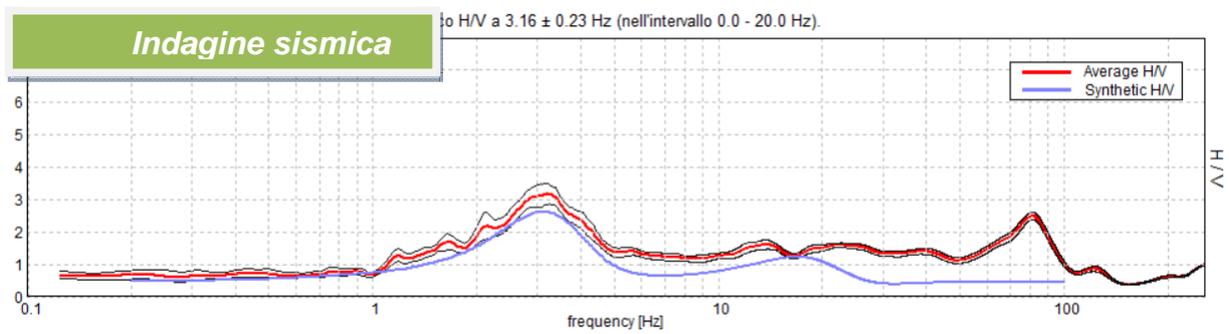
L'utilizzo incrociato delle due tecniche sismiche ha permesso di ottenere un modello sismo - stratigrafico del sottosuolo robusto e affidabile in corrispondenza della zona d'interesse. L'indagine M.A.S.W. ha individuato le discontinuità sismiche superficiali e stimato le velocità di propagazione delle onde S mentre la prospezione passiva a stazione singola (H.V.S.R.), ha stimato il grado di rigidità delle coperture profonde. Inoltre, la misura H.V.S.R. ha determinato le frequenze di risonanza di sito cioè i valori di frequenza attesi in superficie in occasione di evento sismico.

L'attendibilità del modello sismo-stratigrafico desunto è da considerarsi elevata poiché la coerenza del segnale è buona e lo spettro di velocità è ben definito nel modo fondamentale per quasi tutte le frequenze campionate. Il programma di elaborazione utilizzato permette di considerare non solo il

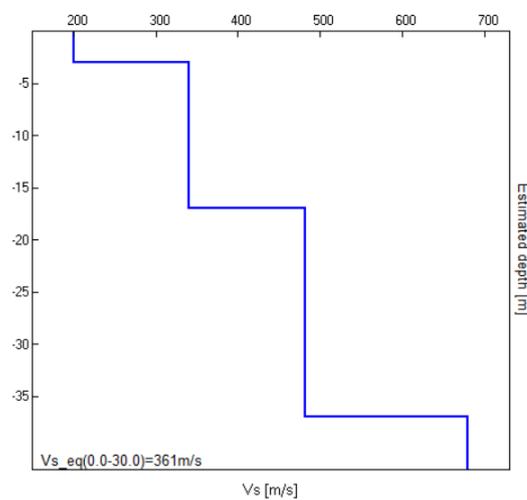
modo fondamentale ma, una volta individuati, anche i modi superiori per vincolare con maggior attendibilità la ricostruzione sismo-stratigrafica del sottosuolo.



*Spettro di velocità: il modo fondamentale è presente in quasi tutte le frequenze campionate. Il segnale si presenta con una buona coerenza. In blu le curve sintetiche create da una modellizzazione diretta delle onde*



*La curva spettrale rossa rappresenta l'andamento sismico registrato in campagna mentre quella blu è la curva sintetica generata dal codice di calcolo*



La ricostruzione sismo-stratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di un materiale mediamente addensato fino a circa 3,0 m dal p.c. locale, caratterizzato da  $V_s$  di circa 200 m/s, mentre per profondità maggiori le  $V_s$  tendono ad aumentare raggiungendo valori di circa 340 m/s.

