

Regione Lombardia



Comune di Barzago



Provincia di Lecco

COMUNE DI BARZAGO

PIANO DELLE REGOLE

art. 10 bis della L.R n 12/2005 e s.m.i

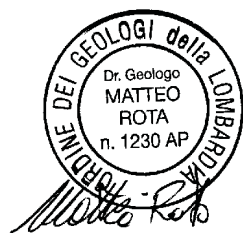
Componente "Geologica" del Piano

Relazione analisi sismica - secondo livello

Settore di competenza Studio della componente geologica, idrogeologica e analisi del rischio sismico

Estensori

Dott. Geol. Rota Matteo



Dott. Geol. Luigi Corna



Data:

Febbraio 2024

1. PREMESSA

Il Comune di Barzago con determinazione n. 130 del 25.05.2021 ha conferito alla scrivente Società di Ingegneria l'incarico di aggiornamento della "Componente Geologica idrogeologica e sismica" della Variante al PGT, consistito nell'esecuzione della sola verifica di secondo livello sismico mantenendo tutta la documentazione cogente.

La direttiva tecnica (D.G.R. n. 2616 del 15 Dicembre 2011 "Criteri e indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del P.G.T.") nasce espressamente "dedicata" al nuovo strumento urbanistico comunale introdotto dalla legge 12/2005 riunendo e coordinando in un unico documento tutti i precedenti criteri tecnici e gli iter procedurali legati alla componente geologica di supporto alla pianificazione urbanistica.

Successivamente con d.g.r. n. 6738 del 2017 e d.g.r. n. 470 del 2018 sono state introdotte le norme inerenti al rischio idraulico ed in particolare le verifiche di congruenza con il PGRA.

Infine con d.g.r. n. 7564 del 2022 si sono istituite le norme relative al tema degli sprofondamenti (sinkhole).

Lo Studio Geologico si inserisce nel Piano di Governo del Territorio in quanto il Documento di Piano lo contiene integralmente rappresentando una delle componenti del quadro conoscitivo del territorio comunale e costituisce base per le scelte pianificatorie; il Piano delle Regole contiene come parti integranti le fasi di sintesi/valutazione e proposta (Carte di Sintesi, dei Vincoli, di Fattibilità Geologica per le Azioni di Piano e Norme geologiche di Piano), in quanto contribuiscono alla definizione della normativa d'uso del territorio.

Quindi, il Piano di Governo del Territorio per la componente geologica:

- nel Documento di Piano definisce l'assetto geologico, idrogeologico e sismico del territorio (l.r.12/2005, art. 8, comma 1, lettera c)
- nel Piano delle Regole individua le aree a pericolosità e vulnerabilità geologica, idrogeologica e sismica, nonché le norme e le prescrizioni a cui le medesime sono assoggettate (l.r.12/2005, art. 10, comma 1, lettera d)

Il comune di Barzago è già dotato di una componente geologica predisposta nell'ambito dei precedenti PGT.

Gli scriventi verificato che rispetto alla vigente componente geologica del PGT non sono sopraggiunte modifiche per quanto riguarda il quadro del Dissesto idrogeologico, che il comune non intende fare modifiche all'assetto del quadro del dissesto, che non necessitano aggiornamenti per quanto attiene la documentazione cogente del PAI (Piano di Assetto idrogeologico del Bacino del Po) e del PGRA (Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni), e che non vi sono problematiche relative a fenomeni di sprofondamenti (sinkhole), hanno definito che per l'adeguamento della "Componente Geologica" del PGT necessita il solo aggiornamento della componente sismica provvedendo all'esecuzione degli approfondimenti di secondo livello.

Gli approfondimento di secondo livello sismico si sono ora resi necessari a seguito dell'aggiornamento delle zone sismiche che la Regione Lombardia ha rivisitato con D.G.R. n. X/2129 del 11 luglio 2014, la cui entrata in vigore è stata poi differita al 14 ottobre 2015, che ha riclassificato il territorio comunale di Barzago dalla zona sismica 4 alla 3.

2. ANALISI DELLA PERICOLOSITA' SISMICA

La valutazione della pericolosità sismica nell'ambito degli studi geologici dei PGT viene eseguita nella fase di analisi.

Per quanto riguarda la metodologia dello studio e le risultanze delle valutazioni attinenti all'analisi di primo livello si rimanda alla documentazione della "Componente geologica del PGT" ed in particolare alla relazione geologica e alla Carta di Pericolosità sismica di Primo Livello (Carta PSL).

Di seguito si riporta l'analisi di secondo livello specificatamente svolta per il territorio comunale di Barzago.

Per quanto concerne le aree classificate nella cartografia della Pericolosità Sismica nello scenario Z1, effetti di instabilità, e Z2, cedimenti e liquefazioni, esse sono state escluse dalle valutazioni di secondo livello in quanto la normativa prevede che per esse si proceda in automatico ad analisi di terzo livello nella fase di progettazione.

2.1. Concetti generali dell'analisi

La procedura consiste in un approccio di tipo semiquantitativo e fornisce la stima quantitativa della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di amplificazione (Fa); gli studi sono condotti con metodi quantitativi semplificati, validi per la valutazione delle amplificazioni litologiche e morfologiche e sono utilizzati per zonare l'area di studio in funzione del valore di Fa.

Il valore di Fa si riferisce agli intervalli di periodo tra 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s: i due intervalli di periodo nei quali viene calcolato il valore di Fa sono stati scelti in funzione del periodo proprio delle tipologie edilizie presenti più frequentemente nel territorio regionale; in particolare l'intervallo tra 0.1-0.5 s si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide, mentre l'intervallo tra 0.5-1.5 s si riferisce a strutture più alte e più flessibili.

La procedura di 2° livello fornisce, per gli effetti litologici, valori di Fa per entrambi gli intervalli di periodo considerati, mentre per gli effetti morfologici solo per l'intervallo 0.1-0.5 s: questa limitazione è causata dall'impiego, per la messa a punto della scheda di valutazione, di codici di calcolo di tipo bidimensionale ad elementi di contorno che sono risultati più sensibili all'influenza del moto di input nell'intervallo di periodo 0.5-1.5 s.

La norma prevede che nel caso vi sia la presenza contemporanea di effetti litologici (Z3) e morfologici (Z4) si dovranno analizzare entrambi i casi e si sceglierà quello più sfavorevole. Nel caso del territorio di Barzago tale concomitanza non si presenta nella carta delle PSL.

2.2. Descrizione della procedura di analisi (estratto dalla norma regionale)

2.2.1. Effetti morfologici

La procedura semplificata è valida per lo scenario di zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo (Z3b), caratterizzata da pendii con inclinazione maggiore o uguale ai 10°; il rilievo è identificato sulla base di cartografie a scala almeno 1:10.000 e la larghezza alla base è scelta in corrispondenza di evidenti rotture morfologiche: sono da considerare creste solo quelle situazioni che presentano il dislivello altimetrico minimo (h) maggiore o uguale ad un terzo del dislivello altimetrico massimo (H) (scheda di valutazione).

Il materiale costituente il rilievo topografico deve avere una Vs maggiore o uguale ad 800 m/s.

Nell'ambito delle creste si distinguono due situazioni:

Variante al PGT del comune di Barzago**Aggiornamento "Componente geologica, idrogeologica e sismica" – Analisi secondo livello sismico**

- rilievo caratterizzato da una larghezza in cresta (l) molto inferiore alla larghezza alla base (L) (cresta appuntita);
- rilievo caratterizzato da una larghezza in cresta paragonabile alla larghezza alla base, ovvero pari ad almeno $1/3$ della larghezza alla base; la zona di cresta è pianeggiante o subpianeggiante con inclinazioni inferiori a 10° (cresta arrotondata).

Per l'utilizzo della scheda di valutazione si richiede la conoscenza dei seguenti parametri:

- larghezza alla base del rilievo L ;
- larghezza in cresta del rilievo l ;
- dislivello altimetrico massimo H e dislivello altimetrico minimo h dei versanti;
- coefficiente di forma H/L .

All'interno della scheda di valutazione si sceglie, in funzione della tipologia di cresta (appuntita o arrotondata) e della larghezza alla base del rilievo, solo per le creste appuntite, la curva più appropriata per la valutazione del valore di F_a nell'intervallo 0.1-0.5 s, in base al valore del coefficiente di forma H/L .

Il valore di F_a determinato dovrà essere approssimato alla prima cifra decimale ed assegnato all'area corrispondente alla larghezza in cresta l , mentre lungo i versanti tale valore è scalato in modo lineare fino al valore unitario alla base di ciascun versante.

I valori di F_a così ottenuti dovranno essere utilizzati per valutare il grado di protezione raggiunto al sito dall'applicazione della normativa sismica vigente.

La valutazione del grado di protezione viene effettuata in termini di contenuti energetici, confrontando i valori di F_a ottenuti dalla scheda di valutazione con un parametro di analogo significato calcolato per ciascun comune e valido per ciascuna zona sismica (zone 2, 3 e 4) e per suolo di tipo A ($V_s \geq 800$ m/s) e per l'intervallo di periodo 0.1-0.5 s.

Il parametro calcolato per ciascun Comune della Regione Lombardia è riportato nella banca dati in formato .xls (soglie_lomb.xls) e rappresenta il valore di soglia, oltre il quale lo spettro proposto dalla normativa risulta insufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito.

La procedura prevede pertanto di valutare il valore di F_a con la scheda di valutazione e di confrontarlo con il corrispondente valore di soglia, considerando una variabilità di ± 0.1 che tiene in conto la variabilità del valore di F_a ottenuto dalla procedura semplificata.

Si possono presentare quindi due situazioni:

- il valore di F_a è inferiore o uguale al valore di soglia corrispondente: la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione morfologica del sito e quindi si applica lo spettro previsto dalla normativa (classe di pericolosità H1);
- il valore di F_a è superiore al valore di soglia corrispondente: la normativa è insufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione morfologica e quindi è necessario effettuare analisi più approfondite (3° livello) in fase di progettazione edilizia (classe di pericolosità H2).

2.2.2. Effetti litologici

La procedura semplificata richiede la conoscenza dei seguenti parametri:

- litologia prevalente dei materiali presenti nel sito;
- stratigrafia del sito;
- andamento delle V_s con la profondità fino a valori pari o superiori a 800 m/s;
- spessore e velocità di ciascun strato;
- sezioni geologiche, conseguente modello geofisico - geotecnico ed identificazione dei punti rappresentativi sui quali effettuare l'analisi.

Di seguito si riporta sinteticamente la procedura seguita per l'analisi di secondo livello di cui, a titolo di esempio, si rimanda alla Figura 2.

Sulla base di intervalli indicativi di alcuni parametri geotecnici, quali curva granulometrica, parametri indice, numero di colpi della prova SPT, si individua la litologia prevalente presente nel sito e per questa si sceglie la relativa scheda di valutazione di riferimento (vedi passaggio 1a di Figura 2).

Attualmente sono disponibili:

- una scheda per le litologie prevalentemente ghiaiose;
- due schede per le litologie prevalentemente limoso-argillose (tipo 1 e tipo 2);
- due schede per le litologie prevalentemente limoso-sabbiose (tipo 1 e tipo 2);
- una scheda per le litologie prevalentemente sabbiose.

Una volta individuata la scheda di riferimento è necessario verificarne la validità in base all'andamento dei valori di V_s con la profondità (vedi passaggio 1b di Figura 2); in particolare si dovrà verificare l'andamento delle V_s con la profondità partendo dalla scheda tipo 1, nel caso in cui non fosse verificata la validità per valori di V_s inferiori ai 600 m/s si passerà all'utilizzo della scheda tipo 2.

In presenza di una litologia non contemplata dalle schede di valutazione allegate si potrà utilizzare la scheda di valutazione che presenta l'andamento delle V_s con la profondità più simile a quella riscontrata nell'indagine. Nel caso esista la scheda di valutazione per la litologia esaminata ma l'andamento delle V_s con la profondità non ricade nel campo di validità della scheda potrà essere scelta un'altra scheda che presenti l'andamento delle V_s con la profondità più simile a quella riscontrata nell'indagine.

Nel caso di presenza di alternanze litologiche, che non presentano inversioni di velocità con la profondità, si potranno utilizzare le schede a disposizione solo se l'andamento dei valori di V_s con la profondità, nel caso da esaminare, risulta compatibile con le schede proposte.

All'interno della scheda di valutazione si sceglie, in funzione della profondità e della velocità V_s dello strato superficiale, la curva più appropriata (indicata con il numero e il colore di riferimento) per la valutazione del valore di F_a (vedi passaggio 2 di Figura 2). Tale passaggio è utile per il solo intervallo $T=0.1-0.5$ s ove sono identificate tre differenti curve, mentre per l'intervallo $0.5-1.5$ s è presente una unica curva.

Il valore di V_s dello strato superficiale riportato nella scheda è da intendersi come limite massimo di ogni intervallo (es: per un valore di V_s dello strato superficiale ottenuto dall'indagine pari a 220 m/s si sceglierà il valore 250 m/s nella matrice della scheda di valutazione). Qualora lo strato superficiale abbia una profondità inferiore ai 4 m si utilizzerà, per la scelta della curva, lo strato superficiale equivalente, a cui si assegna una velocità V_s calcolata come media pesata del valore di V_s degli strati superficiali la cui somma supera i 4 m di spessore.

Variante al PGT del comune di Barzago**Aggiornamento "Componente geologica, idrogeologica e sismica" – Analisi secondo livello sismico**

In generale nelle tabelle di calcolo si è deciso di non considerare il primo metro di profondità del primo strato, poiché esso è composto nella quasi totalità dei casi da terreni di riporto, non considerati dunque rilevanti per il calcolo del F_a e del periodo proprio del sito e comunque di norma sovrastanti le opere di fondazione.

Il periodo proprio del sito T necessario per individuare il fattore di amplificazione (vedi passaggio 3 di Figura 2) è calcolato considerando tutta la stratigrafia fino alla profondità in cui il valore della velocità V_s è uguale o superiore a 800 m/s ed utilizzando la seguente equazione, ove h_i e V_{s_i} sono lo spessore e la velocità dello strato i -esimo del modello.

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^n h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{s_i} \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \right)}$$

Il valore di F_a determinato (vedi passaggio 4° e 4b di Figura 2) dovrà essere approssimato alla prima cifra decimale e dovrà essere utilizzato per valutare il grado di protezione raggiunto al sito dall'applicazione della normativa sismica vigente.

La valutazione del grado di protezione viene effettuata in termini di contenuti energetici, confrontando il valore di F_a ottenuto dalle schede di valutazione con un parametro di analogo significato calcolato per ciascun comune e valido per ciascuna zona sismica (zona 2, 3 e 4) e per le diverse categorie di suolo soggette ad amplificazioni litologiche (B, C, D ed E) e per i due intervalli di periodo 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s.

Il parametro calcolato per ciascun Comune della Regione Lombardia è riportato nella banca dati in formato .xls (soglie_lomb.xls) e rappresenta il valore di soglia oltre il quale lo spettro proposto dalla normativa risulta insufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito. Di seguito si riportano i valori definiti per il territorio comunale di Barzago.

| Periodo | Suolo tipo | | | | |
|-------------|------------|-----|-----|-----|-----|
| | A | B | C | D | E |
| 0.1 – 0.5 s | 1 | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,0 |
| 0.5 – 1.5 s | 1 | 1,7 | 2,4 | 4,2 | 3,1 |

Tabella 1: valori di soglia (come da normativa nazionale) per il comune di Barzago.

La procedura prevede pertanto di valutare il valore di F_a con le schede di valutazione e di confrontarlo con il corrispondente valore di soglia, considerando una variabilità di ± 0.1 che tiene in conto la variabilità del valore di F_a ottenuto dalla procedura semplificata.

Si possono presentare quindi due situazioni:

- il valore di F_a è inferiore o uguale al valore di soglia corrispondente: la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito e quindi si applica lo spettro previsto dalla normativa (classe di pericolosità H1);

- il valore di Fa è superiore al valore di soglia corrispondente: la normativa è insufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica e quindi è necessario effettuare analisi più approfondite (3° livello) in fase di progettazione edilizia (classe di pericolosità H2).

La scelta dei dati stratigrafici, geotecnici e geofisici, in termini di valori di Vs, utilizzati nella procedura di 2° livello deve essere opportunamente motivata e a ciascun parametro utilizzato deve essere assegnato un grado di attendibilità, secondo la seguente tabella:

| <i>Dati</i> | <i>Attendibilità</i> | <i>Tipologia</i> |
|--------------------------|----------------------|---|
| Litologici | Bassa | Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe |
| | Alta | Da prove di laboratorio su campioni e da prove in sito |
| Stratigrafici (spessori) | Bassa | Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe |
| | Media | Da prove indirette (penetrometriche e/o geofisiche) |
| | Alta | Da indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo) |
| Geofisici (Vs) | Bassa | Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe |
| | Media | Da prove indirette e relazioni empiriche |
| | Alta | Da prove dirette (sismica in foro o sismica superficiale) |

Tabella 2 – Livelli di attendibilità da assegnare ai risultati ottenuti dall'analisi

3. ANALISI SVOLTA PER IL TERRITORIO DI BARZAGO

3.1. Effetti morfologici

Nel territorio comunale di Barzago nella tavola delle PSL è stato individuato un solo orlo di ciglio nella zona di cava (Zona Z3a).

Analizzando svariate sezioni topografiche, tra le più rappresentative dei massimi fenomeni di amplificazione individuabili, è risultato che il fattore di amplificazione risulta sempre inferiore a 1,2 poiché il rapporto tra la larghezza alla base L e l'altezza H è basso.

Pertanto l'utilizzo della classe T2-T3 della normativa, che presenta fattori di amplificazione di 1,2 è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione morfologica del sito e quindi si applica lo spettro previsto dalla normativa.

In sintesi, non sono stati rilevati effetti di amplificazione morfologica rilevanti motivo per cui non si è riportata alcuna scheda a titolo di esempio e nemmeno la sintesi delle elaborazioni svolte.

3.2. Amplificazione litologiche

3.2.1. Dati considerati per la definizione del modello sismico e litologico locale

Per caratterizzare il profilo delle Vs si è fatto riferimento alle indagini disponibili e fornite dal Comune, dalle stratigrafie dei pozzi per acqua, integrate da ulteriori e specifiche indagini geofisiche da noi eseguite. Queste sono state collocate in punti significativi e rappresentativi che hanno permesso di caratterizzare l'intero territorio comunale. Per ogni nuovo sito di indagine sono state eseguite indagini mediante la tecnica tomografica, MASW e HVSR; la descrizione delle metodologie utilizzate per le indagini sono state riportate nell'allegato n. 1.

Variante al PGT del comune di Barzago

Aggiornamento "Componente geologica, idrogeologica e sismica" – Analisi secondo livello sismico

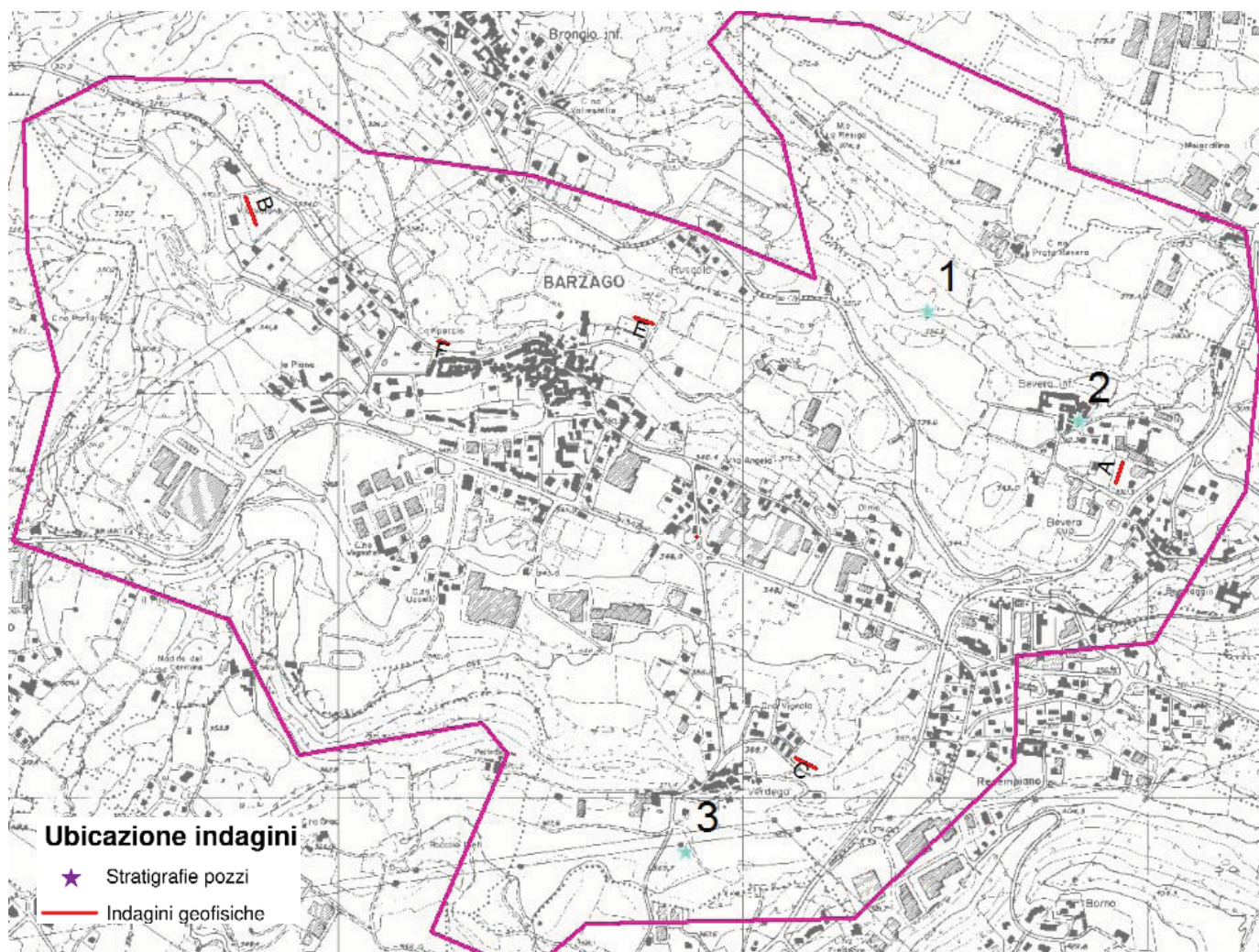
Per la ricostruzione delle caratteristiche litologiche si sono considerati tutti i dati disponibili, ricomprendendo anche la nuova carta geologica predisposta nell'ambito del progetto CARG (alla cui bibliografia si rimanda per la descrizione delle caratteristiche litologiche), ed in particolare le stratigrafie dei pozzi per acqua; nella documentazione del PGT si sono riportate solo le stratigrafie ritenute utili e rappresentative.

Per quanto riguarda le nuove indagini geofisiche eseguite specificatamente per il PGT, sono indicate con le sigle A, B e C; mentre le indagini preesistenti e fornite dal Comune con le sigle D, E ed F.

Buona parte dei dati sono riportati nella tavola dell'analisi di secondo livello allegata alla presente.

In Figura 1 si riporta l'ubicazione delle indagini più significative considerate. La linea rossa riportata per ciascuna indagine geofisica identifica lo sviluppo dello stendimento effettuato (tomografia e MASW, mentre la HVSR è stata posizionata nel punto mediano dello stendimento).

Con il simbolo della stella si sono identificati i pozzi di cui si è considerata la stratigrafia.



Variante al PGT del comune di Barzago
Aggiornamento “Componente geologica, idrogeologica e sismica” – Analisi secondo livello sismico

Figura 1: ubicazione delle indagini e stratigrafie più significative considerate.

La sintesi delle risultanze delle indagini svolte e del modello sismico e litologico derivati per ciascun sito, sono state riportate nell'allegato n. 2 per i siti A-B-C (le cui indagini sono state svolte specificatamente per il PGT), mentre nell'allegato n. 3 si sono riportate quelle fornite dal Comune.

Dall'analisi di secondo livello sono state escluse le aree identificate nella Carta di Pericolosità sismica (Carta PSL) come Z1 e Z2, nelle quali si devono eseguire specifiche e puntuali analisi di terzo livello a supporto di ciascun intervento in progetto.

3.2.2. Analisi svolta per il calcolo F_a atteso al sito

Per ogni Sito si è proceduto alla definizione del Fattore di amplificazione atteso al sito applicando la procedura proposta dalla normativa regionale, mediante l'utilizzo delle schede di cui all'allegato 5 della D.G.R. n. 2616 del 15 dicembre 2011.