A circa 17 m di profondità dal p.c. locale si segnala un aumento della velocità delle onde S che raggiunge valori di circa 480 m/s.

L'ultimo sismo-strato riconosciuto ( $V_s \approx 680$  m/s) è stato riscontrato a circa 37 m di profondità dal p.c. locale ed è riferibile a conglomerati.

Il rilievo nello specifico ha fornito i seguenti dati sismici (*modello sismo - stratigrafico interpretativo*):

Indagine sismica M.A.S.W. con inversione congiunta H.V.S.R.	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	200	3.0	0,0 - 3.0
II SISMOSTRATO	340	14	3.0 - $\approx 17$
III SISMOSTRATO	480	20	$\approx 17$ - $\approx 37$
IV SISMOSTRATO	680	Semisp.	$\approx 37$ -

Nel caso specifico del sito in esame si è cercato di correlare i valori di picco, dello spettro di risposta HVSR, con le frequenze fondamentali di risonanza di sito.

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si sono potute ricavare le frequenze relative ad ogni discontinuità sismica.

La frequenza fondamentale di risonanza di sito, generata dalla discontinuità sismica a più elevato rapporto spettrale ( $H/V \approx 3$ ) nell'intervallo di interesse ingegneristico-strutturale (0,0 – 20,0 Hz), è di circa 3 Hz.

### 6.3 MICROZONAZIONE SISMICA COMUNALE

Lo studio di Microzonazione Sismica del PGT del Comune di Brescia identifica l'area di progetto tra le zone successibili di amplificazione sismica di tipo stratigrafico ed in particolare la iscrive nella Z4a (Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi).

Coerentemente con i risultati delle prospezioni sismiche descritte in precedenza, anche il PGT individua per l'area in esame la categoria di sottosuolo B.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

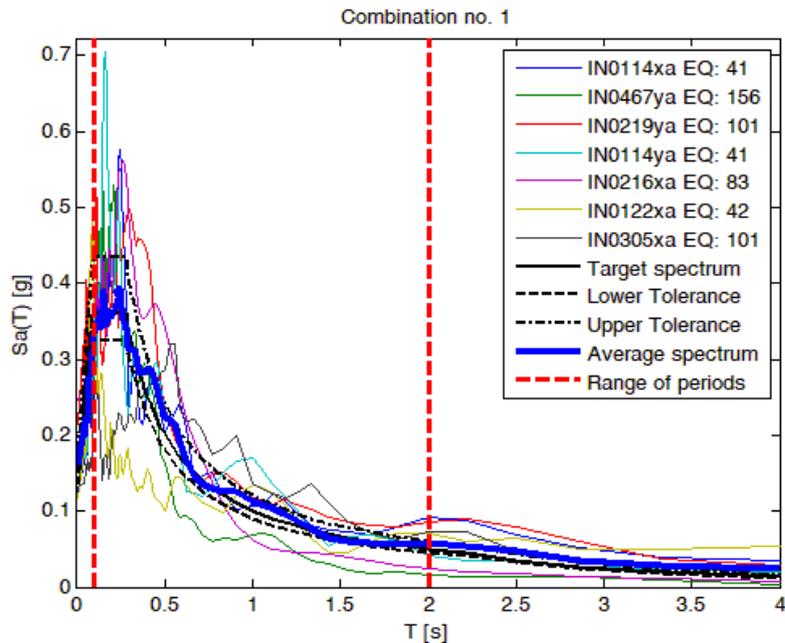
Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

L'analisi di secondo livello determina tuttavia uno scenario locale per cui il valori di amplificazione Fa individuato per l'ambito in questione risulta maggiore al valore di soglia comunale per la medesima categoria di suolo, con conseguente necessità o di applicazione di un'analisi cosiddetta di terzo livello o di utilizzo per la progettazione edilizia dello spettro di norma caratteristico della categoria di sottosuolo C.