La principale difficoltà nella procedura risulta essere la scelta della scheda litologica. Nella zona di Barzago sono presenti dei depositi misti contenenti percentuali variabili sia di materiale fine, prevalentemente limo, che di sabbia e ghiaia, pertanto le uniche schede che dal punto di vista litologico risultano rappresentative della media dei depositi presenti nell'area considerata, sono la sabbiosa o la limoso-sabbiosa. Nella scelta della scheda si è inoltre considerato il campo di validità dell'andamento delle V_s con la profondità.

Nella Tabella 3 si riporta la sintesi del grado di attendibilità dei dati acquisiti.

| <i>Dati</i> | <i>Attendibilità</i> | <i>Tipologia</i> |
|--------------------------|----------------------|---|
| Litologici | Bassa | Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe |
| | Alta | Da prove di laboratorio su campioni e da prove in sito |
| Stratigrafici (spessori) | Bassa | Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe |
| | Media | Da prove indirette (penetrometriche e/o geofisiche) |
| | Alta | Da indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo) |
| Geofisici (V_s) | Bassa | Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe |
| | Media | Da prove indirette e relazioni empiriche |
| | Alta | Da prove dirette (sismica in foro o sismica superficiale) |

Tabella 3 – Livelli di attendibilità dei dati utilizzati.

L'analisi del fattore di amplificazione è stata svolta secondo la procedura illustrata nel cap. n. 2.2.1 a cui si rimanda per le valutazioni specifiche.

A titolo di esempio in Figura 2 si è riportata la procedura ed i risultati ottenuti per l'indagine del Sito A, procedura valida per tutti gli altri Siti.

Indagine Sito A

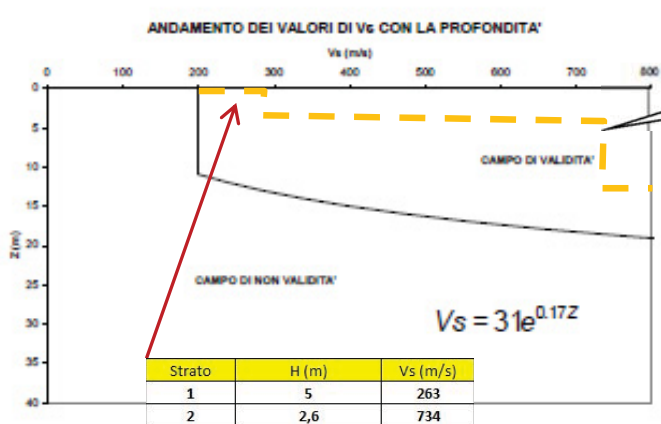
EFFETTI LITOLOGICI – SCHEDA LITOLOGIA LIMOSO – SABBIOSA TIPO 1

PARAMETRI INDICATIVI

GRANULOMETRIA:
 Da limi con sabbie debolmente ghiaiose a limi debolmente sabbioso-argillosi passando per limi con sabbie, limi debolmente argillosi, limi debolmente sabbiosi, limi debolmente ghiaiosi e sabbie con limi debolmente argillosi

NOTE:
 Comportamento coesivo
 Frazione limosa ad un massimo del 95%
 Presenza di clasti immersi con $D_{max} < 2-3$ cm
 Frazione ghiaiosa fino ad un massimo del 10%
 Frazione sabbiosa fino ad un massimo del 45%
 Frazione argillosa fino ad un massimo del 15%
 A FIANCO: range di valori per alcuni parametri geotecnici significativi validi per limi sabbiosi debolmente argillosi

1a – scelta scheda di riferimento
 Dal modello geologico= Limoso-sabbiosa tipo 1



1b – verifica validità scheda di riferimento
 Andamento V_s con profondità derivato dalla MASW 1

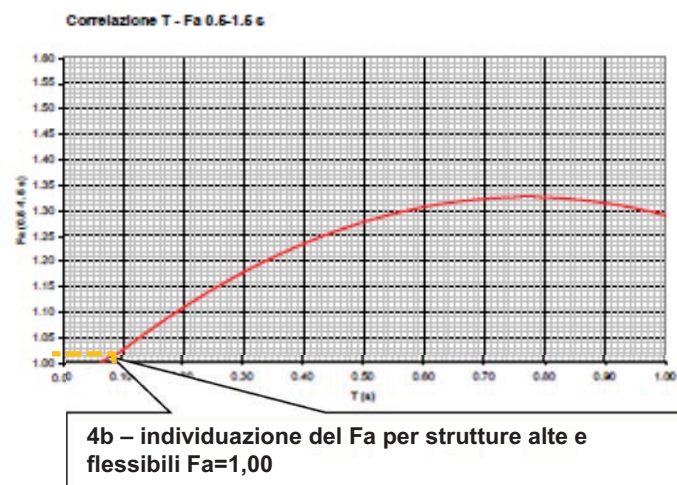
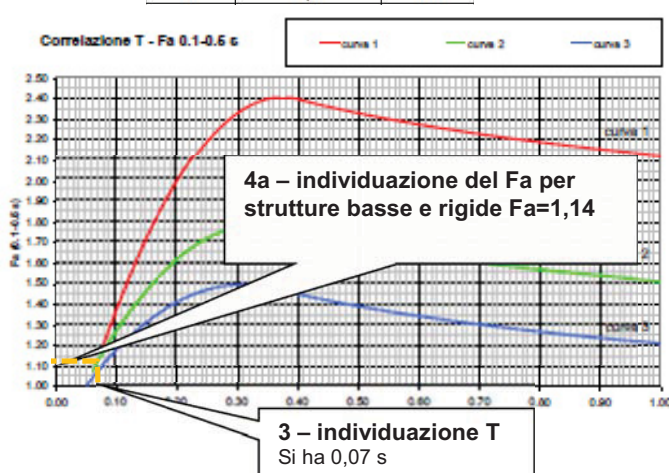
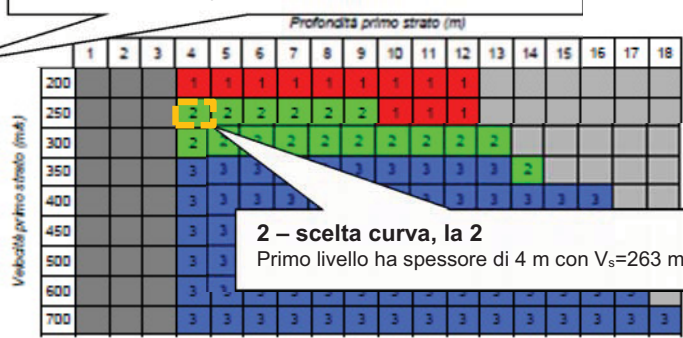


Figura 2: esempio scheda di valutazione dell'analisi di secondo livello. Sito A

3.2.3. Risultati - Valutazione del grado di protezione

Definito il fattore di amplificazione previsto al suolo per ciascun Sito si conclude l'analisi confrontando il F_a ottenuto dalle schede (vedi capitolo precedente), con valori di analogo significato derivati dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC18), specifici per ogni comune e indicati per ciascuna classe di suolo. Si ribadisce che il grado di attendibilità attribuiti ai risultati dell'analisi dei dati stratigrafici, geotecnici e geofisici, utilizzati per individuare la tipologia di scheda da utilizzare nell'analisi, sono stati riportati in Tabella 3.

Nella Tabella 4 seguente si è riportata per ciascun Sito la sintesi dei risultati ottenuti dalla procedura di secondo livello sismico.

| Sito | V_{seq} | Classe NTC18 | Scheda | Primo strato | | Curva | T_s (s) | 0,1-0,5 (s) | | 0,5-1,5 (s) | |
|------|-----------|--------------|----------------|--------------|-------------|-------|-----------|-------------|----|-------------|----|
| | | | | Spessore | V_s (m/s) | | | F_a | Cl | F_a | Cl |
| A | 263 | B | Lim sab tipo 1 | 5 | 263 | 2 | 0,07 | 1,14 | E | 1,00 | B |
| B | 329 | E | Sabbiosa | 5,6 | 225 | 2 | 0,16 | 1,45 | E | 1,13 | E |
| C | 393 | B | Lim sab 2 | 9 | 286 | 2 | 0,23 | 1,93 | E | 1,19 | B |
| D | 285 | E | Lim sab 2 | 8 | 234 | 2 | 0,23 | 1,93 | E | 1,19 | E |
| E | 274 | E | Lim sab 2 | 6 | 274 | 2 | 0,06 | 1,02 | E | 0,92 | E |
| F | 507 | B | Sabb | 4 | 200 | 2 | 0,34 | 1,68 | E | 1,22 | B |

Tabella 4: sintesi dell'elaborazione dell'analisi di secondo livello sismico per ciascun Sito.

Dalle indagini svolte è risultato che nella zona sono presenti depositi prevalentemente granulari ma eterogenei con *bedrock* posto a profondità variabili da pochi metri fino a 50 m, comportando l'individuazione di terreni caratterizzati da suoli attribuibili alla classe di suolo B o E.

Dall'analisi di secondo livello è comunque emerso che per gli edifici bassi e rigidi compresi nella categoria del periodo compreso tra **0,1 – 0,5 s** indifferentemente dalle caratteristiche locali la classe di suolo caratteristica delle NTC18 in grado di coprire i fattori di amplificazione calcolati, è sempre e solo la E. Pertanto **in fase di progettazione** si dovrà procedere con specifiche **analisi di terzo livello sismico oppure attribuire la classe di suolo E** (oppure D).

Per quanto concerne invece gli edifici alti e flessibili compresi nella categoria del periodo compreso tra **0,5 – 1,5 s** la classe di suolo caratteristica delle NTC18 risulta sempre compatibile. Pertanto in fase di progettazione sarà possibile **attribuire la classe di suolo derivante dall'indagine svolta**.

4. PRESCRIZIONI PER LA COMPONENTE SISMICA DA APPLICARSI NELLE FASI DI PROGETTAZIONE

Dall'analisi di secondo livello è emerso che nella progettazione di strutture basse e rigide, aventi un periodo di vibrazione compreso tra 0,1 – 0,5 s, la norma nazionale è in grado di rappresentare sufficientemente l'amplificazione sismica locale prodotta dalla stratigrafia alluvionale solo per la classe di suolo E (oppure D).

Si specifica che la sovrapposizione delle prescrizioni sismiche derivanti dall'analisi di secondo livello svolta non comporta un automatico cambio di classe di fattibilità ma fornisce indicazioni su dove poter utilizzare, in fase di progettazione, lo spettro di risposta elastico previsto dal DM 17 gennaio 2018, oppure dove sia necessario realizzare preventivamente gli studi di 3^a livello, fermo restando la possibilità di utilizzare i parametri di progetto previsti dalla normativa nazionale per la categoria di suolo superiore.

Pertanto in conclusione e facendo riferimento alla suddivisione riportata nella figura di pag. 9, ferma restando la possibilità del Progettista di eseguire specifici approfondimenti e valutazioni, si individuano i seguenti casi.

| SCENARIO | | ATTIVITÀ IN FASE DI PROGETTAZIONE |
|--|-----------------------------|--|
| Sigla | Descrizione | |
| Z3 | Amplificazioni topografiche | Utilizzo classe topografica T2 - T3 |
| Z4 e strutture basse e rigide (T=0,1 – 0,5 s) | Amplificazioni litologiche | Approfondimenti mediante analisi di terzo livello In alternativa utilizzo della classe di suolo E |
| Z4 e strutture alte e flessibili (T=0,5 – 1,5 s) | Amplificazioni litologiche | Utilizzo della classe di suolo derivante dalle indagini |

ALLEGATO 1

Descrizione metodologia esecuzione indagini geofisiche

INDAGINI GEOFISICHE CON LA TECNICA MASW

Descrizione della prova

Nelle prospezioni sismiche per le quali si utilizzano le onde di tipo P, la maggior parte dell'energia sismica totale generata si propaga come onde superficiali di tipo Rayleigh.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente in frequenza di queste onde è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) e quindi da una diversa lunghezza d'onda.

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

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

Per ottenere un profilo verticale di velocità V_s bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. Nel tempo sono state utilizzate diverse tecniche per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi.

La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a rifrazione. Una MASW può essere efficace anche con solo dodici canali di registrazione collegati a geofoni verticali a bassa frequenza (4.5 Hz).

Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S (V_s) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- acquisizione dei dati sperimentali;
- estrazione della curva di dispersione;
- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s (profilo 1-D), che descrive la variazione di V_s con la profondità. In questi metodi frequenza – numero d'onda (denominati anche metodi f-k), l'analisi dei segnali viene condotta trasformando le tracce sismiche acquisite nel dominio spazio – tempo (x, t) nel dominio frequenza – numero d'onda ($\omega-k$), mediante l'applicazione della trasformata bidimensionale di Fourier.

La prova SASW eseguite in modalità multi-stazione viene indicata con l'acronimo MASW (Multistation Analysis of Surface Waves) e serve per determinare il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , dunque:

- il tipo di suolo sismico (A, B, C, D, E, S1, S2);
- le azioni sismiche con cui progettare e verificare le opere di Ingegneria Civile;
- il modulo di rigidezza del terreno;
- i cedimenti e gli spostamenti delle opere interagenti con il terreno: edifici, ponti, rilevati arginali, opere di sostegno, etc.

I principali vantaggi della tecnica MASW sono i seguenti:

- forniscono il profilo di velocità delle onde di taglio V_s oltre 30 m di profondità;
- consentono di individuare il tipo di suolo sismico;

- a differenza della sismica a rifrazione, si utilizzano in qualunque situazione stratigrafica pseudo-orizzontale, anche in presenza di falda;
- non sono invasive, non occorre eseguire perforazioni;
- non implicano nessun danneggiamento allo stato dei luoghi e delle cose;
- rapidità e facilità di esecuzione e di elaborazione dati;
- ingombro limitato delle attrezzature per l'esecuzione delle prove;
- mobilità, trasporto agevole della strumentazione necessaria per eseguire le prove.

Modalità esecutive

Le operazioni di campagna sono identiche a quelle che si effettuano in rilievi di sismica a rifrazione tipo standard.

Si energizza il terreno mantenendo un guadagno costante su tutti i canali e si registra direttamente il segnale ad ogni geofono.

Occorre tener presente che la lunghezza dello stendimento definisce la profondità di indagine raggiungibile, mentre l'interdistanza tra i geofoni definisce il dettaglio della restituzione interpretativa. Questi due parametri devono quindi essere calibrati in modo da consentire di raggiungere il massimo dettaglio possibile per la profondità di indagine richiesta e per i livelli di strati di terreno previsti.

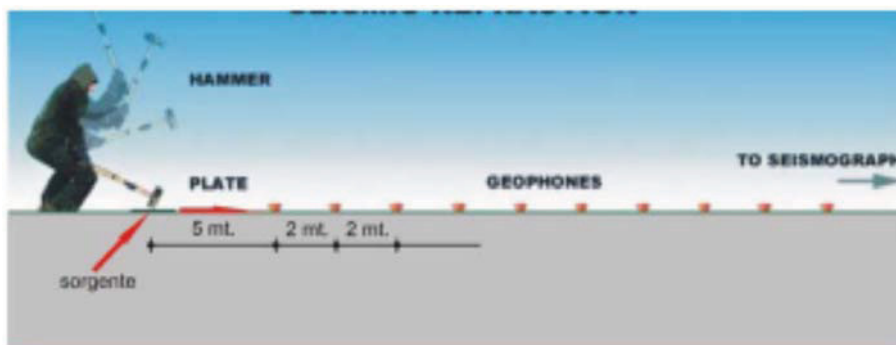
L'energizzazione del terreno (sorgente di energia) è ottenuta impiegando un'apposita mazza dal peso di 9 Kg, la quale viene fatta collidere col suolo generando così onde elastiche. Si prevedono più ripetizioni dell'energizzazione per garantire l'apprezzabilità dei segnali raccolti dal sistema di acquisizione dati. Si consideri che una massa del peso di 9 Kg circa (in quantità pari a n. 1 battuta) genera circa 100 J di energia.

Infine, il rilievo altimetrico dei punti - geofono e dei punti di energizzazione è ricostruito in loco in maniera puntuale e restituito cartograficamente in scala adeguata. La topografia irregolare è una condizione sufficientemente comune nella pratica di rifrazione ed influisce avversamente sulla definizione del rifrattore (funzioni tempo-profondità); ne consegue l'importanza di definire con maggior dettaglio possibile il dislivello lungo il profilo sismico impostato.

Caratteristiche attrezzatura utilizzata

Le prove sono state eseguite per mezzo della strumentazione di seguito elencata:

- Acquisitore digitale multi – canale nel caso specifico un sismografo PASI 16SG24 a 24 canali;
- Ricevitori (geofoni da 4.5 Hz) capaci di misurare il campo di moto nella direzione verticale;
- Sorgente sismica impulsiva costituita da mazza di 9 kg.



Software di interpretazione dei dati sismici

L'elaborazione dei dati è stata garantita dall'utilizzo del software WinMASW 4.1 della ElioSoft di Palmanova (UD); le principali caratteristiche di questo programma si possono così sintetizzare:

- Analisi di sezioni bidimensionali del terreno su dati raccolti mediante acquisizioni multiple, ottenute tramite la traslazione dell'array dei ricevitori;
- Interfaccia grafica studiata per rendere semplice l'uso degli strumenti disponibili, come:
 - L'impostazione dei parametri che definiscono il modello sintetico per l'inversione del modello del terreno in modalità interattiva;
 - *Picking* dello spettro per l'estrazione delle curve di dispersione;
 - *Editing* della curva di dispersione sperimentale;
- Algoritmi di calcolo completi, veloci ed efficienti;
- Calcolo spettro FK, FV, FX;
- Molteplici finestre di *windowing* (*boxcar, hamming, hanning, blackman...*);
- Parametrizzazione del modello sintetico del terreno fino ad almeno 30 metri;
- Controllo dei principali parametri dell'inversione (numero massimo delle iterazioni, tolleranza sui parametri, quantificazione del disturbo);
- Esportazione delle immagini nei più comuni formati grafici;
- Editing della curva di dispersione sperimentale.

L'elaborazione dei dati di campagna si compone delle seguenti fasi:

- *Pre-processing*, per pulizia da fenomeni di disturbo sul segnale utile, dovuto a sorgenti ambientali non controllabili, e assemblaggio di *array* virtuali, per ovviare alla limitazione del numero di geofoni disponibili in campagna;
- Analisi spettrale del sismogramma ottenuto, condotta mediante l'utilizzo di vari parametri matematici, che consentono di adattarsi alle esigenze dell'utente;
- Estrazione (manuale od automatica) della curva di dispersione sperimentale, e sua visualizzazione nel dominio della frequenza o della lunghezza d'onda;
- Generazione di una curva di dispersione, basata su modello sintetico del terreno, mediante la caratterizzazione, per ciascuno strato, dello spessore dello strato stesso, della velocità delle onde S, della velocità delle onde P, della densità del terreno;
- Inversione del modello sintetico in modalità interattiva o automatica (inversione basata sulle velocità delle onde S o sugli spessori degli strati);
- A seguito della interpretazione eseguita viene fornito anche il valore della V_s del sito, consentendone la classificazione secondo le normative tecniche, attualmente in corso, in materia di progettazione antisismica.

INDAGINI GEOFISICHE CON LA TECNICA HVSR

Descrizione della prova

La tecnica HVSR (*Horizontal-Vertical Spectral Ratio*), o tecnica di Nakamura, è una tecnica di indagine geofisica passiva dove, invece di avere una sorgente attiva di onde sismiche, viene registrato, tramite un geofono triassiale, il rumore di fondo, con la presenza di un operatore che controlla solamente l'apparato di acquisizione. Come sorgente di energizzazione del terreno, infatti, il metodo HVSR utilizza i microtremiti, ovvero delle piccole oscillazioni onnipresenti nel sottosuolo, generate da sorgenti naturali (onde che impattano sulla costa, condizioni meteorologiche, tremore vulcanico, ecc.) o da sorgenti antropiche (traffico veicolare, industrie, ecc.). Questo metodo di indagine effettua un'analisi delle tre componenti del moto del suolo (una componente verticale e due componenti orizzontali), in termini di rapporti spettrali. Nello specifico, il metodo calcola la funzione di trasferimento del mezzo, ovvero le modalità con cui il moto sismico viene alterato nel suo passaggio da una roccia rigida profonda ad una copertura sedimentaria superficiale. Tale funzione viene calcolata attraverso la formula del *Quasi Transfer Spectrum* (QTS): si tratta di un'equazione in grado di approssimare lo spettro della funzione di trasferimento generata dalla copertura sedimentaria. La tecnica HVSR consente di effettuare delle ricostruzioni del sottosuolo e di definire la risposta sismica di una zona analizzata, indagando la frequenza di risonanza f_0 dei mezzi attraversati dalle onde sismiche.

La tecnica HVSR consente di ottenere indicazioni "quali-quantitative" sulle caratteristiche geomeccaniche del sito che possono determinare effetti di amplificazione sismica locale, con particolare riferimento all'individuazione della frequenza di risonanza f_0 (o periodo $T_0 = 1/f_0$) e indicazioni sul contrasto di impedenza sismica. La frequenza di risonanza è in funzione della velocità di propagazione nel sottosuolo delle onde S e dello spessore dello strato considerato. Tramite l'individuazione della f_0 si riesce a risalire allo spessore dello strato grazie a questa equazione:

$$f_0 = V_s/4H$$

dove H è lo spessore dello strato.

La frequenza di risonanza non è correlata solamente al contrasto di impedenza tra le coperture ed il *bedrock*, ma in generale è legata ai principali contrasti di impedenza presenti nella sismo-stratigrafia caratterizzante il sito. Nota la velocità e registrata la frequenza ottenuta dai rapporti spettrali è quindi possibile ottenere una ricostruzione sismo-stratigrafica. Si definisce "*bedrock*" o "basamento sismico" quella unità geologica-geofisica che non evidenzia effetti di amplificazione sismica locale e che è caratterizzata da parametri geotecnici e geofisici tali da indurre una risposta sismica unitaria (lo spettro è pari ad 1). Non corrisponde necessariamente al *bedrock* geologico.

L'analisi HVSR viene in genere effettuata con la finalità di integrare la caratterizzazione geofisica e geotecnica dei terreni, tramite l'elaborazione di modelli $V_s - z$, dove z è la profondità. Solitamente questi modelli sono ottenuti tramite integrazione di dati derivati da inversione congiunta di metodi di indagine diversi, quali la sismica a rifrazione, la tecnica MASW e la tecnica HVSR stessa. Tuttavia, in certi casi la sola indagine HVSR può permettere di effettuare la ricostruzione del profilo sismo-stratigrafico.

La tecnica HVSR permette inoltre di integrare ed estendere arealmente la stima quantitativa delle amplificazioni effettuata mediante modellazione numerica o mediante rapporti spettrali di eventi sismici utilizzando micro-reti sismologiche temporanee (SSR), in supporto alla microzonazione sismica.

La tecnica HVSR è vantaggiosa in quanto richiede analisi semplici e veloci. La procedura di acquisizione è caratterizzata dall'utilizzo di una sola stazione, non di reti di più ricevitori o stendimenti sismici. È quindi possibile caratterizzare in poco tempo molti siti ed analizzare un'area vasta. Effettuando più misure lungo un transetto scelto è infatti possibile osservare la variazione dei picchi di frequenza è quindi seguire la variazione di spessore degli strati.

I risultati delle misure HVSR possono essere utilizzati per costruire una mappa o più mappe degli f_0 (T_0) dell'area indagata.

Il metodo HVSR utilizza 3 sensori; perché la misura sia affidabile le curve di risposta dei tre sensori devono essere teoricamente uguali o con differenze minime (massimo 2-3%).

È buona pratica effettuare una calibrazione dei sensori presso la casa costruttrice o in alternativa effettuando un cluster (misura con sensori vicini a pochi centimetri) con altra strumentazione dello stesso tipo e/o di tipo diverso.

Ipotesi Nakamura – Quasi Transfer Spectrum

La procedura Nakamura è la più utilizzata per elaborazioni di indagini HVSR. Dal punto di vista operativo, vengono eseguite misure di rumore di fondo, acquisendo diverse registrazioni in diversi punti del sito di interesse nell'arco di una giornata. In genere è possibile acquisire molti dati in un ridotto intervallo temporale, arrivando a fino a 8 – 10 misure al giorno. Spesso è meglio fare le acquisizioni durante la notte, quando il disturbo antropico è minimo.

La strumentazione è identica a quella che viene utilizzata per l'analisi dei rapporti spettrali con sito di riferimento, ma in questo caso non è necessario alcun sito di riferimento. Inoltre, dovendo utilizzare una singola stazione sismologica, è sufficiente un singolo operatore. In questo modo, con una singola stazione si caratterizza un'area più o meno estesa, andando a misurare il rumore ambientale: l'obiettivo è effettuare il rapporto tra le componenti orizzontali del moto e la componente verticale (H/V). Considerando la componente del moto verticale uguale a 1 (analogamente al *bedrock*), sulla base di considerazioni sperimentali, la funzione di trasferimento orizzontale degli strati superficiali SR(f) è data dal rapporto degli spettri delle componenti orizzontali (H) al sito (S) e al *bedrock* affiorante (R):

$$\mathbf{SR(f) = HS (f) / HR (f)}$$

(Standard Spectral Ratio)

- Ipotesi 1): HR(f) = HB(f); VR(f)=VB(f); se H piccolo: non si hanno variazioni significative in ampiezza tra *bedrock* alla base delle coperture (B) e in R;
- Ipotesi 2): HR(f)=VR(f); verificata sperimentalmente.