### 6.4 MODELLIZZAZIONE NUMERICA AVANZATA – terzo livello

E' stato effettuato uno studio di risposta sismica locale tramite una modellazione numerica monodimensionale avanzata in modalità dinamica. Nel rispetto della normativa vigente è stata effettuata una modellazione numerica assegnando una severità dell'azione sismica con la probabilità di superamento, P, e con il periodo di ritorno, Tr, relativi agli stati limite considerati. In particolare, secondo le indicazioni ricevute dal progettista, è stata considerata una vita nominale della costruzione (Vn) di 50 anni, una classe d'uso di II con il relativo coefficiente pari a 1 e quindi una vita di riferimento Vr = 50 anni. A partire da queste indicazioni si è determinato un periodo di ritorno dell'azione sismica di 475 anni corrispondenti allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

Gli input sismici utilizzati sono rappresentati da una settupla di storie accelerometriche applicate alla base del modello per lo stato limite considerato e riferite agli spettri di normativa calcolati per il sito in esame, considerando un sottosuolo di roccia affiorante (classe A) con topografia sub-orizzontale (T1)

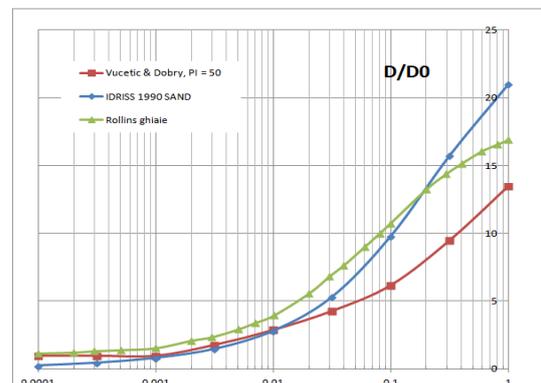
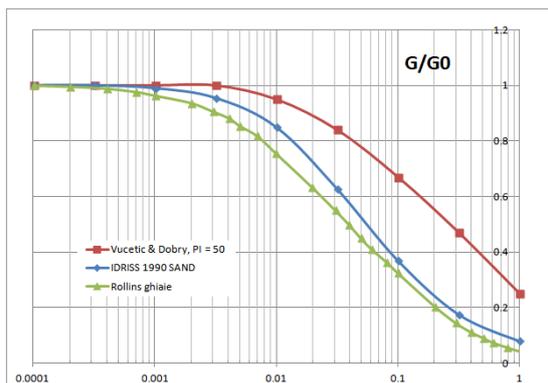


Gli accelerogrammi sono stati ricavati tramite l'utilizzo del software REXEL

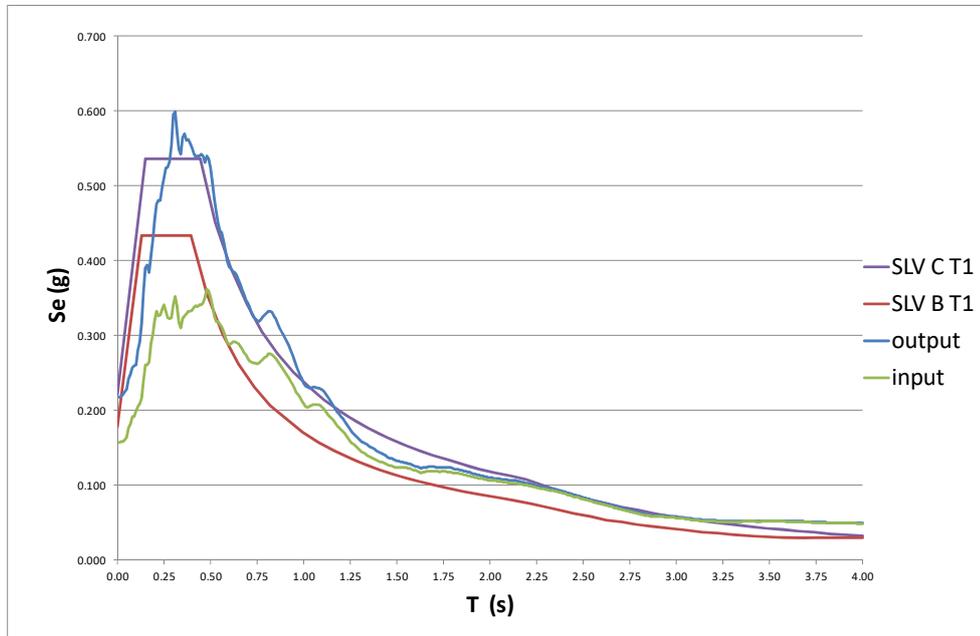
(Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8:339-362, 2010 DOI 10.1007/s10518-009-9146-1) e (Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B. Internet-Site for European Strong-Motion Data, European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme (2002))