Il rapporto tra le componenti verticali, al sito in superficie e al *bedrock* alla base del deposito, fornisce lo spettro cumulato delle sorgenti di microtremori nel deposito:

$$\mathbf{AS (f) = VS (f) / VB (f)}$$

Supponendo uguali in tutte le direzioni e omogeneamente distribuite le sorgenti di microtremori, il rapporto:

$$\mathbf{SM (f) = SR (f) / AS (f) = [HS(f) / HR(f)] / [VS(f) / VB(f)] = [HS (f) / VS (f)] * [VB (f) / HR(f)]}$$

fornisce la funzione di trasferimento degli strati superficiali depurata dell'effetto sorgente "Quasi Transfer Spectrum =HVSR" (Nakamura,1989).

Assumendo valide le ipotesi 1 e 2, VB(f)/HR(f) = 1 la quasi-funzione di trasferimento, è quindi data dal rapporto tra le componenti orizzontali e quella verticale registrate al sito in superficie:

$$\mathbf{HVSR (f) = HS (f) / VS (f)}$$

Normalmente dopo un picco (a cui corrisponde la frequenza massima) si osservano una discesa e un nodo: è il risultato dell'analisi di un rapporto spettrale. Nell'analisi si va a studiare l'ellitticità (ellitticità orizzontale = picco; ellitticità verticale = nodo) delle onde di Rayleigh.

Il rapporto HVSR può essere considerato difatti come una misura dell'ellitticità delle onde di Rayleigh. L'ellitticità reale è ottenuta dalla misura HVSR mediante un metodo di filtraggio delle onde sismiche basato sull'analisi della polarizzazione o del moto della particella che seleziona la porzione di segnale caratterizzata da un moto planare ellittico. In corrispondenza della frequenza di picco prevale la componente orizzontale mentre in corrispondenza della frequenza di nodo prevale la componente verticale

Per le misure di microtremori HVSR è consigliata l'esecuzione secondo lo standard SESAME (progetto europeo):

- durata registrazione ≥ 30 min. Questa consente normalmente di avere un numero di finestre sufficiente per fare l'analisi, ma possono essere sufficienti anche 10 minuti se in fase di elaborazione si riesce ad individuare un numero adeguato di finestre; la durata della registrazione va comunque estesa in modo da ottenere un numero di finestre di rumore dalla lunghezza compresa tra 25 e 30 sec, prive di transienti, ovvero picchi anomali che possano inficiare la misura, non inferiore al numero di 20. Questo serve per avere un valore mediano significativo. In alternativa possono essere selezionate finestre manuali che garantiscano un'analisi su almeno 10 min di tremore privi di transienti significativi;
- frequenza campionamento ≥ 100 Hz (relazione di Nyquist);
- sensore velocimetrico a tre componenti con bassa frequenza propria, in genere ≤ 1 Hz, ma sono accettabili anche sensori a frequenze maggiori (2 Hz);
- orientazione del sensore orizzontale verso Nord.

Il numero totale di misure da effettuare e la loro ubicazione dipende dall'estensione dell'area e dalle caratteristiche geolitologiche e morfologiche individuate per l'area stessa con il supporto di studi di microzonazione MOPS I e II livello, carte geologiche e carte geolitologiche. Le misure possono essere più fitte o più rade, ma devono andare a caratterizzare tutta l'area, geologicamente e geomorfologicamente. Con questo metodo è possibile ottenere anche lo spessore degli strati, fino ad arrivare a quello a più alta competenza. Gli strati ad alta competenza sono identificati dai picchi.

Elaborazione e software di interpretazione dei dati sismici

Per l'elaborazione delle registrazioni ottenute e l'inversione delle curve di ellitticità al fine di ottenere un modello rappresentativo del sottosuolo in termini di Vs e z sono stati utilizzati il software *Geopsy* e il suo applicativo *dinver*.

In fase di acquisizione sono state salvate in formato .saf le tracce registrate tramite il software "PASI gemini". Le tracce sono state quindi caricate sul programma *Geopsy*. In fase di *pre-processing* sono state selezionate automaticamente delle finestre temporali di lunghezza compresa tra 25 e 30 s con *overlap* del 5% lungo tutta la traccia, le quali sono state utilizzate per l'analisi spettrale e per il calcolo del rapporto H/V. È stato applicato il comando *Anti-triggering* sia per il segnale grezzo sia per il segnale filtrato; sono stati inoltre assegnati i seguenti valori:

- STA (*short term average*): 1,00 s;
- LTA (*long term average*): 30,00 s;
- Min STA/LTA: 0,20;
- Max STA/LTA: 2,50.

In fase di *Processing* è stato impostato un lisciamento con finestra Konno-Ohmachi, con costante pari a 40, in modo da ottenere un segnale più smussato. Le componenti orizzontali sono state combinate mediante media quadratica tra N(f) e E(f) secondo la seguente relazione:

$$H(f) = \sqrt{\frac{N^2(f) + E^2(f)}{2}}$$

In fase di elaborazione dell'output H/V è stato selezionato un intervallo di frequenze compreso tra 0,5 Hz e 45 Hz con 100 valori spazati in scala logaritmica.

È possibile effettuare l'analisi della direzionalità degli HVSR per valutare la polarizzazione della sorgente di rumore e la lettura e classificazione delle frequenze f_0 di picco HVSR in intervalli definiti di frequenza (o periodo), in modo da ottenere un'interpretazione grazie alla relazione $f_0 = V_s/4H$. L'inversione dei dati di ellitticità da HVSR per la definizione di modelli Vs-z monodimensionali è stata effettuata tramite l'applicativo *dinver*.

Caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata

Le prove sono state eseguite per mezzo della strumentazione di seguito elencata:

- geofono triassiale modello – tomografo Gemini2 della PASI di Torino.

Lo strumento consiste in un unico contenitore *waterproof* al cui interno è integrata una terna di geofoni e un acquirente hardware da 24 bit. Le masse oscillanti presentano una frequenza di risonanza di 2Hz sono accuratamente accoppiate meccanicamente ed elettricamente.

Collegando lo strumento ad un computer tramite l'interfaccia USB, questo strumento consente la memorizzazione dei dati direttamente tramite un software dedicato. I tre geofoni interni sono orientati secondo una terna di assi cartesiani; assumendo la convenzione descritta nelle linee guida del Progetto SESAME:

- asse Z = geofono verticale (direzione Up-Down);
- asse X = geofono orizzontale (direzione East-West);
- asse Y = geofono orizzontale (direzione North-South).

Prima di effettuare l'acquisizione lo strumento deve essere opportunamente orientato in corrispondenza del N magnetico. Ciò è possibile tramite un'etichetta posizionata direttamente sul contenitore; inoltre, la terna deve essere livellata prima dell'acquisizione, operazione facilitata con l'ausilio della livella a bolla montata sul corpo dello strumento. Lo strumento può essere accoppiato al terreno grazie all'utilizzo di appositi puntali. Nell'immagine sottostante sono riportate le specifiche tecniche dello strumento.

Specifiche sensore Gemini-2:

Freq. Naturale di risonanza: 2 Hz +/-10%

Sensibilità: $2 \text{ V/cm} \cdot \text{S}^{-1}$ +/- 5%

Resistenza interna: $5.8 \text{ k}\Omega$ +/-5%

Damping: 0.7 +/-10%

Distorsione armonica: $\leq 0.2\%$

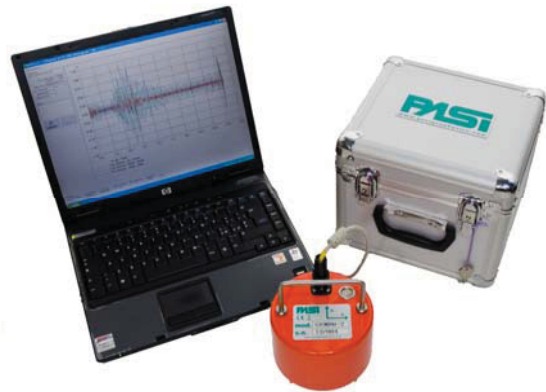
Resistenza d'isolamento: $\geq 10 \text{ M}\Omega$

Temp.funzionamento: da -25°C a $+55^\circ\text{C}$

Bloccaggio sensori: automatico per il trasporto

Dimensioni: diam.128mm, h.175mm

Peso: 2.15 kg



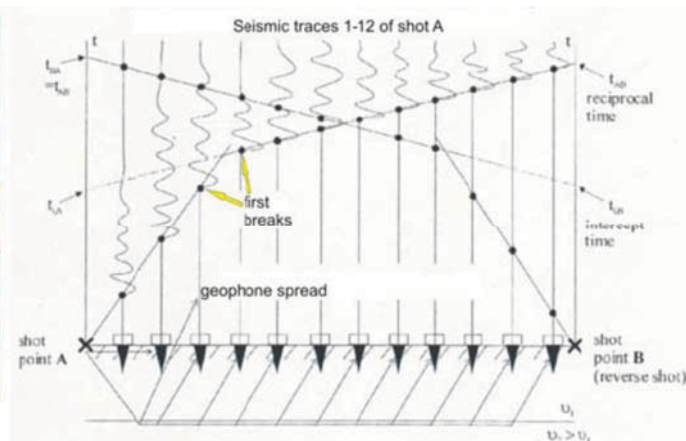
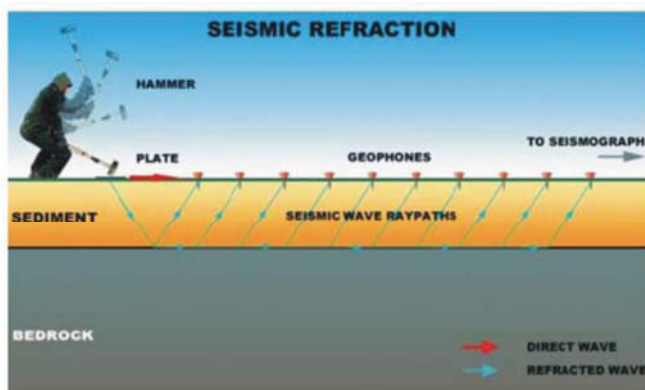
CERTIFICATO DELL'INDAGINE GEOFISICA CON LA TECNICA DELLA TOMOGRAFIA A RIFRAZIONE

| | |
|---------------------------|---|
| Denominazione prove | Indagine geofisica con tecnica tomografia sismica |
| Procedura interpretazione | Elaborazione mediante individuazione dei primi arrivi delle onde generate da energizzazioni con massa battente e interpretazione mediante la tecnica dei raggi sismici con ricostruzione della velocità sismica |

Descrizione della prova

I metodi convenzionali di sismica a rifrazione mirano a determinare la distribuzione nello spazio delle velocità delle onde sismiche nel sottosuolo (onde "p" – onde "s"). Queste velocità possono essere correlate a parametri geologici e petrofisici quali tipo di roccia, porosità, erosione superficiale, saturazione d'acqua ed elasticità.

In linea generale una campagna sismica a rifrazione prevede l'energizzazione del terreno mediante l'onda d'urto prodotta dall'impatto sul terreno di una mazza di battuta o carica esplosiva; il compito del sismografo è quello di misurare il tempo impiegato dalla "perturbazione sismica" indotta nel terreno a percorrere la distanza tra sorgente e geofoni, opportunamente spaziatati lungo un profilo.



La velocità di propagazione dell'onda sismica dipende dalle caratteristiche elastiche del sottosuolo e dalla sua conformazione; la relazione tra velocità e distanza sorgente-geofono (dromocrona) permette, attraverso opportuni calcoli matematici, di risalire agli spessori degli strati che caratterizzano il sottosuolo investigato.

L'analisi permette di individuare i principali rifrattori caratterizzati da significativi contrasti di impedenze di velocità.

Modalità esecutive

Le operazioni di campagna comporta l'energizzazione lungo l'allineamento dello stendimento del terreno in più punti speculari tra loro. La prima fase prevede alcuni shots di prova con lo scopo di tarare i parametri di acquisizione dello strumento.

Una volta effettuata la taratura si registrano, in modo sequenziale, tre o più basi sismiche opportunamente ubicate secondo quanto stabilito; ciascuna base prevede una stesa del cavo sismico per la lunghezza stabilita e le si registrano su 12 geofoni. La spaziatura dei punti di ricezione delle onde sismiche (geofoni) dipende dalla lunghezza dello stendimento; inoltre ciascuna base di norma prevede 5-7 punti di energizzazione (shots) così distribuiti: due alle estremità e tre posizionati all'interno di ciascun profilo sismico.

Occorre tener presente che la lunghezza dello stendimento definisce la profondità di indagine raggiungibile, mentre l'interdistanza tra i geofoni definisce il dettaglio della restituzione interpretativa. Questi due parametri devono quindi essere calibrati in modo da consentire di raggiungere il massimo dettaglio possibile per la profondità di indagine richiesta.

L'energizzazione del terreno (sorgente di energia) è ottenuta impiegando una apposita mazza del peso di 9 Kg, che viene fatta collidere col suolo generando così onde elastiche. Si prevedono più ripetizioni dell'energizzazione per garantire l'apprezzabilità dei segnali raccolti dal sistema di acquisizione dati. Si consideri che una massa del peso di 9 Kg. circa (in quantità pari a n. 1 battuta) corrisponde a circa 100 J di energia.

Infine, il rilievo altimetrico dei punti - geofono e dei punti di energizzazione è ricostruito in loco in maniera puntuale e restituito cartograficamente in scala adeguata. La topografia irregolare è una condizione sufficientemente comune nella pratica di rifrazione ed influisce avversamente sulla definizione del rifratore (funzioni tempo-profondità); ne consegue l'importanza di definire con maggior dettaglio possibile il dislivello lungo il profilo sismico impostato.

Descrizione attrezzatura utilizzata

La metodologia usata per l'acquisizione dei dati a rifrazione consiste in stendimenti sismici con l'impiego di 12 geofoni a frequenza naturale di 4,5 Hz a componente verticale, collegati, tramite un cavo multipolare, al sismografo; tali geofoni sono apparecchi che segnalano i movimenti del terreno, trasformando l'energia sismica in energia elettrica.

Si utilizza inoltre un geofono (geofono del time break o hammer switch) posizionato in fregio all'apparato energizzatore, che costituisce il dispositivo di trigger per l'inizio della registrazione. Il sismografo utilizzato per l'acquisizione dei dati in campagna è il modello 16SG24 prodotto dalla ditta Italiana PASI, Tale strumentazione è dotata di sommatoria del segnale con possibilità di filtratura diversa in funzione dei disturbi da eliminare.

Software di interpretazione dei dati sismici

Come software di interpretazione è stato utilizzato Zond2D ver. 4.1 della Zond geophysical di San Pietroburgo.

La prima fase consiste nel processo di inserimento del profilo topografico, la geometria dello stendimento e delle energizzazioni e l'individuazione dei primi arrivi. La seconda fase consiste nel calcolo delle dromocrone, utilizzando un procedimento di ricerca di minimo sviluppato in forma analitica che garantisce il riconoscimento delle dromocrone che in assoluto presentano il miglior coefficiente di correlazione con i tempi di primo arrivo precedentemente determinati.

La prima procedura di elaborazione tomografica consiste nella ricerca della geometria di percorso dei raggi sismici da ogni punto di energizzazione a ciascun geofono.

Questa operazione viene eseguita utilizzando una prima modellazione in velocità del sottosuolo; il programma sulla base di una prima modellazione in velocità del sottosuolo traccia i vari raggi sismici che coprono tutta l'area investigata al di sotto del piano topografico sul quale è stato steso l'allineamento sismico di pertinenza.

Il passo successivo prevede l'applicazione di procedure che forniscono valori di velocità sismica per partizioni unitarie. Mediante un processo iterativo dalla prima modellazione del sottosuolo si fanno convergere i dati modellati con quelli reali e corrispondenti ai tempi ottenuti dalle dromocrone originali; il processo termina quando gli scarti quadratici e le varianze dei tempi calcolati sono minimi rispetto a quelli definiti in input.

Le successive elaborazioni risultano sempre più affinate basandosi sull'osservazione del *fit* tra le dromocrone sintetiche e quelle calcolate e terminano, a discrezione dell'interprete, quando sono il più possibile coincidenti e con scarto minimo $\leq 0.5\%$. Per addivenire a tale risultato sono utilizzati due metodi in modo da discriminare ulteriormente le risultanze: *Smooth Inversion* e *Delta t-V*. Il secondo metodo è sconsigliato in presenza di topografie esasperate o in presenza di strutture inclinate.

Risultati dell'elaborazione

La documentazione finale dell'indagine è costituita dalla sezione verticale interpretativa con individuazione di campiture di colore corrispondenti a specifici valori di velocità delle onde di compressione espresse in km/s.

Sulle sezioni sopra del profilo topografico è riportata la numerazione dei geofoni per migliori riferimenti planimetriche e la posizione delle energizzazioni.

Vantaggi dell'interpretazione tomografica

L'analisi tomografica, dove il sottosuolo investigato dalla linea sismica viene diviso in minime celle analitiche, permette un'elaborazione più dettagliata rispetto all'analisi standard per rifrattori (es. metodo GRM) consentendo di distinguere, con rappresentazioni a linee di isovelocità, intorni minimi con caratteristiche differenziate per variazioni di consistenza, grado di alterazione, granulometria e addensamento. La prospezione sismica con tecnica tomografica, grazie al suo dettaglio, può “esaltare” effetti di anisotropia laterale anche all'interno di un livello litostratigrafico indicati da significative variazioni dei valori di velocità di propagazione delle onde elastiche che evidenziano strati alterati non sempre individuabili direttamente. L'elaborazione tomografica è in grado quindi di differenziare maggiormente le variazioni nel grado di consistenza dell'ammasso roccioso rispetto anche alle altre tecniche sismiche; inoltre con questa tecnica si sopperisce alla mancanza di rifrattori significativi e alla presenza di materiale non sufficientemente differenziato nei termini fisici dei parametri elastici, per cui le tecniche tradizionali di sismica a rifrazione non riescono a discriminare il grado di consistenza, alterazione o disomogeneità dell'ammasso.

Infine la tecnica permette di raggiungere maggiori profondità d'investigazione sopperendo alla comune mancanza di rifrattori significativi procedendo in profondità.

ALLEGATO 2

Indagini svolte a supporto del PGT

INDAGINE SITO A

Ubicazione indagine
Via Santuario Inferiore – Barzago
525.902 - 5.066.784 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)

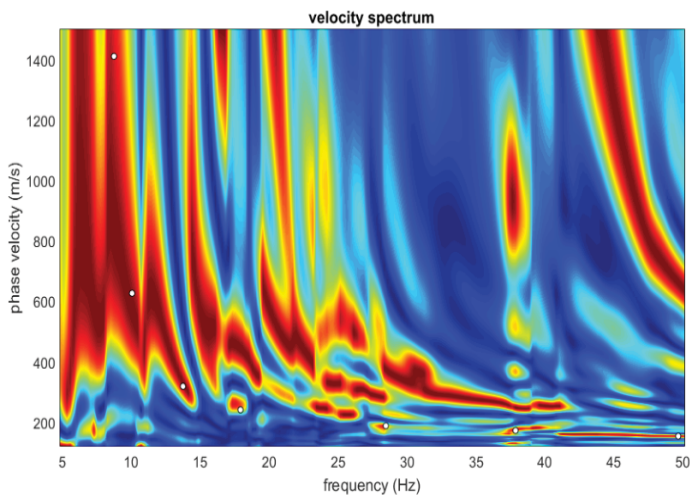


DATI DELL'ACQUISIZIONE MASW e Tomografia

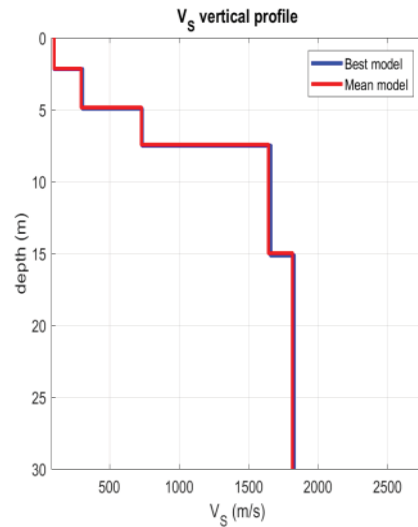
Acquisitore= sismografo multi-canale PASI 16SG24 a 24 canali
Numero geofoni= 12-verticali
Frequenza geofoni= 4,5 Hz
Distanza intergeofonica= 4 m
Energizzazione= mazza da 9 kg
Durata acquisizioni= 0,5 s (Tomo) – 2 s (MASW)
Tempo campionamento= 0,128 (Tomo) – 2 (MASW) ms
Filtri= nn
Data acquisizione= Aprile 2023

MASW

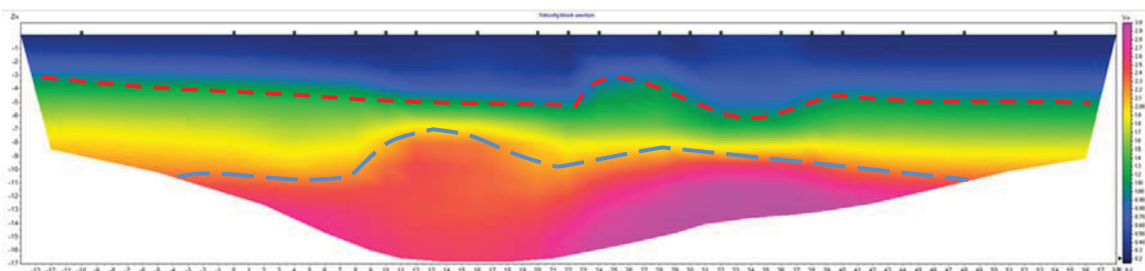
Curva di dispersione calcolata e spettro delle velocità con il *picking*



Andamento delle Vs con la profondità (VS model in m/s)



TOMOGRAFIA SISMICA

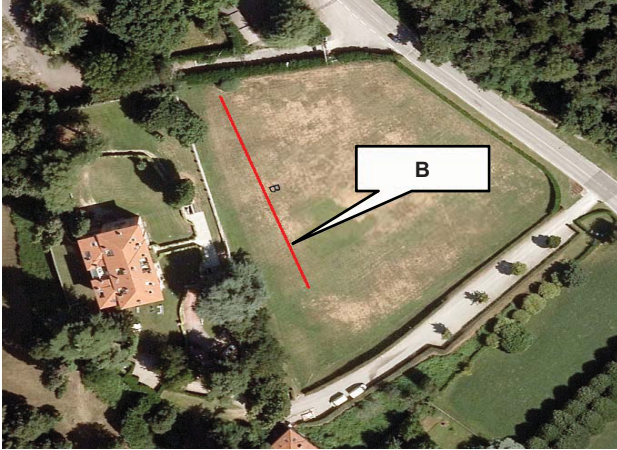


INDAGINE SITO B

Ubicazione indagine

Via Como – Barzago

523.753 - 5.067.433 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)



DATI DELL'ACQUISIZIONE

Acquisitore= sismografo multi-canale PASI 16SG24 a 24 canali

Numero geofoni= 12-verticali

Frequenza geofoni= 4,5 Hz

Distanza intergeofonica= 4 m

Energizzazione= mazza da 9 kg

Durata acquisizioni= 0,5 s (Tomo) – 2 s (MASW)

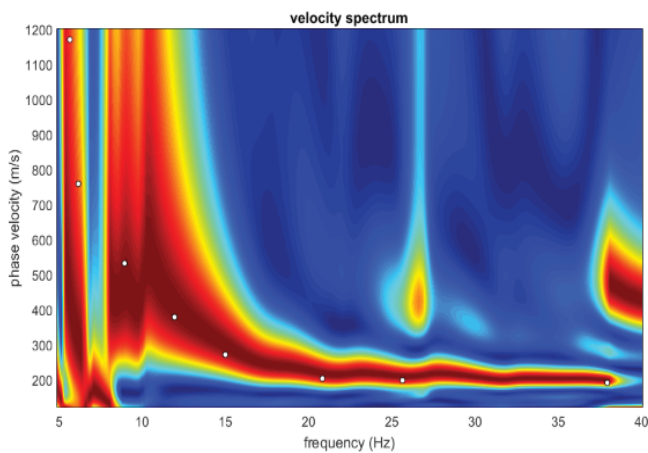
Tempo campionamento=0,128 ms (Tomo) –2 ms (MASW)