Nella modellazione numerica, è stata utilizzata la sismo – stratigrafia e i valori di rigidità ricavati dalle indagini sismiche precedentemente illustrate.

Per limitare la riflessione delle onde in corrispondenza della frontiera inferiore del modello sono stati utilizzati degli smorzatori viscosi mentre le proprietà dissipative dei materiali sono state ottenute attraverso lo smorzamento isteretico per i materiali più superficiali tramite le curve di degrado  $G/G_0$  e  $D/D_0$  di seguito indicate.



Le storie temporali ricavate al tetto del modello rappresentano le storie accelerometriche orizzontali attese nel sito d'indagine. Le n°7 *history* ottenute sono state successivamente plottate in uno spettro di risposta elastico e mediate in una curva rappresentativa, confrontabile con gli spettri di normativa provenienti dall'approccio semplificato.



Lo spettro di risposta elastico ottenuto dallo studio di RSL presenta valori massimi di ag compresi tra 0,50 – 0,6 ag/g nell'intervallo 0,25s e 0,70s. Dal grafico sopra riportato, si può osservare che la Categoria C unita alla Categoria Topografica T1 ben modella lo spettro calcolato, confermando l'analisi di microzonazione comunale.

## **7 CONCLUSIONI**

Da quanto precedentemente esposto si conclude che l'area oggetto dell'indagine non presenta situazioni geomorfologiche, geologiche o idrogeologiche pregiudizievoli per la realizzazione del Piano programmato.

I dati reperiti in letteratura, il rilevamento di campagna e le indagini dirette ed indirette hanno evidenziato che:

- ❖ il substrato dell'area in esame è costituito da alluvioni ghiaio e sabbiose con buone caratteristiche geotecniche sottostanti un primo livello superficiale di spessore pari a 2-2.5 m prevalentemente argillo limoso;
- ❖ non sono state riconosciute morfologie legate a dissesti in atto;
- ❖ la zona indagata non è esondabile;
- ❖ per quel che concerne le caratteristiche idrogeologiche dell'area in esame, la falda si trova a una profondità di circa 50 metri dal piano campagna.

Come tutto il territorio comunale di Brescia, l'area è a medio rischio sismico e la classificazione regionale vigente la inserisce in zona a sismicità 2, con valori di accelerazione orizzontale massima, definiti secondo la mappa di pericolosità sismica di cui all'OPCM 3519/2006, per suolo rigido e pianeggiante, compresi tra 0.125 – 0.175 g (con probabilità di superamento del 10% in 50 anni).

Per quanto riguarda la microzonizzazione sismica le indagini eseguite hanno evidenziato che la Categoria C unita alla Categoria Topografica T1 ben modella lo spettro calcolato dall'analisi di Risposta sismica locale, confermando le indicazioni di microzonazione comunale.;

L'assenza di falde acquifere entro i primi 15 m dal p.c. fanno escludere la possibilità di fenomeni di liquefazione.