Filtri= nn

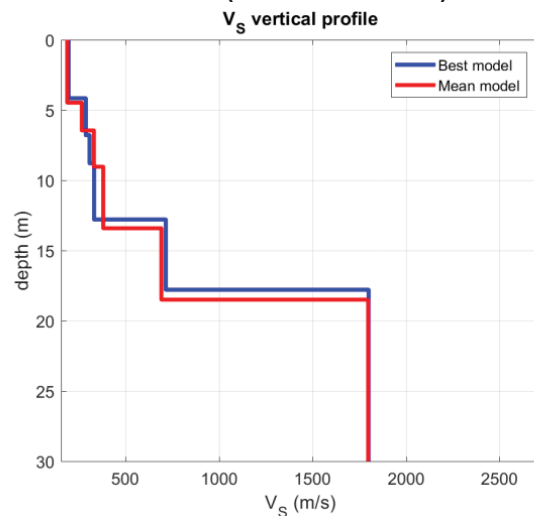
Data acquisizione= Aprile 2023

MASW

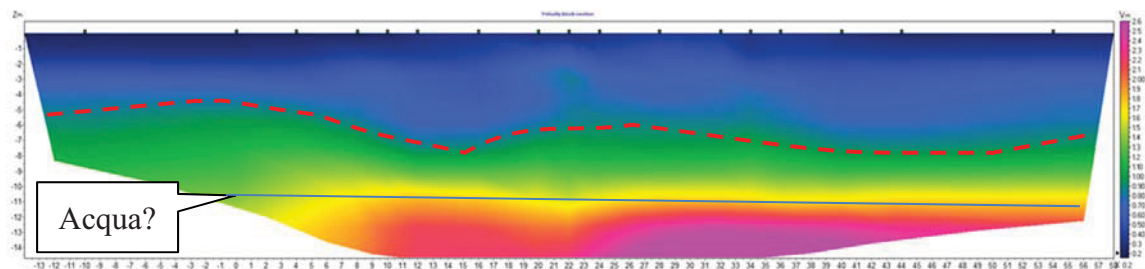
Curva di dispersione calcolata e spettro delle velocità con il *picking*



Andamento delle Vs con la profondità (VS model in m/s)



TOMOGRAFIA SISMICA

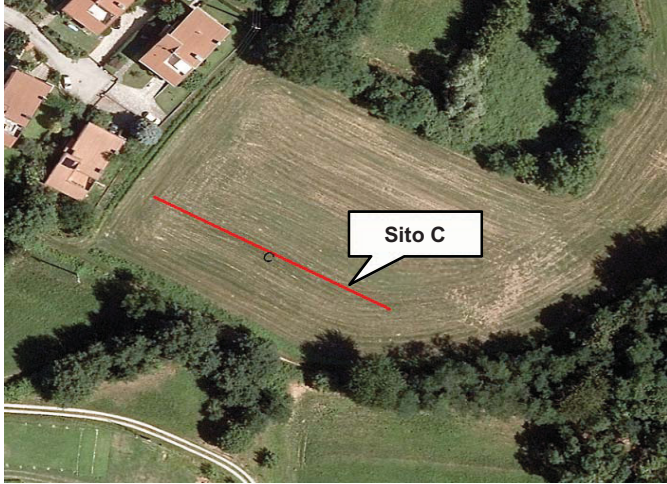


INDAGINE SITO C

Ubicazione indagine

Via Cavour – Barzago

525.127 - 5.066.067 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)



DATI DELL'ACQUISIZIONE

Acquisitore= sismografo multi-canale PASI 16SG24 a 24 canali

Numero geofoni= 12-verticali

Frequenza geofoni= 4,5 Hz

Distanza intergeofonica= 3 m

Energizzazione= mazza da 9 kg

Durata acquisizioni= 0,5 s (Tomo) – 2 s (MASW)

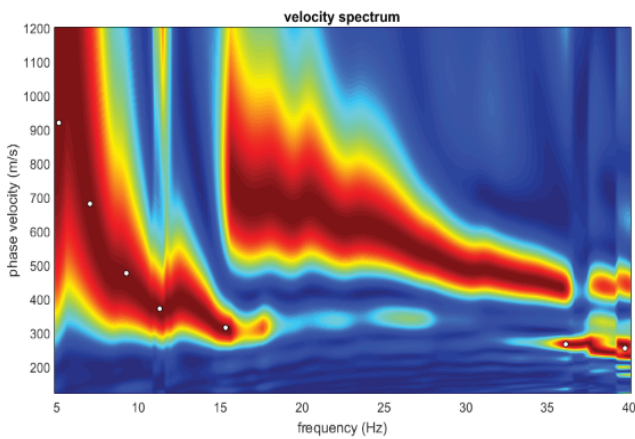
Tempo campionamento= 0,128 ms (Tomo) – 2 ms (MASW)

Filtri= nn

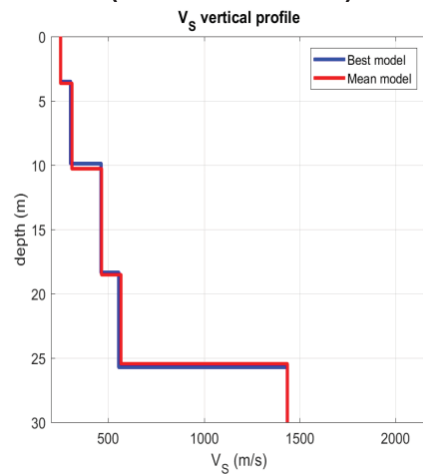
Data acquisizione= Aprile 2023

MASW

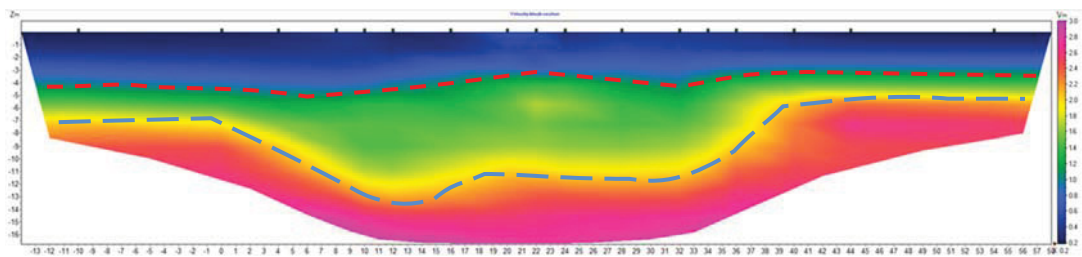
Curva di dispersione calcolata e spettro delle velocità con il *picking*



Andamento delle Vs con la profondità (VS model in m/s)

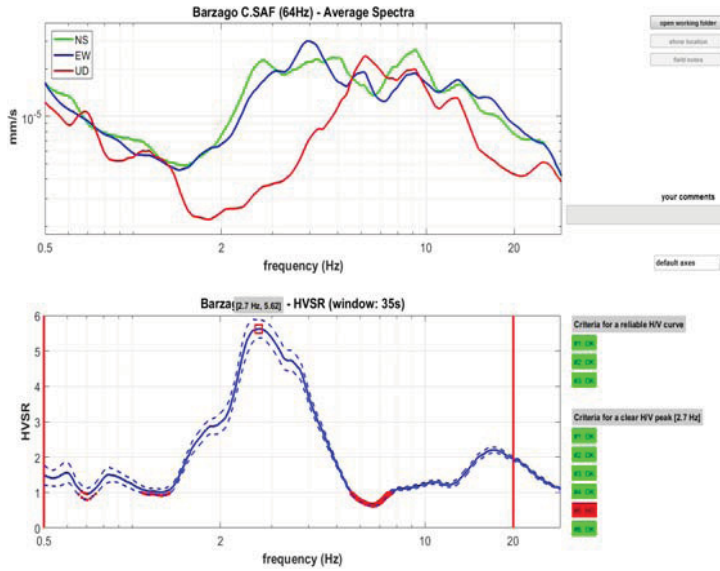


TOMOGRAFIA SISMICA

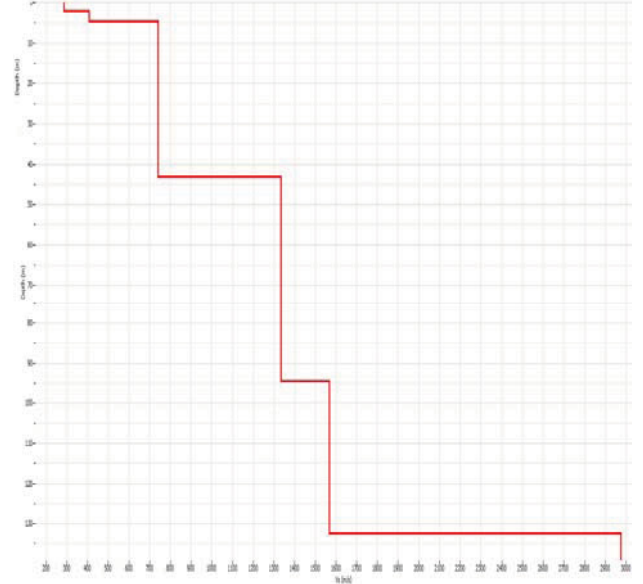


HVSR

Grafico dello spettro H/V



Andamento della velocità delle onde di taglio



MODELLO SISMICO

| Livello | Profondità(m) | Spessore(m) | Litologia (grado medio alto conoscenza) | Vs (m/s) |
|---------|---------------|-------------|---|----------|
| 1 | 3,5 | 3,5 | Limi argillosi | 250 |
| 2 | 10 | 6,5 | Limi argillosi ghiaiosi | 302 |
| 3 | 18,5 | 8,5 | Ghiaie con blocchi in matrice argillosa | 461 |
| 4 | 25,9 | 7,4 | Blocchi con ghiaia | 554 |
| 5 | >26 | | Roccia | > 800 |

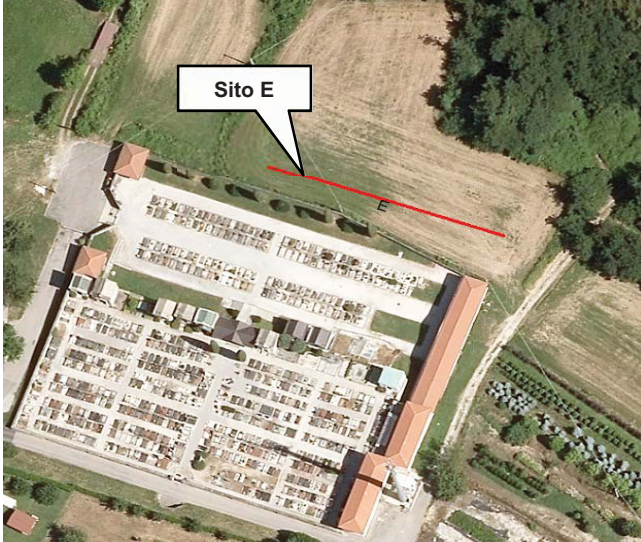
ALLEGATO 3

Indagini fornite dal Comune

INDAGINE SITO E

Ubicazione indagine

Cimitero comunale – Barzago
524.726 - 5.067.160 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)



DATI DELL'ACQUISIZIONE

Acquisitore= sismografo multi-canale PASI 16SG24 a 24 canali

Numero geofoni= 12-verticali

Frequenza geofoni= 4,5 Hz

Distanza intergeofonica= 3 m

Energizzazione= mazza da 9 kg

Durata acquisizioni= 0,5 s (Tomo) – 2 s (MASW)

Tempo campionamento= 0,128 ms (Tomo) – 2 ms (MASW)

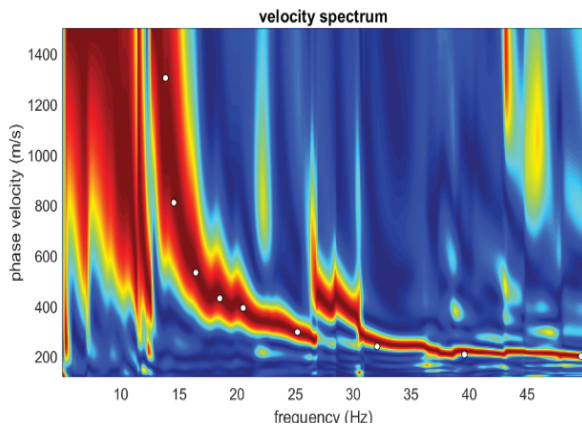
Filtri= nn

Data acquisizione= 2021

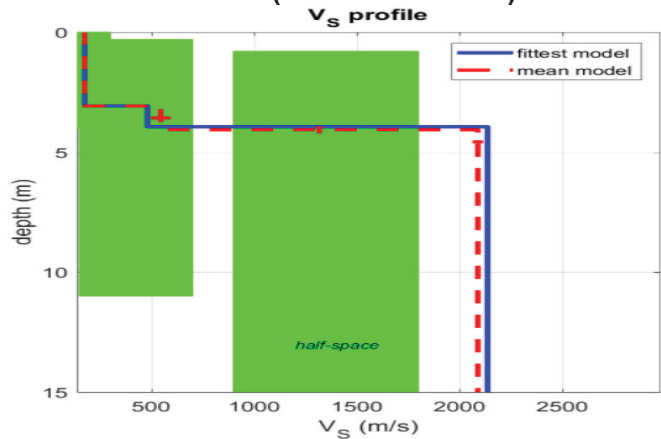
Fonte: Studio geologico Tecno Geo

MASW

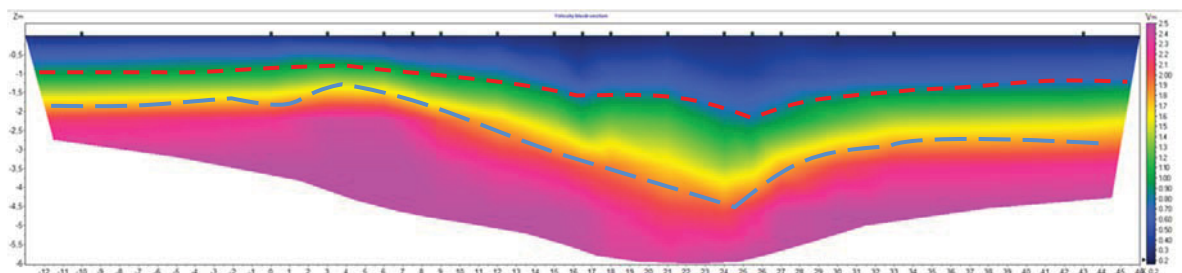
Curva di dispersione calcolata e spettro delle velocità con il picking



Andamento delle Vs con la profondità (VS model in m/s)



TOMOGRAFIA SISMICA



INDAGINE SITO F

Ubicazione indagine

Via Roma – Barzago
 524.233 - 5.067.104 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)

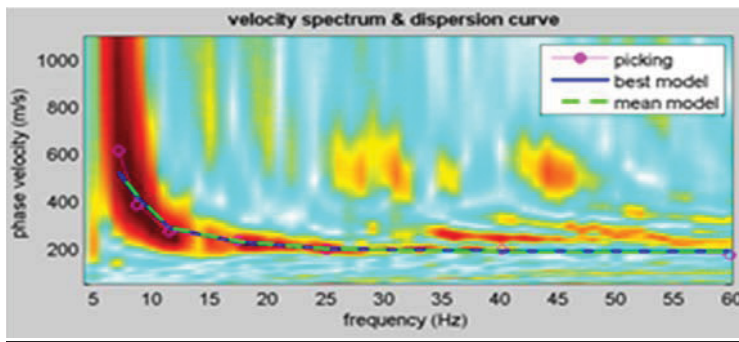


DATI DELL'ACQUISIZIONE

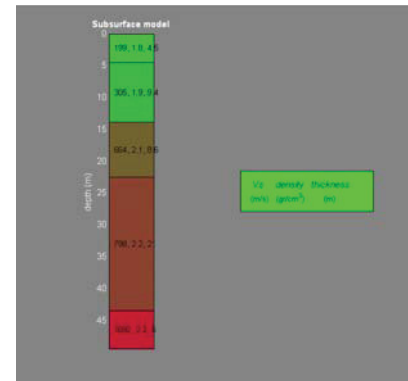
Acquisitore= sismografo multi-canale PASI 16SG24 a 24 canali
 Numero geofoni= 12-verticali
 Frequenza geofoni= 4,5 Hz
 Distanza intergeofonica= 3 m
 Energizzazione= mazza da 9 kg
 Durata acquisizioni= 0,5 s (Tomo) – 2 s (MASW)
 Tempo campionamento=0,128 ms (Tomo)–2 ms (MASW)
 Filtri= nn
 Data acquisizione= 2015
 Fonte: Studio geologico Tecno Geo

MASW

Curva di dispersione calcolata e spettro delle velocità con il picking



Andamento delle Vs con la profondità (VS model in m/s)



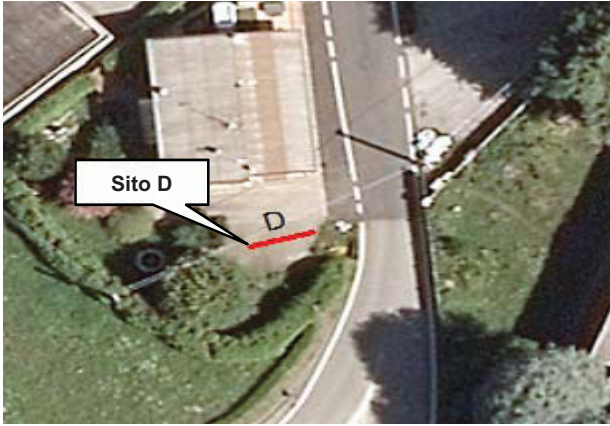
MODELLO SISMICO

| Livello | Profondità (m) | Spessore (m) | Litologia (grado medio alto conoscenza) | Vs (m/s) |
|---------|----------------|--------------|---|----------|
| 1 | 4 | 4 | Sabbie argillose ghiaiose | 200 |
| 2 | 12 | 8 | Sabbie ghiaiose con blocchi addensata | 305 |
| 3 | 23 | 11 | Ghiaia sabbiosa con blocchi | 660 |
| 4 | 43 | 20 | Ghiaia e sabbia cementate | 790 |
| 5 | >43 | | Bedrock sismico | > 800 |

INDAGINE SITO D

Ubicazione indagine

Via Milano – Barzago
 524.857 - 5.066.626 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)

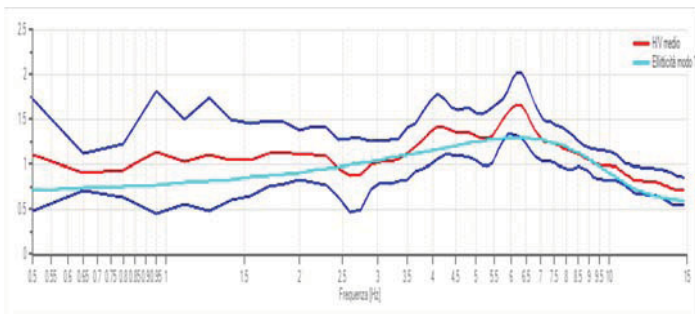


DATI DELL'ACQUISIZIONE

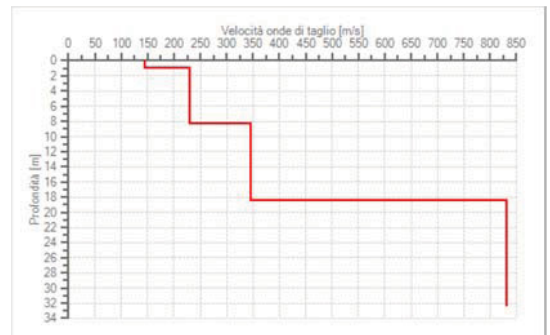
Acquisitore=geofono triassiale GEMINI2 della PASI
 Numero geofoni= 3 multidirezionali (X, Y, Z)
 Frequenza geofoni= 2Hz
 Distanza intergeofonica=/
 Energizzazione= onde naturalmente generate
 Durata acquisizioni= 15 min (HVSr)
 Tempo campionamento=0,05s (HVSr)
 Filtri= nn
 Data acquisizione= 2020
 Fonte= Dr Geologo Samuele Azzani

HVSr

Grafico dello spettro H/V



Andamento delle velocità delle onde di taglio con la profondità



MODELLO SISMICO

| Livello | Profondità (m) | Spessore (m) | Velocità onde di taglio (m/s) |
|---------|----------------|--------------|-------------------------------|
| 1 | 0 | 1,02 | 145 |
| 2 | 1,02 | 7,34 | 230 |
| 3 | 8,36 | 10,07 | 345 |
| 4 | 18,43 | 14 | 832 |

ALLEGATO 3

Stratigrafie pozzi

Fonte: Banca Geologica di Sottosuolo Regione Lombardia

STRATIGRAFIA 1

Ubicazione indagine

Barzago

525.431 - 5.067.186 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)



RISULTATI INDAGINE

COMUNE: BARZAGO IDE: B5D154457198

QUOTA (m s.l.m.): 277 PROFONDITA'(m): 54 NUMERO STRATI: 12

| Strato | Da | A | Spessore | descrizione | sigla |
|--------|------|------|----------|--------------------------------------|---------|
| 1 | 0 | 6 | 6 | TERRENO DI COLTURA E ARGILLA TORBOSA | ZS A PT |
| 2 | 6 | 15 | 9 | LIMO GRIGIO | L |
| 3 | 15 | 18 | 3 | GHIAIA COMPATTA | G |
| 4 | 18 | 20 | 2 | GHIAIA E ARGILLA COMPATTA | G A |
| 5 | 20 | 25 | 5 | TROVANTI O MASSI LEGATI CON ARGILLA | GB A |
| 6 | 25 | 34 | 9 | ARGILLA E GHIAIA COMPATTA | A G |
| 7 | 34 | 36 | 2 | ARGILLA | A |
| 8 | 36 | 39 | 3 | GHIAIA E SABBIA | G S |
| 9 | 39 | 43 | 4 | ARGILLA | A |
| 10 | 43 | 48 | 5 | GHIAIA E SABBIA | G S |
| 11 | 48 | 50,5 | 2,5 | MARNA ALTERATA | BM |
| 12 | 50,5 | 54 | 3,5 | MARNA COMPATTA | BM |

STRATIGRAFIA 2

Ubicazione indagine

Via Santuario Inferiore – Barzago

525.803 - 5.066.912 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)



RISULTATI INDAGINE

COMUNE: BARZAGO IDE: B5D158356922

QUOTA (m s.l.m.): 277 PROFONDITA'(m): 50 NUMERO STRATI: 11

| Strato | Da | A | Spessore | descrizione | sigla |
|--------|------|------|----------|--------------------------------------|----------|
| 1 | 0 | 10 | 10 | TERRENO VEGETALE ARGILLA BLU | ZS A |
| 2 | 10 | 14 | 4 | LIMO CON GHIAIA MARRONE | L G |
| 3 | 14 | 16 | 2 | GHIAIA SCIOLTA | G |
| 4 | 16 | 21 | 5 | ARGILLA E GHIAIA E TROVANTI | A G GB |
| 5 | 21 | 25 | 4 | ARGILLA LIMOSA CON GHIAIA E TROVANTI | A L G GB |
| 6 | 25 | 34 | 9 | ARGILLA GRIGIA | A |
| 7 | 34 | 39 | 5 | ARGILLA E GHIAIA | A G |
| 8 | 39 | 40 | 1 | GHIAIA SPORCA | G |
| 9 | 40 | 47 | 7 | ARGILLA CON GHIAIA | A G |
| 10 | 47 | 49,5 | 2,5 | GHIAIA CON ARGILLA | G A |
| 11 | 49,5 | 50 | 0,5 | MARNA | BM |

STRATIGRAFIA 3

Ubicazione indagine

Via Don G. Dell'Acqua– Barzago
524.833 - 5.065.849 m (WGS 1984 UTM Zone 32N)

RISULTATI INDAGINE



COMUNE: BARZAGO IDE: B5D148895868

QUOTA (m s.l.m.): 383 PROFONDITA'(m): 21 NUMERO STRATI: 6

| Strato | Da | A | Spessore | descrizione | sigla |
|--------|------|------|----------|--|-----------|
| 1 | 0 | 3 | 3 | ARGILLA E LIMI | A L |
| 2 | 3 | 4 | 1 | TERRENO VEGETALE CON CIOTTOLI E ARGILLI E LIMI | ZS GC A L |
| 3 | 4 | 12 | 8 | CIOTTOLI CON ARGILLE E LIMI CON GHIAIA | GC A L G |
| 4 | 12 | 17,5 | 5,5 | CIOTTOLI CON TRACCE DI ARGILLA LIMI E BLOCCHI | GC A L GB |
| 5 | 17,5 | 20 | 2,5 | BLOCCHI | GB |
| 6 | 20 | 21 | 1 | ROCCE CARBONATICHE | BZ |